

Герике Павел Борисович¹, канд. техн. наук, доцент, Ещеркин Павел Васильевич², канд. техн. наук

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: am_besten@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Аннотация: *Актуальность работы.* В рамках решения задачи по обеспечению безопасной эксплуатации предельно изношенных карьерных экскаваторов была осуществлена разработка методики диагностирования энерго-механического оборудования по параметрам генерируемой при его работе вибрации, позволяющая осуществить сбор и анализ диагностической информации с учетом конструктивных и кинематических особенностей объектов исследования. Создаваемая методика диагностирования позволит получить данные для решения актуальной задачи по разработке единых критериев для оценки и прогнозирования процессов деградации оборудования электрических карьерных экскаваторов.

Цель работы: *Разработка и обоснование методологии диагностирования узлов и агрегатов электрических карьерных экскаваторов на основе использования результатов комплексного подхода к диагностике сложных механических систем по параметрам вибрации, позволяющей своевременно выявлять дефекты диагностируемого оборудования и использовать получаемые данные для разработки единых диагностических критериев оценки и прогнозирования состояния горных машин.*

Методы исследования: *В настоящей работе использовались результаты комплексного подхода к диагностике машин по параметрам вибрации, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей спектра, эксцесс и анализа выбега агрегата. Показано, что именно такое сочетание диагностических методологий является оптимальным для получения ценной информации о фактическом состоянии оборудования карьерных экскаваторов.*

Результаты: *Полученные научные результаты позволяют создать эффективную методику диагностирования энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, учитывающую конструктивные и эксплуатационные особенности предельно изношенных горных машин, пригодную для осуществления высокоэффективной оценки технического состояния и прогнозирования процессов развития дефектов основных узлов карьерных экскаваторов.*

Ключевые слова: *вибродиагностика, карьерные экскаваторы, механические дефекты, методика диагностирования, прогнозное моделирование.*

Информация о статье: *принята 10 июля 2020 г.*

DOI: *10.26730/1816-4528-2020-3-34-41*

В рамках изучения развития вибрационных процессов на предельно изношенном оборудовании горных машин при выполнении научного проекта по гранту РФФИ и Кемеровской области № 20-48-420010\20 была обозначена необходимость в разработке методологии сбора диагностических данных с учетом специфики условий эксплуатации карьерных экскаваторов и конструктивных особенностей их энерго-механического оборудования, а также по созданию совокупностей диагностических признаков и правил выявления и оценки степени развития дефектов горных машин, пригодных для формирования единых диагностических критериев, основанных на принципах комплексного подхода к анализу параметров вибрации.

Выявление базовых закономерностей изменения технического состояния оборудования

горных машин по параметрам генерируемой при их работе вибрации является ключевым условием для создания единых критериев оценки предельного состояния диагностируемого оборудования [1, 2]. Сегодня в мире нет универсального комплексного критерия оценки технического состояния энерго-механического оборудования горных машин, применение которого на практике позволило бы оценить фактическое состояние объектов диагностирования, определить степень опасности развивающихся дефектов и спрогнозировать деградационные процессы, сопровождающие эксплуатацию горной техники [3]. Основные причины этого заключаются в недостаточной изученности вопросов изменения процессов вибронгруженности оборудования горных машин, ограниченных возможностях практического применения критериев предельного

состояния, разработанных для относительно небольшой группы однотипной техники, а также в малых объемах выполняемого прогностического моделирования. Совершенствование методологии диагностирования горных машин по параметрам вибрации является актуальной задачей, требующей изучения процессов формирования и развития вибрационных процессов обследуемого оборудования, при этом ее решение является ключевым условием для разработки единых диагностических критериев, способных заменить собой необходимость применения большого числа громоздких признаков и правил, а также осуществить прогнозирование процессов изменения технического состояния энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов.

