

УДК 53.083(430.1)

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА КАМЕННЫХ КАРЬЕРАХ КУЗБАССА

DIAGNOSIS OF THE ACTUAL CONDITION OF TECHNICAL DEVICES OPERATED IN THE QUARRIES OF KUZBASS

Герике Павел Борисович¹

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: am_besten@mail.ru

Gericke Pavel B.¹ C.Sc., Associate Professor

Никитин Александр Григорьевич²

доктор техн. наук, профессор, e-mail: nikitin1601@yandex.ru

Nikitin Aleksandr G.², Dr. Sc., Professor

Тагильцев-Галета Константин Валерьевич²

кандидат техн. наук, e-mail: magister463@gmail.ru

Tagil'tsev-Galeta Konstantin V.², C.Sc.

¹Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН, 650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, 650065, Kemerovo, Russian Federation.

²Институт машиностроения и транспорта ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42

²Siberian State Industrial University, Institute of Mechanical Engineering and Transport, 42 street Kirova, 654007, Novokuznetsk, Russian Federation

Аннотации. Осуществленное в рамках настоящей работы исследование параметров вибрационных характеристик, генерируемых при работе энерго-механического оборудования технических устройств, эксплуатируемых в условиях горнорудной промышленности Кузбасса, позволило провести классификацию дефектов данного класса оборудования в зависимости от типа повреждения и степени его опасности. Основным дефектом данного типа оборудования соответствует более ста двадцати диагностических признаков по параметрам вибрации, формализованных для удобства их использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по частотным наборам базовых признаков. Полученные результаты позволили обосновать необходимость использования на практике комплексного диагностического подхода. Показано, что только с широким использованием результатов, полученных с применением различных современных методов вибрационной диагностики, появляется возможность для эффективного выявления дефектов оборудования сложной техники и разработки деградационных прогностических моделей. Созданный комплекс диагностических правил для выявления дефектов технических устройств, эксплуатируемых на каменных карьерах, по результатам анализа параметров механических колебаний и разрабатываемые единые диагностические критерии оценки состояния послужат платформой для реализации основных элементов системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию. Полученные научные результаты доказывают принципиальную возможность создания группы единых диагностических критериев, пригодных для осуществления оценки и построения достоверного прогноза изменения технического состояния сложных механических систем.

Abstract. As part of this work carried out research of vibro-acoustic characteristics of the parameters generated by the energy-mechanical equipment technical devices operated in a mining industry of Kuzbass. This allowed for the classification of defects in equipment damage, depending on the type and degree of its danger. The main defects of this type of equipment corresponds to more than one hundred twenty-diagnostic signs of vibration parameters, formalized for ease of use in the development of the algorithm code of the automated control of complex systems on the frequency set of basic features. The obtained results allowed to substantiate the need for the use in practice of integrated diagnostic approach. It is shown that only with the widespread use of the results obtained with the use of modern methods of vibration diagnostics, it is possible to effectively identify defects in the equipment and the development of predictive models that describe the process of changing the

technical condition. The results of these researches demonstrate the need to move categorically repair and maintenance departments of industrial enterprises in the service system technology on its actual technical condition, a platform for the implementation of the basic elements of the concept which will serve as a designed complex of diagnostic rules detecting defects on the analysis of the parameters of mechanical vibrations. These scientific results demonstrate the fundamental possibility of creating a group of uniform diagnostic criteria that are suitable to assess and forecast changes in the technical condition of complex mechanical systems.

Ключевые слова: вибродиагностика, энерго-механическое оборудование, каменный карьер, дефекты электрических машин.

Keywords: vibration analysis, energomechanical equipment, stone quarry, defects of electric machines.

