

УДК 53.083 (430.1)

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГРОХОТА КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИКИ
ПО ПАРАМЕТРАМ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.**

**HIGH-FREQUENCY COARSE SCREENS
AS A DIAGNOSTIC OBJECT BY THE PARAMETERS
OF MECHANICAL VIBRATIONS**

Герике Павел Борисович,

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

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

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН

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

Аннотация. В настоящей работе приведены результаты исследований параметров вибрационных волн, генерируемых при работе высокочастотных грохотов, эксплуатируемых в условиях предприятий угольной промышленности Кузбасса. Приводится классификация неисправностей и повреждений энерго-механического оборудования высокочастотных грохотов. Доказана эффективность применения комплексного диагностического подхода применительно к анализу по параметрам механических колебаний, сформулированы основные подходы к разработке критерии предельного состояния дробильно-сортировочного оборудования. Обоснована необходимость широкого применения современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля для своевременного выявления различных типов дефектов динамического оборудования и прогнозирования изменения их технического состояния. В рамках настоящей работы проанализированы существующие методологические подходы к разработке единых диагностических критерии, основанные на принципах вибродиагностики сложных механических систем. Результаты работы позволили создать авторский комплекс из более чем ста диагностических правил, предназначенный для автоматизированного выявления основных дефектов диагностируемого оборудования на основе анализа селективных групп информативных частот. Предложенные диагностические подходы могут быть рекомендованы для использования их в качестве базовой платформы для совершенствования системы обслуживания эксплуатируемой горной техники. Результаты проведенных исследований безапелляционно доказывают принципиальную возможность внедрения на предприятиях угольной промышленности России системы обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию. Доказана принципиальная возможность создания группы единых диагностических критерии, пригодных для осуществления оценки технического состояния оборудования высокочастотных грохотов и являющихся необходимым условием для осуществления эффективного краткосрочного прогнозирования исследуемых параметров при разработке адаптивных математических моделей. Результаты краткосрочного адаптивного моделирования процессов деградации технического состояния как нельзя лучше вписываются в концепцию предлагаемой системы обслуживания технологического оборудования.

Abstract. The article presents the results of investigations of parameters of vibroacoustic waves generated during operation of screens operated under the conditions of the coal industry in Kuzbass. We present a classification of faults and damages to the power and mechanical equipment of high-frequency screens. The efficiency of an integrated diagnostic approach to the analysis of the parameters of mechanical vibrations has been proved, and the basic approaches to the development of criteria for the limit state of crushing and screening equipment has been formulated. The necessity of wide use of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive testing for the early detection of various types of defects in dynamic equipment and prediction of changes in their technical condition is justified. As part of this paper, we analyze the existing methodological approaches to the development of uniform diagnostic criteria based on the principles of vibration diagnostics of complex mechanical systems. Results of work allowed the authors to create a complex of more than one hundred of diagnostic rules, designed for automated detection of major defects of the diagnosed equipment based on the analysis of selective groups of informative frequencies. The proposed diagnostic approaches can be recommended for use as a basic platform for the improvement of the existing technical maintenance system of the operated mining equipment. The results of the research prove categorically the fundamental possibility of implementation in the existing conditions of the coal industry in Russia of equipment maintenance system based on its actual technical condition. It was proved in principle that it is possible to create a group of uniform diagnostic criteria that are suitable for evaluation of the technical condition of the equipment of high-frequency coarse screens and that are the prerequisite for effective short-term forecasting of the tested parameters in the development of adap-

tive mathematical models. The results of short-term adaptive modeling of technical condition can be most effectively implemented precisely in the concept of the proposed system of the process equipment maintenance.

Ключевые слова: вибродиагностика, высокочастотный грохот, дробильно-сортировочное оборудование, управление техническим обслуживанием, предельное состояние.

Keywords: vibration analysis, high-frequency coarse screens, crushing and screening equipment, maintenance management, ultimate state.