Методика сбора диагностических данных должна включать разработку программы функциональной диагностики, подготавливаемую с учетом всех особенностей конструкции и специфики эксплуатации карьерных экскаваторов. Алгоритм функциональной диагностики основывается на принципах анализа дискретной информации, пригодных для описания фактического состояния диагностируемого оборудования по параметрам вибрации. Программное обеспечение базы данных должно обеспечивать возможность хранения и сортировки информации, а также создания протоколов о фактическом состоянии объектов исследований. Программа диагностирования должна включать в себя обоснование выбора конкретных методов диагностирования в зависимости от конструктивных, кинематических и эксплуатационных особенностей обследуемых технических устройств. Комплексный подход к диагностике должен основываться на принципах обеспечения эффективной реализации контроля и получения максимума полезной диагностической информации при минимуме затрат времени на проведение измерений и осуществление анализа данных.

Специфика проведения измерений на оборудовании электрических карьерных экскаваторов предусматривает определенные требования к выбору точек измерения, подготовке измерительной поверхности, датчикам, аппаратуре и программному обеспечению, в частности:

- Главным требованием при выборе измерительных точек на энерго-механическом оборудовании карьерных экскаваторов является обеспечение безопасности при установке датчиков и проведении замеров вибрации.
- Проведение измерений должно проводиться на корпусах всех подшипников агрегатов во всех трех ортогональных направлениях, при невозможности установки датчика в измерительной точке допускаются измерения по двум направлениям (например, осевую вибрацию допускается измерять только у подшипника свободного конца вала).
- Для проведения измерений целесообразно использовать стандартные пьезоакселерометры (например, АС-102). Данный тип и модель

датчика выбраны в соответствии с совокупностью преимуществ их использования: прочность конструкции; слабая чувствительность к внешним электромагнитным полям; остронаправленность; малые размеры и масса; герметичность; широкий динамический и частотный диапазон измерений; высокая долговечность и низкая цена.

- Датчики вибрации следует крепить к агрегату с помощью магнита (см. рисунок 1), данный тип крепления обеспечивает необходимые и достаточные метрологические характеристики регистрируемых параметров, при этом измерительная поверхность на агрегате должна быть ровной, очищенной от ржавчины и краски, шероховатость ее не должна превышать $Ra=2,5$ [4].

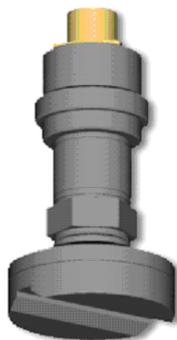
- При проведении измерений измерительный кабель не должен подвергаться интенсивным колебаниям и должен быть удален от источников сильных электромагнитных полей.

- Не допускается проведение измерений на тонкостенных участках корпусов или деталей.

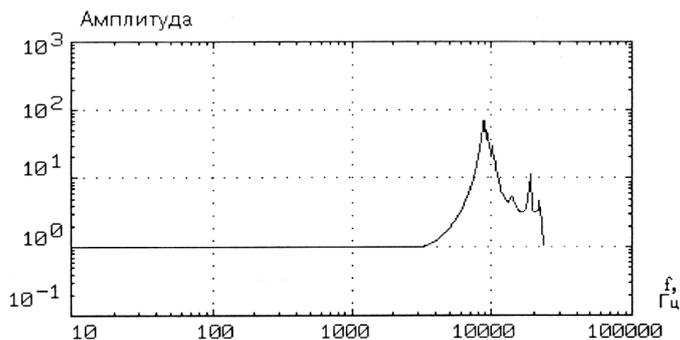
- Угол между направлением максимальной чувствительности датчика и направлением измерения не должен превышать 25° .

- Для проведения измерений пригодна переносная аппаратура, регистрирующая виброакустические сигналы (в т.ч. в виде амплитудно-частотной характеристики) в полосе частот 0,01-10,0 кГц (предпочтительно 0,01-40,0 кГц), с двойным интегрированием, с заданием границ частотного диапазона, с чувствительностью по виброскорости не ниже $1,0 \cdot 10^{-5}$ мм/с, с энергонезависимой памятью и возможностью вывода данных на ЖК-дисплей и персональный компьютер, искро- и взрывобезопасным исполнением корпуса и широким рабочим температурным диапазоном (минимум от -20°C до $+60^\circ\text{C}$).