До 25% от общего количества технических устройств, эксплуатируемых на каменных карьерах Кузбасса, находится сегодня в недопустимом техническом состоянии. Дальнейшая эксплуатация данной техники неминуемо повлечет за собой возникновение аварийных ситуаций и увеличение непроизводительных простоев. Кроме того, данный факт неизменно влечет за собой рост числа несчастных случаев на производстве, связанных с техническим состоянием эксплуатируемого оборудования. В рамках процедуры экспертизы промышленной безопасности были произведены диагностические обследования технических устройств, эксплуатируемых на каменных карьерах, включая дробильно-сортировочное оборудование (ленточные конвейера, грохота, дробилки, питатели), буровые станки (5 СБШ-200-36, СБШ 250-МНА-32), карьерные экскаваторы (ЭКГ-4,6А; ЭКГ-4,6Б; ЭКГ-5А) и автосамосвалы (БелАЗ 7548, 7523, 75485 и др.).

В качестве основного метода для оценки технического состояния был выбран контроль по параметрам механических колебаний, как наиболее информативный и эффективный метод НК, позволяющий получить максимум ценной диагностической информации без длительного непроизводительного простоя горной техники [1, 2]. Обобщение результатов анализа диагностических данных позволяет сделать вывод о том, что широкое распространение получило большое количество типовых неисправностей и повреждений энерго-механического оборудования горных машин, каждому из которых соответствуют несколько диагностических признаков в области контроля по параметрам вибрации.

Некоторые примеры спектрального представления параметров полигармонических волн, генерируемых при работе технических устройств и средств механизации, эксплуатируемых на каменных карьерах, приведены на рис. 1...5.

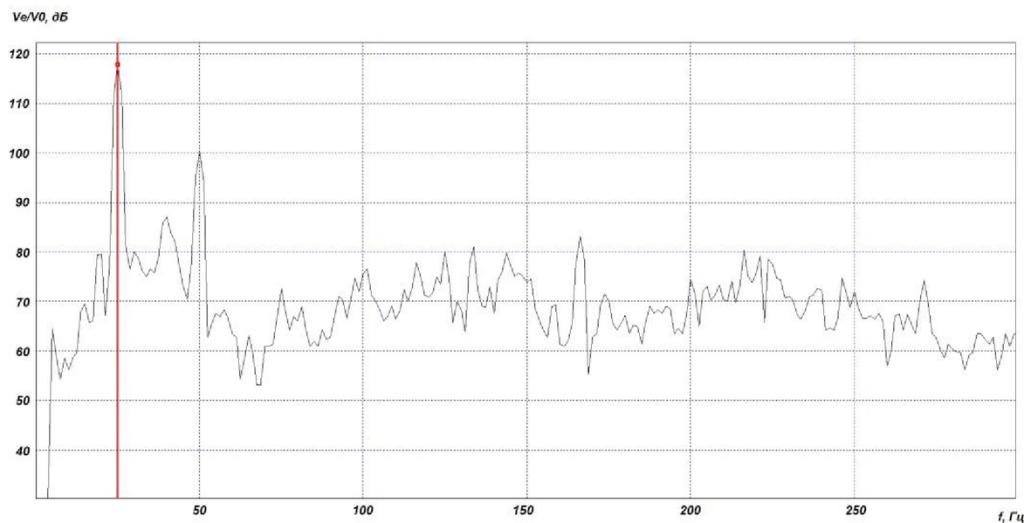


Рис. 1. Неуравновешенность ротора электродвигателя щековой дробилки СМД-109.

Наиболее эффективно выявить дефекты оборудования на различных стадиях развития возможно только с применением результатов комплексного диагностического подхода,

