

берлитовых руд./ Б. Л. Герике, А. П. Филатов, П. Б. Герике, В. И. Клишин. // ФТПРПИ. – 2006. - № 6, С. 98-105.

12. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин./ П. Д. Крестовоздвиженский, В. И. Клишин, С. М. Никитенко, П. Б. Герике// ФТПРПИ. – 2014. - № 6, С. 106 - 114.

13. Новые армирующие вставки для тангенциальных поворотных резцов./ В. И. Клишин, С. М. Никитенко, Б. Л. Герике, П. Д. Крестовоздвиженский// Горный журнал. – 2014. - №12, – С. 89-92.

*Поступило в редакцию 8.09.2015*

**UDC 622.232.72:622.02.2**

## **SHEARER MACHINE WORKING BODIES FOR THE EXTRACTION OF SOLID MINERALS**

**Gericke Boris L.<sup>1,2</sup>.**

Dr. Sc. (Engineering), Professor, Chief researcher, e-mail: [gbl\\_42@mail.ru](mailto:gbl_42@mail.ru)

**Klishin Vladimir I.<sup>1,2</sup>,**

Corresponding member of the RAS, E-mail: [klishinbi@icc.kemsc.ru](mailto:klishinbi@icc.kemsc.ru)

<sup>1</sup>I Institute of Coal SB RAS. Leningradskiy av., 10, Kemerovo, 650065.

<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyya, Kemerovo, 650000

**Abstract.** This article examines matters relating to the equipping of the working bodies of the mountain of Shearer machines disk tool for extraction of solid minerals. Shows the results of industrial testing of the working bodies of the continuous destruction of complicated structured coal seams, frozen sand and ore bodies of various lithological composition. It is shown that the use of disk tool enables you to efficiently develop solid minerals mechanically.

**Keywords:** Shearer machine, working body, disk tools, continuous mechanical destruction, solid minerals arrays.

### REFERENCES

1. Ispytanija ispolnitel'nogo organa s diskovymi sharoshkami / A.N. Korshunov, V.I. Nesterov, B.L. Gerike i dr. // Ugol'noe mashinostroenie. – M.: CNIJeIugol', 1977. – Vyp. 4. – S. 1-4.
2. Korshunov A.N., Revskij D.F., Nesterov V.I. i dr. Opyt razrabotki peschano-glinistykh plastov s tverdymi vkljuchenijami // Gornyj zhurnal – 1984. - № 4. – S. 6-9.
3. Kudlaj E.D. O parametrah mehanicheskogo razrushenija mnogoletnemerzlyh krupnooblomochnyh porod // Kolyma – 1985. – № 10. – S. 4-6.
4. Loguncov B.M.. Razvitie prohodcheskih kombajnov v 1971-1975 g.g. // Gornoe i neftepromyslo-voe mashinostroenie /Itogi nauki i tehniki. – M.: VINITI, 1976. – t. 4. – S. 7 – 98.
5. Logov A.B., Gerike B.L., Raskin A.B. Mehanicheskoe razrushenie krepkih gornyh porod. – Novo-sibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1989. – 141 s.
6. Gerike B.L., Lizunkin V.M. Jenergeticheskaja ocenka kachestva processa mehanicheskogo razrushe-nija gornyh porod. // Gornyj zhurnal – 1998. - № 6. – S. 51-54.
7. Nesterov V.I., Gerike B.L. Vybor racional'nyh rezhimov razrushenija tverdyh vkljuchenij dis-kovym skalyvajushhim instrumentom // Teorija i praktika razrushenija uglej i gornyh porod / Materia-ly nauchnogo soveta po probleme «Novye processy i sposoby proizvodstva rabot v gornom dele»: GKNT SSSR. – M. – 1978. – S. 44-45.
8. Lizunkin V.M., Volkov E.S., Kravcov V.M. i dr. Ispytanija kombajnovogo sposoba vyemki rud // Gornyj zhurnal – 1989. - № 2. – S. 36-38.
9. Gerike B.L., Lizunkin V.M., Lizunkin M.V. Razrushenie peskov mnogoletnemerzlyh rossypej diskovym skalyvajushhim instrumentom ochistnyh kombajnov. //Kolyma.-1995.- № 11-12. – S.20-24.
10. Lizunkin V.M., Gerike B.L., Ucyn Ju.B. Mehanizirovannaja podzemnaja razrabitka krepkih rud malomoshhnyh mestorozhdenij. – Chita: ChitGU, 1999. – 238 s.
11. Koncepcija porodorazrushajushhego ispolnitel'nogo organa mashiny dlja podzemnoj razrabitki kimberlitovyh rud./ B. L. Gerike, A. P. Filatov, P. B. Gerike, V. I. Klishin. // FTPRPI. – 2006. - № 6, S. 98-105.
12. Vybor formy armirujushhih vstavok dlja tangencial'nyh poverotnyh rezcov gornyh mashin./ P. D. Krestovozdvizhenskij, V. I. Klishin, S. M. Nikitenko, P. B. Gerike// FTPRPI. – 2014. - № 6, S. 106 -114.
13. Novye armirujushchie vstavki dlja tangencial'nyh poverotnyh rezcov./ V. I. Klishin, S. M. Ni-kitenko, B. L. Gerike, P. D. Krestovozdvizhenskij// Gornyj zhurnal. – 2014. - №12, – S. 89-92.

