

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

П. Б. Герике

## Development of the testing procedure for units and elements of mining equipment

P. B. Gerike

The author considers in detail the stages of creating a testing procedure for mining equipment based on the complex implementation of principles of nondestructive testing and technical diagnostics. The author substantiates effectiveness of application of a complex diagnostic approach for assessing the state of metal structures and energy-mechanical equipment of mining machines. The opportunity for timely detection of defects, regardless of their type and degree of danger, presents itself only with a wide application of the modern methods of vibration diagnostics and nondestructive testing. The author substantiates the effectiveness of specific combination of methods of nondestructive testing, most optimally suited for solving given tasks. The article contains the developed complex of more than 120 diagnostic rules, suitable for performing automated analysis of vibroacoustic signal and revealing the main damages of energy-mechanical equipment based on selective groups of informative frequencies. The author formulates the main criteria that one can use as a basic platform for improving the methodology for normalizing the parameters of mechanical oscillations. The developed diagnostic criteria became a basis for the development of individual spectral masks suitable for performing the analysis of parameters of vibroacoustic waves generated during operation of mining equipment. The author proves necessity of transition of repair and maintenance divisions of industrial enterprises to the system of maintenance of machinery according to its actual technical state, and the developed complex of diagnostic rules for detecting defects can serve as a platform for the implementation of basic elements of this system. The author substantiates the principal validity of the developed methodology for testing mining machines equipment and its individual elements, such as the predictive modeling of degradation of technical state of mining equipment and the improvement of normalization using spectral masks and unified diagnostic criteria. Implementation of the principles of the developed testing methodology will increase reliability of mining equipment and minimize the number of emergency failures of complex expensive equipment, which in the end will generally have a positive impact on the safety of mining operations.

**Keywords:** vibrodiagnostics; mining equipment; testing procedure; residual resource; normalization of mechanical vibration parameters.

Подробно рассмотрены этапы создания методики проведения испытаний горно-шахтного оборудования, основанной на комплексной реализации принципов неразрушающего контроля и технического диагностирования. Обоснована эффективность применения комплексного диагностического подхода для оценки состояния металлоконструкций и энергомеханического оборудования горных машин. Показано, что только с широким применением современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля представляется возможность для своевременного выявления дефектов вне зависимости от их типа и степени опасности. Обоснована эффективность конкретного сочетания методов неразрушающего контроля, наиболее оптимально подходящих для решения поставленных в работе задач. Разработан комплекс более чем из 120 диагностических правил, пригодных для выполнения автоматизированного анализа виброакустического сигнала и выявления основных повреждений энергомеханического оборудования на базе селективных групп информативных частот. Сформулированы основные критерии, которые могут быть использованы в качестве базовой платформы для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний. Разработанные диагностические критерии реализованы в качестве основы при разработке индивидуальных спектральных масок, пригодных для выполнения анализа параметров виброакустических волн, генерируемых при работе горно-шахтного оборудования. Доказана необходимость перехода ремонтных и обслуживающих подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию, платформой для реализации базовых элементов которой может послужить разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов. Обоснована принципиальная состоятельность разрабатываемой методологии проведения испытаний оборудования горных машин и ее отдельных элементов, таких как прогнозическое моделирование процессов деградации технического состояния горно-шахтного оборудования и совершенствование нормирования с использованием спектральных масок и единых диагностических критериев. Реализация принципов разрабатываемой методологии проведения испытаний позволит повысить надежность горной техники и минимизировать количество аварийных отказов сложного дорогостоящего оборудования, что в конечном итоге окажет положительное влияние на безопасность горных работ в целом.

**Ключевые слова:** вибродиагностика; горно-шахтное оборудование; методика испытаний; остаточный ресурс; нормирование параметров механических колебаний.

В рамках выполнения научно-исследовательских работ по разработке систем диагностирования горно-шахтного оборудования перед учеными Федерального исследовательского центра угля и углекими СО РАН была поставлена задача создания методики испытаний узлов горно-шахтного оборудования для определения основных показателей их работоспособности. Для решения данной задачи в настоящее время выполняется цикл исследований по выявлению критериев предельного состояния, пригодных для оценки и прогнозирова-

ния процесса изменения фактического состояния горных машин. Кроме того, ведутся работы по созданию универсальной прогнозной адаптивной математической модели, описывающей процесс деградации технического состояния энергомеханического оборудования горных машин различного типа и конструкции.

