

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-111-118

УДК 53.083(430.1)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ACTUAL PROBLEMS OF DIAGNOSIS AND ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE OF MINING EQUIPMENT

Герике Павел Борисович,

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

Gericke Pavel B., C. Sc. (Engineering), Associate Professor

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН, 650065, г. Кемерово пр.
Ленинградский, 10
Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, 650065,
Kemerovo, Russian Federation.

Аннотация. Результаты настоящей работы получены на основе анализа параметров механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин, объем выборки для проведения исследований составил более 30 единиц экскаваторов и буровых станков и более 100 единиц дробильно-сортировочного, горнотранспортного и углеобогащительного оборудования, период наблюдений более 10 лет. Полученные данные оперативного анализа позволили разработать комплекс из более чем 120 диагностических правил, пригодных для выполнения автоматизированного выявления основных повреждений диагностируемого оборудования на основе анализа селективных групп информативных частот. Обоснован выбор основных критериев, которые потенциально могут быть использованы в качестве базовой платформы для совершенствования методологии нормирования параметров упругих колебаний. Сформулированные критерии приняты за основу при разработке индивидуальных спектральных масок высокой степени детализации, предназначенных для нормирования параметров виброакустических волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин. Сформулированы требования к организации комплексного диагностического подхода для оценки технического состояния агрегатов и механизмов по параметрам генерируемой ими вибрации. Показано, что только с широким применением современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность своевременного выявления дефектов оборудования горной техники. Реализация принципов комплексного диагностического подхода сделала возможной разработку единых диагностических критериев оценки фактического состояния сложных механических систем, которые, в свою очередь, могут быть применены для осуществления краткосрочного прогнозирования процесса деградации фактического состояния механизмов. Результаты адаптивного краткосрочного моделирования могут быть использованы для осуществления расчета остаточного ресурса отдельных узлов и агрегатов горных машин и использоваться в качестве одного из базовых элементов системы обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию.

Abstract. The results of this work were obtained on the basis of the analysis of the parameters of mechanical oscillations generated during operation of power mechanical equipment of mining machines, the sampling amount for the study was more than 30 mining shovels and drilling rigs and more than 100 units of crushing and sorting, mining transport, and coal washing equipment, the period of observation was more than 10 years. The obtained data of the operational analysis allowed to develop a set of more than 120 diagnostic rules suitable for performing automated detection of main damages of the diagnosed equipment based on the analysis of selective groups of informative frequencies. The selection of the main criteria that could potentially be used as a basic platform for improving the methodology for the normalization of vibration parameters is substantiated. These criteria are taken as the basis for development of individual spectral masks of a high degree of detail, designed to normalize the parameters of vibroacoustic waves generated by the operation of energy – mechanical equipment of mining machines. The requirements for the organization of a comprehensive diagnostic approach for assessing the technical state of aggregates and mechanisms by vibration parameters are formulated. It is shown

that only with a wide application of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive testing is the opportunity to detect defects in mining equipment in time. The implementation of the principles of a comprehensive diagnostic approach made it possible to develop common diagnostic criteria for assessing the actual state of complex mechanical systems that can be used to implement a short-term prediction of the process of degradation of the actual state of the mechanisms. The results of adaptive short-term modeling can be used to calculate the residual life of units and aggregates of mining machines and be used as one of the basic elements of the maintenance system for its actual technical condition.

Ключевые слова: *вибродиагностика, остаточный ресурс, энерго-механическое оборудование горных машин, управление техническим обслуживанием, нормирование параметров механических колебаний.*

Keywords: *vibration analysis, residual life, power mechanical equipment of mining machines, maintenance management, setting the parameters of mechanical vibrations.*

Современный уровень развития средств и методов неразрушающего контроля позволяет осуществлять выявление самых разных дефектов металлоконструкций и энерго-механического оборудования горных машин, в том числе, находящихся на стадии своего зарождения. Однако, единственным методом, позволяющим получить максимум ценной информации о фактическом состоянии работающей сложной механической системы, остается анализ по параметрам вибрации, причем выбор оптимального набора диагностических методологий анализа параметров вибрации всегда определяется типом объекта диагностирования и спецификой режимов его работы.

