

¹ ЗАО «КонсОМ СКС»

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

³ АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ»

ПРИМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ЕГО АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

Целью исследования является анализ возможности разработки системы бесконтактной диагностики технического состояния электропривода, исключающей монтаж датчиков на корпус диагностируемого оборудования, за счет применения в качестве чувствительного элемента направленного микрофона промышленного исполнения. Для проверки предложенного способа был использован направленный микрофон, предназначенный для измерения уровня акустического шума, уровня звукового давления и получения амплитудно-частотной характеристики на всем слышимым звуковым диапазоне. В работе выполнены: анализ существующих систем диагностики роторного оборудования; экспериментальное определение спектра акустической вибрации электропривода и сравнение его со спектром, полученным с акселерометра; определение характерных частот дефектов подшипника качения, редуктора и электродвигателя экспериментальной установки; сформулирован принцип построения автоматизированной системы диагностики электропривода с помощью направленного микрофона. При исследовании применялись эмпирические методы. В результате исследования предложен принцип функционирования системы диагностики технического состояния электропривода с использованием направленного микрофона. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стационарных и переносных систем диагностики роторного оборудования, отвечающих требованиям Индустрии 4.0.

Ключевые слова: диагностика, акустическая вибрация, подшипник, электрический двигатель, мониторинг, направленный микрофон, спектральный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня существует множество способов измерения вибрации технологического оборудования. Их можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные. Контактные методы предполагают непосредственный физический контакт датчика с объектом диагностирования. При применении бесконтактного метода датчик находится на расстоянии от объекта. В технической литературе описано множество систем мониторинга и диагностики технического состояния технологических агрегатов, использующих как контактные, так и бесконтактные методы.

В [1] рассмотрен принцип построения систем непрерывного контроля и диагностирования технического состояния электрооборудования агрегатов металлургического производства: слабых машин непрерывного литья заготовки, трансформаторов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей, а также листопрокатного стана. Рассмотрена система диагностики технического состояния асинхронных двигателей электроприводов секций роллгангов стана 5000 по обобщенному вектору тока статора в пусковых режимах. В [2-5] описываются системы вибрационной и токовой диагностики электрических двигателей и роторного оборудования. В [6-7] рассмотрен принцип построения системы диагностики технического состояния редукторов. В [8-10] проанализированы диагностические признаки дефектов подшипников и редукторов. В [11] дан обзор опытной эксплуатации систем виброконтроля и вибродиагностики различного оборудования металлургической про-

мышленности. В [12] описывается радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации оборудования. В [13] разработана система диагностирования и выявления дефектов подшипников качения и дефектов статора однофазного асинхронного двигателя на ранней стадии их развития, используя акустическую вибрацию.

Компания ЗАО «КонсОМ СКС» при непосредственном участии первого автора данной статьи разработала и внедрила в эксплуатацию систему виброконтроля привода чистовой группы клетей №5-11 стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» [11]. При монтаже системы датчиками вибрации были оборудованы опоры двигателей, опоры промежуточных валов, редукторы клетей №5-6, шестеренные клети №5-11. Также для осуществления мониторинга состояния подшипников скольжения в опорах, шестеренных клетях, опорах двигателей были установлены датчики температуры. В течение пяти лет эксплуатации системы приходилось выполнять полную замену датчиков вибрации и температуры, установленных на всех шестеренных клетях.

Необходимость выполнять замену была вызвана выходом из строя практически всех датчиков, установленных на шестеренные клети, при выполнении перевалки и технического обслуживания клетей. Работники, выполняющие перевалку, отламывали датчики от места их крепления, а кабели, идущие к датчикам, отрывали. При этом датчики, установленные в машинном зале на опоры двигателей и промежуточных валов, находятся в эксплуатации до настоящего времени и не требуют технического обслуживания.