Эффективное создание критериев предельного состояния диагностируемого оборудования, разработка адекватных математических моделей развития типовых дефектов, обоснование комплекса диагностических правил для энергомеханического оборудования угольной промышленности невозможно без выявления основных закономерностей изменения технического состояния оборудования горных машин по параметрам механических колебаний [1–3]. В мировой 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 отдельных составляющих сигнала и оценить степень их опасности [4]. Именно поэтому крайне трудно спрогнозировать скорость развития дефектов и момент перехода агрегата между группами оценки технического состояния. Основные причины этого заключаются в недостаточной проработке деградационных моделей и ограниченных возможностях практического применения критериев предельного состояния, разработанных для относительно небольшой группы горной техники. Таким образом, совершенствование методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых оборудованием горных машин, является актуальной научной задачей, для решения которой необходимо проведение масштабных исследований процессов формирования, изменения и развития составляющих механических колебаний, содержащих признаки наличия дефектов обследуемого оборудования. Решение сформулированных задач является необходимым условием создания полноценной современной методологии проведения испытаний, включающей элементы математического моделирования процессов деградации и прогнозирования изменения технического состояния сложных механических систем.

На первом этапе реализации методики испытаний узлов и элементов горно-шахтного оборудования необходимо осуществить анализ технической документации на объект проведения испытаний (в том числе нормативно-технической и конструк-

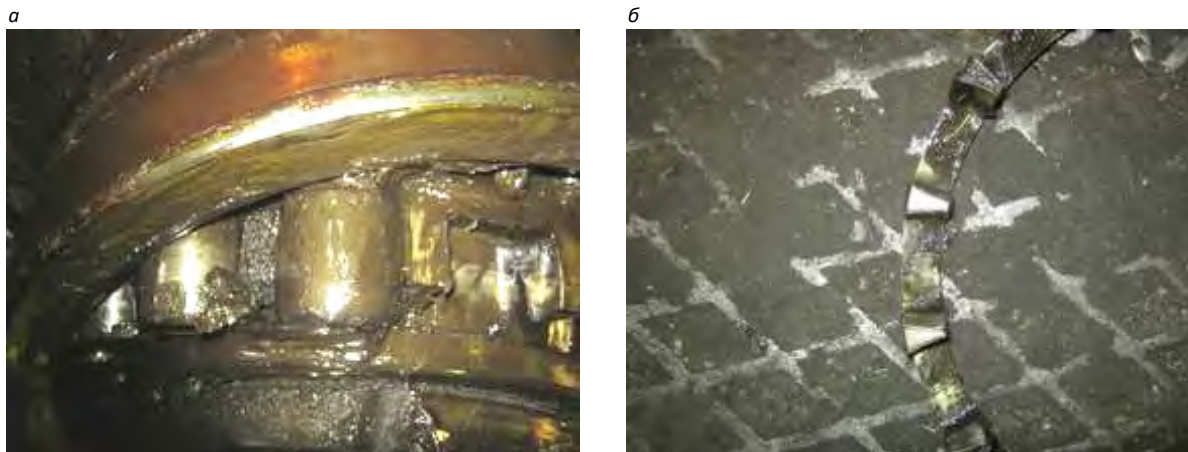


Рисунок 1. Пример проведения визуально-измерительного контроля, выполненного для подтверждения результатов вибродиагностики. Диагностированы износ и наклеп сепаратора, предшествующие полному разрушению подшипника генератора тяги экскаватора ЭШ 10/70.

торской документации, статистической информации об аварийных отказах аналогичного оборудования). Целью проводимого на данном этапе анализа является установление номенклатуры параметров, определяющих отказы оборудования; а также осуществление поиска и выявление элементов металлоконструкций и агрегатов, внезапное повреждение которых может привести к ресурсному отказу.