Значительный опыт практического виброанализа самого разного горно-шахтного оборудования, в том числе находящегося в предельно изношенном техническом состоянии, позволил сформулировать и указать на некоторые актуальные проблемы и специфические аспекты диагностирования и оценки остаточного ресурса горных машин.

Основными причинами, затрудняющими процесс измерения диагностических параметров, являются следующие: серьезный дефицит времени в условиях промышленных предприятий, отсутствие ограждений вращающихся деталей, труднодоступность измерительных точек, недостаточное или отсутствующее освещение, значительные загрязнения и шероховатость измерительной поверхности (угольная, каменная или металлическая пыль в сочетании со смазкой, остатки краски и т.д.), отрицательная температура окружающего воздуха или ее резкий перепад (рис. 1).

Эти и некоторые другие причины иногда вынуждают проводить измерения в альтернативных точках, что часто приводит к искажению виброакустического сигнала и потере ценной диагностической информации. Причины этого заключаются в особенностях распространения полигармонических волн, проходящих через границы раздела двух или более сред (например, металл – воздух – металл – фундамент). Кроме того, высокочастотные колебания в значительной мере затухают по мере удаления от источника своего возбуждения, а колебания низко- и среднечастотного диапазонов могут претерпевать серьезные искажения [1, 2]. Как показывает практика, именно для таких

условий наибольшую эффективность предоставляет реализация принципов комплексного подхода к анализу параметров вибрации.

Помимо прочего, целый ряд таких значащих факторов, как: цикличность работы механизмов, изменяющиеся частоты вращения и серьезные ударные нагрузки, которые испытывают узлы энерго-механического оборудования горных машин в процессе работы, указывают на затруднения или невозможность использования только лишь какого-то одного метода вибродиагностики для эффективного выявления присущих данному типу оборудования дефектов, в том числе, находящихся на начальной стадии своего развития.

Доказано [3, 4, 5], что комплексный диагностический подход должен включать в себя реализацию как минимум двух базовых методов: прямого спектрального анализа и анализа огибающей, причем методология анализа огибающей спектра наиболее эффективно может применяться для диагностики подшипников качения (повреждения и/или наклеп сепаратора, изменение формы тел качения, повреждения внутреннего и внешнего колец, нарушение режима смазки, ослабление посадки и увеличение зазоров подшипников) и зубчатых передач (износ и выкрашивание зубчатых колес, нарушение соосности и перекосы валов в редукторах). Если позволяет время, затрачиваемое на проведение диагностирования, эффективной может оказаться реализация методологии эксцесса для проведения экспресс-анализа состояния подшипников качения. Преимущество эксцесса заключается в отсутствии необходимости в наличии априорной информации о геометрии подшипника – достаточно знать частоту вращения вала и предполагаемый вид дефекта – зарождение, эксплуатационный износ или дефект монтажа.

Кроме того, в рамках комплексного диагностического подхода, в ряде случаев, когда это необходимо, достаточно эффективно могут быть реализованы:

- анализ кепстра (диагностика состояния редукторов), анализ характеристики выбега (выявление дефектов электрической природы – магнитная асимметрия якоря, перекося фаз, смещение в магнитном поле и т.д.), тест-удар (для определения собственных частот агрегата), анализ временной реализации (диагностика тихоходных под-

