

Герике Павел Борисович, канд. техн. наук, доцент

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

E-mail: am_besten@mail.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДРОБИЛЬНО-КЛАССИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Аннотация: *Актуальность работы.* В настоящей статье обобщены некоторые результаты исследований в области анализа параметров вибрации, генерируемой при работе оборудования дробильно-классификационных установок различного типа и конструкции, а также предпринята попытка создания задела для разработки единых диагностических критериев оценки и прогнозирования процессов изменения фактического технического состояния диагностируемого оборудования.

Цель работы: Разработать классификацию диагностических признаков и правил выявления дефектов энерго-механического оборудования дробильных установок, пригодную для диагностирования дефектов, вне зависимости от стадии их развития и причин возникновения, а также для совершенствования существующих методологий нормирования параметров вибрации и создания алгоритмов единых диагностических критериев оценки фактического состояния обследуемого оборудования.

Методы исследования: В рамках настоящей работы применялись результаты комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей спектра, анализ характеристики разгона/выбега и анализ временной реализации исходного виброакустического сигнала. Результаты исследования подтверждают необходимость предложенного комплексного подхода для анализа параметров вибрации и доказывают эффективность предложенного набора диагностических методологий для выявления типовых дефектов оборудования дробильных установок различного типа и конструкции.

Результаты: Полученные в рамках настоящего исследования научные результаты доказывают эффективность предложенного подхода к анализу параметров вибрации с использованием единых диагностических критериев. Прогнозирование деградационных процессов на предельно изношенном оборудовании с учетом реализации создаваемых единых диагностических критериев откроет перспективное направление для внедрения в условиях угольных предприятий России элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию.

Ключевые слова: вибродиагностика, дробильные установки, управление техническим обслуживанием, механические дефекты, прогнозное моделирование.

Информация о статье: принята 16 февраля 2020 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-27-34

На предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса широкое распространение получили щековые, конусные, молотковые и валковые дробилки, выбор применения конкретного типа дробилки обусловлен технологическими параметрами (выход фракции, крепость дробимого материала и т.д.), экономической эффективностью и условиями эксплуатации ДСО. Наряду со стационарными дробилками, требующими наличия специального фундамента, эксплуатируются и мобильные установки на гусеничном ходу, а также дробильно-классификационные установки, в состав которых помимо непосредственно дробилки входит еще и грохот для обеспечения разделения и сортировки дробимого материала. Доля дробильного оборудования, попадающего под проведение процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных

производственных объектах, и находящегося в недопустимом техническом состоянии, сегодня доходит до тридцати процентов от среднесписочного числа технологических единиц дробильного оборудования, попадающего на экспертизу. Недовольное техническое состояние сложного технологического оборудования является одной из основных причин роста аварийности на производстве, что приводит к увеличению доли отказов и росту непроизводительных простоев техники, а также может служить причиной возникновения несчастных случаев на опасных производственных объектах [1, 2, 3].

Объектом настоящего исследования является выборка из двадцати дробильных установок различного типа и конструкции, эксплуатируемых



Рис. 1. Пример искажения спектра виброакустического сигнала по параметру виброускорения (измерения на приводе установки ДКУ1-М)

Fig. 1. An example of a distortion of the spectrum of a vibroacoustic signal according to the vibration acceleration parameter (measurements on the drive of the DKU1-M installation)