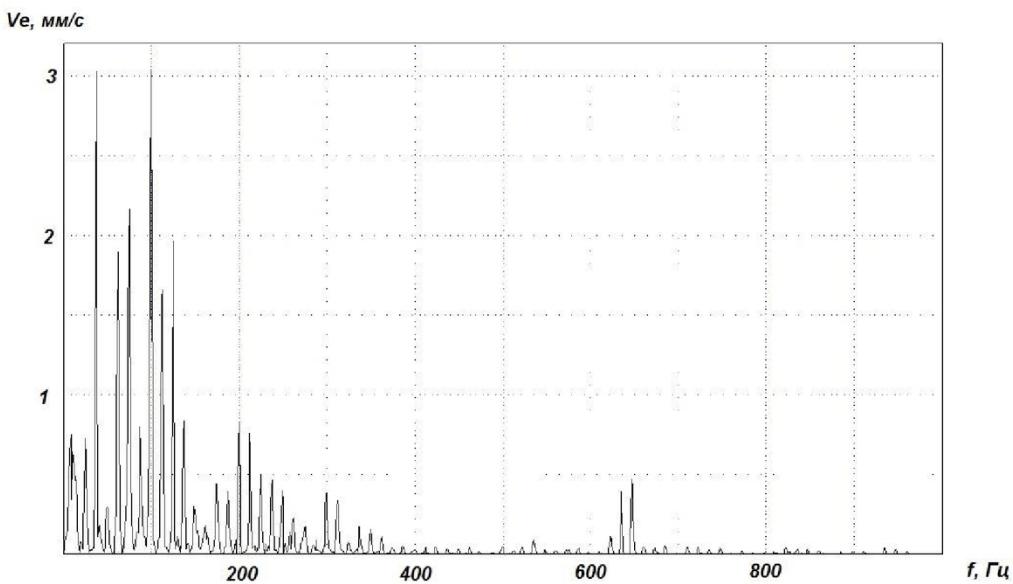


Рис. 2. Ярко выраженное нарушение жесткости системы, дефект соединительной муфты, ослабление посадки подшипника электродвигателя грохота ГИСЛ-62УК.

A, м/с²

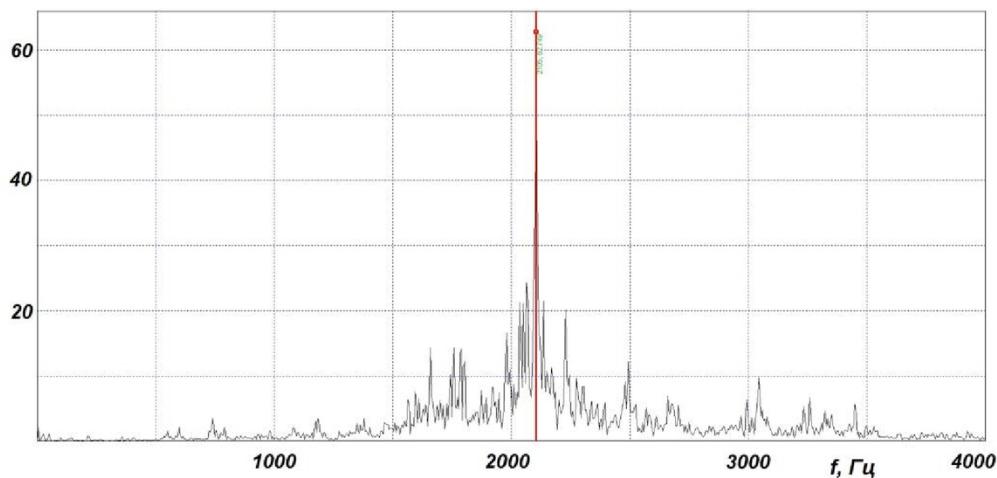
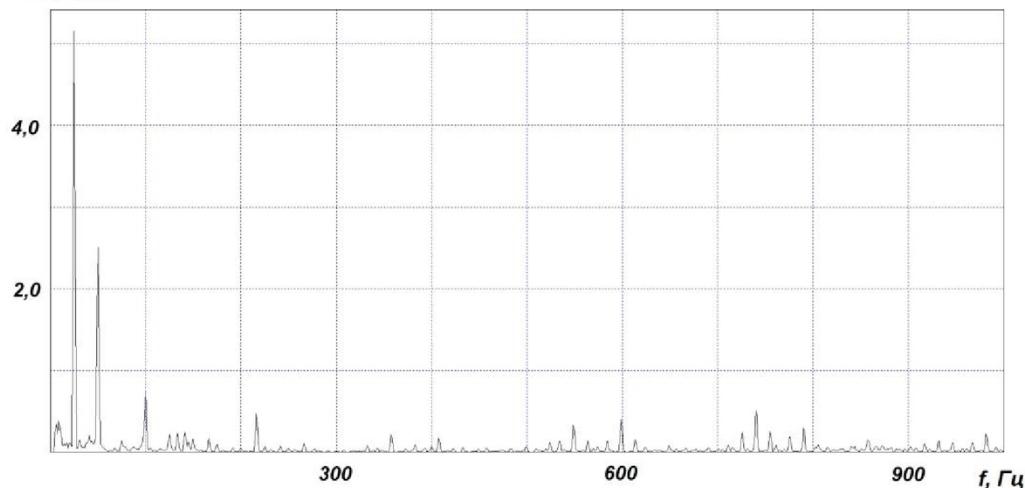