*Received 8 September 2015*

УДК 53.083(430.1)

**АДАПТИВНОЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ДЕГРАДАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ГРУПП  
КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ  
ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ ИХ РАБОТЕ ВИБРАЦИИ**

Герике Павел Борисович  
канд. техн. наук, доцент, e-mail: am\_besten@mail.ru

Институт угля СО РАН, 650065, г. Кемерово, Ленинградский пр. 10.

**Аннотация:** В настоящей работе приводится анализ опыта разработки математических прогнозных моделей изменения технического состояния сложных механических систем. Приведена классификация дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов, на основе которой обосновано использование конкретных методов вибраанализа, наиболее подходящих для проведения эффективного контроля и разработки единых диагностических критериев изменения технического состояния объектов диагностирования. Обоснована необходимость применения комплексного диагностического подхода для оценки технического состояния механизмов по параметрам генерируемой или вибрации. Показано, что только с широким использованием современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность для своевременного выявления дефектов динамических агрегатов карьерных экскаваторов и разработки прогнозных моделей изменения их технического состояния. Результаты проведенных исследований безапелляционно доказывают принципиальную возможность создания адекватных моделей изменения состояния, подходящих для выполнения краткосрочного прогнозирования, разработка которых является необходимым базовым условием для осуществления качественного перехода ремонтных подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию. Платформой для реализации элементов концепции такой системы послужит разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний и создаваемые адаптивные прогнозные модели развития дефектов, пригодные для описания процессов деградации состояния широкого типового ряда агрегатов, используемых в конструкциях горной техники.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, прогнозное моделирование, нормирование механических колебаний, управление техническим обслуживанием, карьерные экскаваторы.

В рамках проведения работ по техническому диагностированию и неразрушающему контролю средств механизации открытых горных работ на предприятиях угольной промышленности Кузбасса учеными и специалистами ИУ СО РАН и ФГБОУ ВПО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева» в настоящее время выполняется цикл исследований по выявлению критериев предельного состояния и разработке прогнозных моделей, описывающих процессы деградации динамического оборудования горных машин. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в недопустимом техническом состоянии сегодня находится до 25% от общего числа технических устройств, эксплуатируемых на предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса и подлежащих обязательной процедуре экспертизы промышленной безопасности.

Объектами данного исследования являются технические устройства, такие как одноковшовые карьерные экскаваторы, дизель-гидравлические и электрические буровые станки и установки, дробильно-сортировочное и углеобогатительное оборудование, автосамосвалы, бульдозеры, вспомо-

гательная техника, оборудование гидромеханизации и т.д. В качестве основного метода, который был использован при выполнении настоящего исследования, выбран контроль по параметрам вибрации, включающий в себя целую группу диагностических подходов, основанных на специализированной математической обработке исходного виброакустического сигнала. Контроль технического состояния механических систем по параметрам механических колебаний с высокой степенью достоверности позволяет выявлять абсолютное большинство дефектов диагностируемого динамического оборудования вне зависимости от стадии и степени их развития; применение вибродиагностики является обязательным при выполнении процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств и регламентировано рядом руководящих документов Ростехнадзора РФ [1, 2].