Из сказанного можно сделать вывод, что контактные методы не всегда возможно применить в силу того,

что не на всех агрегатах существует возможность установить датчики непосредственно на объект диагностирования, или жесткие условия эксплуатации оборудования могут привести к быстрому выходу датчиков из строя. Кроме того, если стоит задача диагностирования нового механизма, находящегося на гарантии производителя, монтаж датчиков с помощью сварки или сверления приведет к потере гарантии. Поэтому бесконтактные способы измерения вибрации, избавляющие систему от описанных недостатков, предпочтительны при дополнении стационарной системы диагностики или разработке новой автоматизированной системы диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ХАРАКТЕРНЫМ ЧАСТОТАМ ДЕФЕКТОВ

Наиболее часто дефекты в электроприводе возникают в узлах, имеющих трущиеся поверхности. Это подшипники и редукторы. В технической литературе диагностика этих узлов по вибрации полно и всесторонне описана [9, 10]. Суть диагностики заключается в расчете характерных частот дефектов этих узлов, а затем определение превышения амплитуды вибрации на рассчитанных частотах.

Дефект подшипника качения зарождается в виде микротрещин на поверхности внешнего или внутреннего колец, сепаратора или тел качения. Микротрещины возникают в силу того, что подшипник находится под переменной нагрузкой, которая вызывает его попеременное сжатие и расширение. С течением времени микротрещины перекрываются, и образуется скол. На рис. 1 показан скол на наружном кольце подшипника качения.

Тела качения прокатываются по возникшему углу с определенной частотой. При этом они ударяются о скол, вызывая акустическую вибрацию на этой частоте. Если скол возникнет на другом элементе подшипника (внутреннее кольцо, тела качения или сепаратор), то частота дефекта будет другой. Характерные частоты дефектов подшипника качения определяются по следующим зависимостям [9–10].

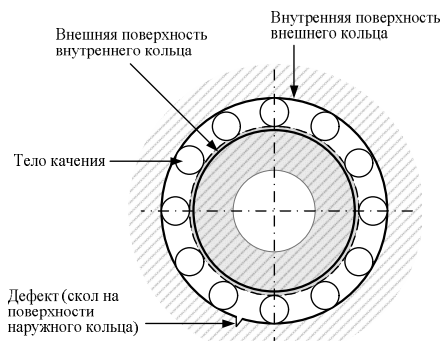


Рис. 1. Возникновение дефекта в виде скола на поверхности наружного кольца

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца определяется выражением

$$f_c = \frac{1}{2} f_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right), \quad (1)$$

где f_{BP} – частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного; d_{TK} – диаметр тела качения; $d_c = (d_H + d_B)/2$ – диаметр сепаратора; d_H – диаметр наружного кольца; d_B – диаметр внутреннего кольца; α – угол контакта тел и дорожек качения.

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу определяется выражением

$$f_H = \frac{1}{2} f_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right) Z = f_c Z, \quad (2)$$

где Z – число тел качения.

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу определяется выражением

$$f_B = \frac{1}{2} f_{BP} \left(1 + \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right) Z = (f_{BP} - f_c) Z. \quad (3)$$

Частота вращения тела качения относительно поверхности колец определяется выражением

$$f_{TK} = \frac{1}{2} f_{BP} \frac{d_c}{d_{TK}} \left(1 - \frac{d_{TK}^2}{d_c^2} \cos^2 \alpha \right). \quad (4)$$

Рассмотрим в качестве объекта диагностики редуктор. Для упрощения будем полагать, что он имеет только две шестерни. Характерные частоты для дефектов редуктора, таких как дефект зубозацепления входного и выходного вала, износ зубчатой пары входного и выходного вала, эксцентриситет шестерни входного и выходного вала, треснувший (сломаный) зуб, вычисляются по следующему выражению:

$$f_{ред} = f_{вх} Z_{вх} = f_{вых} Z_{вых}, \quad (5)$$

где $f_{вх}$ – частота вращения входного вала; $f_{вых}$ – частота вращения выходного вала; $Z_{вх}$ – число зубьев входного вала; $Z_{вых}$ – число зубьев выходного вала.

Если редуктор имеет более двух шестерен, частоты его дефектов могут быть рассчитаны по тому же уравнению (5), при известных числах зубьев и частотах вращения каждой шестерни.

Кроме описанных уравнениями (1)–(5) частот дефектов, в силу различных причин в работающем оборудовании может наблюдаться модуляция данных частот, что приводит к возникновению боковых пиков в спектре вблизи основных частот дефектов. Это также может служить дополнительным признаком при выявлении того или иного дефекта оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА

В связи с тем, что вибрация, по которой можно диагностировать дефекты электропривода, имеет акустическую природу, в качестве чувствительного элемента

системы диагностирования предлагается использовать направленный микрофон промышленного исполнения, имеющий соответствующую степень защиты для работы в условиях производственного цеха. Такой микрофон может быть установлен на некотором удалении от диагностируемого узла и направлен на него.