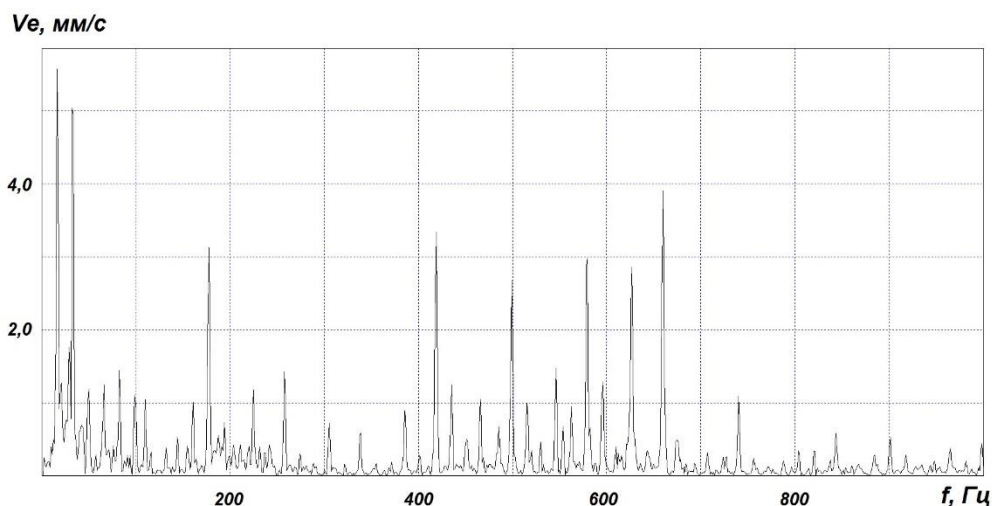


Рис. 2. Ярко выраженное нарушение жесткости системы на электродвигателе дробилки СМД-110

Fig. 2. A pronounced violation of the rigidity of the system on the electric motor of the crusher SMD-110

на обогатительных фабриках и дробильно-сортировочных комплексах угольных разрезов и карьеров по добыче щебня, сбор диагностической информации выполнялся в рамках проведения процедуры экспертизы промышленной безопасности с интервалом от одного до трех раз в три года, наблюдение за выборкой осуществлялось на протяжении восьми лет. Анализ большого объема полученных за этот промежуток времени данных позволяет сделать вывод о том, что наиболее широкое распространение на оборудовании дробилок получили следующие дефекты – нарушение жесткости системы, расцентровка, дефекты ременных передач, дефекты подшипников, неуравновешенность вращающихся деталей, износ рабочих элементов дробилок (молотков, валков, щек и т.п.), износ соединительных муфт, дефекты электрической природы. Наиболее эффективное решение задачи по своевременному

выявлению дефектов и исключению неявных результатов диагностики позволяет получить комплексный подход к анализу диагностических данных с одновременным применением различных диагностических методологий, конкретное сочетание которых зависит от объектов исследования и режимов их работы.

Объективность результатов диагностики зависит в том числе и от качества записанного исходного сигнала вибрации [4]. Наличие искажений виброакустического сигнала может являться следствием одной или сразу нескольких причин, среди которых: погрешности интегрирования программного обеспечения; ошибки, допущенные при установке датчика (неправильно выбранное место установки, неподготовленная измерительная поверхность, невозможность установки в штатных измерительных точках); дефекты резьбовых и кабельных соединений в

системе «датчик – кабель – прибор»; существенные нарушения жесткости опорной системы и/или структурный резонанс работающего агрегата; низкая температура окружающего воздуха а также ее резкие перепады, оказывающие существенное влияние на линейность АЧХ пьезоакселерометров и т.д. (см. пример искажения спектра на рис. 1). Особенностью проведения диагностических измерений на дробильном оборудовании является частое отсутствие ограждений вращающихся элементов, что делает невозможным безопасное осуществление замеров вибрации. Диагностические данные, получаемые за пределами штатных точек, обычно грешат наличием искажений и в существенной мере потерей информации о высокочастотных составляющих спектра, как следствие, результаты анализа не позволяют выявлять дефекты подшипников, подавляющее большинство признаков наличия которых содержится именно в высокочастотной области спектра. Для решения задачи по выявлению групп информативных частот в настоящей работе использованы результаты, полученные в рамках проведения модифицированного поэтапного клиппирования [3, 5]. Использование процедур клиппирования сигнала было бы невозможным без применения алгоритмов фильтрации массивов исходных данных, основанных на принципах автоматизированного исключения некорректных результатов измерений по результатам оценки меры сходства спектров и нормирования общего уровня сигнала и гармонического состава спектров. Как следствие, анализу подвергались результирующие модифицированные спектры, представляющие собой сумму однородных по причине своего возникновения частот, а также тех компонент спектра, которые являются независимыми от оборотной частоты агрегата.