Очевидно, что создание комплекса прикладных математических прогнозных моделей, описывающих процессы деградации технического состояния динамического оборудования горных машин (развитие таких дефектов, как дисбалансы ротора;

нарушение соосности, перекосы и искривления валов агрегатов; дефекты подшипников качения; нарушение жесткости системы и/или структурный резонанс; повреждения зубчатых передач; соединительных муфт и т.д.) и позволяющих выполнять средне- и долгосрочное прогнозирование изменения параметров технического состояния сложных механических систем по результатам анализа параметров генерируемой ими вибрации является актуальной научной задачей.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют математические модели, прогнозирующие процесс изменения технического состояния динамического оборудования карьерных экскаваторов, как наиболее сложных и дорогостоящих технических устройств, применяемых при реализации технологии добычи полезных ископаемых открытым способом.

Универсальной прогнозной математической модели, описывающей деградационные процессы изменения технического состояния сложных механических систем, эксплуатируемых в условиях угольной промышленности, по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации и обладающей высокой достоверностью прогноза при достаточной адекватности на сегодняшний день не существует. Это объясняется недостаточной изученностью вопросов динамики горных машин, практическим отсутствием представительных баз данных по параметрам вибрации такого типа оборудования (включающих результаты мониторинга технического состояния), сложностью интерпретации полученных результатов, трудностями в реализации предлагаемых громоздких и не всегда адекватных математических моделей.

Разработка адекватных прогностических моделей развития дефектов узлов и механизмов горных машин, основанных на анализе параметров механических колебаний, невозможна без устойчивой теоретической базы [3], учитывающей характер изменения спектрального состава исследуемых характеристик [4].

Кроме того, эффективное моделирование процессов деградации технического состояния невозможно без комплексного использования результатов анализа параметров исходных виброакустических волн при помощи сразу нескольких диагностических методов (классическое сочетание – прямой спектральный анализ в стандартном и расширенном частотном диапазонах, экцесс, анализ огибающей спектра [5], иногда к указанной совокупности методов целесообразно добавить кепстральную обработку и анализ ударных импульсов [6]). Для каждого отдельного элемента конструкции динамического оборудования горных машин и/или группы сопутствующих дефектов должен быть предложен свой единый диагностический критерий оценки технического состояния, учитывающий результаты комплексной обработки исходных данных несколькими

различными методами вибранализа.

Значительная часть существующих математических моделей [3, 7], разработанных для описания процессов изменения технического состояния технологического оборудования угольной промышленности обладают значительными общими недостатками – узкая область применения (единичный элемент конструкции агрегата – например, подшипник редуктора переднего двигателя вращателя дизель-гидравлической буровой установки DML-LP или подшипник сетевого двигателя экскаватора ЭШ 10/70) и недостаточная апробация полученных результатов моделирования.

При построении долгосрочных прогнозов изменения параметров, характеризующих техническое состояние объектов диагностирования, наибольшее распространение получил метод экспоненциальной экстраполяции данных эксперимента. В рамках действующей на предприятиях угольной и горнорудной промышленности системы планово-предупредительных ремонтов все сроки выведения технических устройств в ремонт или на проведение технического обслуживания четко регламентированы, поэтому гораздо более важным является наличие достоверной информации о том, что объект диагностирования способен работать без возникновения аварийных отказов до очередного ремонта без принятия дополнительных мер восстановительного характера. Наиболее эффективное решение этой задачи предоставляется адаптивное краткосрочное прогнозирование процесса деградации технического состояния исследуемого объекта, наилучшим образом использующее экспериментальные данные последних измерений, корректируя на их основе параметры используемой модели, адаптируя её к изменившимся внешним условиям. Проведенные исследования [3, 8] показали состоятельность разработанных краткосрочных прогностических моделей, однако, их главным недостатком является узкая область применения полученных результатов. Как правило, такие работы связаны с разработкой единого диагностического критерия, основанного на обобщении результатов применения методологии различных диагностических подходов и оригинальных способов фильтрации исходных данных, однако область таких моделей обычно ограничивается самым изученным объектом вибранализа – подшипниками качения [8, 9].