Рис. 3. Износ тел качения, наклеп сепаратора, трещина наружного кольца подшипника генератора напора экскаватора ЭКГ-5А.

Ve, мм/с



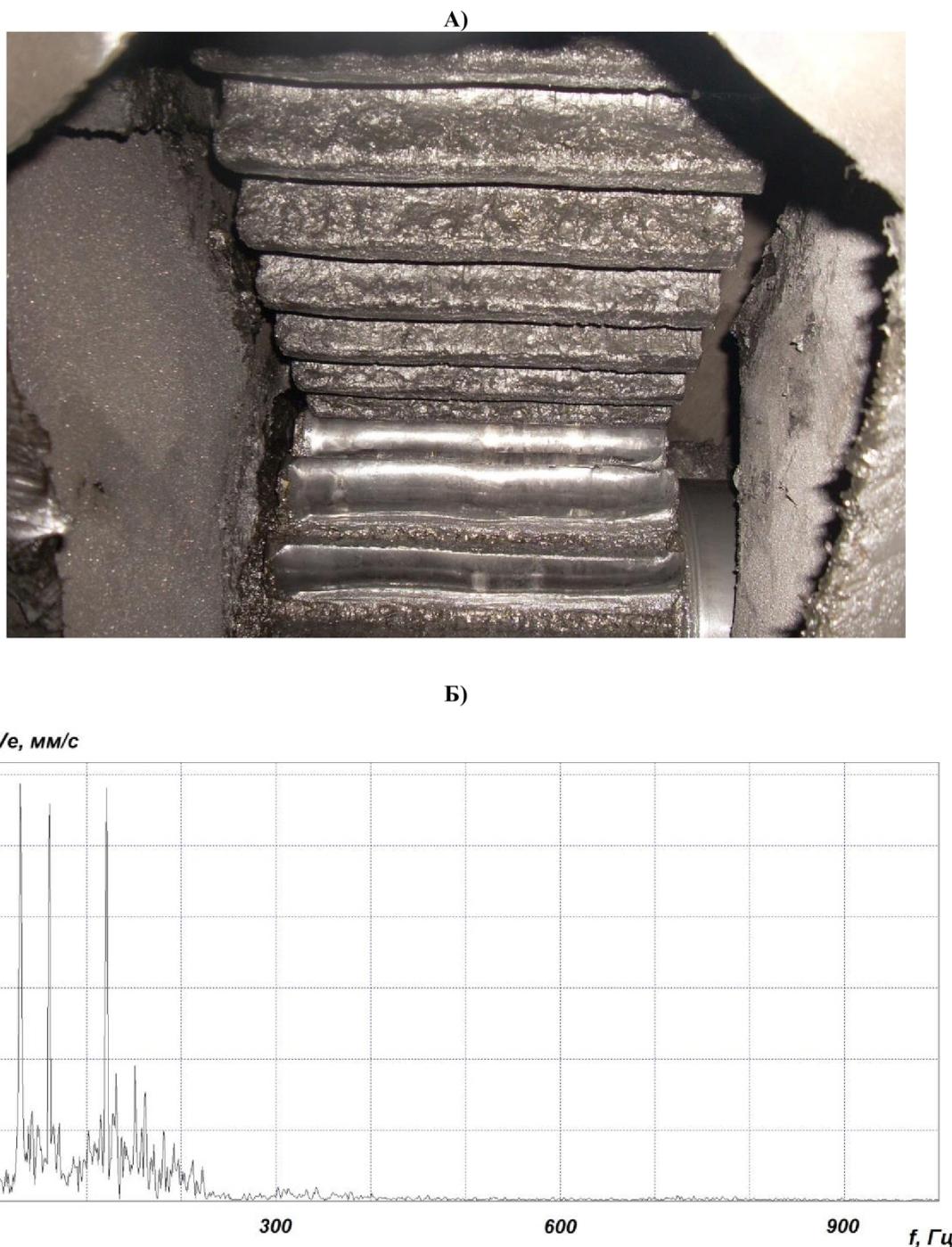


Рис. 4. Абразивный износ зубчатых зацеплений открытой зубчатой передачи, недопустимый уровень расценцовки редуктора с открытой передачей подъемной лебедки экскаватора ЭКГ-5А (A – общий вид, Б – спектр по параметру виброускорения, записанный на подшипниковой опоре лебедки).

представляющего собой сочетание нескольких различных методов вибранализа. В соответствии с типами наиболее распространенных дефектов и особенностями режима работы диагностируемого оборудования удалось обосновать конкретное сочетание методов, что позволило получить эффективные результаты комплексной диагностики. Результаты прямого спектрального анализа и анализа огибающей спектра были

дополнены автоматизированной обработкой полигармонических волн с применением алгоритмов эксцесса, что позволило проводить анализ при отсутствии априорных данных о геометрических параметрах подшипника.

Объектом данного исследования является изучение процессов формирования, распространения и особенности анализа параметров виброакустических волн,

генерируемых при работе энерго-механического оборудования горной техники, эксплуатируемой на каменных карьерах. Полученные данные позволили осуществить классификацию типовых дефектов по их опасности, степени развития, причинам возникновения и развития. Среди дефектов диагностируемого оборудования наибольшее распространение получили следующие: неуравновешенность вращающихся масс (см. рисунок 1), нарушение жесткости системы (см. рисунок 2), разнообразные повреждения подшипников качения и нарушение режима их смазки (см. рисунок 3), расцентровка (в том числе перекос и изгиб – рисунок 4) валов агрегата, дефекты элементов соединительных муфт, дефекты зубчатых передач в составе редукторов, дефекты электрической природы (замыкание обмоток статора электродвигателя, асимметрия электромагнитного поля, дефекты стержней и т.п. – см. рисунок 5), структурный резонанс.

Наиболее быстро оценить фактическое техническое состояние электрических машин и редукторов возможно с применением спектрального анализа по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном (2...8 000 Гц) частотном диапазоне [3].