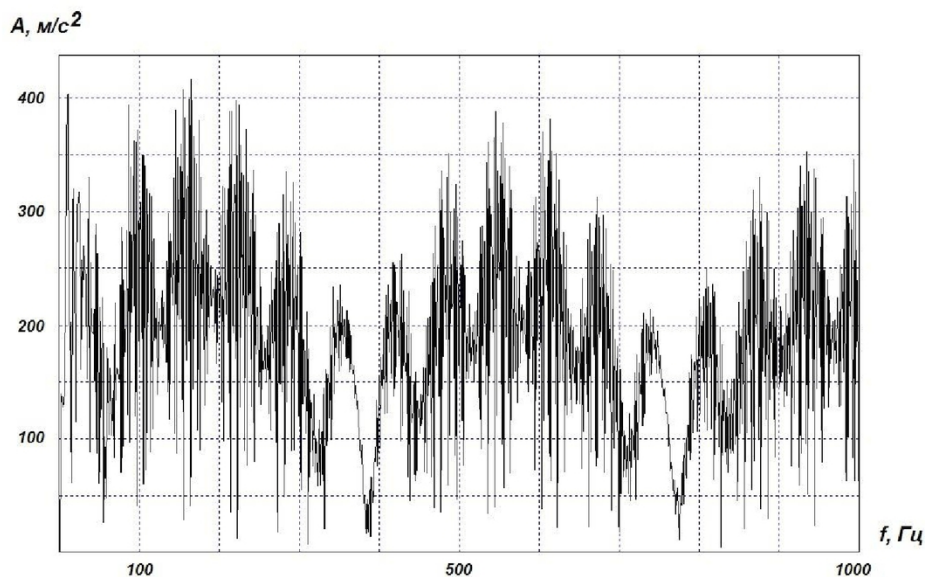


Рис. 1. Спектр по параметру виброускорения, полученный на редукторе ленточного конвейера В-1200 при температуре окружающего воздуха -11°C (пример искажения).

шипников и редукторов, в тех случаях, когда применение стандартных подходов спектрального анализа является не эффективным).

Именно результаты комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, полученные в рамках настоящего исследования, позволили формализовать более 120 диагностических признаков и правил выявления дефектов оборудования горных машин. Данные признаки для удобства использования были сгруппированы по наиболее распространенным типам дефектов энерго-механического оборудования (нарушение жесткости системы, расцентровка валов, дефекты подшипников и зубчатых передач, неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты электрической природы, дефекты ДВС, прочие дефекты (ременные и цепные передачи, соединительные муфты и т.п.).

До 80 % от общего числа диагностических признаков, подвергшихся формализации, сосредоточены в области прямого спектрального анализа, что объясняется сложностями алгоритмизации наборов диагностических правил с применением других методологий, использование которых часто оправдано только в случаях наличия неявного результата диагностирования или для подтверждения правильности уже поставленного диагноза.

Полученные результаты позволили приступить к созданию группы единых диагностических критериев (ЕДК) оценки фактического состояния оборудования горных машин. Актуальность решения этой задачи трудно переоценить, т.к. на практике до сих пор отсутствует универсальный комплексный критерий оценки технического состояния горных машин по параметрам генерируемой ими вибрации, в соответствии с которым можно провести детальное нормирование отдель-

ных составляющих сигнала, оценить степень их опасности и скорости развития. Кроме того, использование на практике таких единых критериев открывает путь к созданию эффективных деградационных математических моделей, реализация которых на практике позволит заранее определить необходимое время замены изношенных элементов и предсказать момент аварийного выхода технологического оборудования из строя.

Результаты ранее проведенных исследований [7, 8] по моделированию процесса деградации технического состояния на основе прогнозирования вариативности единых диагностических критериев для подшипников качения, редукторов переборного типа и нарушения центровки [8, 9, 10] позволили установить базовые диагностические зависимости между изменением величин ЕДК и параметрами, характеризующими фактическое состояние элементов механической системы. Очевидно, что работу по созданию прогнозных моделей и разработке ЕДК необходимо продолжить, количество единых критериев должно совпасть с числом основных групп дефектов энерго-механического оборудования, возникновение и развитие которых потенциально возможно при эксплуатации горной техники, в том числе, находящейся в предельно изношенном состоянии (см. примеры на рис. 2).

Выявленные основные закономерности изменения технического состояния диагностируемого оборудования были использованы автором в качестве базовой платформы [8, 10] при решении задачи совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе оборудования горных машин, для чего рассматривалась вся совокупность сформулированных диагностических признаков отдельно для каждой из основных групп дефектов,

