

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-118-124

УДК 53.083(430.1)

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БУРОВЫХ СТАНКОВ

## NEW APPROACHES TO ASSESSING THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL DRILLING RIGS

Герике Павел Борисович

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

Pavel B. Gericke

C.Sc. (Engineering), Associate Professor

Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН,  
650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

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

**Аннотация:** В настоящей статье приведены результаты исследований в области совершенствования методологических подходов к оценке фактического технического состояния электрических буровых станков типа СБШ и СБР на основе комплексного анализа параметров вибрации и использования единых диагностических критериев, пригодных для разработки математических деградационных моделей изменения состояния сложных механических систем. Проведенный анализ диагностических характеристик, полученных при работе энерго-механического оборудования электрических буровых станков, позволил сгруппировать дефекты данного типа горных машин по базовым группам, которым в совокупности соответствует более ста двадцати диагностических признаков по параметрам вибрации. Данные признаки были классифицированы и формализованы для удобства использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по параметрам генерируемых механических колебаний. В рамках настоящей работы доказана эффективность реализации комплексного диагностического подхода для оценки фактического состояния технических устройств по параметрам генерируемой ими вибрации. Показано, что только с широким использованием современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность для своевременного выявления дефектов оборудования горных машин и разработки прогнозных моделей изменения их технического состояния. Основой для реализации элементов системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию послужит разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний и создаваемые единые диагностические критерии оценки состояния, основанные на анализе параметров механических колебаний, разрабатываемые по количеству основных групп неисправностей диагностируемого оборудования. Полученные в рамках настоящего исследования научные результаты безапелляционно доказывают принципиальную возможность создания группы адекватных единых диагностических критериев, использование которых повысит эффективность прогнозирования процесса изменения диагностических параметров.

**Abstract:** This article presents the results of researches in the field of improvement of methodological approaches to an estimation of an actual technical condition of electrical drilling rigs on the basis of the complex analysis of vibration parameters and using the uniform diagnostic criteria suitable for development of mathematical degradation models of change in a condition of complex mechanical systems. The analysis of diagnostic features of power mechanical equipment of drilling rigs allowed to classify the defects of this type of mining machines in several major groups, which together correspond to more than one hundred and twenty diagnostic signs by vibration parameters. These signs have been classified and formalized for ease of use in the development of the algorithm code of the automated control of complex systems in the parameters generated by mechanical vibrations. As part of this study the efficiency of the comprehensive diagnostic approach to assess the technical condition of the parameters generated by the vibration of machinery was proved. It is shown that only with the extensive use of modern methods of vibration analysis and nondestructive testing it becomes possible to detect in time the defects of mining machinery and to develop predictive models of change in their technical condi-

tion. The platform for the implementation of elements of the concept of system maintenance technology in its actual technical condition may serve as a developed set of diagnostic rules to identify defects on the analysis of mechanical fluctuations of parameters and to create a unified diagnostic criteria for assessment of the state, based on the analysis of parameters of mechanical vibrations developed by the number of basic groups of diagnosed equipment defects. The results of these studies demonstrate the ability to create groups of diagnostic criteria, which can be used to carry out forecast of diagnostic parameters.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, единый диагностический критерий, прогнозное моделирование, буровые станки.

**Key words:** vibration analysis, a single diagnostic criterion, predictive modeling, drilling rigs.

Анализ диагностических данных, полученных при проведении процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах Кузбасса, позволяет сделать вывод о том, что в недопустимом техническом состоянии сегодня находится до 40% от общего числа обследованных электрических буровых станков. В рамках настоящей работы использовались результаты, полученные при обследовании выборки, состоящей из 10 единиц технических устройств (СБШ 250МНА-32 – 3 ед., СБР – 160 – 2 ед., СБШ-270ИЗ – 1 ед, 3 СБШ-200-60 – 4 ед.), сбор диагностической информации проводился на протяжении шести лет с интервалом обследования 1 раз в год. Все обследованные буровые станки эксплуатируются на угольных разрезах и каменных карьерах Кузбасса и подлежат прохождению обязательной процедуры экспертизы промышленной безопасности, как выработавшие свой нормативный срок.

Результаты исследований свидетельствуют об общем неудовлетворительном состоянии обследуемого оборудования и неэффективности системы планово-предупредительных ремонтов в совре-

метрам вибрации являются не совершенными, не позволяют быстро выявлять все дефекты оборудования с оценкой степени их вклада в общий уровень исследуемого сигнала, что является причиной необходимости разработки критериев предельного состояния энерго-механического оборудования широкого типового и модельного ряда горных машин, основанных на результатах вибродиагностики.