Одним из наиболее распространенных дефектов энерго-механического оборудования горных машин являются дефекты подшипников качения. Основных причин для преждевременного выхода из строя этих узлов несколько: это нарушение режима и качества смазки, заводской брак, расцентровка валов агрегатов, неуравновешенность ротора электрических машин и некоторые другие. Несмотря на то, что входной контроль качества поставляемых подшипников, осуществляемый на крупных промышленных предприятиях, позволяет свести к минимуму заводской брак, нарушения технологии монтажа, расцентровка и некачественная смазка приводят к значительному снижению их эксплуатационного ресурса [4]. Зачастую встречаются множественные повреждения, совокупность которых приводит к аварийному выходу из строя сложного технологического оборудования, спрогнозировать который в условиях системы планово-предупредительных ремонтов не представляется возможным.

На практике в рамках обследования подшипников по параметрам вибрации часто ограничиваются результатами спектрального анализа, изредка используется экспесс, что вызвано ограниченным временем на проведение замеров в условиях промышленных предприятий ТЭК. Кроме того, эффективными могут оказаться результаты анализа по общему уровню виброускорения и оценка степени вклада амплитуд отдельных гар-

моник спектра [5, 6]. Таким образом, существует около десяти основных диагностических правил выявления дефектов подшипников, некоторые из которых включают до 20 диагностических признаков, находящихся по большей мере в области частотного анализа. Именно эти признаки наилучшим образом подходят для использования в качестве основы при разработке единого диагностического критерия (ЕДК) для оценки фактического состояния подшипников качения [7, 8, 9], как наиболее изученного объекта с точки зрения вибранализа. Одной из основных задач, стоящих перед настоящим исследованием, является разработка ЕДК, пригодных для оценки и прогнозирования технического состояния не только подшипников, но и других элементов энергомеханического оборудования: редукторов, электрических машин, соединительных муфт и т.д.