Кроме того, неотъемлемой частью этапа проведения анализа документации является исследование взаимосвязи между возможными причинами возникновения отказов и их последствиями, а также установление причин скрытых и внезапных отказов, поиск зависимостей между ними.

Анализ статистических данных позволит осуществить распределение отказов горных машин по их типу, причинам и степени опасности для функционирования объекта в целом.

Результаты проведенного анализа технической документации на объект испытаний должны включать в себя:

1. Перечень проанализированной документации.
2. Схемы объекта с указанием элементов, наиболее подверженных возникновению отказов. Кроме того, данные схемы должны содержать локацию измерительных точек для осуществления контроля параметров вибрации, проведения теплового и ультразвукового контроля. Для каждого типа, марки и модели испытуемого оборудования определяются свои уникальные измерительные точки, выбор которых обусловлен особенностями конструкции агрегатов и спецификой распространения виброакустических, ультразвуковых и других типов волн.

На **втором этапе** реализации методики осуществляется разработка программы функциональной диагностики и экспертного обследования, которая подготавливается с учетом всех особенностей конструкции и специфики эксплуатации объекта испытаний.

Алгоритм функциональной диагностики должен предусматривать дискретную регистрацию показателей, пригодных для описания фактического состояния объекта испытаний (температура, вибрация, мощность, расход и т. п.). Результаты диагностирования формируют базу данных измерений, анализ полученных данных позволяет создавать протоколы о фактическом состоянии объекта испытаний.

Программа диагностирования и экспертного обследования в обязательном порядке должна включать в себя обоснование выбора конкретных методов неразрушающего контроля в зависимости от конструктивных, кинематических и эксплуатационных особенностей исследуемого объекта. Комплекс методов неразрушающего контроля должен обеспечить эффективную реализацию принципов диагностирования и контроля [5], предусматривающую получение максимума ценной диагностической информации при минимальных временных и трудовых затратах

(см. пример комплексного применения методов неразрушающего контроля на рис. 1).

Кроме того, целый ряд таких значащих факторов, как цикличность работы механизмов горных машин (например, циклы опускания и подъема ковша экскаватора, пуск и остановка питающего насоса и т. д.), изменяющаяся во время работы частота вращения приводных двигателей, а также серьезные ударные нагрузки прямо указывают на невозможность использования только лишь какого-то одного метода вибродиагностики для эффективного выявления присущих конкретному типу энерго-механического оборудования дефектов, в том числе, находящихся на начальной стадии своего развития.

В мире сегодня не существует единого метода [6, 7], который мог бы одинаково эффективно применяться как при проведении экспресс-диагностики, так и при периодическом мониторинге технического состояния объекта диагностирования по параметрам вибрации и обладать при этом достаточной помехозащищенностью. Все это обуславливает необходимость реализации комплексного диагностического подхода, причем конкретное сочетание методов зависит только от типа объекта диагностирования и режимов его работы. Результаты осуществленных ранее исследований доказано [8], что на объектах угольной и горнорудной промышленности наилучших показателей удается достичь при реализации комплексного диагностического подхода, включающего в себя сразу группу методов вибродиагностики, среди которых обычно выделяют спектральный анализ, эксцесс, анализгибающей, а также метод ударных импульсов. Иногда к указанной генеральной совокупности целесообразно добавить вейвлет-преобразование сигнала, анализ характеристики разгона/выбега и кепстральный анализ [9].

Помимо прочего, разрабатываемая программа диагностирования должна учитывать тот факт, что диагностические признаки наличия дефектов энергомеханического оборудования зачастую могут перекрывать друг друга в частотной плоскости, значительно затрудняя проводимый анализ по параметрам вибрации [10, 11]. В этом случае необходимо предусмотреть использование алгоритма фильтрации диагностической информации с учетом кинематических особенностей объекта испытаний.

Программа функциональной диагностики должна предусматривать реализацию в двух основных вариантах проведения измерений:

- диагностирование в условиях реальной эксплуатации объекта испытаний на производстве (in-situ);
- диагностика на специальном стенде в лабораторных условиях.