Наибольшее распространение среди дефектов энерго-механического оборудования дробильных установок различного типа и конструкции получило нарушение жесткости опорной системы, которое встречается практически повсеместно и обычно проявляет себя в виде наличия ослаблений (или частичного отсутствия) крепежа электродвигателей и шкивов ременных передач, ослабления посадки подшипников, нарушения жесткости силовых рам и анкером и т.д. Данному дефекту в области анализа параметров вибрации соответствует более двадцати диагностических признаков, сосредоточенных в области спектрального анализа, анализа временной реализации, анализа огибающей и вейвлет-преобразования параметров виброакустических волн. Основным признаком наличия нарушения жесткости принято считать присутствие в спектре гармонических рядов базовой оборотной частоты, состоящих из большого количества дискретных составляющих (см. пример на рис. 2). В то же время природа данного дефекта такова, что часть диагностических признаков, подтверждающих наличие данного дефекта, вплоть до 0,1 Гц может совпадать с признаками проявления дефектов

совершенно иного характера, например, с расцентровкой природа дробилки, структурным резонансом силовой рамы или признаками биения неуравновешенных вращающихся элементов дробилки. В целом ряде случаев результаты спектрального анализа не позволяют сделать корректные выводы о наличии нарушения жесткости опорной системы обследуемых агрегатов, именно поэтому целесообразным может оказаться применение результатов комплексного подхода к анализу параметров вибрации, включая одновременное использование сразу нескольких диагностических методов, сочетание которых зависит от типа объекта диагностики и режимов его работы [6, 7, 8].

Следующим по распространенности повреждением энерго-механического оборудования дробильно-классификационных установок являются дефекты подшипников, которые в той или иной форме встречаются примерно у 30% обследованной выборки (см. пример спектра на рис. 3). К данной группе дефектов относят повреждения наружных и внутренних колец подшипников, трещины и наклеп сепараторов, изменение формы тел качения, нарушение режима смазки. Для их диагностики обычно пользуются базовым набором диагностических признаков в области спектрального анализа параметров вибрации, производя вычисление и обнаружение в спектре составляющих из группы «подшипниковых» частот. Данная группа дефектов является самой изученной с точки зрения практического виброанализа, для выявления дефектов подшипников разработано большое количество самостоятельных диагностических методологий, таких как: пик-фактор, эксцесс, анализ огибающей спектра, метод ударных импульсов и другие [1, 9, 10]. В силу того, что данный объект максимально изучен, для диагностики подшипников качения как в нашей стране, так и за рубежом были разработаны и успешно апробированы единые диагностические критерии, каждый из которых может заменить собой большое число громоздких диагностических признаков и правил и использоваться для выполнения оценки фактического технического состояния подшипников и прогнозирования процессов их деградации [3, 10, 11].

Анализ диагностических данных, регистрируемых на подшипниковых узлах дробильных установок, значительно усложняется наличием ограниченного доступа к точкам проведения измерений, а также отсутствием актуальной информации о геометрических параметрах используемых в конструкции дробилки подшипников. Дополнительные трудности в анализе данных добавляет совпадение значащих гармоник, причины возникновения которых могут быть абсолютно различны (совпадение частотных признаков отличающихся по своей природе дефектов). Помимо этого, значительные искажения сигнала дает использование диагностических щупов для проведения измерений в труднодоступных