Среди наиболее распространенных дефектов энерго-механического оборудования горных машин необходимо выделить некоторые, развитие которых является причиной значительного роста амплитудных показателей вибрации, что без должных ремонтных мероприятий неминуемо приводит к аварийному выходу агрегата из строя. К таким дефектам относят неуравновешенность вращающихся масс (см. рисунок 1), расцентровку валов агрегата и дефекты зубчатых передач (см. рисунок 4). Качество ремонтных и наладочных работ по устранению данных дефектов можно оценить путем определения величины остаточной несоосности или дисбаланса, а также выявлением и оценкой интенсивности параметров для группы «зубцовых» частот в случае ремонта и/или замены элементов зубчатых передач.

Практика показывает [10], что до 30% от всех случаев нарушения соосности валов энергомеханического оборудования горных машин приходится на так называемую «горизонтальную» остаточную несоосность, являющуюся следствием недостаточной компенсации горизонтальной компоненты механических колебаний при проведении центровки, что со временем неминуемо приводит к значительному росту величин параметров вибрации. Причина этого заключается в низкой квалификации ремонтного персонала и слабом техническом оснащении лабораторий неразрушающего контроля. Одним из опасных последствий расцентровки является преждевременное разрушение подшипников (срок эксплуатации уменьшается до 10 раз по сравнению с номинальным), выход из строя соединительных муфт, ускоренное развитие повреждений зубчатых колес в редукторах, общее нарушение жесткости системы. Наглядное представление процесса развития таких дефектов проиллюстрировано спектрами на рисунках 1, 2, 3 и 4.

В зависимости от состояния элементов крепежа агрегатов, степени развития и конкретного сочетания повреждений различных типов дефекты могут проявлять себя наличием в спектре различных наборов значащих частотных компонент [11], причем данные признаки частично будут перекрывать друг друга [12]. Т.е. дефектам различной природы могут соответствовать одинаковые признаки, что значительно затрудняет проводимый анализ. Именно этот факт является основной причиной, которая позволяет обосновать эффективность применения результатов комплексного диагностического подхода. Так, например, при наличии неуравновешенности вращающихся элементов результаты спектрального анализа можно подтвердить при помощи анализа траектории движения ротора. Форма кривой на фазовой плоскости, полученная при помощи специальной математической обработки синхронного сигнала вибрации по параметру виброперемещения, является надежным диагностическим признаком, по ней можно

агрегата, применение которых становится актуальным в случае совпадения «электрических» частот с рабочими частотами или диагностическими признаками наличия других повреждений.

Все «электрические» дефекты принято разделять две базовые группы, для которых диагностические признаки будут существенно различаться – это признаки наличия дефектов синхронных и асинхронных электродвигателей. Среди дефектов электрической природы, получивших широкое распространение на электрических двигателях, применяемых в конструкциях энергомеханического оборудования рудников и каменных карьеров, наиболее распространены следующие: повреждения стержней роторов (обрывы, растрескивания); эксцентризитет воздушного зазора между статором и ротором; ослабление посадки пакетов железа; межвитковые замыкания обмоток; нарушение симметрии фазовых токов. Этим дефектам электрической природы только в области спектрального анализа соответствует более двадцати диагностических признаков, частич-