На сегодняшний день не существует единого метода контроля по параметрам вибрации, пригодного для выполнения оценки состояния самых разных объектов диагностирования. Именно поэтому в рамках проводимого цикла исследований [1] была обоснована необходимость реализации принципов комплексного диагностического подхода, включающего в себя такие методы практического вибродиагностики, как спектральный анализ, эксцесс, анализ огибающей и некоторые другие. Конкретное сочетание методов диагностики зависит, в данном случае, только от типа объекта исследования и режимов его работы.

Одной из основных задач настоящего исследования является разработка новых диагностиче-

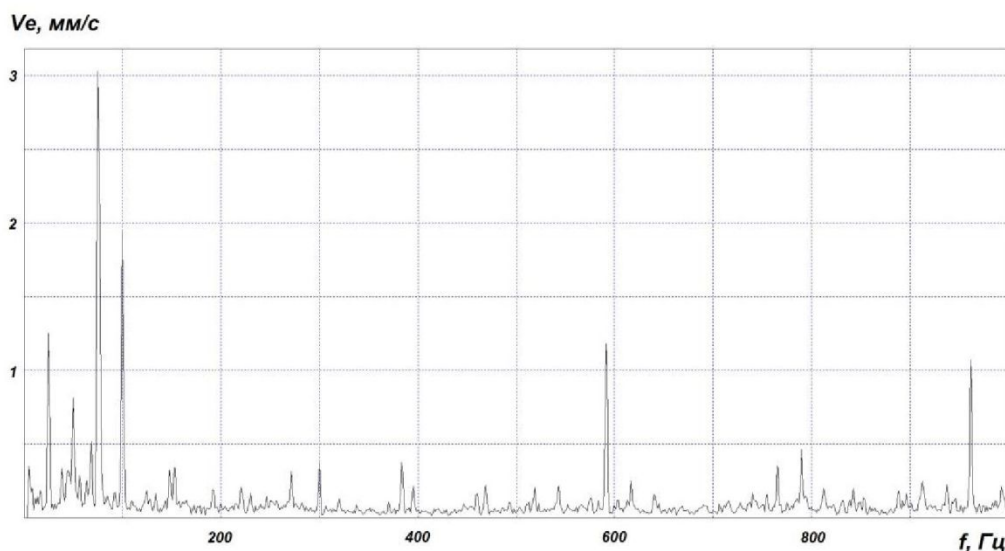


Рис. 1. Признаки не критичного нарушения жесткости системы. Силовая установка бурового станка СБР-160.

менных условиях. Кроме того, реализованные в рамках системы экспертизы промышленной безопасности методологические подходы к оценке технического состояния горных машин по пара-

метрам вибрации, использование которых позволяет извлечь максимум полезной диагностической информации о фактическом состоянии оборудования горных машин. К данным критериям в обязатель-

ном порядке должны применяться определенные требования, позволяющие сделать их использование максимально эффективным. Так, например, разрабатываемые критерии должны иметь возможность выявления дефектов на всех стадиях их развития – от зарождения первоначального повреждения до стадии, предшествующей аварийному выходу из строя технического устройства. Кроме того, использование таких критериев на практике должно обеспечить эффективное комплексное выявление дефектов всех узлов и агрегатов энерго-механического оборудования горной техники вне зависимости от вида дефекта, типа оборудования и режимов его работы.

Автором настоящей работы была предложена концепция создания набора единых диагностических критериев (ЕДК) оценки фактического состояния работающего энерго-механического оборудования горных машин, пригодных для диагностирования самых разных технических устройств по результатам анализа параметров вибрации, причем количество разрабатываемых ЕДК должно равняться числу базовых групп дефектов оборудования горных машин. Таким образом, данные критерии должны быть разработаны для всех семи основных типов дефектов – нарушения жесткости системы, дефектов подшипников, зубчатых передач различного типа и конструкции, неуравновешенности вращающихся масс, нарушения центровки агрегатов, дефектов соединительных муфт и дефектов электрической природы (таких, как замыкание обмоток статора, нарушение воздушного зазора или асимметрия магнитного поля). Некоторые примеры диагностических признаков наличия дефектов оборудования буровых станков приведены на рисунках 1 – 3. Из-за существенных ограничений на область применения различных методов вибродиагностики (например, таких как низкие частоты вращения агрегатов и наличие так называемых «паразитных» составляющих частотного спектра), набор конкретных диагностических характеристик и нормируемых параметров, используемый для создания ЕДК для каждого из дефектов, будет, в своем роде, уникальным [2, 3]. Уникальность таких критериев обеспечивается тем, что результаты анализа исключают необходимость использования для проведения оценки и прогнозирования процесса изменения технического состояния объектов диагностирования большого числа диагностических признаков и правил.