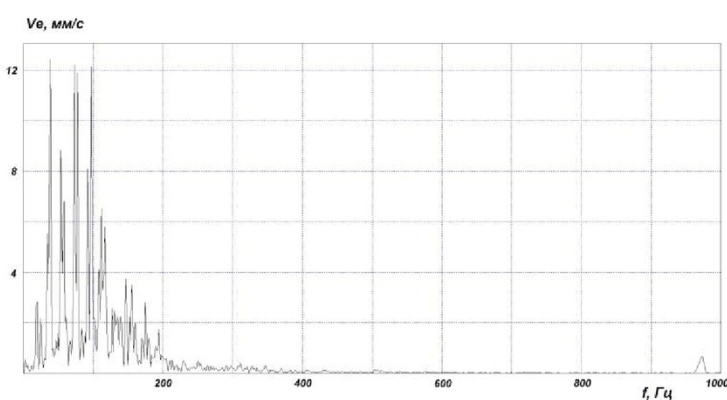
соответствующих конкретному типу механизмов (среди которых нарушение жесткости системы, нарушение соосности валов, дефекты подшипников и зубчатых передач, неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты ДВС, дефекты рабочих элементов насосов и компрессоров – валов, колес, лопастей, поршневых групп, винтов и т.д., дефекты электрической природы, прочие дефекты – муфты, ременные и цепные передачи и т.п.).

Опыт разработки ЕДК для диагностики подшипников качения [1, 3, 8, 11] подсказывает, что данный тип критериев должен основываться на результатах комплексного анализа параметров виброакустических волн, причем конкретное сочетание методов анализа зависит, в первую очередь, от типа объекта диагностирования. Так, рас-

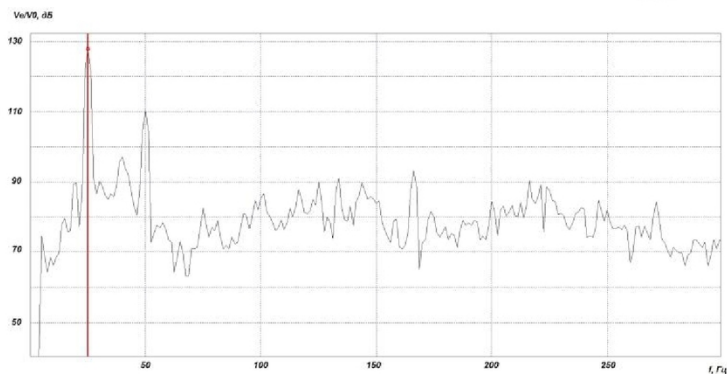
считываемый единый диагностический критерий, пригодный для диагностики и прогнозирования процесса изменения технического состояния подшипников может быть основан на результатах анализа параметров исходных характеристик с применением как минимум трех базовых диагностических подходов - спектрального анализа по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, анализа огибающей спектра и эксцесса.

Именно таким образом, ЕДК, наиболее подходящий для выполнения оценки состояния однотипных объектов, может быть разработан с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [3, 8], включающих пошаговую сегментацию объектов на группы в зависимости от степени

А) Расцентровка левого электродвигателя с редуктором подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70.



Б) Дисбаланс ротора сетевого двигателя экскаватора ЭКГ-5А.



В) Перекос осей валов первой и второй ступени, абразивный износ зубчатых зацеплений провала редуктора подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70.

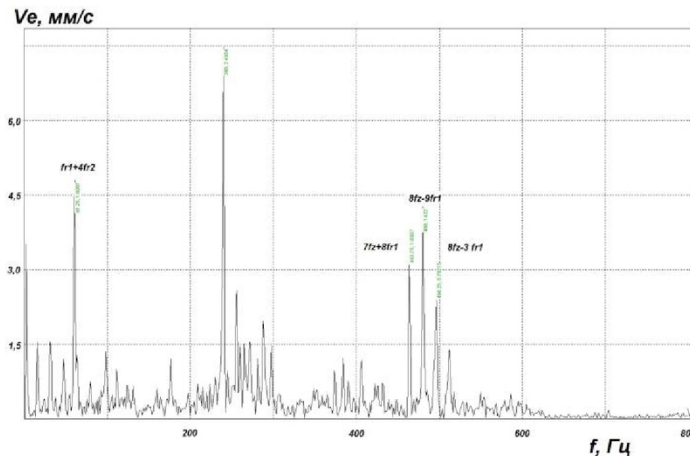


Рис. 2. Примеры спектров, содержащих диагностические признаки наличия недопустимых дефектов энерго-механического оборудования горных машин.

развития дефектов. Замена вектора диагностических признаков на скалярную величину позволяет сформировать обобщенный критерий, используя геометрическую интерпретацию для выполнения наиболее оптимальной скаляризации.