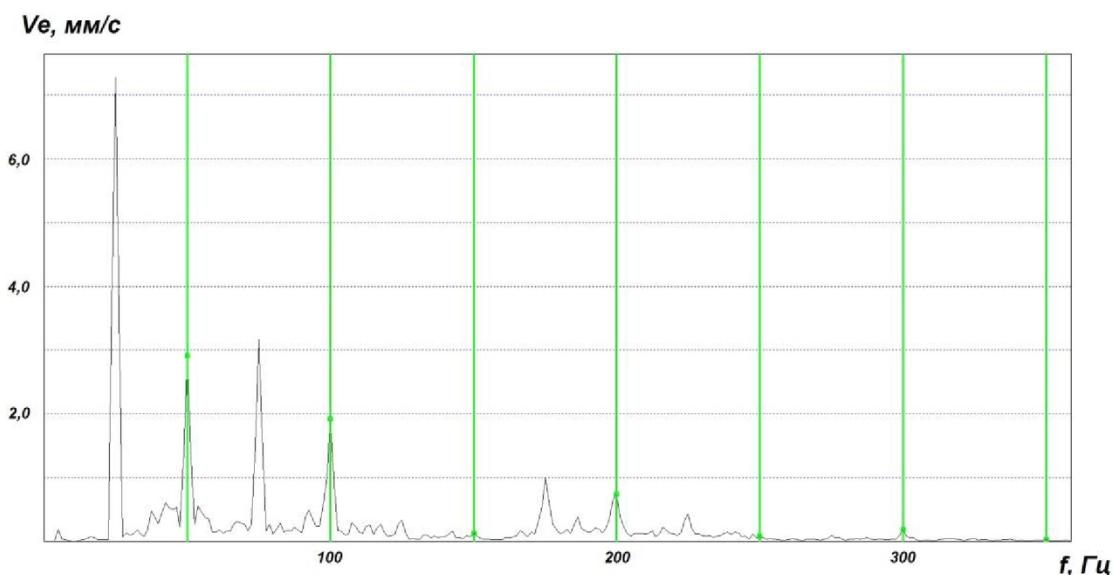


Рис. 5. Замыкание обмоток электродвигателя приводной станции ленточного конвейера.

достоверно судить о наличии тех или иных повреждений роторного агрегата [13].

Кроме того, широко распространено совпадение гармоник спектра (генерируемых процессами различной природы, например: расцентровка валов, нарушение жесткости, замыкание обмоток ЭД) с точностью до 0,1 Гц. Кроме того, рабочие частоты агрегатов из-за особенностей конструкции иногда могут проявлять себя на гармониках, субгармониках и обертонах частоты питающей электрической сети (см. рисунок 5). В этом случае наличие дефектов электрической природы позволяют подтвердить только результаты анализа характеристики выбега

но перекрывающих друг друга и совпадающих с признаками повреждений совершенно иного характера. Всего же результаты проведенных исследований позволили обобщить и формализовать более 120 диагностических признаков в области виброанализа, пригодных для идентификации основных дефектов энергомеханического оборудования горных машин. Осуществленная формализация позволила приступить к созданию единых диагностических критериев для оценки состояния электродвигателей, редукторов, соединительных муфт, насосного и компрессорного оборудования по параметрам генерируемой при их работе вибрации.

Результаты проведенных ранее исследований [1, 2, 10] позволили заключить, что необходимым и достаточным условием осуществления эффективного контроля состояния энергомеханического оборудования горных машин по параметрам вибрации является использование следующих методов вибродиагностики: прямого спектрального анализа в расширенном частотном диапазоне, экспесса для экспресс-диагностики подшипников качения, анализа огибающей спектра, вейвлет-преобразования сигнала [11], метода анализа траектории/процессии движения ротора и анализа характеристики разгона/выбега агрегата [14]. Кроме того, такой подход к диагностике по параметрам вибрации накладывает дополнительные требования к используемому аппаратно-программному комплексу, как то: синхронный сбор данных по нескольким измерительным трактам, расширенный частотный и динамический диапазон измерений, высокое разрешение регистрируемых характеристик, программная реализация большого количества диагностических методов.

Осуществление перехода на систему обслуживания техники по ее фактическому состоянию невозможно без применения принципов аддативного краткосрочного моделирования процесса деградации технического состояния объектов диагностирования. В качестве моделируемого параметра может быть использован единый диагностический критерий, гораздо более точно описывающий состояние объекта диагностирования по сравнению со стандартными параметрами, такими как общий уровень по параметру виброскорости или амплитудные величины «подшипниковых» и «зубцовых» частот.