- Программное обеспечение для анализа должно обеспечивать возможность обмена данными с виброанализатором, функции архивирования баз данных, создания отчетов о проведенной диагностике, возможность быстрой группировки иерархической структуры базы данных в удобный для обхода оборудования маршрут, функции визуализации измерительных точек, агрегатов и машин с повышенным уровнем вибрации, редактирование пороговых значений определения зон оценки технического состояния, возможность быстрой пользовательской настройки основных параметров измерений, пересчет параметров полигармонической волны для отображения спектра в удобных для анализа величинах, возможность применения дополнительной математической обработки для анализа измеренных характеристик (экссесс, вейвлет, огибающая и т.д.). В рамках выполнения настоящей работы использовался программный комплекс Диамант-2 производства ООО «Диамех 2000», удовлетворяющий всем указанным требованиям.



а) способ крепления датчика



б) амплитудно-частотная характеристика, соответствующая способу крепления датчика на магните

Рис.1 Пьезоакселерометр АС-102

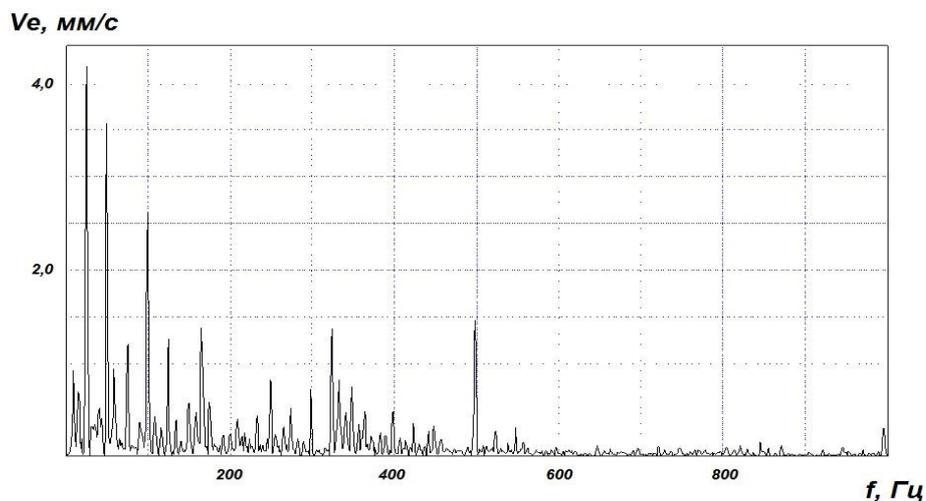


Рис.2. Нарушение жесткости системы, расцентровка электродвигателя с редуктором подъемной лебедки экскаватора ЭКГ-5А

- Суммарная погрешность проведения измерений с использованием современной аппаратуры, включающая в себя погрешность датчика, прибора и погрешность математической обработки с использованием программного комплекса, не должна превышать 5%.

Помимо этого, еще целый ряд факторов оказывает существенное влияние на специфику проведения замеров вибрации на оборудовании карьерных экскаваторов, например, цикличность работы приводных механизмов (в т.ч. циклы опускания и подъема ковша, поворота платформы и т.п.), изменяющиеся рабочие частоты электродвигателей, а также ударные нагрузки, которые испытывает механическое оборудование во время своей работы. В частности, при проведении работ на подъемных и тяговых лебедках драглайнов, а также на механизмах подъема и напора экскаваторов типа механическая лопата на момент проведения измерений должна синхронизироваться с устойчивой работой лебедки, исключая моменты ее остановки или резкого ускорения, а сами измерения проводятся без нагрузки (ковш пустой; все приводы, кроме того, на котором проводятся измерения, остановлены).

Сегодня не существует универсального метода, который мог бы с одинаковым успехом

применяться для экспресс-диагностики и периодического мониторинга по параметрам вибрации, и при этом обладал хорошей помехозащищенностью и высокой точностью результатов анализа [1, 5]. Все эти причины свидетельствуют о необходимости использования комплексного подхода к диагностике параметров вибрации, что позволит производить эффективное выявление дефектов, в том числе находящихся на стадии зарождения.