В силу большой стоимости промышленного направленного микрофона авторами был проведен эксперимент по получению спектра вибрации электродвигателя при помощи обычного направленного микрофона, или шумомера, USB Noise Meter компании Spl-Lab [14, 15].

Направленный микрофон Spl-Lab USB Noise Meter предназначен для измерения уровня акустического шума, уровня звукового давления и получения амплитудно-частотной характеристики на всем слышимым звуковым диапазоне от 10 Гц до 20 кГц. Частоты большинства дефектов диагностируемого оборудования находятся в нижнем частотном диапазоне – до 1,5 кГц. Нижняя граница частотного диапазона дефектов определяется частотой вращения ротора электродвигателя, а также частотой вращения валов редуктора. Частотные факторы дефектов наружного и внутреннего колец для подшипника качения, как правило, больше 10, а дефектов сепаратора и тел качения – около 7 и 5 соответственно. Таким образом, самый низкий частотный фактор имеет дефект тел качения. И если частота вращения ротора двигателя больше 4 Гц, что справедливо для большего числа электродвигателей, то возможно продиагностировать все дефекты подшипника качения такого двигателя.

Направленный микрофон Spl-Lab USB Noise Meter имеет широкий динамический диапазон измеряемого сигнала в 70 дБ и высокий предельный уровень звукового давления в 150 дБ. Измеряемый сигнал оцифровывается внутри микрофона и передается через USB-порт на персональный компьютер или планшет в цифровом виде.

Для выполнения измерений необходимо направить микрофон на то место на двигателе, где расположен подшипник. Микрофон подключен с помощью USB-кабеля к компьютеру или ноутбуку, на котором запущено прикладное программное обеспечение Measuring Center для чтения данных с микрофона Spl-Lab USB Noise Meter и выполнения последующих вычислений, таких как выделение из сигнала его спектра (рис. 2). Программа Measuring Center автоматически вычисляет прямой спектр временного сигнала акустической вибрации, измеренной микрофоном, во всем диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц. На скриншоте (см. рис. 2) для отображения спектра задан диапазон от 10 Гц до 1 кГц.

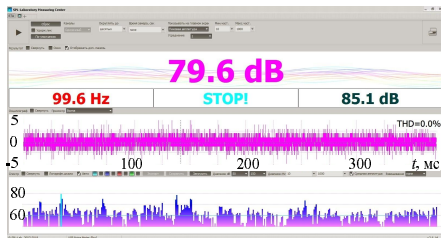


Рис. 2. Скриншот программы Measuring Center для работы с микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter

При выполнении эксперимента была использована лабораторная установка, состоящая из асинхронного двигателя и редуктора. Частота вращения вала двигателя в момент проведения измерений составила 35 Гц. Число зубьев понижающего редуктора равно 19/51. Частота вращения выходного вала составила 13 Гц. Рассчитанные по выходящим (1)-(5) и согласно ГОСТ [16] для асинхронных электродвигателей частоты дефектов экспериментальной установки сведены в таблицу.

Дефекты 1-4 (см. таблицу) относятся к опорным подшипникам установки. Оба подшипника одинаковы, поэтому и частоты дефектов для них будут одинаковы. Дефект 5 относится к редуктору. Дефекты 6-7 характерны для асинхронного электродвигателя.

На одном из подшипников экспериментального электродвигателя и на редукторе стационарно установлены акселерометры VSA001, подключенные к электронному диагностическому приборам VSE002 производства ifm electronics. Приборы VSE002 выполняют чтение временного сигнала вибрации с датчиков и расчет прямого спектра и спектра огибающей в задаваемом диапазоне частот и с заданным разрешением. Чтение данных с диагностического прибора VSE002 производится с помощью прикладного программного обеспечения, разработанного компанией ЗАО «КонсОМ СКС».

Это позволило сравнить спектры измеренной вибрации, полученные двумя разными способами: контактным методом – с помощью стандартных акселерометров и бесконтактным методом – с помощью направленного микрофона. На рис. 3 совмещены прямые спектры вибрации, измеренные этими двумя способами.

