

Герике Павел Борисович¹, канд. техн. наук, доцент, **Никитин Александр Григорьевич**², доктор технических наук, профессор

¹Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, 650065, г. Кемерово пр. Ленинградский – 10

²ФГБОУ ВПО СибГИУ

654041, Новокузнецк, пр. Бардина – 25

E-mail: am_besten@mail.ru

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ РАБОТЕ ЩЕКОВЫХ ДРОБИЛОК

Аннотация: *Актуальность работы.* В данной статье предпринята попытка обобщить результаты исследований в области анализа параметров вибрации щековых дробилок и создать задел для разработки единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки и осуществления краткосрочного прогнозирования процессов деградации технического состояния дробильного оборудования.

Цель работы: *Осуществить классификацию диагностических признаков развития дефектов щековых дробилок, пригодную для совершенствования существующих методологий нормирования вибрации и создания алгоритмов единых диагностических критериев оценки фактического состояния дробильно-сортировочного оборудования по параметрам вибрации.*

Методы исследования: *В рамках выполнения работы использовались результаты комплексного диагностического подхода, включая спектральный анализ, анализ огибающей, анализ характеристики разгона/выбега и анализ временной реализации сигнала. Показано, что результаты комплексного подхода позволяют выявить четкую ассоциативную связь между параметрами сигнала вибрации и наличием поврежденных узлов и агрегатов оборудования в случаях наличия неявных результатов диагностики, полученных с применением стандартных методов диагностирования.*

Результаты: *Полученные результаты доказывают принципиальную эффективность предложенного методологического подхода для выполнения анализа параметров вибрации, генерируемой при работе щековых дробилок. Использование на практике разрабатываемых единых диагностических критериев открывает инновационный путь для внедрения на угольных предприятиях Кузбасса системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию.*

Ключевые слова: *вибродиагностика, щековая дробилка, управление техническим обслуживанием, механические дефекты, прогнозное моделирование.*

Информация о статье: принята 28 октября 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-16-22

Дробильно-сортировочное оборудование (ДСО), эксплуатируемое на предприятиях Кузбасса, довольно часто находится в недопустимом техническом состоянии. Доля такого оборудования, по некоторым оценкам, составляет до 30% от общего числа технологических единиц ДСО, подпадающих под проведение процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах [1]. Неудовлетворительное техническое состояние эксплуатируемого оборудования является одной из основных причин роста аварийности на промышленных предприятиях и существенно снижает их экономические показатели [2].

В качестве объекта настоящего исследования выбраны щековые дробилки, получившие широкое распространение в угольной и горнорудной отраслях промышленности благодаря относительной простоте конструкции и широкому диапазону применения. Работа щековых дробилок, особенно

оснащенных приводом большой мощности и при этом находящихся в недопустимом техническом состоянии, влечет за собой опасность разрушения и отрыва вращающихся элементов конструкции, что может являться причиной возникновения несчастных случаев и производственного травматизма. Наибольшее распространение на энерго-механическом оборудовании дробилок получили дефекты, являющиеся следствием нарушения технического регламента эксплуатации и некачественно проведенного монтажа или ремонта, например: нарушение жесткости системы (включая дефекты фундамента и структурный резонанс системы), расцентровка привода дробилки, нарушение соосности шкивов и износ ременной передачи, дефекты подшипников качения электродвигателя и дробилки и нарушение режима их смазки, неуравновешенность ротора электродвигателя и вращающихся элементов дробилки, износ муфты двигателя, дефекты