Конкретное сочетание методов вибродиагностики всегда определяется типом объектов диагностирования и режимами их работы. Для карьерных одноковшовых электрических экскаваторов такая совокупность диагностических методологий должна включать результаты спектрального анализа в стандартном и расширенном частотном и динамическом диапазонах (см. примеры на рисунках 2-4), анализ огибающей спектра и анализ эксцесса для экспресс-диагностики подшипников качения, что подтверждается результатами мониторинга технического состояния горных машин [1]. В ряде случаев к данной базовой совокупности методов целесообразным может оказаться добавление результатов анализа,

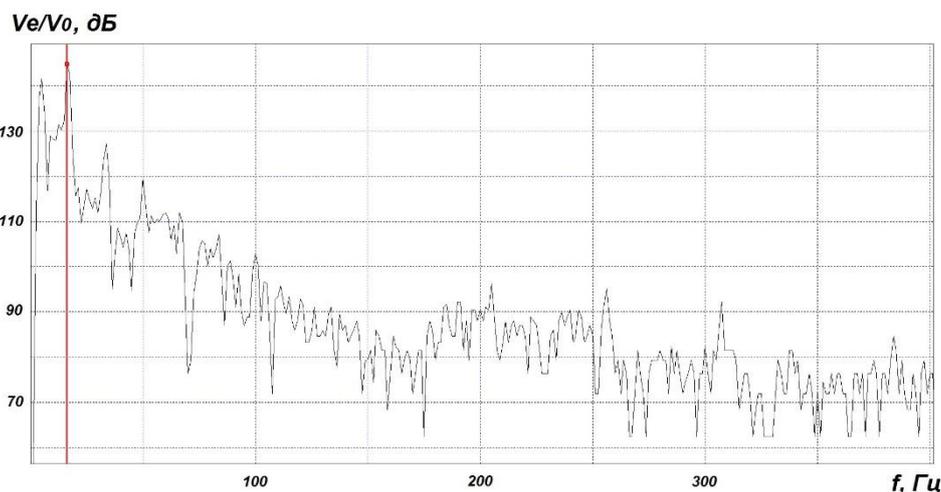


Рис. 3. Дисбаланс ротора генератора собственных нужд экскаватора ЭШ 10/70

полученных с использованием вейвлет-преобразования исходного сигнала, характеристики разгона/выбега, а также кепстрального анализа для диагностики зубчатых передач в составе редукторов механизмов подъема, напора, тяги и поворота [1, 6]. Кроме того, целесообразно использовать алгоритмы настраиваемой фильтрации регистрируемых характеристик, учитывающие кинематические особенности объекта исследований. Использование таких алгоритмов является необходимым из-за того, что часть диагностических признаков обследуемого оборудования может работать некорректно по причине перекрытия друг другом значащих гармонических составляющих, что значительно затрудняет интерпретацию получаемых данных [7, 8].

Действующая сегодня на предприятиях угольной промышленности России система планово-предупредительных ремонтов регламентирует периодичность проведения технического обслуживания и ремонтов, не исключая при этом возможность использования контрафактных (восстановленных) запчастей и других элементов системы аварийного обслуживания, которую еще называют «работой до поломки». В реальных сложившихся условиях осуществление долгосрочного прогнозирования с интервалами 1,5-2 года не представляет никакого практического интереса, т.к. невозможно учесть все постоянно меняющиеся параметры системы ремонтов. Именно поэтому максимальную ценность представляет прогнозирование гарантированной возможности безаварийной работы объекта исследования до момента проведения очередного ремонта, осуществить которое можно с использованием краткосрочной прогнозной модели, описывающей процессы деградации сложной механической системы на периоде, равном одному или двум диагностическим интервалам. Реализация алгоритмов прогнозирования позволит осуществлять расчет остаточного гарантийного минимального ресурса объектов исследования на основе полученных ранее диагностических данных [4, 9]. В данных условиях наиболее эффективной может

оказаться реализация принципов экспоненциального адаптивного краткосрочного прогнозирования, подразумевающих возможность коррекции параметров модели на основании результатов последних измерений.