Сравнение спектров показало, что вибрация на характерных частотах дефектов регистрируется как акселерометрами, так и микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter. Кроме того, несмотря на то, что микрофон был направлен только на один из подшипников двигателя, в спектре измеренного им сигнала (рис. 3, б) больше информации, чем у соответствующего акселерометра (рис. 3, а).

Расчет частот дефектов экспериментальной установки

№ п/п	Наименование дефекта	Частота дефекта, Гц
1	Дефект наружного кольца подшипника f_H	290,5
2	Дефект внутреннего кольца подшипника f_B	374,5
3	Дефект тел качения подшипника f_{TK}	84
4	Дефект сепаратора подшипника f_C	15,3
5	Дефект зубозацепления редуктора $f_{ред}$	665
6	Ослабление прессовки пакета стали статора, обрыв или замыкание в обмотке статора	100
7	Эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения	50

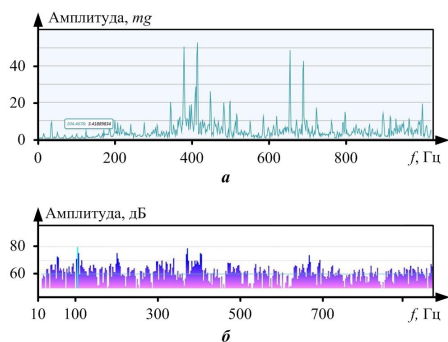


Рис. 3. Сравнение спектров акселерометра, установленного на подшипник электродвигателя со стороны вентилятора (а), и спектра микрофона Spl-Lab USB Noise Meter (б), направленного в то же место

Так, в спектре акустического сигнала, измеренного акселерометром, можно выделить две частоты дефектов, на которых амплитуда вибрации повышена: это частота 381 Гц, соответствующая дефекту внутреннего кольца подшипника (пик на частоте 417 Гц является ее боковой гармоникой), а также частота 662 Гц, соответствующая дефекту зубозацепления редуктора. Повышенная амплитуда вибрации на частоте 692 Гц является боковой гармоникой частоты дефекта зубозацепления.

В спектре акустического сигнала, измеренного микрофоном, помимо перечисленных двух дефектов, можно выделить еще два возможных дефекта асинхронного двигателя: это частота питающей сети 50 Гц (эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения) и частота электромагнитных сил в электрических машинах, равная удвоенной частоте сети, то есть 100 Гц (ослабление прессовки пакета стали статора, обрыв или замыкание в обмотке статора). Частота 200 Гц является второй гармоникой частоты электромагнитных сил электродвигателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при разработке стационарной системы диагностики с использованием промышленного направленного микрофона для получения той же полноты диагностической информации может быть использовано меньшее количество микрофонов по сравнению с количеством акселерометров.

Принцип диагностики технического состояния ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА

С помощью направленного микрофона возможно построение системы мониторинга и контроля технического состояния электрического и механического оборудования металлургических и других предприятий, принцип действия которой основан на измерении общего уровня акустического шума, производимого работающим оборудованием. Однако наиболее перспективным является применение направленного микрофона для задачи диагностирования технического состояния оборудования, используя информацию, полученную путем разложения акустической вибрации, издаваемой объектом диагностики, в спектре.

У дефектов подшипников, как было показано выше, и у других видов дефектов электродвигателя существуют характерные частоты в спектре, по которым эти дефекты возможно диагностировать. На рис. 4 проиллюстрирован принцип диагностики дефектов электродвигателя по спектру акустической вибрации.

Сначала необходимо найти все частоты дефектов $f_{дефекта}$ для диагностируемого механизма. Это можно сделать, рассчитав ее по уравнениям (1)–(5) для подшипников качения и редуктора, или взяв из ГОСТа [16] для дефектов асинхронного электродвигателя, или другим способом – для остальных типов дефектов. Частоты дефектов уникальны для различных механизмов и зависят от типа используемых подшипников, частоты вращения ротора двигателя и других геометрических и электрических параметров установок.

После того как рассчитаны частоты всех возможных дефектов, система диагностики должна ожидать появления дефекта в пределах частотного окна $f_{дефекта} \pm \Delta f$. Величина Δf определяется эмпирическим путем в зависимости от возможного разброса по частоте вращения электродвигателя. Если частота вращения электродвигателя постоянна, то необходимо выбрать размер частотного окна, исходя из диапазона возможных изменений частоты вращения двигателя при изменении нагрузки, возникающем в ходе его работы. Если двигатель имеет возможность регулирования частоты вращения в процессе работы, то необходимо знать текущее значение частоты вращения и в зависимости от нее перемещать частотное окно по спектру. При этом ширина частотного окна может оставаться постоянной.