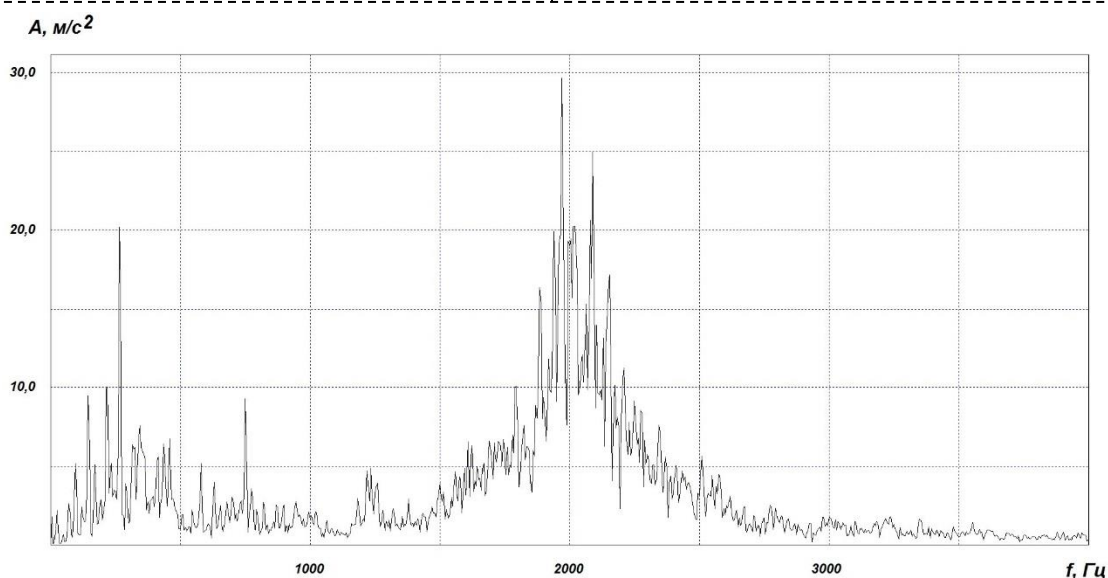


Рис. 3. Множественные дефекты подшипника электродвигателя дробилки СМД-110А
 Fig. 3. Multiple defects of the bearing of the electric motor of the crusher SMD-110A

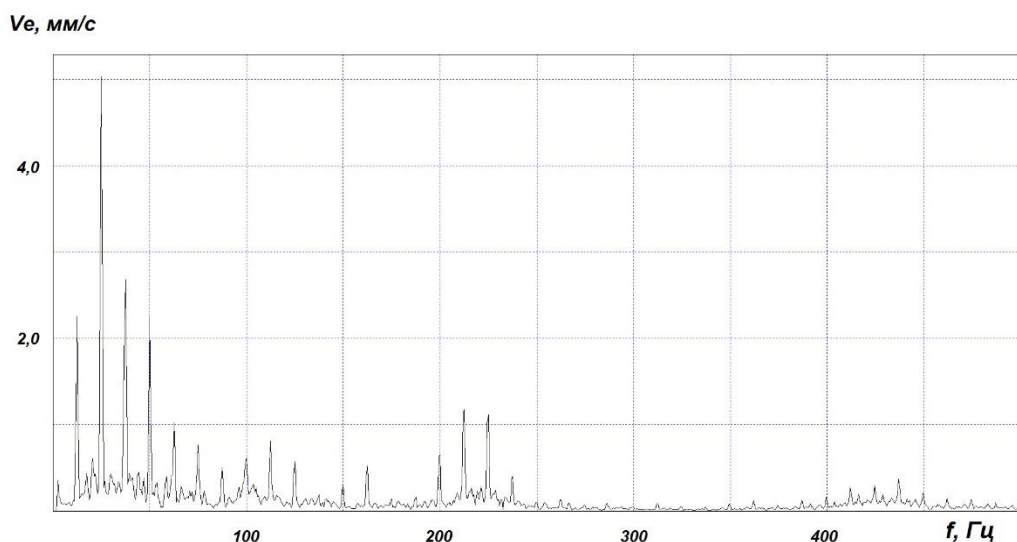


Рис. 4. Спектр, записанный на электродвигателе привода молотковой дробилки ДМР-1450, иллюстрирующий совпадение частотных признаков разных по своей природе дефектов.
 Fig. 4. The spectrum recorded on the drive motor of the hammer mill DMR-1450, illustrating the coincidence of the frequency characteristics of defects of different nature.

местах конструкции и использование неподготовленной измерительной поверхности (загрязнения, пыль, потеки масла, краска и т.д.), что влечет за собой потерю части ценной диагностической информации при сужении частотного и динамического диапазона измерений вибрации. Все вышесказанное подтверждает необходимость использования на практике результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации. Конкретный набор диагностических методологий должен изменяться в зависимости от типа изучаемого объекта, так, например, для диагностики подшипников качения такой комплексный подход должен включать результаты спектрального анализа, эксцесса и анализа огибающей [12, 13]. Результаты исследований, выполненных в рамках

настоящей работы, свидетельствуют, что для диагностики энерго-механического оборудования дробильных установок различного типа и конструкции (щечковые, валковые, молотковые и т.д.) оптимальным является сочетание результатов спектрального анализа в расширенном частотном диапазоне, анализа огибающей спектра и анализа временной реализации. Именно такое сочетание диагностических методов позволяет получить максимум полезной информации о фактическом состоянии оборудования дробилок и исключить неявные результаты контроля при минимуме временных затрат [1, 2, 9].