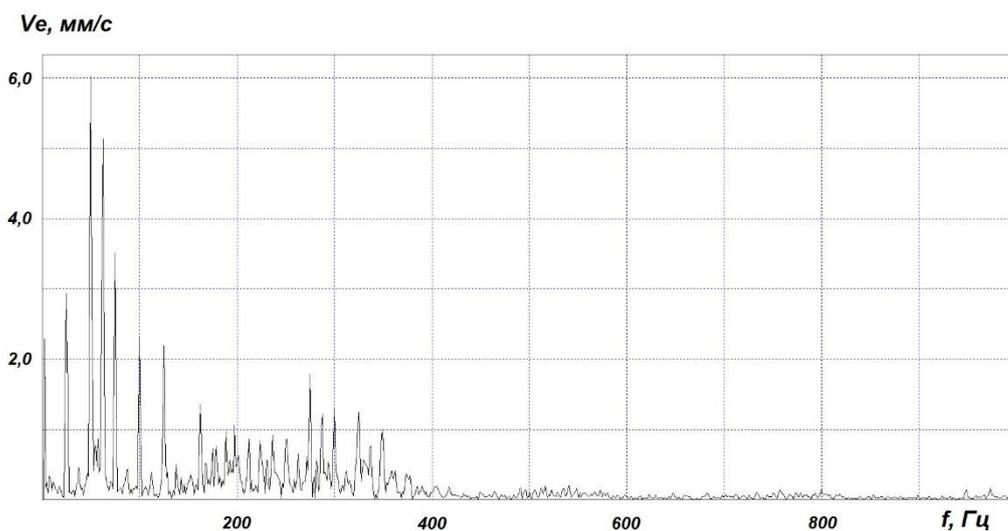


Рис. 1. Износ и биение ременной передачи, нарушение жесткости системы на дробилке СМД-110

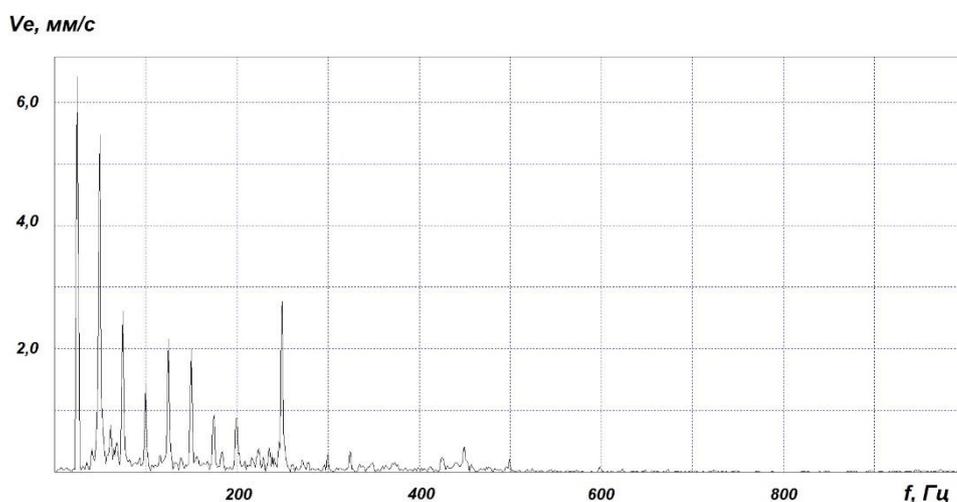


Рис. 2. Расцентровка привода дробилки СМД-108А, общее нарушение жесткости системы

электромагнитного происхождения (магнитная асимметрия якоря электродвигателя, перекос фаз, смещение в магнитном поле и т.д.).

Своевременно выявить данные дефекты и наиболее эффективно решить задачи диагностирования возможно при условии осуществления комплексного использования современных средств и методов неразрушающего контроля с применением подходов прогностического моделирования процессов деградации технического состояния сложных механических систем.

В качестве объекта настоящего исследования использовалась выборка, состоящая из 15 единиц щековых дробилок типа СМД, эксплуатируемых на предприятиях Кузбасса. Наблюдение за данной выборкой осуществлялось на протяжении трех лет, что позволило изучить особенности формирования и распространения виброакустических волн, сопровождающих работу дробилок. Все объекты выборки выработали свой нормативный ресурс и подлежат обязательной процедуре экспертизы промышленной безопасности, в рамках которой выполнялось их техническое диагностирование.

На результаты анализа получаемых диагностических данных сильное влияние оказывает наличие

искажений исходного сигнала [3]. Особенностью проведения измерений на щековых дробилках зачастую является отсутствие ограждений вращающихся элементов, что напрямую влияет на безопасность проведения замеров. Поэтому нередко проведение замеров непосредственно на подшипниковых опорах главного вала дробилки, опорах шкивов ременных передач и выходных валов электродвигателей является невозможным. В таких случаях обычно ограничиваются проведением измерений в ближайших безопасных местах рамы или фундамента, что в значительной мере ведет к потере информации о высокочастотных составляющих спектра. Поэтому применение процедур клипирования для выявления информативных групп составляющих спектра в области высоких частот проявления дефектов приводов щековых дробилок не производилось.