Математические модели, прогнозирующие минимальный гарантированный и ожидаемый остаточный ресурс технологического оборудования и использующие в качестве основного и часто единственного диагностического критерия общий уровень среднеквадратического значения виброскорости получили в последнее время широкое распространение, их алгоритмы успешно реализуются в программном обеспечении многих отечественных фирм (например, Dream for Windows от ЗАО «ВАСТ», г. С.-Петербург или Аврора от ООО «Вибро-Центр», г. Пермь).

Качественное отличие исследований, проводи-

мых в рамках настоящей работы заключается в том, что совершенствование методологических подходов к диагностике сложных механических систем ориентировано на решение задач по проблематике создания моделей деградации технического состояния совершенно различных узлов и агрегатов – синхронных и асинхронных двигателей, генераторов, подшипников качения, соединительных муфт различной конструкции, зубчатых передач и других элементов динамического оборудования одноковшовых карьерных экскаваторов.

Для разработки достоверной прогнозной модели необходимо осуществить выбор, обоснование и нормирование критериев технического состояния, пригодных для выполнения оценки наличия и степени развития повреждений динамического оборудования.

В качестве критериев предельного состояния эффективным может оказаться использование сразу нескольких информативных показателей, характеризующих степень развития повреждений и общее техническое состояние объекта диагностирования. Необходимый и достаточный минимум диагностической информации, полностью характеризующей фактическое состояние сложной механической системы может быть получен при помощи анализа следующих основных параметров вибраакустического сигнала:

- максимальные амплитуды подшипниковых и зубчатых частот по параметру виброускорения;
- общие уровни среднеквадратических значений (СКЗ) виброскорости и виброускорения в стандартном и расширенном частотных диапазонах;
- относительно узкие частотные полосы, диапазоны или отдельные компоненты спектра, свидетельствующие о наличии повреждений однотипного характера (например, гармонические ряды нарушения жесткости системы  $[0,4f_R \dots 24f_{R\max}]$  или расцентровки двигателя с редуктором  $[f_R \dots 4\dots 6f_R]$ );
- размах виброперемещения в стандартном частотном диапазоне;
- СКЗ виброскорости в октавной полосе частот, включающей в себя частоту вращения ротора  $[10, 11]$ .

Разработка единого диагностического критерия (ЕДК) оценки технического состояния по параметрам вибраактивности каждого из конструктивных элементов динамического оборудования драглайнов является актуальной научной задачей. Очевидно, что из-за особенностей и ограничений на область применения каждого из существующих методов вибродиагностики [10], набор диагностических параметров, необходимый для создания ЕДК для каждого из элементов конструкции экскаватора, будет уникalen.

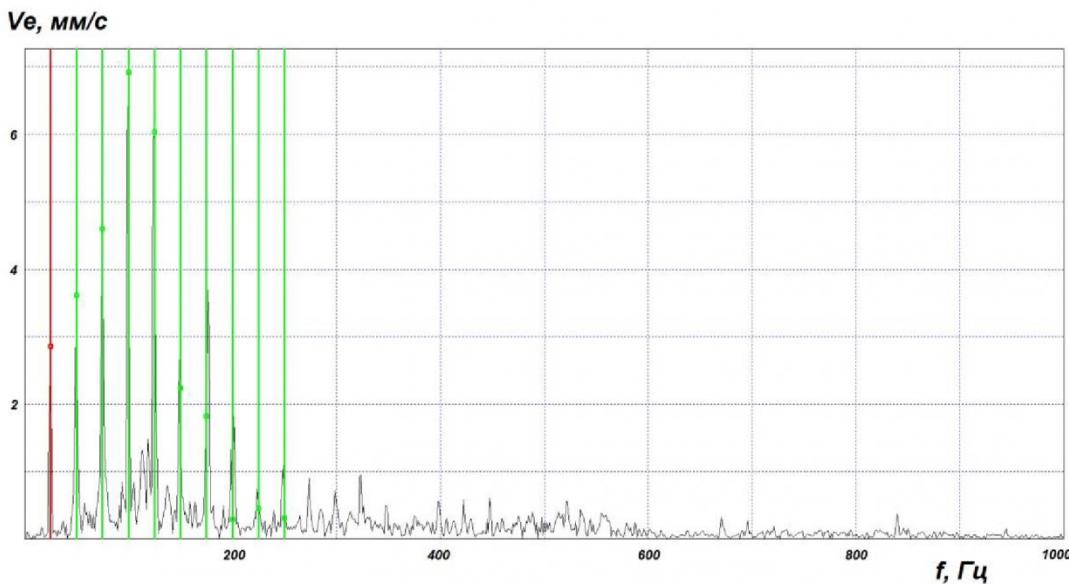
Именно распределенный подход к выбору критериев предельного состояния является отличительной особенностью предлагаемой модели, в то время как другие исследователи [3, 7, 12] рассматривают в качестве информативного критерия