Примером совпадения диагностических признаков может служить одновременное наличие неуравновешенности вращающихся конструктивных элементов дробилки (например, ротора

электродвигателя), расцентровки привода дробильной установки и нарушения жесткости опорной системы – трех достаточно распространенных дефектов, встречающихся примерно у 1/5 части обследованной в рамках выполнения настоящей работы выборки (см. рис. 4). В силу ряда особенностей, к которым относят фактическое техническое состояние или особенности конструкции оборудования, невозможно получить объективные результаты контроля вибрации без использования принципов комплексного диагностического подхода, т.к. ряд гармоник, причины возникновения которых совершенно различны, в спектре могут практически полностью совпадать друг с другом [14, 15]. Развитая неуравновешенность вращающихся деталей (элементов муфт, шкивов, роторов и т.д.) в сочетании с нарушением жесткости опорной системы и расцентровкой привода дробилки создает условия для возникновения аварийных ситуаций, связанных с повышенным уровнем вибрационной активности агрегата. Задача по обнаружению неуравновешенности вращающихся деталей конструкции и своевременному проведению виброналадочных работ агрегата является одной из важнейших задач практического виброанализа, своевременное решение которой позволяет предотвратить угрозу возникновения аварийных ситуаций, представляющих риски для жизни обслуживающего персонала. Зачастую только результаты комплексного применения нескольких различных диагностических методологий позволяют найти четкую ассоциативную связь между большим количеством разных по своей природе диагностических признаков и наличием на агрегате дефектов механической природы. В данном случае в дополнение к стандартному набору диагностических методов целесообразно использование анализа траектории движения вала ротора, результаты которого позволяют избежать формирования заведомо ложных заключений о техническом состоянии работающего агрегата [1, 2].

Следующим дефектом, получившим широкое распространение на дробильных установках, является нарушение соосности шкивов и дефекты ременных передач, такие как износ, растрескивание, биение, перекручивание ремней. Диагностическими признаками, подтверждающими наличие дефектов этой группы, является наличие в спектре группы «ременных» частот, для детектирования которых необходима информация о диаметре шкивов ременной передачи и их оборотной частоте, а также о длине и количестве ремней. При наличии развитого дефекта ременной передачи амплитуды значащих гармоник могут достигать достаточно больших величин при малом шаге дискретизации составляющих, что объясняется наличием в спектре большого числа субгармоник и обертонов, которыми «обрастают» базовые несущие частоты (см. рис. 5). С учетом несоосности шкивов ременных передач общая доля технических устройств, на которых в рамках проведения исследований были выявлены признаки

наличия расцентровки, достигает величины 30% от общего объема выборки. В свою очередь, расцентровка является одной из основной причин резкого уменьшения срока эксплуатации подшипников и соединительных муфт, что влечет за собой рост вероятности аварийного выхода из строя эксплуатируемого дробильного оборудования. Таким образом, только результаты реализации комплексного подхода к анализу параметров вибрации позволяют эффективно обнаруживать дефекты различного энерго-механического оборудования (в том числе и находящиеся на стадии зарождения), избегать ошибочных заключений (которые могут возникать при совпадении частотных признаков наличия дефектов), формулировать и обосновывать рекомендации по выполнению ремонта и виброналадки горной техники, а также осуществлять прогнозирование процессов деградации технического состояния дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования.