Кроме решения задачи оценки фактического состояния объектов диагностирования ЕДК с успехом могут применяться для прогнозирования процесса деградации объектов исследования при реализации алгоритмов адаптивного краткосрочного моделирования, избавив их от главного недостатка – крайне ограниченной области применения. Доказано, что именно такой тип алгоритмов наилучшим образом использует экспериментальные данные предыдущих измерений, адаптируя

параметры модели к изменению внешних условий, что является необходимым и достаточным залогом успешного применения таких моделей в условиях действующей сегодня на предприятиях ТЭК Кузбасса системы планово-предупредительных ремонтов [1].

Большинство существующих единых диагностических критериев основаны на допущении, что необходимый и достаточный минимум диагностической информации, практически полностью характеризующей фактическое состояние объекта диагностирования, может быть получен с помощью нормирования одного или нескольких параметров виброакустического сигнала. Качественное отличие разрабатываемых ЕДК заключается в том, что при осуществлении выбора основных критериев предельного состояния используются сразу несколько основных информативных показателей, например:

- общий уровень СКЗ виброскорости и виброускорения в стандартном и расширенном частотных диапазонах;
- максимумы амплитуд подшипниковых и зубчатых частот по параметрам виброскорости и/или виброускорения в расширенном частотном диапазоне ( $10 \dots 10000$  Гц);
- частотные полосы, ряды или отдельные гармоники, свидетельствующие о наличии повреждений однотипного характера (например, гармонические ряды нарушения жесткости системы  $[0,4f_R \dots 24 f_{Rmax}]$  или расцентровки двигателя с редуктором  $[f_R \dots 4 \dots 6f_R]$ );
- размах виброперемещения в диапазоне  $10 \dots 1000$  Гц.

Осуществленный в рамках настоящего исследования обзор научных публикаций, посвященных проблематике разработки алгоритмов автоматизированной диагностики и создания единых критериев оценки технического состояния, показал, что область применения таких алгоритмов, как правило, ограничивается не сложными механическими объектами, например, подшипниками качения [4, 5, 6, 7]. Кроме того, на точность таких алгоритмов сильное влияние оказывает количество и качество используемых диагностических данных, а также наличие искажений виброакустических сигналов.

Исследованиями [1] доказано, что при создании единых критериев для оценки технического состояния, например, редукторов переборного типа, широко используемых в конструкции электрических буровых станков, наиболее эффективной может оказаться комплексная реализация нескольких базовых диагностических признаков, в частности:

1. Общего уровня зубцовых составляющих спектра по параметру виброскорости в диапазоне  $2 \dots 1000$  Гц, включая частоты пересопряжения зубчатых колес, частоты неуравновешенности шестерен и валов, а также частоты перекоса валов редуктора.



2. Общего уровня виброакустического сигнала и пиковых величин отдельных гармоник по параметру виброускорения в диапазоне 2...8000 Гц.

3. «Меры подобия», определяемой по спектру огибающей сигнала в области высоких частот.

Анализ значительного объема диагностических характеристик, регистрируемых при работе энерго-механического оборудования электрических буровых станков, позволил создать совокупность из более чем ста двадцати диагностических признаков по параметрам вибрации, соответствующих основным группам дефектов. Все эти признаки были разбиты по типу причин, вызывающих повышенную вибрацию, и формализованы для удобства реализации алгоритма автоматизированного контроля сложных механических систем по параметрам генерируемых механических колебаний.

Исследование параметров вибрации, генерируемой при работе оборудования буровых станков, позволило сделать вывод о том, что необходимый и достаточный минимум диагностической информации может быть получен при использовании результатов комплексного диагностического подхода, включающего результаты спектрального анализа по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном до 7 000 Гц частотном диапазоне, анализа огибающей спектра в высокочастотной области и эксцесса. При этом ЕДК для диагностирования технического состояния всех основных элементов энерго-механического оборудования станков (электродвигателей, компрессоров, подшипников, соединительных муфт, редукторов) могут быть основаны на результатах анализа параметров исходных характеристик с использованием данных методологических подходов. При разработке ЕДК для каждого из базовых

типов дефектов оборудования электрических буровых станков важной задачей является удаление из спектра всех «лишних» гармонических составляющих, появление которых вызвано иными причинами, нежели рассматриваемая группа дефектов. Таким образом, данная процедура клиппирования, используемая для выделения информативных составляющих спектра, отвечающих за наличие дефектов подшипников качения, зубчатых передач, соединительных муфт, центровки валов и т.п. основана на удалении из спектра всех составляющих иной природы. Таким образом, число разрабатываемых алгоритмов клиппирования должно равняться максимально теоретически возможному количеству дефектов на данном типе оборудования.