оценки только параметр среднеквадратического значения виброускорения или виброскорости в стандартном частотном диапазоне.

Обзор научных публикаций по данной тематике показал, что существующие алгоритмы автоматизированного поиска дефектов по частотным наборам [7, 9, 12] несовершенны. Разработка алгоритмов автоматизированной диагностики, основанных на выявлении в спектре информативных частот проявления дефектов, является широко распространенным подходом, направленным на решение задач практического вибранализа. Однако реализация такого подхода требует наличия базы данных по дефектам конкретного однотипного оборудования и может быть применена только на нем. Кроме того, точность данного метода сильно зависит от характера исследуемых полигармонических волн, точного соблюдения методологии сбора диагностических данных, наличия шумов или искажений спектра.

Анализ диагностической информации, полученной в рамках выполнения настоящего исследования, позволил сгруппировать дефекты динамического оборудования карьерных экскаваторов по 7 основным типам, которым соответствуют более 60 базовых диагностических признаков по параметрам вибрации. Причины их возникновения и развития можно укрупненно классифицировать по трем основным сегментам. Во-первых, это дефекты изготовления, т.е. возможная неисправность закладывается еще на заводе при использовании некачественных материалов или из-за нарушения технологических операций (например, не соблюдение характеристик используемого металла). Ко второму сегменту относятся дефекты монтажа, некачественно проведенная установка узла может сократить его ресурс в десятки раз (например, перекос валов редуктора). К третьему сегменту настоящей классификации относят эксплуатационные дефекты, проявляющие себя уже в процессе работы оборудования (например, абразивный износ или выкрашивание зубчатых шестерен вследствие значительного превышения расчетных нагрузок, нарушения режима смазки или нарушения соосности валов редуктора). Как правило, на одном и том же агрегате может встречаться комбинация дефектов, возникновение и развитие которых вызвано сразу несколькими из вышеперечисленных причин.

Одним из способов повышения эффективности результатов диагностики является уточнение обратной частоты вращения вала, такая процедура хорошо изучена и активно используется при проведении исследований [8, 13]. Такой алгоритм способен значительно повысить точность построения спектральных масок, используемых для нормирования спектрального состава полигармонической волны. Достаточно полные классификаторы дефектов динамического оборудования [12] могут с успехом применяться для разработки спектраль-



*Рис. 1. Спектр по параметру выброскорости, записанный на генераторе собственных нужд вспомогательного трёхмашинного агрегата экскаватора ЭШ 10/50*

ных масок с высокой степенью детализации, однако при смене объекта диагностирования работу по нормированию составляющих спектра и созданию масок необходимо начинать заново.

Точность разрабатываемых моделей можно повысить уменьшением периода прогнозирования и увеличением числа экспериментальных данных, полученных на однотипных объектах диагностирования, обладающих одинаковыми режимными эксплуатационными характеристиками. Важно знать минимальное число измерений параметров вибрации, необходимое и достаточное для построения достоверной прогнозной модели, это в значительной мере обусловлено существенной трудоемкостью сбора диагностических данных при помощи мобильных систем контроля. Задачу существенно упростило бы использование стационарного комплекса контроля параметров вибрации, однако применение таких систем на исследуемых объектах считается экономически неэффективным.