Приоритет при проведении полномасштабных диагностических измерений должен быть отдан именно промышленным условиям проведения испытаний (насколько это возможно), так как второй вариант реализации программы диагностирования

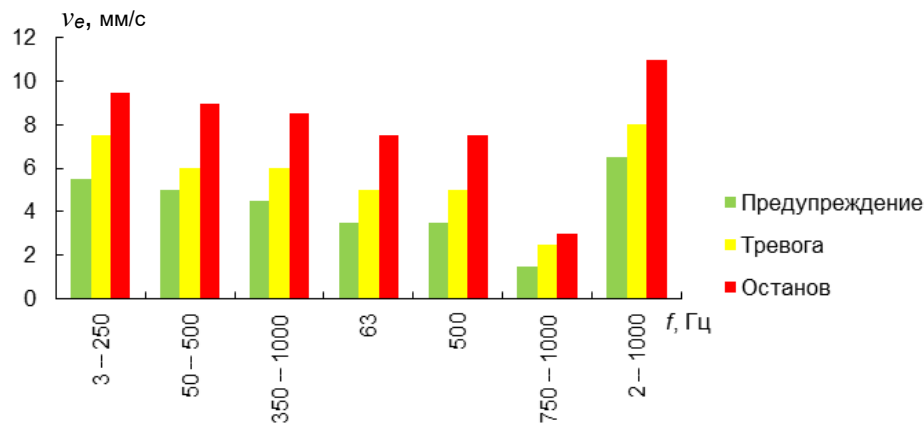


Рисунок 2. Пример нормирования спектрального состава полигармонической волны, записанной на редукторе подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70.

подразумевает проектирование и строительство специализированного стенда, что значительно усложняет проект и увеличивает стоимость проводимых работ. Кроме того, натурные испытания, осуществляемые при эксплуатации объекта в промышленных условиях, позволяют получить значительно более полную диагностическую информацию, так как регистрируемые характеристики в этом случае содержат информацию, генерируемую при синхронной работе всех узлов и агрегатов оборудования в сборе. Если принять во внимание тот факт, что условия реальной длительной эксплуатации на предельных режимах значительно отличаются от лабораторных, то ценность получаемой диагностической информации сложно переоценить.

Ресурсные испытания в лабораторных условиях наилучшим образом подходят для диагностирования отдельных узлов и элементов горной техники, в частности: электрических двигателей и генераторов, редукторов различного типа и конструкции, соединительных муфт, приводных барабанов, подшипников и т. п.

На **третьем этапе** реализации алгоритма методики испытаний осуществляется экспертное обследование объекта. Все используемое для проведения контроля оборудование в обязательном порядке должно иметь действующие сертификаты поверки метрологических характеристик и лицензионное программное обеспечение.

Проводимые испытания должны базироваться на разработанной программе, в основе которой находится принцип комплексной реализации сразу нескольких методов неразрушающего контроля, а именно: визуально-измерительного (с использованием эндоскопии), теплового контроля, ультразвуковой дефектоскопии и вибродиагностики.

При необходимости экспертное обследование может быть дополнено результатами замеров твердости металла, толщинометрии, анализом состава металла, акустико-эмиссионного контроля.

Результаты обследования оформляются в виде заключения, в котором указывается фактическое состояние объекта испытаний (в том числе энергомеханического оборудования, сварных соединений и несущих металлоконструкций). Результаты анализа выявленных повреждений оформляются в виде, позволяющем осуществить их дальнейшее использование с целью изучения механизма возникновения и развития выявленных дефектов, а также для выявления характеристик предельного состояния объектов испытаний и поиска определяющих зависимостей между диагностическими критериями.

**Четвертый** этап реализации методики испытаний предусматривает разработку рекомендаций по применению методов восстановления работоспособности горно-шахтного оборудования с учетом выявленных особенностей формирования и развития дефектов, способных привести к ресурсному отказу объекта испытаний.