Экономические показатели работы промышленных предприятий напрямую зависят от фактического состояния эксплуатируемого оборудования. Большое количество технологических единиц дробильно-сортировочного оборудования, эксплуатируемого на установках, комплексах и обогатительных фабриках предприятий угольной и горнорудной промышленности Кузбасса, в настоящее время выработали свой ресурс. Исследованиями [1] подтверждено, что до $\frac{1}{4}$ части от подпадающего под процедуру экспертизы промышленной безопасности технологического оборудования обогатительных фабрик Кузбасса находится сегодня в недопустимом техническом состоянии. В рамках выполнения технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, учеными и специалистами ФИЦ УУХ СО РАН и ФГБОУ ВПО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева» за период с 2010 по 2016 год был осуществлен ряд исследовательских работ, связанных с изучением особенностей формирования и развития вибраакустических волн, генерируемых при работе энергомеханического оборудования, эксплуатируемого на ряде промышленных предприятий Кемеровской области (обогатительные фабрики – ОФ «Листвяжная», ЦОФ «Беловская», ОФ «Черниговская», ОФ «Кедровская», ПАО «КТК» ОФ «Каскад» и другие). В общей сложности было обследовано более 400 единиц дробильно-сортировочного, горнотранспортного и углеобогатительного оборудования, что позволяет говорить о представительном объеме выборки диагностических данных. В качестве основного метода контроля технического состояния машин и агрегатов был выбран метод вибродиагностики, являющийся неотъемлемой составляющей процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатирующихся на опасных производственных объектах. Метод получил широкое распространение благодаря высокой информативности и точности получаемых результатов, а также широкой области применения [2, 3]. Следует особо отметить тот факт, что именно результаты анализа большого массива диагностических данных, структурированного по типам и маркам оборудования, открыли значительные возможности для обоснования точных критериев предельного состояния, разработки математических деградационных моделей изменения технического состояния объектов диагностирования и уточнения зависимостей, используемых для рас-

чета остаточного ресурса технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах.

Настоящая работа ориентирована, в первую очередь, на решение проблематики создания единого критерия предельного состояния, пригодного для выполнения оценки и прогнозирования изменения фактического состояния динамического оборудования высокочастотных грохотов, эксплуатируемых в условиях угольной промышленности Кузбасса (см. рисунок 1).

Среди динамического оборудования высокочастотных грохотов наибольшее распространение получили следующие типы неисправностей и повреждений: дефекты электро-двигателей (дисбалансы, дефекты электрической природы); ослабление посадки, увеличение зазоров подшипников и нарушение режима их смазки (см. рисунок 2), разнообразные дефекты подшипников качения; нарушение жесткости системы, структурный резонанс.

Ниже на примерах реальных спектров проиллюстрирован процесс анализа параметров вибраакустических волн, содержащих информацию о наличии диагностируемых дефектов.

Оценка фактического технического состояния энергомеханического оборудования грохотов вне зависимости от их типа и конструкции может быть достаточно эффективно осуществлена на основе анализа параметров виброскорости и виброускорения амплитудно-частотной характеристики вибраакустического сигнала в диапазоне частот от 2 до 2 000 Гц [4, 5]. Однако, отличительной особенностью настоящей работы является использование результатов комплексного диагностического подхода, что позволяет наилучшим образом учесть конструктивные и кинематические особенности объектов исследования и предоставить исчерпывающую оценку их технического состояния.

Результаты анализа вибраакустических характеристик с применением комплексного диагностического подхода позволяют в значительной мере компенсировать существенные ограничения на область применения того или иного конкретного метода вибродиагностики – такие как низкие рабочие частоты, знакопеременные ударные нагрузки, источники случайной высокочастотной вибрации и т.д. Кроме того, данные анализа в значительной степени дополняют друг друга, повышая вероятность выявления дефектов динамического оборудования еще на стадии их зарождения. Именно поэтому комплексный подход к анализу параметров механических колебаний позволяет



Рис. 1. Схема проведения измерений параметров вибрации на высокочастотном грохоте.

извлечь максимум полезной информации из исходных полигармонических волн, что открывает дополнительные возможности для выполнения обоснованной оценки и прогнозирования изменения параметров энерго-механического оборудования.

Исследованиями [1, 5; 6] обоснована эффективность применения комплексного диагностического подхода, включающего такие методы практической вибродиагностики, как: спектральный анализ, эксцесс, анализ огибающей, анализ кепстрап и вейвлет-преобразование. Конкретное сочетание методов в каждом конкретном случае определяется только типом объекта исследования и режимами его работы, а также необходимой

степенью детализации проводимого исследования [7]. Для анализа параметров вибрации, генерируемой при работе высокочастотных грохотов, такой подход должен включать результаты прямого спектрального анализа в расширенном частотном диапазоне (дефекты электродвигателей, нарушение жесткости системы), эксцесс и анализ огибающей (повреждения подшипников качения).