Наибольшее распространение в алгоритмах клиппирования получила процедура уточнения оборотной частоты вращения, принцип реализации которой основан на поиске отдельных гармоник с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне спектра. Анализ публикаций по теме исследований [8, 9, 10, 11, 12, 13] показал, что на сегодняшний день существует несколько аналогичных процедур, которые отличаются принципами выявления оборотной частоты (которая не всегда совпадает с максимальной по амплитуде гармоникой в области низких частот). Из них наибольший интерес представляет программа расчета оборотных, предложенная [14], т.к. она показала высокую степень достоверности при работе со спектрами виброскорости и виброускорения подшипников качения, где максимальные амплитуды значащих гармоник априори не принадлежали оборотной частоте. Данная программа расчета оборотных была использована для реализации алгоритмов клиппирования при разработке ЕДК для некоторых объектов диагностирования в рам-

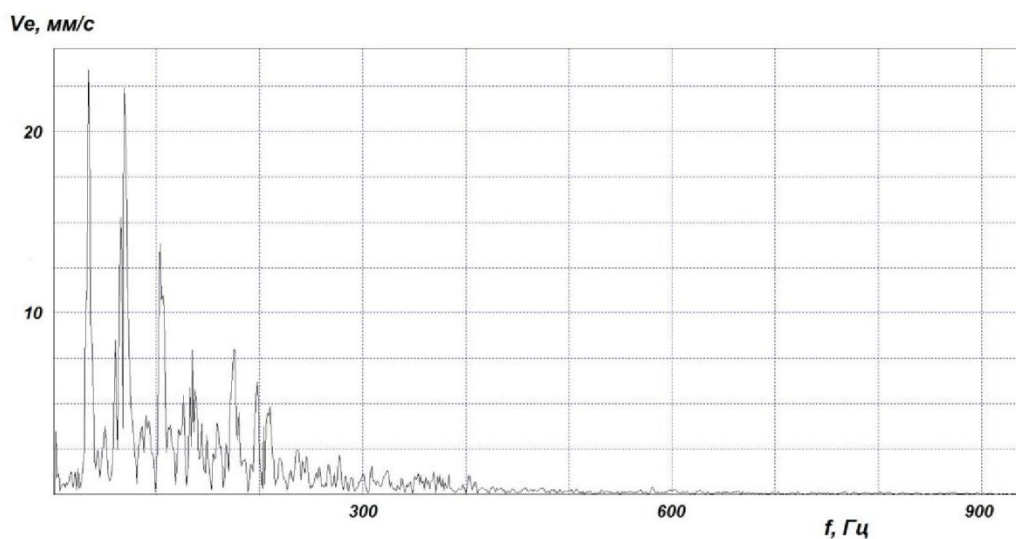


Рис. 2. Перекус валов редуктора, выкрашивание зубьев редуктора механизма подачи бурового станка СБР-160.

как выполнения настоящего исследования.

На примере зубчатых передач в составе редукторов механизмов подачи буровых станков серий СБШ и СБР ниже кратко приведен алгоритм разработки ЕДК, который может использоваться для выполнения оценки состояния однотипных объектов диагностирования. Наиболее эффективный путь для разработки такого критерия представляет реализация с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [14]. Данная процедура включает в себя пошаговую сегментацию групп однотипных объектов (редукторов переборного типа) с различной степенью развития всех присущих им дефектов (несоосность и перекосы валов, неуравновешенность валов и шестерен, абразивный износ и выкрашивание зубьев зубчатых колес и т.д.).