Единый диагностический критерий, основанный на результатах вибродиагностики и предназначенный для оценки состояния только одного типа объектов диагностирования, наиболее эффективно может быть описан в многомерном пространстве диагностических признаков с применением алгоритмов скаляризации [7, 15]. Алгоритм создания ЕДК основывается на принципе эффективного разделения объектов, находящихся на разной стадии развития дефектов, на различные группы. Очевидно, что число создаваемых ЕДК должно соответствовать количеству базовых дефектов диагностируемого оборудования. Если рассматри-

вать весь комплекс энерго-механического оборудования технических устройств, эксплуатируемых в горнорудной промышленности, то наиболее актуальной задачей становится разработка ЕДК для редукторов различного типа и конструкций. И первым этапом создания таких ЕДК является осуществление процедуры клиппирования, т.е. удаления из спектра «лишней» диагностической информацию о других физических явлениях иной природы, не относящихся к исследуемым дефектам. Алгоритмы клиппирования должны содержать процедуру уточнения обратной частоты вращения, основанную на принципе поиска в низкочастотном диапазоне спектра гармоник с максимальными амплитудами. Из множества аналогичных алгоритмов в рамках настоящей работы использовалась процедура уточнения, предложенная в работах [7], которая наилучшим образом зарекомендовала себя на объектах с неявными максимумами обратной частоты. При разработке ЕДК для диагностирования по параметрам вибрации однотипных механических объектов применялись алгоритмы скаляризации, выполняющие замену множества векторов диагностических признаков скалярными величинами [7, 14] и базирующиеся на принципах пошагового распределения объектов на группы по степени развития повреждений и дефектов.

Предложенный алгоритм создания ЕДК для энерго-механического оборудования горных машин ориентирован на решение актуальных научных проблем по разработке адекватных деградационных моделей для диагностики сложных механических систем, использование которых позволит повысить безопасность горных работ и оптимизировать логистические издержки. Кроме того, результаты проведенных исследований убедительно доказали, что на сегодняшний день в Кузбассе созданы все основные научные предпосылки для внедрения на предприятиях угольной и горнорудной промышленности элементов системы обслуживания горной техники по ее фактическому техническому состоянию. В частности, обоснован ряд критериев предельного состояния отдельных узлов горной техники, которые могут быть взяты за основу при создании математических моделей прогнозирования развития повреждений энергомеханического оборудования широкого типового и модельного ряда горных машин.

СПИСОК ИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
2. Герике П.Б. Результаты вибродиагностики оборудования центробежных насосов применительно к созданию единого критерия оценки фактического состояния /П.Б. Герике, Блюменштейн В.Ю./ // Вестник КузГТУ, № 6. – Кемерово. – 2016. – С. 89-96.
3. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

4. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
5. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
6. F. Balducchi, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
7. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
8. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180
9. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», Engineering Failure Analysis #37 (2014). 86–95
10. Герике П. Б. Поиск предпосылок для создания единого диагностического критерия оценки предельного технического состояния горной техники /П. Б. Герике// Известия Уральского государственного горного университета №4. – Екатеринбург, 2016 – С. 63-67. DOI 10.21440/2307-2091-2016-4-63-67.
11. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
12. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
13. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
14. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. / Барков А.В., Баркова Н.А. / Издательство СПбГМТУ. Санкт Петербург, 2004. — 156 с.
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.

REFERENCES

1. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik. V 7-kh tomakh [Non-destructive testing: Handbook. In 7 Vol. V.7] / Pod. red. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie Publishers, 2005. 828 p. (rus)
2. Gericke P.B., Blyumenshteyn V.Yu. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. #6. Pp. 89-96. (rus)
3. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)
4. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
5. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih burovых stankov [Development of a technique of diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
6. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/> (eng)
7. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)
8. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). Pp. 173–180 (eng)
9. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», Engineering Failure Analysis #37 (2014). Pp. 86–95 (eng)
10. Gericke P.B. Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2016. #4. Pp. 63-67. DOI 10.21440/2307-2091-2016-4-63-67 (rus)
11. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745 (eng)

12. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
13. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [The practical vibration analysis and monitoring of mechanical equipment] Moscow: Spectrum engineering Publishers, 1996. 276 p. (rus)
14. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: Handbook]. St. Petersburg, 2004. 156 p. (rus)
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)

Поступило в редакцию 20.02.2017

Received 20.02.2017