Среди дефектов привода щековых дробилок на первом месте по распространенности стоит нарушение жесткости опорной системы, которое встречается практически повсеместно на всех объектах выборки и проявляется в виде ослабления крепежа электродвигателей и шкивов ременных передач,

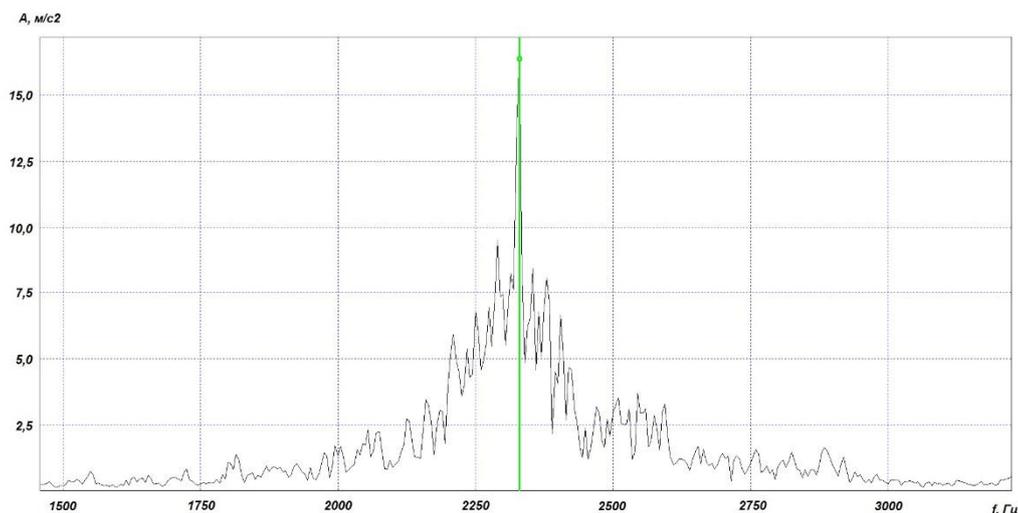


Рис. 3. Трещина сепаратора подшипника двигателя дробилки СМД-110А

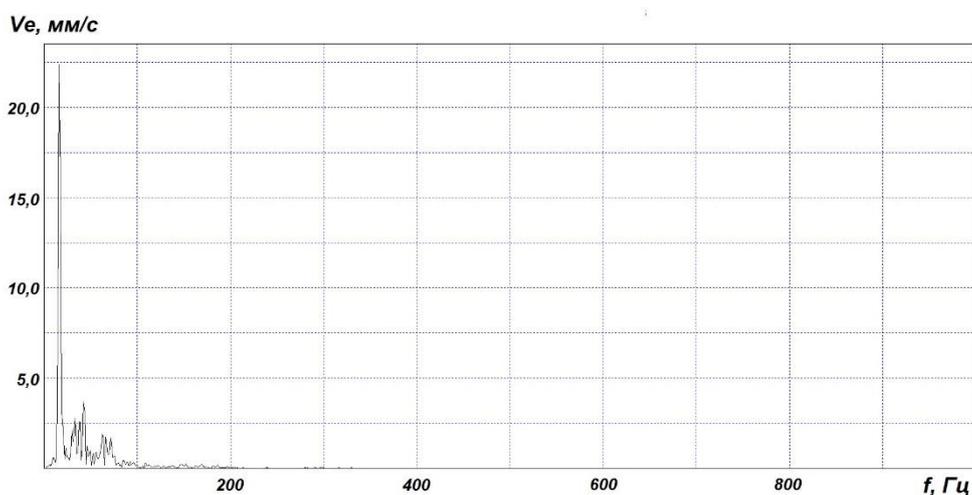


Рис. 4. Дисбаланс ротора двигателя щековой дробилки СМД-108

ослабления посадки подшипников, нарушения жесткости силовых рам и анкеров (см. пример на рис. 1). Данному дефекту в области виброанализа соответствует около двадцати диагностических признаков, наиболее распространенным из которых считается наличие в спектре гармонических рядов базовой оборотной частоты, состоящих из большого количества составляющих (десять и более гармоник). Выявлению данного дефекта методом прямого спектрального анализа обычно препятствует совпадение значащих гармоник с составляющими, появление которых в спектре вызвано причинами совершенно иного характера, например, расцентровкой природы дробилки или структурным резонансом. Именно поэтому в тех случаях, когда результаты спектрального анализа не позволяют сделать корректные выводы о фактическом состоянии диагностируемого оборудования, обычно рекомендуют использовать комплексный подход к диагностике параметров вибрации, включающий в себя использование сразу нескольких диагностических методологий, конкретное сочетание которых зависит от типа объекта диагностики и режимов его работы [4, 5, 6].