Обобщение результатов проведенных в рамках настоящей работы исследований позволило сформировать совокупность основных диагностических признаков, пригодных для создания единого диагностического критерия (ЕДК) оценки и прогнозирования технического состояния оборудования высокочастотных грохотов:

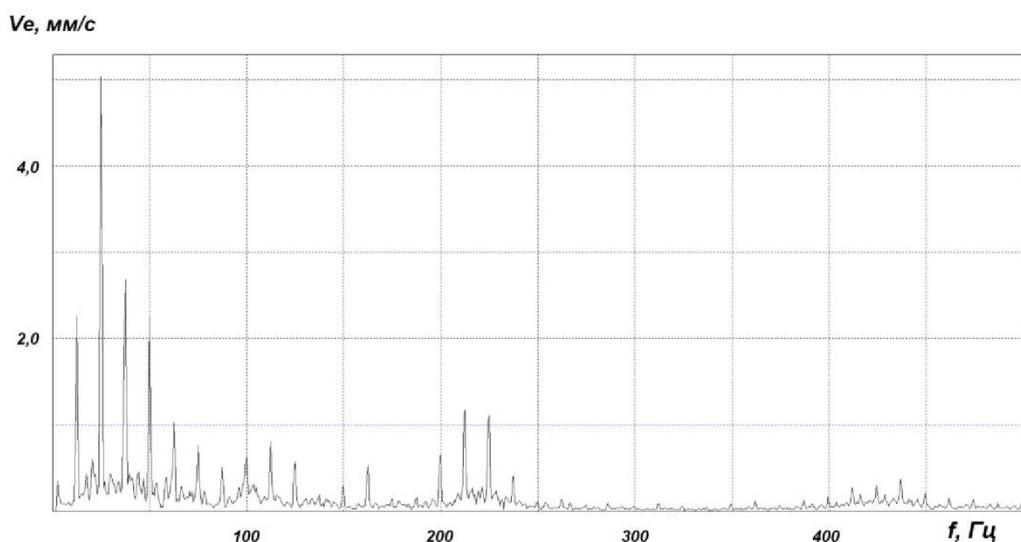


Рис. 2. Нарушение жесткости системы, нарушение режима смазки и зарождение дефекта подшипника электродвигателя.

1. Общий уровень сигнала и уровень составляющих подшипниковых частот по параметру выброскорости ($2\ldots3000$ Гц);

2. Общий уровень и пиковые значения отдельных максимальных по амплитуде гармоник по параметру выброускорения в диапазоне $50\ldots5000$ Гц;

3. Общий уровень по параметру выброскорости в низкочастотном диапазоне ($2\text{Гц} \ldots 15f_{R1}$), содержащий признаки нарушения жесткости системы и неуравновешенности ротора электродвигателя.

4. Глубина модуляции спектра огибающей выбросигнала в области подшипниковых частот, а также величина флуктуации амплитуд соответствующих гармоник – базовых, промежуточных и модуляционных частот.

5. Размах выброперемещения в диапазоне $10\ldots1000$ Гц;

6. Мера подобия, определяемая по результатам сравнения характеристик вейвлет-преобразования и временной волны реального и «эталонного» сигналов.

В совокупности эти базовые признаки могут быть использованы для разработки единого диагностического критерия с использованием принципов скаляризации, подразумевающих замену множества диагностических признаков единой скалярной величиной с использованием полуэмпирического критерия «разделяемости» [8]. Данний критерий позволяет разделить диагностируемое оборудованием как минимум на 2 сегмента, в зависимости от его фактического технического