Кроме того, алгоритм разработки ЕДК для каждого из типов дефектов энерго-механического оборудования в обязательном порядке должен включать процедуру клиппирования, т.е. удаления из спектра всех «лишних» гармонических составляющих, не имеющих отношения к рассматриваемому типу дефектов. Число разрабатываемых процедур клиппирования должно равняться количеству потенциально возможных дефектов исследуемого оборудования.

Реализованные в рамках настоящей работы процедуры клиппирования включают в себя алгоритм уточнения оборотной частоты вращения, основанный на принципе поиска составляющих спектра с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне. Среди множества аналогичных процедур, отличающихся принципами выявления потенциально возможных оборотных частот (не всегда совпадающих с максимально выраженными гармониками в низкочастотном диапазоне), была выбрана и реализована программа расчета, примененная ранее в работе [3], которая основана на принципе оценки массивов амплитуд «пиков» гармоник и реализует дальнейший выбор на основе оценки наиболее вероятной оборотной частоты с учетом расчета вероятности для осуществленного выбора. Таким образом, этот алгоритм обладает явными преимуществами по сравнению со стандартными программами обработки данных, которые основаны на принципе поиска гармоник с максимальной амплитудой в низкочастотном диапазоне спектра [1, 3, 5]. Кроме того, выбор данного алгоритма уточнения оборотной обусловлен высокой достоверностью получаемых результатов при работе со спектрами виброскорости и виброускорения подшипников качения, что подтверждает эффективность этого алгоритма для использования при разработке ЕДК для других типов объектов диагностирования.

В то же время, реализуемые алгоритмы клиппирования лишь частично решают проблему разделения детерминированной и случайной компонент виброакустического сигнала, что явно недостаточно для осуществления даже краткосрочного прогнозирования процесса деградации сложных механических систем. Именно поэтому необходимо использование процедуры полного разделения компонент вибросигнала и отыскания полезного тренда, определяемого изменением детерминированной составляющей. Сегодня разработано большое количество таких процедур [3, 12, 13], которые позволяют осуществить выявление тренда полезной составляющей из зашумленного сигнала, например, на основе проверки рядов данных на наличие полезного тренда по критериям Фише-

ра или Стьюдента. Использование для выделения тренда совокупности значений ЕДК вместо параметров реальной временной волны упрощает процедуру расчета, сохраняя при этом требуемую достоверность получаемых результатов. В случае, если рассматриваемые ряды данных содержат полезный непериодический тренд, то задача по отысканию тренда сводится к поиску аналитической зависимости, как можно более точно описывающей детерминированную составляющую вибрационного сигнала. Для решения этой задачи, как правило, используют метод наименьших квадратов [3], результатом производимых расчетов должно являться решение уравнения, характеризующего зависимость величин усредненных ЕДК от времени. Реальные значения единого диагностического критерия будут находиться вблизи полученной линии регрессии в пределах границ доверительного интервала. Данные, полученные в результате выделения тренда полезной составляющей виброакустического сигнала, могут быть использованы при осуществлении прогнозирования изменения технического состояния сложных механических систем. Построение долгосрочного прогноза изменения параметров оборудования горных машин в условиях действующей системы планово-предупредительных ремонтов не является актуальной задачей [3, 5, 14], именно поэтому приоритет отдается решению задачи краткосрочного прогнозирования.

На практике [3, 14] удается добиться максимального эффекта от реализации алгоритмов адаптивного краткосрочного прогнозирования, позволяющих получить адекватные результаты моделирования на один-два диагностических интервала вперед. Спецификой применения адаптивных методов является выбор параметра экспоненциального сглаживания, с ростом величины которого увеличивается значимость данных последних измерений диагностируемого параметра и плохо сглаживаются случайные колебания. Напротив, уменьшение параметра экспоненциального сглаживания приводит к лучшему сглаживанию кривой, однако при этом данные последних замеров практически не оказывают влияния на характер моделируемого процесса [3, 5]. Все это обуславливает значительное влияние конкретных задач моделирования на выбор величины параметра сглаживания, причем при малом числе циклов моделирования данный параметр должен стремиться к единице. Сложность применения параметра сглаживания объясняется тем, что его фактическая величина может быть определена только лишь на основе анализа представительного объема диагностической информации, полученной на однотипном оборудовании в течение достаточно длительного периода времени. При смене объекта диагностирования работу по определению оптимальной величины экспоненциального сглаживания необходимо начинать заново, именно