Разработка алгоритма создания ЕДК включает в себя несколько основных этапов:

1. Выделение оборотной.
2. Процедуру фильтрации для выделения диагностического критерия (клиппирование). Используется операция поэтапного клиппирования, предложенная в работах [14]. Задача решается в несколько этапов, начиная с выделения значимых компонент спектра по одному из диагностических параметров, например, виброскорости. Затем осуществляется рекуррентное клиппирование модифицированного (сглаженного в области диагностических признаков) спектра с обнулением гармонических рядов оборотной частоты, подшипниковых составляющих и т.д., т.е. всех частот, не связанных напрямую с разрабатываемым ЕДК.
3. Создание результирующего критерия по каждому из параметров (обычно, рассматриваются параметры виброскорости, виброускорения, эксцесс и огибающая спектра сигнала [1, 3]). Так, для формирования результирующего критерия виброскорости рассчитывается общий вклад составляющих зубцовой природы. Для этого определяется количество составляющих модифицированного спектра. Виброускорение обычно рассматривается как общий уровень профильтрованного сигнала, спектр огибающей описывается через условную меру сходства рассматриваемых сигналов. При рассмотрении такого объекта, как редуктора механизмов подачи электрических буровых станков, параметр эксцесса не рассматривается, т.к. его реализации мешает высокий уровень фоновых шумов и значительный уровень случайных составляющих спектра.
4. Анализ ограничений на применение диагностических критериев (низкие частоты вращения, тип используемых датчиков, паразитные составляющие сигнала и т.п.) и их последующая корректировка.

5. Формирование обобщенного критерия на основе множества выявленных и формализованных диагностических признаков наличия дефектов проводится с использованием принципов оптимальной скаляризации, т.е. введения скалярной величины, при помощи которой можно определить группу разномерных признаков [14]. Критерий проверяется по признаку достаточной «разделяемости» объектов классы в зависимости от их фактического технического состояния, и если разрабатываемый ЕДК удовлетворяет перечисленным требованиям, он признается корректным и допускается его дальнейшее использование [15].
6. Создание ЕДК для каждой последующей группы дефектов диагностируемого оборудования подразумевает повтор пунктов 2-5 данного алгоритма.

Автоматизация алгоритма реализации группы обобщенных диагностических критериев на практике позволит сократить время, затрачиваемое на проведение анализа параметров вибрации, и свести к минимуму количество совершаемых экспертами ошибок [1].

Кроме того, еще одним преимуществом разрабатываемых ЕДК является то, что эти критерии могут использоваться при разработке адаптивных деградационных моделей, позволяющих провести краткосрочное прогнозирование на один-два интервала моделирования, что является необходимым и достаточным условием для реализации принципов прогнозирования на предприятиях угольной и горнорудной отраслей промышленности в условиях действующей системы планово-предупредительных ремонтов [13].

Таким образом, полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что создаваемые ЕДК для энерго-механического оборудования буровых станков могут быть использованы для выполнения оценки фактического состояния объектов диагностирования, а также применяться в качестве моделируемых параметров при разработке адаптивных прогностических моделей изменения технического состояния. Все это позволяет использовать ЕДК в качестве одного из базовых элементов системы обслуживания горной техники по ее фактическому состоянию [1, 3]. Сформулированный методологический подход к разработке единых диагностических критериев и моделированию деградационных процессов оборудования технических устройств имеет важное практическое значение и может быть применен для решения задачи повышения безопасности проведения открытых горных работ и минимизации аварийных отказов техники и несчастных случаев, связанных с недопустимым состоянием горных машин, эксплуатируемых на предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике П.Б. Актуальные проблемы диагностирования и оценки остаточного ресурса горно-шахтного оборудования /П.Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 5. – Кемерово. – 2017. – С. 111-118.
2. Ещеркин П.В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
4. 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
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
6. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
7. 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.
8. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
9. 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.
10. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
11. Кравченко, В. М. Повреждения подшипников качения в результате износа./В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин.// Горное оборудование и электромеханика. - № 2, 2013. – С. 45-47.
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. Герике П.Б. Влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке на энергоёмкость процесса дробления /А.Г. Никитин, Ю.А. Епифанцев, К.С. Медведева, П.Б. Герике // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, т.60 № 10. – Москва. – 2017. – С. 846-848.
14. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
15. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.

## REFERENCES

1. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. #5. Pp. 111-118. (rus)
2. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih 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)
3. 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)
4. 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
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.



6. 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)
7. 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)
8. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)
9. 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. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/> (eng)
10. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)
11. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2013. #2. Pp. 45-47. (rus)
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. Nikitin A.G, Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya, Vol.60 # 10. – Moscow. – 2017. – Pp. 846-848. (rus)
14. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoho obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)
15. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)

Поступило в редакцию 17.12.2017

Received 17.12.2017