Далее в пределах заданного частотного окна необходимо определить максимальную амплитуду акустической вибрации и сравнить ее с двумя пороговыми значениями, соответствующими степени развития дефекта. Степень развития дефекта иллюстрируется согласно принципу светофора: зеленый (оборудование находится в хорошем техническом состоянии), желтый (предупреждение), красный (опасность). Основное пороговое значение вибрации – предельное значение (начало красной области) – соответствует развитому дефекту, при котором дальнейшая эксплуатация оборудования является нежелательной и может привести к аварии. Второе, дополнительное, пороговое значение вибрации (начало желтой области) соответствует ситуации, когда дефект достаточно развит, но пока еще допускается эксплуатация оборудования до остановки на плановый ремонт.

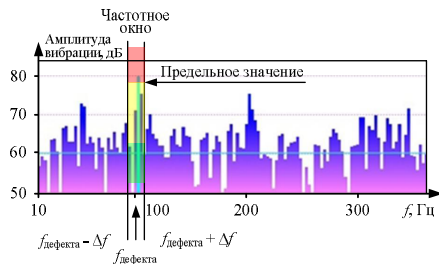


Рис. 4. Диагностика дефектов электродвигателя по спектру акустической вибрации

Величины пороговых значений определяются эмпирическим путем в зависимости от мощности установки и данных об уровнях вибрации для аналогичного оборудования.

При попадании амплитуды акустической вибрации в пределах частотного окна в одну из трех зон (зеленая, желтая или красная) система диагностики должна делать вывод о наличии дефекта в том или ином узле и степени его развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен способ бесконтактной диагностики технического состояния электродвигателя по акустической вибрации с помощью направленного микрофона промышленного исполнения. Экспериментальные исследования возможности применения направленного микрофона для задачи диагностики электропривода и другого промышленного оборудования были осуществлены при помощи направленного микрофона Spl-Lab USB Noise Meter. Использование направленного микрофона позволит устранить недостатки стационарных систем диагностики, связанных с установкой датчиков непосредственно на объект, а также дополнить систему диагностики в случае невозможности установки на оборудовании акселерометров.

В статье показано, что с помощью направленного микрофона можно диагностировать основные типы дефектов роторного оборудования, куда могут входить дефекты подшипников качения и скольжения, дефекты редукторов, валов и соединительных муфт, дефекты электродвигателей. Сформулирован принцип диагностики технического состояния электродвигателя с помощью направленного микрофона.

На основе промышленного направленного микрофона может быть разработана как стационарная, так и переносная система диагностирования. В связи с отсутствием механической связи с объектом и односторонней передачей данных вверх с нижнего уровня (микрофон) на верхний (компьютер, сервер) такая система соответствует требованиям безопасности автоматизированных систем управления и Индустрии 4.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храшкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 129-136.
2. Степанов П.И., Лагуткин С.В., Никитин Ю.Р. Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических

систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2(22). С. 160-165.

3. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
4. Salman Abdi, Danilo Llanio, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // The Journal of Engineering, 2017, no. 13, pp. 724-728.
5. Čereška A. Vibrodiagnostics and Monitoring of the Mechanical-Dynamic Elements of Mechatronic Systems // Solid State Phenomena, 2015, no. 220-221, pp. 153-160.
6. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // IEEE Access, 2017, no. 5, pp. 21918-21926.
7. Dybala J. Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifiers: A pattern recognition approach // Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, no. 38(1), pp. 5-22.
8. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // IEEE Access. 2018, no. 6, pp. 665-676.
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: СПбГ МТУ, 2004. 156 с.
10. Неразрушающий контроль: справочник. В 7-ми т. Т. 7. Кн. 2 / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
11. Ishmet'ev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. Journal of Computational and Engineering Mathematics, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-15.
12. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации / А.И. Волковец, Д.Ф. Руденко, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин // Доклады БГУИР. 2007. №4(20). С. 58-64.
13. Glowacz A., Glowacz W., Glowacz Z., Kozik J. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals // Measurement, 2018, no. 113, pp. 1-9.
14. USB Noise Meter (Pro Edition) - конденсаторный микрофон для замера АЧХ и уровня шума [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://spl-lab.ru/tu/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html> (Дата обращения 10.01.2019).
15. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е.Н. Ишмет'ев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, М. Врабел // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 67-73.
16. ГОСТ ИСО 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнаурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с.