Полученные в рамках настоящей работы результаты исследований в области анализа параметров виброакустических волн, генерируемых при работе дробильно-классификационных установок различного типа и конструкции, позволяют сделать вывод о необходимости продолжить сбор диагностических данных, необходимых для разработки единых диагностических критериев. Анализ большого массива диагностических данных, полученных на однотипных объектах диагностирования, позволит обобщить результаты контроля, разработать математические модели для прогнозирования процессов деградации технического состояния дробильного оборудования и создать единые диагностические критерии для дробильного оборудования [3, 16]. Общее количество таких критериев, создаваемых для диагностики энерго-механического оборудования дробильных установок, должно совпадать с числом групп потенциально возможных на данном оборудовании дефектов. Таким образом, в рамках поставленной задачи необходимо разработать пять таких критериев (каждый из которых должен быть основан на своем индивидуальном наборе диагностических признаков) – для диагностики подшипников, нарушения жесткости системы и расцентровки элементов агрегата, неуравновешенности вращающихся деталей, дефектов соединительных муфт и дефектов электрической природы.

Осуществленные ранее исследования позволили обосновать и апробировать алгоритм создания единого критерия для дефектов электрической природы (замыкание обмоток, смещение в магнитном поле и т.д.), который успешно может быть взят за основу при разработке других единых диагностических критериев [1]. Одной из важных процедур алгоритма создания единых критериев является клиппирование исходного сигнала, что позволяет реализовать решение по

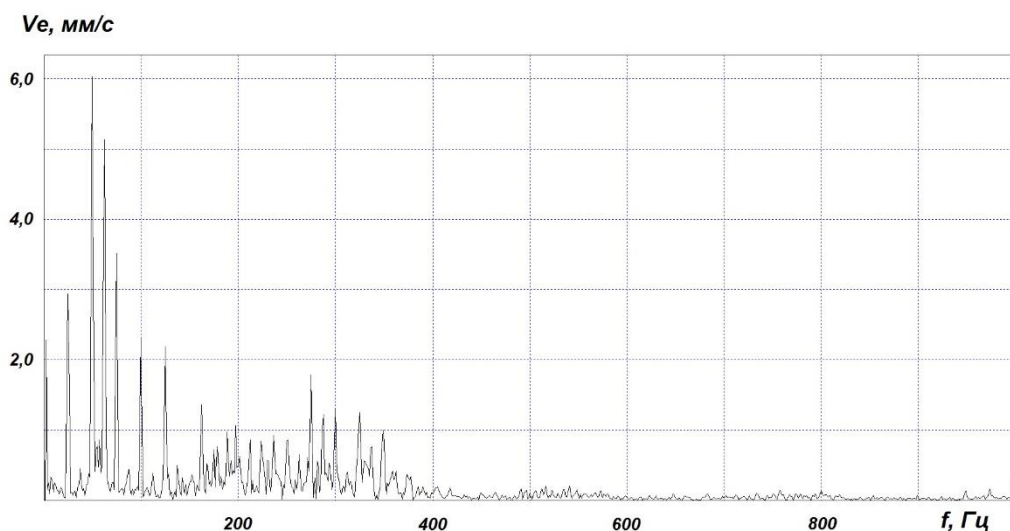


Рис. 5. Биение ременной передачи на щековой дробилке СМД-110
 Fig. 5. Belt runout on the SMD-110 jaw crusher

очистке спектров от «лишних» гармоник. Реализованные в рамках данного исследования алгоритмы клиппирования основаны на принципах фильтрации гармонических составляющих с применением процедуры уточнения оборотной частоты вращения, предложенных в работах Баркова и Сушко [3, 13].

Кроме того, принципы разработки единых диагностических критериев должны включать алгоритмы реализации многомерного пространства диагностических признаков и пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью развития дефектов, т.к. это является необходимым условием для осуществления нормирования создаваемых критериев. Разрабатываемые критерии позволяют перейти к решению задачи по созданию качественно новой прогнозной модели, универсальность которой заключается в возможности осуществления прогноза изменения технического состояния сложных механических систем, в состав которых могут входить самые разные по типу и конструкции узлы и агрегаты. Создаваемая модель для деградационного моделирования может быть использована в качестве элемента базовой платформы при внедрении в условиях угольных предприятий Кузбасса системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию, которая предъявляет свои требования к наличию развитых программно-аппаратных средств и методов прогнозирования и контроля [1, 2, 16], причем использование в такой модели единых критериев в качестве базовых моделируемых параметров делает ее уникальной.