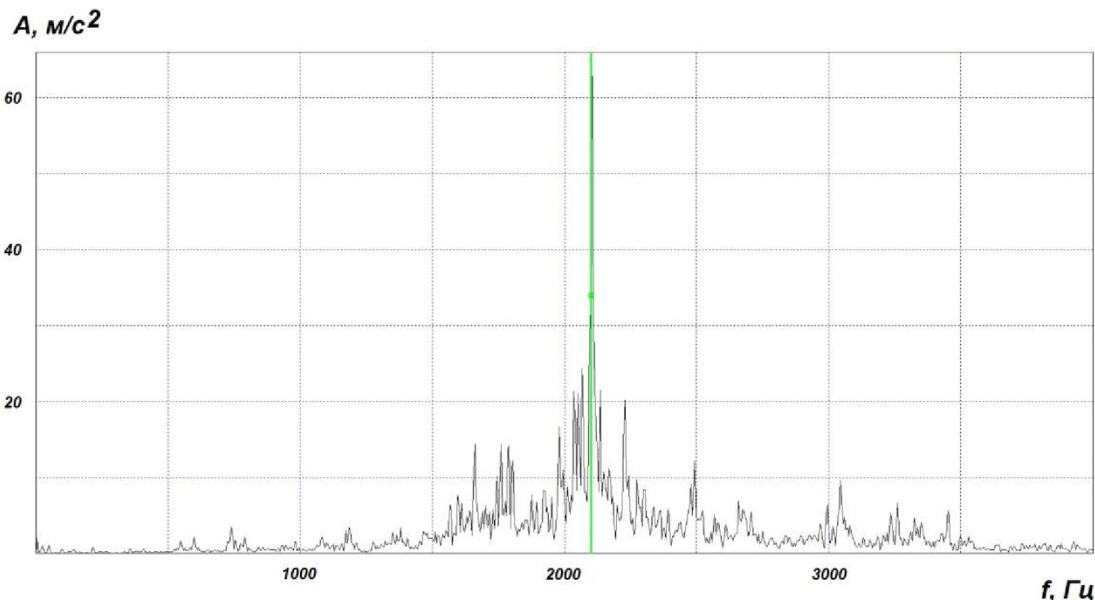


Рис. 3. Признаки наличия множественных дефектов подшипника электродвигателя грохота WF-100/11 (раковины внутреннего кольца, наклеп сепаратора).

$V_e/V_0, \text{дБ}$

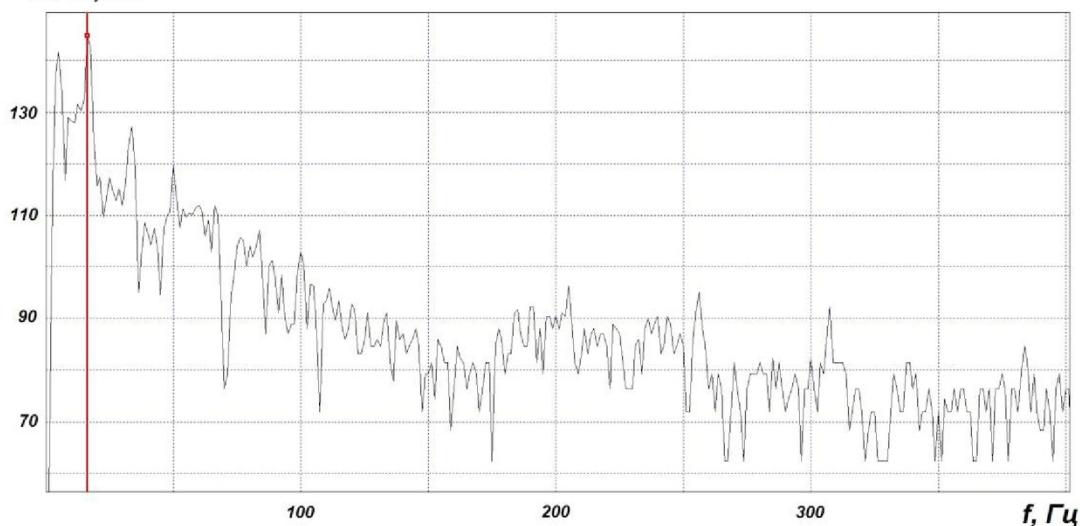


Рис. 4. Развитый динамический дисбаланс ротора верхнего электродвигателя высокочастотного грохота WF-100/11.

состояния, что является необходимым условием создания алгоритма разработки эффективного ЕДК (объекты с оценкой «хорошо», «удовлетворительно» и «допустимо» относят к первому; а с оценкой «предельно допустимо» и «недопустимо» - ко второму сегменту). В редких случаях, когда разрабатываемый критерий не позволяет осуществить разделение объектов на группы, необходимо изменить набор используемых диагностических признаков.