Поступила в редакцию 12 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DIAGNOSTICS OF ELECTRIC DRIVE BY ITS ACOUSTIC VIBRATION USING A CONDENSER MICROPHONE

Alexander N. Panov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Innovation, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia; Head of the Department of System Integration, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Evgeny E. Bodrov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forthearist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Anastasia A. Lysenko

Engineer of the Department of Innovation, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Electronics and Microelectronics, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Denis A. Krivosheev

Engineer of the Department of Industrial and Cyberphysical Systems, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolay I. Kirtyanov

Leading Engineer of the Department of Information Technology, JSC "MAGNITOGORSK GIPROMEZ", Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The goal of this research is the development of feasibility check of an electric drive non-contact diagnostic system that excludes sensor mounting and uses an industrial condenser microphone as a sensitive element instead. To verify this proposition, a commercial microphone was used, which was designed to measure acoustic noise, sound pressure and a frequency response in the hearing range. This paper covers the analysis of existing electric drive diagnostic systems; experimental obtaining of electric motor acoustic vibration spectrum and its comparison to the vibration spectrum of the same motor measured using accelerometers; specific defect frequencies calculation for contact bearing and gearbox; the principle of building the electric drive diagnostic system using condenser microphone is formulated. This research was based on empirical methods of problem solving. As a result of the research, the research group proposed the principle for electric drive diagnostic system functioning that uses condenser microphone as a sensor. The results of this work can be used for the development of stationary or mobile diagnostic systems for rotor equipment that meet the requirement of the Industry 4.0.

Keywords: diagnostics, acoustic vibration, bearing, electric motor, monitoring, condenser microphone, spectral analysis

REFERENCES

1. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Iu., Khramshin V.R. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 129-136. (In Russian)
2. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Ju.R. Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2013, no. 2(22), pp. 160-165. (In Russian)
3. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
4. Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // *The Journal of Engineering*, 2017, no. 13, pp. 724-728.
5. Čerešák A. Vibrodiagnostics and Monitoring of the Mechanical-Dynamic Elements of Mechatronic Systems // *Solid State Phenomena*, 2015, no. 220-221, pp. 153-160.
6. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // *IEEE Access*, 2017, no. 5, pp. 21918-21926.
7. Dybala J. Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifiers: A pattern recognition approach // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, no. 38(1), pp. 5-22.
8. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // *IEEE Access*, 2018, no. 6, pp. 665-676.
9. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, Spbgmtu Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
10. Nerazrushajushij kontrol [Nondestructive Control]. Reference guide in 7 volumes. Under the editorship of V.V. Kluev, no. 7, book 2. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
11. Ishmeteyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-15.
12. Volkovec A.I., Rudenko D.F., Gusinskij A.V., Kostrikin A.M. Non-contact radio wave method for measuring motion and vibration parameters. *Doklady BGUIR* [BSUIR reports], 2007, no. 4(20), pp. 58-64. (In Russian)
13. Glowacz A., Glowacz W., Glowacz Z., Kozik J. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals // *Measurement*, 2018, no. 113, pp. 1-9.
14. USB Noise Meter (Pro Edition) – condenser microphone for measuring the frequency response and noise level [Electronic resource]. Available at: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html>.
15. Ishmeteyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration protection, control and analysis systems for industrial application. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no.1(42), pp. 67-73. (In Russian)
16. GOST ISO 20958-2015. Condition monitoring and machine diagnostics. Signature analysis of electrical signals of a three-phase induction motor. Moscow, Standardinform Publ., 2016. 22 p. (in Russian)

Применение направленного микрофона для диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации / Панов А.Н., Бодров Е.Э., Лысенко А.А., Кривошеев Д.А., Киртыанов Н.И. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 58-63. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-58-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63)

Panov A.N., Bodrov E.E., Lysenko A.A., Krivosheev D.A., Kirtyanov N.I. Diagnostics of Electric Drive by its Acoustic Vibration Using a Condenser Microphone. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 58-63. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-58-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63)