Согласно результатам проведенного неразрушающего контроля, в рекомендациях четко должны быть указаны конструктивные недочеты и основные проблемные места объекта испытаний, в частности, зоны нарушения жесткости опорной системы, сварочных соединений и основного металла. Методы восстановления сварочных соединений и основного металла должны предусматривать возможность использования новых высокоэффективных наноконструктивных материалов для выполнения ремонта и/или восстановления поверхностного слоя контактирующих поверхностей.

Разрабатываемые рекомендации в случае необходимости могут включать решение задач виброналадки (в частности, динамической многоплоскостной балансировки тел вращения и прецизионной лазерной центровки валов агрегатов), а также должны содержать четкое описание проблемных узлов и элементов энергомеханического оборудования объекта испытаний (например, подшипников, соединительных муфт и других деталей) с указанием их конструктивного местоположения, причин возникновения и ускоренного развития дефектов, а также предлагаемых ремонтно-восстановительных мероприятий и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

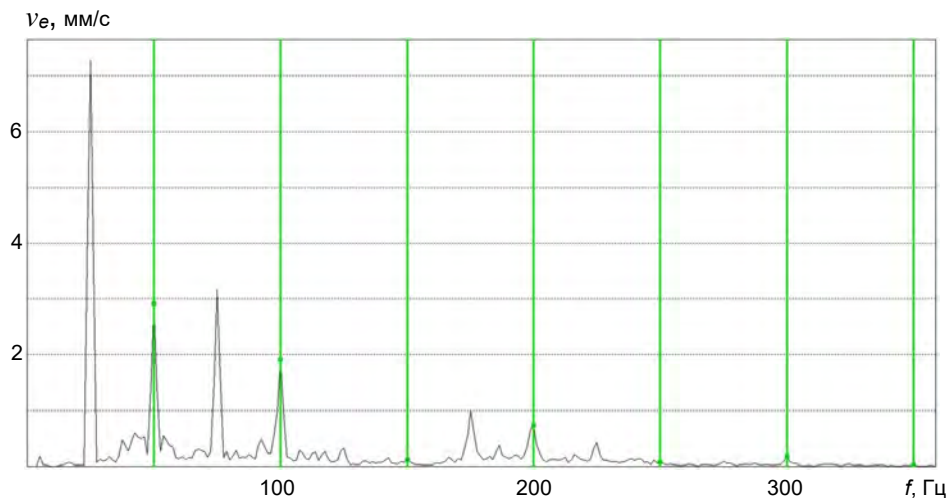
Кроме того, на данном этапе возможно осуществление расчета остаточного гарантийного минимального ресурса на основе реализации математического прогнозного моделирования с использованием полученных ранее диагностических данных. Остаточный ресурс объекта испытаний может быть определен на основе прогнозирования процесса изменения его технического состояния.

В условиях действующей сегодня на предприятиях топливно-энергетического комплекса России системы планово-предупредительных ремонтов все сроки проведения технического обслуживания и ремонтов технологического оборудования четко регламентированы. Максимальную ценность в таких условиях представляет наличие информации о гарантированной возможности безаварийной работы объекта исследования до момента проведения очередного ремонта [12]. Именно поэтому наибольший практический интерес представляют модели, способные осуществить эффективное краткосрочное прогнозирование процесса изменения параметров, характеризующих состояние сложной механической системы.

Доказано [3, 13], что наиболее эффективным решением данной задачи является использование принципов экспоненциального адаптивного краткосрочного прогнозирования. Адаптивность прогнозной модели подразумевает ее способность изменяться, приспосабливаясь к внешним условиям, что достигается путем коррекции параметров модели по результатам последних входных данных.

В рамках решения задачи осуществления эффективного моделирования и качественной оценки процессов деградации технического состояния важную роль играет совершенствование





**Рисунок 3. Пример спектра полигармонической волны, содержащей признаки межвиткового замыкания обмоток статора сетевого двигателя экскаватора ЭКГ-5А.**

методологии нормирования составляющих полигармонических волн, генерируемых при работе энергомеханического оборудования объектов исследования [8].