Необходимым условием для построения адекватного прогноза процессов изменения технического состояния объектов диагностики является детальная проработка вопросов нормирования составляющих вибрации оборудования карьерных экскаваторов. Решение этой задачи возможно с использованием спектральных масок, разрабатываемых индивидуально для всех элементов динамического оборудования с учетом их конструктивных и кинематических особенностей (см. пример на рисунке 5). При этом с ростом степени индивидуализации разрабатываемых масок возрастают и возможности для осуществления математического моделирования процессов изменения параметров, описывающих техническое состояние диагностируемого оборудования.

Отсутствие рекомендаций по выбору параметров частотных масок и низкий уровень изученности вопросов нормирования гармонической активности горного оборудования представляют дополнительные сложности в вопросах нормирования критериев, пригодных для разработки спектральных масок. Совершенствование методологии нормирования параметров вибрации, генерируемой работающим оборудованием горных машин, невозможно без знания основных закономерностей деградации состояния объектов диагностирования [10], для чего необходимо определить оптимальную совокупность диагностических признаков, необходимых для выявления всех базовых групп дефектов машин и механизмов с учетом изменения частотного состава регистрируемых характеристик в процессе работы оборудования экскаваторов.

Результаты исследований по поиску критериев предельного состояния оборудования горных машин по параметрам вибрации позволили обосновать базовые частотные и динамические

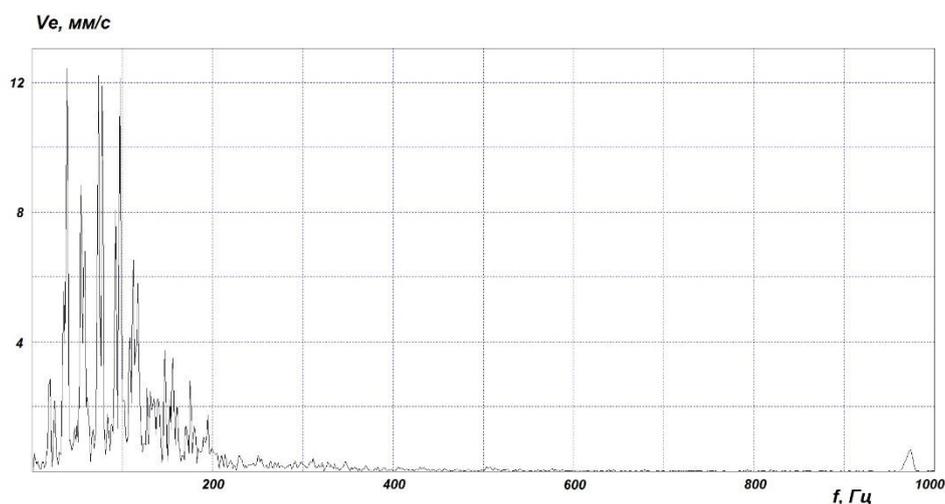


Рис. 4. Износ зубчатых зацеплений открытой передачи экскаватора ЭКГ-4,6Б

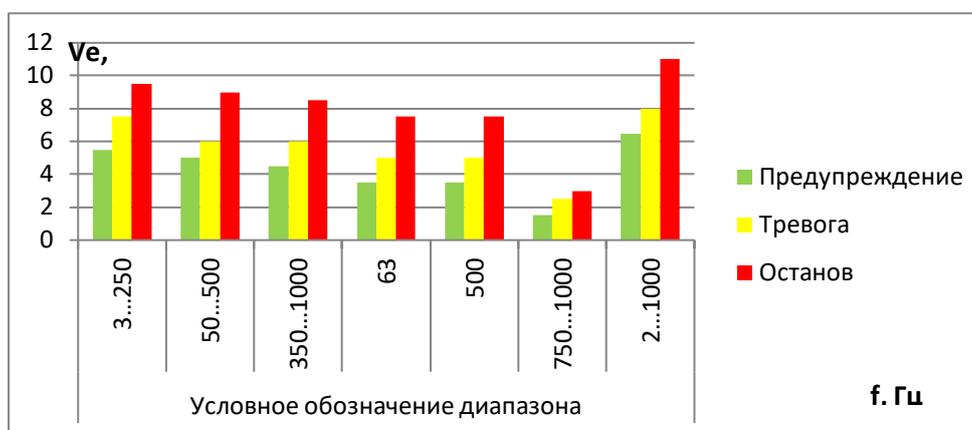


Рис. 5. Пример нормирования спектра вибрации редуктора подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70