Фактическая потребность ремонтных подразделений эксплуатирующих предприятий угольной и горнорудной промышленности Кузбасса в осуществлении долгосрочного прогнозирования в рамках действующей системы планово-предупредительных ремонтов на сегодня отсутствует. Осуществление длительного прогнозирования процессов изменения технического состояния диагностируемого оборудования представляет сегодня только лишь чистый академический интерес с точки зрения разработки базовых элементов обслуживания техники по её фактическому состоянию, пригодных для внедрения в условиях предприятий угольной и горнорудной промышленности Кузбасса. В условиях действующей системы ППР гораздо более актуальной является задача построения краткосрочного (на 1-2 интервала диа-

гностирования) прогноза, позволяющего оценить вероятность безотказной работы сложной механической системы до момента ближайшего обслуживания или ремонта. Применение адаптивных методов при построении краткосрочных прогнозов изменения состояния механических систем дает хорошие результаты на малых промежутках времени [14], что является достаточным фактором для их применения при условии функционирования на предприятии системы планово-предупредительных ремонтов. Проведенные ранее исследования рекомендуют использовать для краткосрочного прогнозирования именно адаптивные экспоненциальные модели [8]. Однако, на сегодняшний день данные методики не опробованы на большом числе конструктивных элементов агрегатов и механизмов горной техники, необходима дальнейшая проверка на адекватность и совершенствование предложенных типов математических моделей.

Для решения задач моделирования процессов вибрационной активности, формирующихся при работе генераторных групп карьерных экскаваторов необходимо построить прогноз изменения с течением времени характеристик групп информативных частот, что является гораздо более сложной задачей по сравнению с прогнозированием изменения величины общего уровня виброакустического сигнала.

Наибольший интерес в создавшихся условиях представляет задача оценки остаточного ресурса сложных механических систем, необходимым условием решения которой является наличие эффективных способов выделения трендов детерминированной составляющей сигналов для выполнения кратко- и среднесрочного прогнозирования изменения технического состояния объекта.

Так, например, прогностическую адаптивную

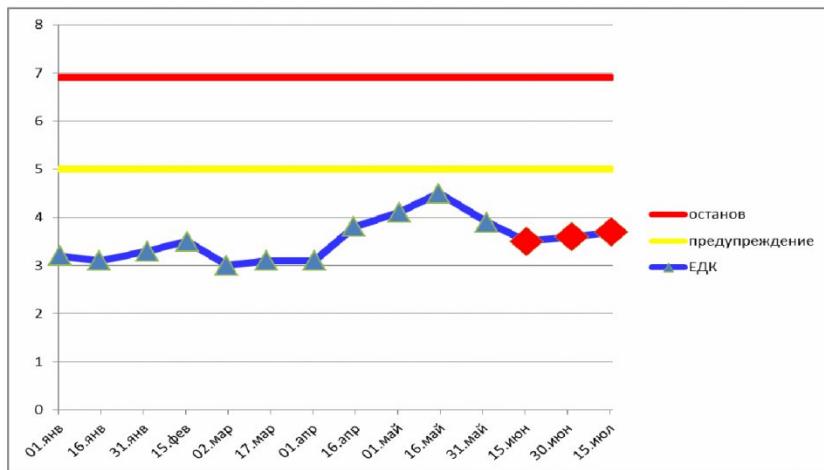


Рис. 2. Результаты краткосрочного моделирования с использованием адаптивной модели.

модель, описывающую изменение диагностического параметра с течением времени можно записать в следующем виде [8]:

$$S_t = \alpha K_t + (1-\alpha) * S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha * (K_t - S_{t-1}) \quad (1)$$

где  $S_t$  – прогноз технического состояния (изменения единого диагностического критерия);  $\alpha$  – параметр экспоненциального сглаживания;  $S_{t-1}$  – прогноз на 1 шаг вперед;  $K_t - S_{t-1}$  – погрешность прогноза  $S_{t-1}$ .

Определенные затруднения при применении адаптивных методов прогнозирования вызывает выбор параметра экспоненциального сглаживания  $\alpha$ . С ростом величины  $\alpha$  увеличивается значимость данных последних измерений диагностируемого параметра и плохо сглаживаются случайные колебания, уменьшение  $\alpha$  ведет к лучшему сглаживанию кривой [14]. Выбор величины параметра  $\alpha$  обусловлен задачами моделирования. При малом числе интервалов моделирования максимальную значимость приобретает информация последних диагностических измерений, оптимальная величина параметра  $\alpha$  в этом случае составит порядка 0,5...0,7. При построении долгосрочного прогноза оптимальное значение  $\alpha$  составит порядка 0,1...0,3 [14].