Здесь как нельзя лучше зарекомендовало себя использование индивидуальных спектральных масок, разрабатываемых с учетом конструктивных и кинематических особенностей обследуемого оборудования (см. пример на рис. 2). Такое направление совершенствования методологии нормирования представляет гораздо большие возможности по сравнению с оценкой состояния объекта по общему уровню. Этот факт обусловлен значительной степенью индивидуализации разрабатываемых масок, что открывает широкие возможности для разработки математических моделей для прогнозирования изменения параметров, описывающих техническое состояние системы.

Основные сложности нормирования критериев для разработки спектральных масок заключаются в отсутствии четких рекомендаций по выбору конкретных частотных полос, пригодных для построения спектральных масок и слабой проработанности вопросов нормирования отдельных составляющих виброакустического сигнала для оборудования угольной промышленности [10]. Этот факт обусловлен, прежде всего, недостаточным количеством статистической информации по параметрам механических колебаний, генерируемых при работе оборудования горных машин. Кроме того, определенные затруднения при нормировании уровня отдельных составляющих спектра вызваны изменением частотного состава групп информативных гармоник в процессе работы ряда агрегатов горной техники. Для решения задачи совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний необходимо выявить основные закономерности изменения технического состояния диагностируемого оборудования [14]. Для этого необходимо рассмотреть всю совокупность диагностических признаков отдельно для каждого из основных дефектов, соответствующих данному типу агрегатов.

В рамках выполнения цикла исследований, связанных с поиском критериев предельного состояния и разработкой единых диагностических критериев для оценки состояния сложных механических систем по параметрам вибрации, удалось выявить наиболее информативные частотные диапазоны, пригодные для создания индивидуальных спектральных масок для оборудования угольной и горнорудной промышленности. Среди данного оборудования карьерные экскаваторы, буровые установки, дробильно-сортировочное и углеобогатительное оборудование. Для всех разрабатываемых спектральных масок были определены свои индивидуальные границы для зон оценки технического состояния – «хорошо», «удовлетворительно», «предупреждение», «тревога», «экстренная остановка оборудования».

Кроме того, разработка адекватных прогностических моделей изменения технического состояния невозможна без комплексного использования результатов анализа параметров виброакустических волн при помощи нескольких диагностических методов (классическое сочетание – прямой спектральный анализ в стандартном и расширенном частотном диапазоне, эксцесс, анализ огибающей спектра, иногда к указанной совокупности методов целесообразно добавить анализ ударных импульсов [8]). Для каждого отдельного элемента конструкции динамического оборудования объекта испытаний и/или группы сопутствующих дефектов должен быть предложен свой единый диагностический критерий оценки технического состояния, учитывающий результаты комплексной обработки исходных данных несколькими различными методами виброанализа.

В рамках выполненных ранее работ была осуществлена формализация более 120 базовых диагностических признаков, пригодных для выявления 7 основных групп дефектов энергомеханического оборудования горных машин, среди которых – нарушение жесткости системы, нарушение соосности валов агрегатов, неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты подшипников качения, повреждения зубчатых передач, дефекты соединительных муфт, дефекты электрической природы (см. пример на рис. 3). Основная часть описываемых признаков сосредоточена в области спектрального анализа виброакустических волн; кроме того, формализации подверглись результаты анализа диагностических данных с применением эксцесса, принципов выделения огибающей, анализа характеристики выбега, вейвлет-анализа параметров исходной волны.

Разработка адекватных прогностических моделей развития дефектов узлов и агрегатов горной техники была бы невозможна без наличия устойчивой теоретической базы, учитывающей характер изменения спектрального состава исследуемых характеристик [3, 13]. Использование в рамках создаваемой методики математических моделей прогнозирования изменения технического состояния объекта испытаний и оценки его остаточного ресурса открывает новые возможности для совершенствования методики нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе сложных механических систем. Универсальность предлагаемой деградационной модели заключается в возможности прогнозирования изменения состояния сложных механических систем, в состав которых входят самые разные по типу и конструкции узлы и агрегаты. Использование в качестве моделируемых параметров разрабатываемых единых критериев, основанных на результатах анализа вибрации, делает данную модель по-своему уникальной.