диапазоны для спектральных масок диагностируемых механизмов.

Следует отметить, что среди всего энерго-механического оборудования карьерных электрических экскаваторов, к которому относят лебедки подъема и тяги, механизмы поворота и напора, а также компрессорное оборудование, спектральные маски на сегодняшний день были разработаны в основном только для оборудования генераторных групп некоторых моделей, получивших наибольшее распространение в технологии ведения открытых горных работ (в частности, ЭКГ-5А, ЭКГ-8И и некоторых других [1, 4, 10]). Этот факт объясняется трудоемкостью разработки масок, потребностью иметь представительные базы данных по вибрации однотипного оборудования карьерных экскаваторов, необходимостью начинать работу по разработке масок заново при смене объекта диагностирования, а также наличием изменяющихся во время работы динамического оборудования оборотных частот. Для всех вновь создаваемых спектральных масок в рамках выполнения настоящей работы были определены свои индивидуальные границы для зон оценки технического состояния – «хорошо», «удовлетворительно», «предупреждение», «тревога», «экстренная остановка оборудования».

Помимо прочего, внедрение на практике элементов системы неразрушающего контроля технологического оборудования и разработку алгоритмов прогностического моделирования невозможно осуществить без реализации комплексного подхода к анализу вибрации с применением целого ряда отдельных диагностических методологий (как правило, это спектральный анализ, эксцесс и анализ огибающей спектра [1, 11, 12]). Поэтому для диагностики каждого отдельного элемента динамического оборудования карьерных экскаваторов должен применяться свой единственный диагностический критерий оценки технического состояния, основанный на результатах комплексного подхода к виброанализу и пригодный для выполнения контроля технического состояния объекта диагностирования по отдельной группе дефектов [4, 13].

В рамках выполнения настоящей работы процедуре формализации подверглись более ста двадцати диагностических признаков в области анализа вибрации, пригодных для выявления всех основных дефектов энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, в том числе признаки нарушения жесткости системы, расцентровки (перекоса, изгиба) валов агрегатов, дисбаланса элементов вращения, дефектов

подшипников качения и зубчатых передач, а также дефектов соединительных муфт и повреждений двигателей электрической природы. Большая часть данных признаков (до 80%) сосредоточена в области спектрального анализа, кроме того, формализации подверглись результаты анализа с использованием выделения огибающей (для диагностики подшипников качения и зубчатых передач), а также результаты диагностирования характеристики выбега (выявление дефектов электрической природы) и эксцесса (для подтверждения результатов спектрального анализа и экспресс – диагностики подшипников).

Разработка математической модели, способной осуществить прогнозирование процессов развития дефектов оборудования горной техники без учета характера изменения спектрального состава вибрации, была бы невозможной [14, 15]. Реализация математических прогнозных моделей, способных осуществить оценку остаточного ресурса горной техники, создает дополнительные возможности для решения задач неразрушающего контроля и совершенствования методологии нормирования параметров вибрации, генерируемой сложным технологическим оборудованием. Уникальность создаваемой прогнозной модели заключается широкой области применения, включая самые разные конструктивные элементы, а также использование в качестве моделируемых параметров единых диагностических критериев, основанных на результатах комплексного анализа параметров механических колебаний.