Еще одним распространенным дефектом приводов на щековых дробилках является нарушение

соосности шкивов (см. рис. 2) и дефекты ременных передач, такие как растрескивание, биение, перекручивание ремней. Наличие дефектов этой группы приводит к возникновению заметной активности в области низких и средних частот спектра, что хорошо интерпретируется при помощи спектрального анализа при условии наличия информации о диаметре шкивов ременной передачи, длине и количестве ремней, оборотной частоте шкивов. Амплитуды значащих гармоник при наличии дефектов ременных передач могут достигать достаточно больших величин, а сами гармонические ряды при условии наличия развитого повреждения обычно имеют малый шаг дискретизации составляющих, что объясняется наличием большого числа субгармоник и обертонов базовых частот, в результате в спектре легко выявляются специфические энергетические «горбы», являющиеся надежным признаком, подтверждающим наличие данного дефекта (см. рис. 1). Помимо несоосности шкивов ременных передач в рамках обследованной выборки почти повсеместно присутствуют признаки наличия расцентровки электродвигателей, примерно у 30% обследованных щековых дробилок подтверждается недопустимый уровень расцентровки привода, что неминуемо

приводит к возрастанию общего уровня виброн нагруженности агрегатов и преждевременному выходу из строя подшипников и соединительных муфт.

Среди прочих дефектов особняком стоят дефекты подшипников, получившие широкое распространение в угольной промышленности, в том числе, на дробильно-сортировочном и углеобогательном оборудовании. К данной группе относят дефекты наружных и внутренних колец, трещины и наклеп сепараторов, изменение формы тел качения, нарушение режима смазки подшипников. В качестве диагностических признаков выявления данных дефектов обычно выступают группы так называемых «подшипниковых» частот (см. пример на рис. 3), кроме того, разработаны единые диагностические критерии, пригодные для выполнения оценки фактического состояния подшипников и осуществления прогнозного моделирования процессов их деградации. Анализ регистрируемых данных заметно осложняет ограниченный доступ к штатным измерительным точкам (наличие или отсутствие ограждений вращающихся частей, особенности конструкции и т.д.), а также отсутствие актуальной информации о геометрических параметрах подшипников, что нередко случается при диагностировании дробильно-сортировочного и углеобогательного оборудования. Кроме того, свои искажения привносит сужение частотного и динамического диапазонов измерений при использовании диагностических щупов и изменение спектрального состава при проведении замеров за пределами штатных измерительных точек. Все эти факторы подтверждают необходимость использования результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, включающего в себя ряд методологий, сочетание которых определяется выбором объекта диагностирования. Для диагностики подшипников качения такой комплексный подход должен включать результаты спектрального анализа, эксцесса и анализа огибающей. Доказано [1, 2, 7], что именно такое сочетание методов виброанализа является оптимальным с точки зрения решения задачи выявления дефектов подшипников. Результаты исследований подтверждают, что для диагностики энерго-механического оборудования щековых дробилок такое сочетание методов (за исключением эксцесса, слишком чувствительного к наличию шума и случайных высокоэнергетических колебаний, сопровождающих работу дробильных установок) является оптимальным, обеспечивающим получение максимума полезной диагностической информации об оборудовании дробилок в случаях наличия неявных результатов диагностирования при минимуме затрат времени на сбор и анализ диагностической информации [2, 8].

Именно результаты широкого применения комплексного подхода к анализу параметров механических колебаний позволяют своевременно выявлять дефекты сложного технологического оборудования, в том числе находящиеся на стадии зарождения, отсекают ложные гипотезы, основанные на совпадении частот проявления дефектов, формулировать рекомендации по выполнению ремонта и виброналадки

техники, предоставлять обоснованную оценку техническому состоянию работающего агрегата и прогнозировать деградационные процессы, неизбежно сопровождающие процесс эксплуатации дробильно-сортировочного и углеобогательного оборудования.