Таким образом, полученные в рамках настоящей работы результаты позволили доказать принципиальную состоятельность разрабатываемой методологии проведения испытаний оборудования горных машин, основанной на принципах реализации комплексного диагностического подхода и использования элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию, таких как прогностическое моделирование процессов деградации технического состояния и совершенствование нормирования с использованием спектральных масок и единых диагностических критериев. Реализация принципов настоящей методологии проведения испытаний позволит повысить надежность горной техники и минимизировать количество аварийных отказов сложного дорогостоящего оборудования, что в конечном итоге окажет положительное влияние на безопасность горных работ в целом.

## 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*. 2014. Vol. 37. P. 86–95.
2. Puchalski A. A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 56–57. P. 173–180.
3. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.
4. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014* (June 16–20, 2014). Düsseldorf, Germany, 2014. 12 p.
5. Неразрушающий контроль: справочник / под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. М., 2005. Т. 7. 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. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.
8. Герике П. Б. Опыт создания моделей деградации технического состояния динамического оборудования экскаваторов-драглайнов на основе анализа параметров механических колебаний // *Вестник Науч. центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2015. № 3. С. 66–73.
9. Герике П. Б. Неразрушающий контроль оборудования гидромеханизации на угольных разрезах Кузбасса // *Изв. УГГУ*. 2013. № 4. С. 72–76.
10. Pozhidaeva V. 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.
11. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration // *Journal of Mechanical Design*. 2008. Vol. 130. P. 121402/1–121402/13. DOI: 10.1115/1.2976803.
12. Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.
13. Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
14. Bently D. E., Hatch C. T. *Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics*. Minden: Bently Pressurized Bearing Press, 2002. 726 p.

## REFERENCES

1. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. 2014, Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan. *Engineering Failure Analysis*. vol. 37, pp. 86–95.
2. Puchalski A. 2015, A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 56–57, pp. 173–180.
3. Sushko A. E. 2007, *Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh sistem: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of special mathematical and software for automated diagnostics of complex systems: the dissertation of the candidate of technical sciences], Moscow, 170 p.
4. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. 2014, 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, 12 p.
5. Klyuev V. V. 2005, *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik* [Non-destructive testing: reference book], Moscow, vol. 7, 828 p.
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. Luk'yakov A. V. 1999, *Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin* [Classifier of vibrodiagnostic features of defects of rotary machines], Irkutsk, 230 p.
8. Gerike P. B. 2015, *Opyt sozdaniya modeley degradatsii tekhnicheskogo sostoyaniya dinamicheskogo oborudovaniya ekskavatorov-draglaynov na osnove analiza parametrov mekhanicheskikh kolebaniy* [Experience in creating models of degradation of technical condition of dynamic equipment of dragline excavators on the basis of analysis of mechanical vibration parameters]. *Vestnik Nauch. tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti* [Industrial Safety], no. 3, pp. 66–73.
9. Gerike P. B. 2013, *Nerazrushayushchiy kontrol' oborudovaniya gidromekhanizatsii na ugol'nykh razrezakh Kuzbassa* [Non-destructive monitoring of hydromechanization equipment at coal mines of Kuzbass]. *Izv. UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 4, pp. 72–76.
10. Pozhidaeva V. 2005, Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. *World Tribology Congress III*, Washington, USA.
11. Liu G., Parker R. 2008, Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. vol. 130, pp. 121402/1–121402/13.
12. Klishin V. I., Zvorygin L. V., Lebedev A. V. et al. 2011, *Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy* [Security problems and new technologies for underground mining of coal deposits], Novosibirsk, 524 p.
13. Eshcherkin P. V. 2012, *Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskh burovykh stankov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of methods for diagnosing and forecasting the technical condition of diesel-hydraulic drilling rigs: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences], Kemerovo, 18 p.
14. Bently D. E., Hatch C. T. 2002, *Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics*, Minden, 726 p.

**Павел Борисович Герике,**

am\_besten@mail.ru

Федеральный Исследовательский Центр  
угля и углехимии СО РАН

Россия, Кемерово, просп. Ленинградский, 10

**Pavel Borisovich Gerike,**

am\_besten@mail.ru

Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry  
of Siberian Branch of RAS

Kemerovo, Russia