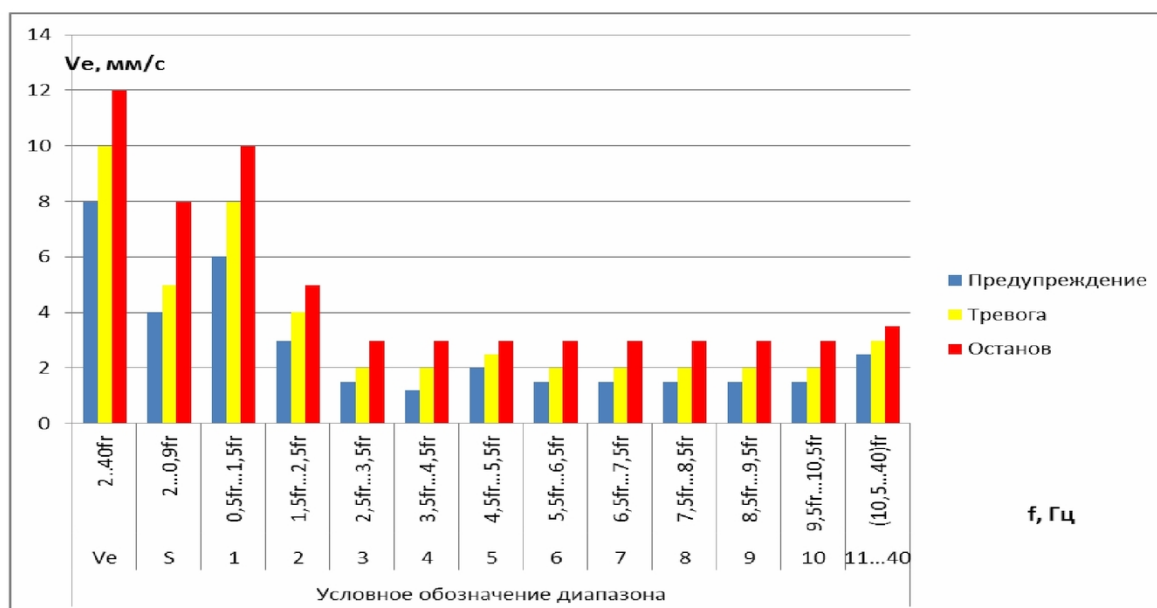


Рис. 3. Спектральная маска, разработанная для электродвигателей подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70.

поэтому величины данного параметра определены на сегодняшний день лишь для незначительного круга элементов технических устройств, большую часть которых составляют подшипники различного типа и конструкции, а также редуктора переборного типа [3, 5, 8, 10].

Автоматизировать алгоритмы диагностирования и упростить задачу анализа и прогнозирования технического состояния энерго-механического оборудования горных машин можно было бы с помощью применения спектральных масок (см. пример на рисунке 3). На практике реализация такой концепции значительно усложняется наличием большого типового и номенклатурного ряда горного оборудования, режимы работы которого часто отличаются от штатных. Разработать индивидуальные спектральные маски высокой степени детализации для всех типов и марок горных машин, эксплуатируемых в угольной и горнорудной промышленности, не представляется возможным. Это обусловлено необходимостью использования значительного объема статистической информации по параметрам механических колебаний однотипного оборудования, работающего в аналогичных условиях на схожих режимах, которую невозможно получить без значительных затрат времени и средств. Таким образом, задача совершенствования методологии нормирования параметров вибрации, генерируемой при работе агрегатов горной техники и создания масок на сегодня может быть решена только для очень ограниченного модельного ряда машин и агрегатов.

Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, позволили осуществить прогнозирование процесса деградации технического состояния объектов диагностирования для двух типов единых диагностических критериев – ЕДК для

дефектов подшипников и нарушения центровки. В соответствии с результатами прогнозирования, объект безаварийно отработал два диагностических интервала (1 календарный месяц), после чего экскаватор был остановлен для проведения годового ремонта согласно нормам системы ППР. В результате выполненных работ по центровке валопровода генераторной группы повышенный уровень механических колебаний был устранен, техническое состояние агрегата признано допустимым.