Созданная методика сбора и анализа диагностических данных, учитывающая специфику условий эксплуатации и особенности конструкции предельно изношенного энерго-механического оборудования горных машин, открывает возможности для использования результатов комплексного подхода к анализу вибрации и реализации на практике элементов системы обслуживания по фактическому состоянию. Следствием анализа полученных научных результатов явилось создание методологии проведения диагностирования оборудования карьерных электрических экскаваторов, которая включает реализацию принципов комплексного подхода к анализу параметров вибрации. Разработанная методика позволяет реализовать подходы прогнозистического моделирования процессов деградации технического состояния объектов контроля и совершенствование принципов нормирования параметров механических колебаний с использованием спектральных масок и единых диагностических критериев, что в конечном итоге позволит повысить надежность эксплуатируемой горной техники и повысить безопасность проведения открытых горных работ.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420010\20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике П.Б. Виброанализ тяговых и подъемных лебедок экскаваторов-драглайнов /Герике П.Б./ Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № S38. с.344-349
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). 86–95
3. 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.
4. Сушко А.Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
5. 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.
6. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
7. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
8. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. /Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
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. Новое в методике проведения испытаний энерго-механического оборудования горной техники /Герике П. Б.// Вестник Кузбасского государственного технического университета, №3. – Кемерово. – 2017. – С. 126 – 134.
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. Краковский, Ю.М. Математические и программные средства оценки технического

состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.

14. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

15. Клишин В.И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. /В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко/ Новосибирск, 2011. – 524 с.

Pavel B. Gericke¹, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, **Pavel V. Eshherkin**², C.Sc. (Engineering), Associate Professor

¹Federal Research Center of Coal and Coal chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Ave., Kemerovo, 650065, Russian Federation

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennyaya street, 28

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DIAGNOSING EQUIPMENT OF ELECTRIC MINING SHOVELS

Abstract: *The urgency of the discussed issue. As part of the solution to the problem of ensuring the safe operation of extremely worn-out mining shovels, a methodology for diagnosing electric and mechanical equipment by vibration parameters was developed. It allows you to record and analyze diagnostic information, taking into account the structural and kinematic features of the objects of research. The developed diagnostic technique will allow us to obtain data for solving the urgent task of developing common criteria for assessing and predicting the degradation processes of equipment for electric mining shovels.*

The main aim of the study: *Development and justification of a methodology for diagnosing the components and assemblies of electric mining shovels based on the results of an integrated approach to the diagnosis of complex mechanical systems by vibration parameters, which allows timely detection of defects in the diagnosed equipment and the use of the obtained data to scalarize multidimensional diagnostic signs and develop common diagnostic criteria for assessing and predicting degradation processes and technical condition of mining machines.*

The methods used in the study: *In this work, we used the results of an integrated diagnostic approach to the analysis of vibration parameters, including spectral analysis in the extended frequency and dynamic range, analysis of the spectral envelope, excess and analysis of aggregate run-down characteristics. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed choice of diagnostic methodologies for development of a set of features and rules in order to develop a comprehensive criterion for evaluating and predicting the degradation of the technical condition of mining equipment.*

The results: *The obtained scientific results allow us to create an effective method for diagnosing electric and mechanical equipment of mining shovels. This methodology takes into account the design features and operating conditions of extremely worn-out mining equipment, which makes it suitable for highly efficient assessment of the technical condition and prediction of the development of defects in the main components of mining shovels.*

Keywords: *vibration analysis, mining shovels, mechanical defects, diagnostic methodology, predictive modeling.*

Article info: received July 10, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-34-41

REFERENCES

1. Gerike P.B. Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten', 2017. # S38 Pp. 344-349. (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). 86–95 (eng)

3. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih burovykh 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. Sushko A.E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmno obespicheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)

5. 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. (eng)

6. 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)
7. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)
8. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (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. 156 p. (rus)
10. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. #3. Pp. 126-134. (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. Krakovskiy, Yu.M. Matematicheskie i programnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
14. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)
15. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б., Ещеркин П.В. Разработка методики диагностирования оборудования электрических карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 3 (148). – С. 34-41.

Reference to article

Gericke P.B., Eshherkin P.V. Development of methods for diagnosing equipment of electric mining shovels. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.3 (148), pp. 34-41.