Примером совпадения значащих частот спектра могут служить такие высокоэнергетические процессы, как неуравновешенность роторов электродвигателей или нарушение соосности привода в конструкции щековых дробилок (см. пример на рис. 4). В силу ряда особенностей (таких как техническое состояние или неудачно выбранные конструктивные параметры оборудования), некоторые гармоники спектра, возникновение которых вызвано развитием совершенно различных по своей природе физических процессов, могут совпадать друг с другом вплоть до 0,01 Гц, что делает невозможным корректную интерпретацию результатов спектрального анализа [6, 9, 10]. Развитая неуравновешенность вращающихся элементов (шквивов, роторов двигателей щековых дробилок) относится к наиболее серьезным дефектам обследуемого оборудования, в сочетании с нарушением жесткости системы и нарушением соосности привода дробилки дисбаланс создает вероятность отрыва вращающихся деталей и/или всей дробильной установки от опор, что повышает риски возникновения аварийных ситуаций и создает угрозу жизни обслуживающего персонала. Именно поэтому одной из важнейших задач практического виброанализа является задача выявления неуравновешенности вращающихся деталей конструкции еще на той стадии развития дефекта, когда его проявление не несет угрозы аварийного выхода агрегата из строя, что зачастую представляется только с использованием результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования щековых дробилок, включая метод прямого спектрального анализа, анализа огибающей и, ряде случаев, методов анализа контурной характеристики и анализа траектории движения вала ротора [1, 11, 12].

Обобщение результатов исследований в области анализа параметров виброакустических волн, генерируемых при работе дробильно-сортировочного оборудования различного типа и конструкции, позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего сбора диагностических данных, необходимых для разработки единых диагностических критериев оценки фактического состояния различного технологического оборудования для дробления и сортировки полезных ископаемых. Анализ большого массива диагностических данных, полученных на однотипных объектах диагностирования, позволит разработать математические деградационные прогнозные модели изменения фактического состояния объектов дробильного оборудования диагностирования и разработать единые диагностические критерии, пригодные для выполнения оценки и осуществления прогноза возникновения аварий на дробильном оборудовании [13, 14].

Количество таких критериев для диагностики щечковых дробилок должно совпадать с числом групп дефектов, которые в принципе могут присутствовать на данном оборудовании. В рамках обследуемой выборки необходимо разработать пять таких критериев – для диагностики подшипников, нарушения жесткости системы и расцентровки элементов агрегата, неуравновешенности вращающихся деталей, дефектов соединительных муфт и дефектов электрической природы. Каждый из единых диагностических критериев должен быть основан на своем, присущем только ему наборе диагностических признаков. Так, например, проведенные ранее исследования [1, 9] позволили обосновать методологию для создания единого критерия для дефектов электрической природы электрических машин (замыкание обмоток, смещение в магнитном поле и т.д.).

Неотъемлемой частью алгоритма создания единых критериев является реализация процедуры клиппирования параметров исходного записанного сигнала, что делает необходимым решение по очистке спектров от присутствия в них «лишних» гармоник. Используемый в рамках настоящей работы алгоритм клиппирования основан на принципе фильтрации гармонических составляющих с применением процедуры уточнения оборотной частоты вращения [3]. Данный принцип хорошо зарекомендовал себя в качестве эффективного инструмента для автоматизации процедуры клиппирования в тех случаях, когда максимумы амплитуд значащих гармоник априори могут не принадлежать оборотной частоте. Кроме того, при разработке единых диагностических критериев необходимо учитывать принципы реализации многомерного пространства диагностических признаков и пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью развития дефектов.

Таким образом, полученные научные результаты прямо свидетельствуют, что только широкое использование результатов комплексного подхода к анализу параметров механических колебаний и разработка единых диагностических критериев оценки технического состояния щечковых дробилок позволит использовать эти методологические подходы в качестве элементов базовой платформы для внедрения современных форм технического обслуживания взамен морально устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов. Использование системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию позволит безопасно эксплуатировать технику; минимизировать потери времени на аварийные простои; оптимизировать логистику, складское хозяйство и систему проведения ремонтов технологического оборудования на эксплуатирующихся предприятиях [15, 16]. Реализация на практике предложенных этапов развития концепции системы ремонтной поддержки предприятиям угольной и горнорудной промышленности Кузбасса осуществить переход на качественно новый уровень обслуживания техники и уйти от системы аварийного обслуживания, что, в конечном итоге, позволит повысить безопасность проведения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gerike P. B. and Klishin V. I. 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 262 (2019) 012020. Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/262/1/012020
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
3. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
4. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018, Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
5. 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
6. F. Balducci, 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. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180
8. 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
9. Обеспечение эксплуатационной безопасности большегрузных карьерных автомобилей /Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Ю.В. Дрозденко, П.Б. Герике // Научное издание «Технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы международной научно-практической конференции «Уголь и майнинг 2019». – Новокузнецк: СибГИУ, 2019 – С. 1416-223.
10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCS 2016. Pp. 668-672. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179>
11. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
12. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
13. 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.

14. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V.126,. Pp. 662-685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051>

15. Ghasemloonia A., Rideout D. G., Butt S. D. Vibration Analysis of a Drillstring in Vibration-Assisted Rotary Drilling: Finite Element Modeling With

Analytical Validation. *Journal of Energy Resources Technology* SEPTEMBER 2013, Vol. 135 / 032902-1

16. Диагностика энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов по результатам анализа вибрации /Клишин В.И., Герике П.Б.// *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, т.5, №2. – Новосибирск. – 2018. С. 221-228

Pavel B. Gericke¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Alexander G. Nikitin**²
Dr. Sc. in Engineering, Professor,

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

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

JAW CRUSHERS VIBRATION ANALYSIS

Abstract: *The urgency of the discussed issue. This article attempts to summarize research results in the analysis of vibration parameters of jaw crushers and to create a reserve for the development of common diagnostic criteria suitable for assessing and implementing short-term forecasting of degradation of the technical condition of diagnosed technological equipment.*

The main aim of the study: *Create a classification of diagnostic signs of defects development in the diagnosed equipment suitable for improving the existing methodologies for normalizing vibration and creating algorithms for common diagnostic criteria for assessing the actual state of crushing equipment by vibration parameters.*

The methods used in the study: *As part of the work, the results of an integrated diagnostic approach were used, which included spectral analysis, envelope analysis, analysis of the acceleration / stick-out characteristics, and analysis of the temporal implementation of the signal. It is shown that the results of the integrated approach allow us to identify a clear associative relationship between the parameters of the vibration signal and the presence of damage in cases of implicit diagnostic results.*

The results: *The results obtained prove the fundamental effectiveness of the proposed methodological approach for analyzing the parameters of vibration generated during the operation of jaw crushers. The practical use of the developed common diagnostic criteria will open an innovative way for the introduction of a maintenance system for equipment at the coal enterprises of Kuzbass in accordance with its actual state.*

Keywords: *vibration analysis, jaw crusher, maintenance management, mechanical defects, predictive modeling.*

Article info: *received October 28, 2019*

DOI: *10.26730/1816-4528-2019-5-16-22*

REFERENCES

1. Gerike P. B. and Klishin V. I. 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 262 (2019) 012020. Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/262/1/012020 (eng)

2. 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)

3. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoy obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)

4. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of

rotating systems. *Applied Condition Monitoring*. 2018, Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9 (eng)

5. 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

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. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing* #56-57(2015). Pp. 173–180 (eng)

8. 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)

9. Gerike B.L., Klishin V.I., Drozdenko Ju.V., Gerike P.B. High-tech technologies for the development and use of mineral resources: Materials of the international scientific-practical conference “Coal and Mining 2019”. - Novokuznetsk: SibGIU. 2019. Pp. 1416-223 (rus).

10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. *Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC 2016*. Pp. 668-672. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179> (eng)

11. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. *AIP Conference Proceedings* 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528> (eng)

12. 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)

13. 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)

14. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V.126,. Pp. 662-685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051> (eng)

15. Ghasemloonia A., Rideout D. G., Butt S. D. Vibration Analysis of a Drillstring in Vibration-Assisted Rotary Drilling: Finite Element Modeling With Analytical Validation. *Journal of Energy Resources Technology* SEPTEMBER 2013, Vol. 135 / 032902-1 (eng)

16. Klishin V.I., Gerike P.B. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk, Vol.5, #2.* – Novosibirsk. – 2018. Pp. 221-228 (rus)

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б., Никитин А.Г. Анализ параметров вибрации, генерируемой при работе щековых дробилок // *Горное оборудование и электромеханика* – 2019. – № 5 (145). – С. 16-22.

Reference to article

Gericke P.B., Nikitin A.G. Jaw Crushers Vibration Analysis. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 5 (145), pp. 16-22.