Представляется очевидным, что задача создания ЕДК предусматривает разработку нескольких базовых критериев, по одному для каждой группы дефектов энерго-механического оборудования горных машин (например – отдельные ЕДК для дефектов подшипников качения и скольжения, нарушения центровки, нарушения жесткости системы, дефектов соединительных муфт, дефектов зубчатых передач и т.д.). Создание ЕДК для каждого из типов дефектов включает в себя задачу, связанную с необходимостью удаления из спектра всех «лишних» гармонических составляющих, т.е. осуществление процедуры клиппирования. При этом, разрабатываемые алгоритмы выделения информативных составляющих наличия дефектов различной природы должны быть основаны на удалении из спектра всех составляющих иной природы, по отношению к разрабатываемому ЕДК. Таким образом, число описываемых алгоритмов клиппирования должно равняться количеству потенциально возможных дефектов исследуемого оборудования и числу ЕДК.

Одними из наиболее распространенных дефектов энерго-механического оборудования высокочастотных грохотов являются разнообразные повреждения подшипников – такие как: дефекты наружного и внутреннего колец (см. рисунок 3), трещины и наклеп сепаратора, изменение формы тел качения, нарушение режима смазки и т.д. С учетом постоянной частоты работы привода их довольно легко диагностировать методом прямого спектрального анализа при условии наличия информации о геометрии подшипника. Для выявления в спектре информативных составляющих на рынке программного обеспечения присутствует большое количество прикладных программ, вопросы выявления и анализа групп «подшипниковых» частот достаточно хорошо изучены [10, 11]. Очень хорошие результаты, в условиях отсутствия априорной информации о марке и геометрических параметрах подшипника, может предоставить экспесс, позволяющий с высокой степенью достоверности предоставить четкие рекомендации о замене дефектного узла.

В силу хорошей изученности процессов формирования и особенностей распространения вибраакустических волн, генерируемых дефектными подшипниками качения, они остаются чуть ли не единственным объектом диагностирования, для которого разработано большое количество

адекватных деградационных прогнозных моделей, основанных, в том числе, на моделировании величины единого диагностического критерия оценки технического состояния [12, 13].

Как правило, такие модели оценивают вероятность того, что подшипник безаварийно отработает заданный временной интервал, причем приоритет отдают моделям, ориентированным на осуществление краткосрочного прогнозирования (один – два интервала диагностирования). Это обуславливается спецификой системы планово-предупредительных ремонтов, что делает решение задач долгосрочного прогнозирования не актуальным в фактически сложившихся условиях эксплуатации технологического оборудования на предприятиях ТЭК России.

Признаки еще одного распространенного дефекта энерго-механического оборудования присутствуют практически повсеместно – это признаки нарушения жесткости системы (см. рисунок 2). Выявление этого дефекта методами вибродиагностики затрудняет наличие большого числа диагностических правил (более 17 признаков для методов спектрального анализа, анализа траектории ротора, анализа кепстра, анализа временной реализации сигнала), частично совпадающих с признаками наличия повреждений иной природы (электрическими дефектами, признаками нарушения соосности, ударами в зубчатых зацеплениях). Именно это и является одной из причин, доказывающими необходимость использования гибкого настраиваемого алгоритма фильтрации, позволяющего отсечь при анализе составляющие различной природы с точностью до 0,1 Гц. Кроме того, широкое применение результатов комплексного диагностического подхода позволяет осуществить четкую ассоциацию характера полигармонических колебаний с конкретным типом дефекта и указать на степень его развития. Пример спектра на рисунке 4 иллюстрирует данное положение. Известно [14], что большинство частотных признаков развитого дисбаланса ротора электрической машины могут практически полностью совпадать с признаками наличия повреждений совершенно иной природы, что часто объясняется конструктивными особенностями агрегата.

Для решения задачи по подтверждению наличия развитой неуравновешенности наиболее эффективно могут быть использованы результаты комплексного диагностического подхода,ключающего диагностические признаки методов спектрального анализа, анализа траектории движения ротора и анализа контурной характеристики. Выявление признаков неуравновешенности вращающихся деталей является одним из базовых критерии, на основе которого можно предоставить обоснованную оценку фактического состояния дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования.