Диагностические исследования, выполненные автором настоящей работы, позволили рассчитать значение  $\alpha$  для динамического оборудования электрических карьерных экскаваторов. Так, для генераторных групп экскаваторов – драглайнов параметр  $\alpha$  составляет 0,6; для другого динамического оборудования, работающего с изменением частот и разнонаправленными переменными ударными нагрузками данный параметр не должен быть более 0,3.

Формулу (1) можно представить в виде следующего выражения для записи параметрического ряда:

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} \beta^i K_{t-i} + \beta^N S_0 \quad (2)$$

где  $S_0$  – среднеарифметическое значение единого диагностического критерия;  $\beta=1-\alpha$ ;  $N$  – число членов

нов параметрического ряда [8].

Анализ параметров вибрации, генерируемой при работе динамического оборудования электрических карьерных экскаваторов, показал, что для эффективной оценки технического состояния и осуществления достоверного прогнозирования наиболее эффективным и информативным является применение комплексного диагностического подхода, состоящего минимум из трех отдельных методов – спектрального анализа параметров выброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, анализа огибающей спектра и экспектса исследуемого сигнала. Таким образом, единый критерий, используемый для оценки технического состояния объекта диагностирования, должен сочетать в себе как минимум эти три диагностических подхода.

Единый диагностический критерий (ЕДК), подходящий для описания оценки состояния только одного типа объектов, наиболее эффективно может быть описан в многомерном пространстве диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8, 15]. Такой алгоритм должен обязательно учитывать эффективное разделение объектов, находящихся на разной стадии развития дефектов, на различные группы.

Кроме того, таких критериев должно быть рассчитано несколько, по одному на каждую группу дефектов диагностируемого оборудования. Так, например, для диагностики и прогнозирования изменения технического состояния генераторных групп электрических карьерных экскаваторов должны быть разработаны индивидуальные ЕДК для подшипников, дефектов связанных с искривлением вала и проявлениями дисбаланса, дефектов соединительных муфт. Если рассматривать весь комплекс динамического оборудования карьерных экскаваторов, то остро встает вопрос необходимости разработки ЕДК для диагностики зубчатых передач редукторов переборного и планетарного типов.

Так, например, спектр на рис. 1 иллюстрирует наличие недопустимого уровня расцентровки валопровода малой генераторной группы экскавато-

ра ЭШ 10/50 в сочетании с ярко выраженным общим нарушением жесткости системы и нарушением режима смазки подшипника. Данные получены методом прямого спектрального анализа по параметру выброскорости в стандартном частотном диапазоне 2...1000 Гц, первые десять значащих гармоник оборотной частоты на спектре выделены маркером.

Для формирования ЕДК нарушения соосности валов преобразовательного агрегата необходимо удалить из спектра всю информацию о других физических явлениях, т.е. осуществить процедуру клиппирования.

Пример расчета с использованием аддитивной модели и разработанного ЕДК для такого класса дефектов динамического оборудования, как нарушение соосности валопровода малой генераторной группы экскаваторов-драглайнов, представлен на рис. 2. Объект диагностирования, как и прогнозировалось, безаварийно отработал два интервала моделирования (1 календарный месяц) до планируемого годового ремонта, на котором была осуществлена центровка валопровода агрегата. В результате повышенный уровень механических колебаний был устранен.

Внедрение системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию требует наличия развитых программно-математических методов про-

гнозирования и контроля [13]. Кроме того, разработка прогнозных моделей изменения технического состояния по параметрам вибрации для широкого типового ряда горной техники является одним из условий осуществления перехода на качественно новые формы проведения технического обслуживания и ремонта, необходимые для максимальной безопасной эксплуатации горной техники. Такой переход был бы невозможен без наличия четко структурированной базы данных, содержащей информацию о динамике изменения диагностических параметров для широкого типового и номенклатурного ряда горной техники. Таким образом, на сегодняшний день в Кузбассе созданы все предпосылки для использования результатов математического моделирования процессов деградации сложных технических устройств, эксплуатируемых в условиях угольной промышленности.