Таким образом, можно заключить, что научные результаты, полученные в рамках выполнения цикла работ по совершенствованию методологических подходов практического виброанализа энерго-механического оборудования горных машин, прямо свидетельствуют о необходимости широкого использования результатов комплексного подхода к анализу параметров механических колебаний и наличии острой потребности

в создании единых диагностических критериев, пригодных для быстрой и эффективной оценки технического состояния обследуемого оборудования и осуществления прогнозирования процессов его деградации. Внедрение на практике разрабатываемых элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию позволит предприятиям угольной и горнорудной промышленности Кузбасса осуществить переход на качественно новый уровень обслуживания техники и отказаться от существующего сейчас на предприятиях Кузбасса сочетания системы планово-предупредительного и аварийного обслуживания эксплуатируемой техники, что позволит повысить безопасность проведения горных работ, минимизировать потери времени на непроизводительные аварийные простои, оптимизировать логистику и складское хозяйство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике П.Б. Выбор критериев для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе драглайнов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2015 - №3 – С. 11-19.
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. Устройство и принцип действия одновалковой дробилки, работающей на сдвиг /А.Г. Никитин, В.А. Кречетов, В.В. Гаряшин, П.Б. Герике // Фундаментальные основы механики. – Новокузнецк, 2019 №4 – С. 164-166. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-164-166>

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/Carpathi-анСС.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.ymsp.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. Создание высокоэффективных рабочих органов горных машин для разрушения прочных породных массивов /Герике Б.Л., Клишин В.И., Герике П.Б.// Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, т.5, №1. – Новосибирск. – 2018. С. 247-251

Pavel B. Gericke, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

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

IDENTIFICATION OF DEFECTS IN ENERGY-MECHANICAL EQUIPMENT OF CRUSHING AND CLASSIFICATION PLANTS

Abstract: *The urgency of the discussed issue. This article summarizes some of the research results in the analysis of vibration parameters generated during the operation of equipment of crushing and classification plants of various types and structures, as well as an attempt to create a reserve for the development of common diagnostic criteria for assessing and predicting the processes of changing the actual technical condition of the diagnosed equipment.*

The main aim of the study: *The main target of this work is to develop a classification of diagnostic signs and rules for identifying defects in energy-mechanical equipment of crushing plants, suitable for diagnosing defects, regardless of their development stage and causes, as well as to improve existing methodologies for normalizing vibration parameters and creating algorithms for common diagnostic criteria evaluation of the actual state of the subject equipment.*

The methods used in the study: *In the framework of this work, we used the results of an integrated diagnostic approach to the analysis of vibration parameters, including spectral analysis in the extended frequency and dynamic range, analysis of the envelope of the spectrum, analysis of the acceleration / stick-out characteristics, and analysis of the temporal realization of the initial vibroacoustic signals. The results of the research confirm the need for the proposed integrated approach for the analysis of vibration parameters and prove the effectiveness of the proposed set of diagnostic methodologies for identifying typical defects in the equipment of crushing plants of various types and structures.*

The results: *The scientific results obtained in the framework of this study prove the effectiveness of the proposed approach to the analysis of vibration parameters using common diagnostic criteria. Prediction of degradation processes on extremely worn-out equipment, taking into account the implementation of the created unified diagnostic criteria, will open up a promising direction for introducing elements of the equipment maintenance system at coal operations of Russia in accordance with its actual condition.*

Keywords: *vibration analysis, crushing plants, maintenance management, mechanical defects, predictive modeling.*

Article info: received February 16, 2020
DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-27-34

REFERENCES

1. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. #3. Pp. 11-19. (rus)
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 programmnogo 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. Nikitin A.G., Krechetov V.A., Garyashin V.V., Guericke P.B.// Fundamental'nye osnovy mehaniki. 2019. #4. Pp. 164-166. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-164-166> (rus)
10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCO 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.ymsp.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. Gerike B.L., Klishin V.I., Gerike P.B. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk, Vol.5, #1. – Novosibirsk. – 2018. Pp. 247-251 (rus)

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б. Выявление дефектов энерго-механического оборудования дробильно-классификационных установок // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 2 (148). – С. 27-34.

Reference to article

Gericke P.B. Identification of defects in energy-mechanical equipment of crushing and classification plants. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.2 (148), pp. 27-34.