Генерирование при работе энергомеханического оборудования горных машин развитых высокоэнергетических низкочастотных колебаний на обратной частоте является одним из грозных признаков наличия развитого дисбаланса [15]. Однако, на этой частоте, её гармониках и обертонах часто проявляют себя признаки совершенно других неисправностей и дефектов, что подтверждает ценность результатов комплексного подхода и применяемых алгоритмов фильтрации. того, произведенный анализ существующих ограничений на применение диагностических признаков и единого критерия оценки позволил выявить основные сложности в реализации предложенных подходов. Так, значительные затруднения в разработку ЕДК привносят искажения спектра, вызванные причинами различного характера. Это и ошибки в выборе места и способа установки виброизмерительного датчика, и механические повреждения системы «датчик – кабель – прибор», погрешности интегрирования в математическом обеспечении вибранализатора и программном обеспечении для анализа, неподготовленная измерительная поверхность, низкая температура окружающей среды (см. пример на рисунке 5) а также

ее резкий перепад и другие причины. Кроме искажения сигнала, дополнительные ограничения на область применения ЕДК накладывают низкие рабочие частоты, нестационарные режимы работы или нагрузки, превышающие расчетные. Для решения проблематики, связанной с анализом искаженной информации, в данной работе был предложен алгоритм фильтрации диагностических данных, основанный на принципе удаления данных диагностических замеров, общие уровни которых по параметрам виброскорости или виброускорения значительно (в десятки или сотни раз) отличаются в большую или меньшую сторону от данных замеров соседних измерительных точек агрегата при условии наличия представительной базы данных для данного типа оборудования. Для оценки влияния на характер параметров вибраакустических волн нестационарности рабочих процессов были использованы весовые коэффициенты, эффективность внедрения которых обоснована в работах [8].

С учетом существенных ограничений системы планово-предупредительных ремонтов, действующей сегодня на предприятиях ТЭК Кузбасса, наибольший интерес в рамках поставленной зада-

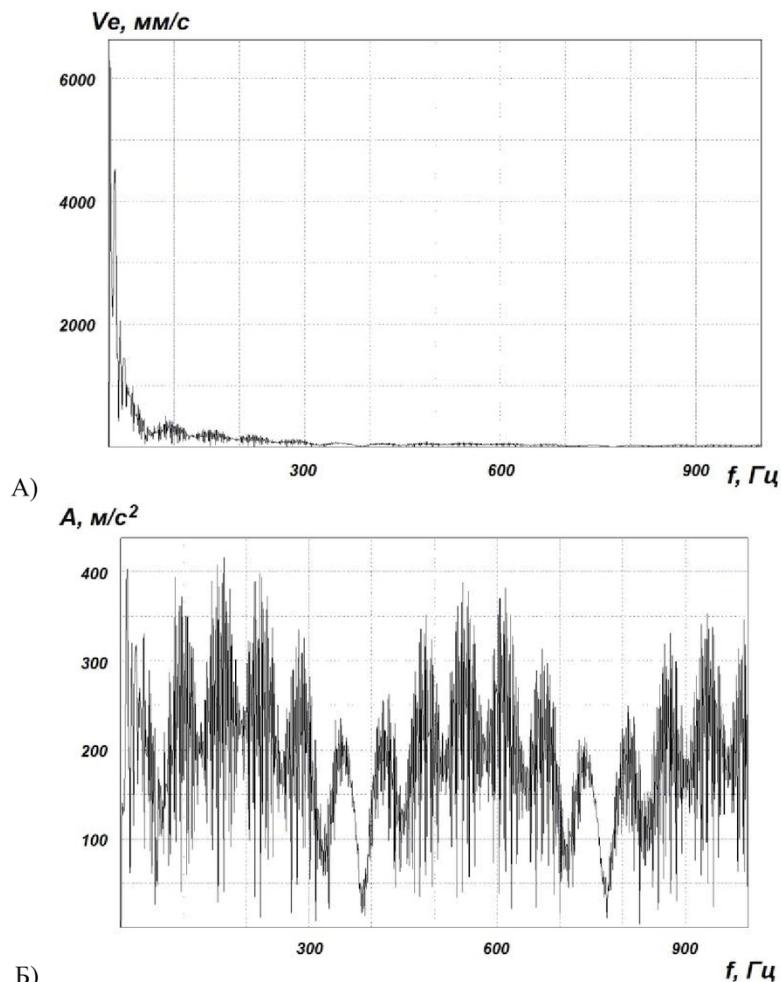


Рис. 5. Пример искажения спектров виброскорости (А) и виброускорения (Б) вибраакустического сигнала, записанного на редукторе ленточного конвейера КЛ – 1000 при температуре окружающего воздуха -11°C .