Предложенный подход к моделированию деградационных процессов в сложных механических системах имеет весьма важное практическое значение и может быть использован, кроме прочего, для решения задач минимизации логистических издержек и оптимизации складского хозяйства промышленных предприятий угольной промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 15-14-2008. Методические рекомендации о порядке проведения экспертизы промышленной безопасности карьерных одноковшовых экскаваторов.
2. РД 15-04-2006. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок.
3. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Ещеркин П.В., автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
4. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Герике П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности. / Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: Институт угля Сибирского отделения РАН. – М. – изд-во «Горная книга». – 2013. - №OB 6. – С. 440 – 446.
6. 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
7. Разработка стационарного диагностического комплекса для экскаватора типа ЭКГ. Дрыгин М.Ю., автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 20 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
10. Герике Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие. /Б.Л. Герике, Г.И. Козовой, В.С. Квагинидзе, А.А. Хорешок, П.Б. Герике/ Москва, 2012. – 400 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. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
14. Попков В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. /Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И./ Л.: Судостроение, 1989
15. 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

Поступило в редакцию 12.09.2015

UDC 53.083(430.1)

## ADAPTIVE PREDICTIVE MODELING OF THE DEGRADATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF ROTATING EQUIPMENT MINING SHOVELS, BASED ON THE ANALYSIS OF VIBRATION PARAMETERS

Gericke Pavel B.

C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: am\_besten@mail.ru

Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, 10 av. Leningradsky, Kemerovo, 650065, Russian Federation.

**Abstract.** This paper analyzes the experience of the development of mathematical models to predict changes in the technical condition of complex mechanical systems. Is a detailed classification of defects dynamic equipment mining shovels on which justified the use of specific methods of vibration analysis most suitable for effective control and the development of common diagnostic criteria for changes in the technical condition of the objects of diagnosis. As part of this work the necessity for a comprehensive diagnostic approach to assess the technical condition of the mechanisms in the parameters of the generated vibrations. It is shown that only with the extensive use of modern methods of vibration analysis and nondestructive testing are given the opportunity for early detection of defects dynamic units mining shovels and develop predictive models change their technical condition. Research results prove categorically the possibility of establishing of adequate models of changes in the state suitable for the implementation of short term forecasting, the development of which is a necessary base for high-quality transition repair and maintenance departments of industrial enterprises in the service system technology on its actual technical condition. The platform for the implementation of elements of the concept of this system will be developed complex of diagnostic rules detecting defects on the analysis of parameters of mechanical vibrations, and created adaptive predictive models of defects, suitable to describe the degradation of the status of a wide number of typical units used in the construction of mining equipment.

**Keywords:** vibration analysis, predictive modeling, valuation of mechanical vibrations, maintenance management, mining shovels

### REFERENCES

1. RD 15-14-2008. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti kar'ernykh odnokrovshovykh ekskavatorov [Methodical recommendations on how to conduct the examination of industrial safety of mining shovels]. Moscow, 2008. 40 p. (rus)
2. RD 15-04-2006. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti lentochnykh konveyernykh ustyanovok [Methodical recommendations on how to conduct the examination of industrial safety of belt conveyor systems]. Moscow, 2006. 56 p. (rus)
3. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel-gidravlicheskikh burovyykh stankov [Development of a technique of diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
4. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Gericke P.B. Otdel'nyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya: Institut uglya Sibirs'kogo otsteleniya RAN. Mining book Publishers. 2013. #OV6. Pp. 440-446. (rus)
6. 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)
7. Drygin M.Yu. Razrabotka statcionarnogo diagnosticheskogo kompleksa dlya ekskavatora tipa EKG [Development of a stationary diagnostic system for an mining shovel ECG-type]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
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. Gericke B.L., Kozovoy G.I., Kvaginidze V.S., Khoreshok A.A., Gericke P.B., Diagnostika gornykh mashin i oborudovaniya [Vibration analysis of mining machinery and equipment]. Moscow, 2012. 400 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. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
14. Popkov V.I., Myshinskiy E.L., Popkov O.I. Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii [Vibration analysis in shipbuilding]. Leningrad, 1989 – 258 p. (rus)
15. 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)

Received 12 September 2015