Результаты выполненных ранее исследований [8, 10] позволили сформулировать базовые диагностических признаки оценки состояния зубчатых передач по параметрам вибрации, на основе которых разработан был ЕДК для диагностики редукторов переборного типа, широко используемых в конструкции горной техники. Использование единого критерия оценки на практике в качестве основного моделируемого параметра, при помощи которого описывается фактическое состояние объекта диагностирования, позволит оптимизировать процесс прогнозирования и максимально повысить его достоверность.

Очевидно, что работу по созданию единых диагностических критериев оценки технического состояния энерго-механического оборудования горных машин необходимо продолжить. ЕДК для оценки состояния большого числа различных узлов и элементов оборудования горной техники с успехом могут применяться при реализации алгоритмов адаптивных деградационных моделей, позволяющих провести краткосрочное прогнозирование на один-два интервала моделирования, что вполне достаточно в условиях действующей на предприятиях отрасли системы планово-предупредительных ремонтов [13]. Кроме того, решение задачи по разработке ЕДК для всех типов

энерго-механического оборудования горных машин и созданию прогностических моделей, описывающих процесс изменения технического состояния оборудования по параметрам вибрации, является одним из условий для реализации систем обслуживания техники по её фактическому состоянию [5, 15].

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили решить некоторые актуальные проблемы, обусловленные спецификой условий эксплуатации и кинематикой объектов диагностирования. Обоснованный комплексный диагностический подход к вопросам анализа параметров вибрации предоставил дополнительные возможности для создания единых критериев оценки состояния сложных механических систем. Изучение процессов формирования и развития упругих механических колебаний впервые позволило провести детальное нормирование спектров для некото-

рого энерго-механического оборудования ряда горных машин, в частности, генераторных групп, редукторов и электродвигателей подъемных лебедок и механизмов поворота карьерных экскаваторов, что позволяет полностью формализовать правила оценки изменения спектрального состава полигармонических волн, генерируемых при их работе. Полученные результаты убедительно доказали, что только реализация на практике таких элементов системы обслуживания техники по фактическому состоянию, как усовершенствованная методология нормирования параметров механических колебаний и основанное на результатах диагностики математическое моделирование процессов деградации технического состояния машин и механизмов, позволит избежать роста непроизводительных простоев оборудования и серьезных аварийных ситуаций, возникающих из-за недопустимого состояния эксплуатируемого оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing* #56-57(2015). 173–180
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. 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.
5. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
6. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. *CSI, Knaxville, TN 37923, USA*.
7. 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.
8. Герике П.Б. К вопросу создания универсальной прогностической деградационной модели для энерго-механического оборудования горных машин /П. Б. Герике// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №2. – Кемерово. – 2017. С. 72-81.
9. 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.
10. Герике П.Б. Опыт создания моделей деградации технического состояния динамического оборудования экскаваторов – драглайнов на основе анализа параметров механических колебаний /П. Б. Герике// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №3. – Кемерово. – 2015. С. 66-73.
11. 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
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803
13. Кравченко, В. М. Повреждения подшипников качения в результате износа. /В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин.// Горное оборудование и электромеханика. - № 2, 2013. – С. 45-47.
14. 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.
15. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

REFERENCES

1. 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 (Eng)
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», *Mechanical Systems and Signal Processing* #56-57(2015). 173–180 (Eng)
3. Sushko A. E. *Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system* [Development of special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (Rus)
4. F. Balducci, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalanced 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. (Eng)
5. *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. p.828. (Rus)
6. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (Eng)
7. 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)
8. Gericke P.B. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2017. #2. pp. 72-81. (Rus)
9. 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. p.156. (Rus)
10. Gericke P.B. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2015. #3. pp. 66-73. (Rus)
11. 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)
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803 (Eng)
13. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2013. #2. pp. 45-47. (Rus)
14. Eshcherkin P.V. *Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskiykh burovnykh stankov* [Development of a technique of diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (Rus)
15. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (Eng)

Поступило в редакцию 30.08.2017
Received 30.08.2017