чи представляют результаты краткосрочного прогнозирования изменения фактического состояния эксплуатируемого оборудования. Этот факт обусловлен актуальностью вопроса по созданию краткосрочного прогноза, способного предоставить оценку вероятности безаварийной работы агрегата до момента проведения ближайшего ремонта. Анализ публикационной активности по тематике настоящего исследования позволил сделать вывод об эффективности использования адаптивных экспоненциальных математических моделей для выполнения краткосрочного прогнозирования. Однако, представляется совершенно очевидным, что на сегодняшний день не была осуществлена апробация данных методик на значительном количестве элементов конструкций горных машин. Адекватных математических моделей, при помощи которых можно осуществить прогноз сразу по нескольким группам различных информативных частот, описывающих дефекты подшипников качения, зубчатых передач, нарушения соосности валов агрегата и т.д. на сегодняшний день не существует; разработка таких моделей является не в пример более сложной задачей, по сравнению с моделированием среднеквадратического значения общего уровня вибрации. Разрабатываемые ЕДК для горнотранспортного, дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования могут с успехом применяться в качестве моделируемых параметров в адаптивных моделях, описывающих все базовые показатели, характеризующие состояние сложной механической системы. В частности, среди таких величин должны быть рассчитаны: гарантированный остаточный ресурс узла и агрегата в целом, ожидаемый остаточный ресурс и оптимальный междиагностический интервал [13, 14].

Кроме, существование такого прогноза, даже краткосрочного, невозможно без выделения тренда детерминированной составляющей виброакустического сигнала, для чего необходима практическая реализация алгоритма полного разделения составляющих сигнала. Многочисленными исследованиями [5, 8, 9] определены наиболее простые и в тоже время эффективные алгоритмы выделения таких положительных трендов, многие из которых основаны на проверке рядов данных по известным критериям [8, 10, 11], что позволяет минимизировать влияние на результат прогнозирования случайных составляющих вибросигнала, вызванных ошибками при установке датчика или сбоями в рабочих циклах оборудования.

Таким образом, результатами проведенных исследований доказано, что только широкое использование на практике полученных научных результатов позволит внедрить в условиях угольной промышленности России систему обслуживания эксплуатируемой техники по ее фактическому техническому состоянию. Внедрение именно такой платформы позволит осуществить необходимый переход от действующей системы планово-предупредительных ремонтов и «аварийного» обслуживания. Обоснованная концепция обслуживания горной техники позволит минимизировать вероятность возникновения аварийных ситуаций, уменьшив непроизводительные простои и повысив уровень безопасности для проводимых работ. Решение задачи по обоснованию критерииев предельного состояния отдельных узлов и агрегатов горных машин, дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования позволило приступить к разработке алгоритмического кода для математических прогнозных моделей, описывающих процесс зарождения и развития повреждений энергомеханического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герике П.Б. Выбор диагностических критериев для оценки фактического состояния обезвоживающих элеваторов / П.Б. Герике// Вестник Кузбасского государственного технического университета, № 5. – Кемерово. – 2016. – С. 41-48.
- 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). – С. 86–95.
- Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180.
- Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
- Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P. 726.
- S. Delvecchio, G. DElia, E. Mucchi, G. Dalpiaz, Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests, Journal of Vibration and Acoustics, April 2010, Vol. 132, Issue 2, 021008-10, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807.
- 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.
- Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
- Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based

predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.

10. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
11. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
12. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
13. Герике П. Б. Диагностика лебедки подъема на примере карьерного экскаватора ЭКГ 5А. / П. Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 2. – Кемерово. – 2013. – С. 33-35.
14. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. / Novosibirsk: Nauka, 2006. – 227 c.
15. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E., "Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 134(18) – 2012.

REFERENCES

1. Gericke P.B. Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. 2016. #5. Pp. 41-48 (rus).
2. 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).
3. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). Pp. 173–180 (eng).
4. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskikh 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).
5. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726 (eng).
6. Delvecchio S, DElia G., Mucchi E., Dalpiaz G., Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests, Journal of Vibration and Acoustics, April 2010, Vol. 132, Issue 2, 021008-10, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807 (eng).
7. 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 (eng).
8. 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).
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA (eng).
10. 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).
11. 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).
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. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. #2. Pp. 33-35 (rus).
14. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus).
15. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E., "Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 134(18) – 2012 (eng).

Поступило в редакцию 27.12.2016

Received 27 December 2016