

Герике Павел Борисович<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, Ещеркин Павел Васильевич<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Федеральний исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10

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

E-mail: am\_besten@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИБРОАНАЛИЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЕДИНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

**Аннотация:** *Актуальность работы.* В рамках совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний были предприняты попытки к поиску решения актуальной задачи по разработке единых критериев для оценки и прогнозирования процессов деградации на примере энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, для чего произведено обобщение результатов анализа данных, полученных в рамках выполнения технического диагностирования подшипников и соединительных муфт, используемых к конструкции экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ.

**Цель работы:** *Обоснование и разработка методологии создания алгоритмов единых диагностических критериев на основе использования результатов комплексного подхода к диагностике сложных механических систем по параметрам вибрации и скаляризации разномерных диагностических признаков выявления дефектов оборудования электрических карьерных экскаваторов.*

**Методы исследования:** *В рамках выполнения настоящего исследования использовались результаты комплексного подхода к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе узлов и агрегатов горных машин. Регистрируемые данные обрабатывались с применением подходов спектрального анализа в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализа огибающей спектра, эксцесса и анализа выбега агрегата. Данные анализа подтверждают эффективность предложенного набора диагностических методологий для получения научного задела, пригодного для разработки единых диагностических критериев.*

**Результаты:** *Полученные результаты доказывают принципиальную возможность использования предложенного методологического подхода для создания алгоритмов разработки единых диагностических критериев, пригодных для осуществления высокоэффективной оценки технического состояния и прогнозирования процессов развития дефектов в основных конструктивных узлах карьерных экскаваторов.*

**Ключевые слова:** *вибродиагностика, единые диагностические критерии, карьерные экскаваторы, механические дефекты, прогнозное моделирование.*

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

**DOI:** 10.26730/1816-4528-2020-3-42-48

В рамках выполнения научного проекта РФФИ и Кемеровской области № 20-48-420010\20 были сформулированы задачи по разработке методологии сбора диагностических данных на предельно изношенных карьерных экскаваторах с учетом специфики условий их эксплуатации и конструктивных особенностей, а также по созданию совокупностей диагностических признаков, пригодных для выявления и оценки степени развития дефектов энерго-механического оборудования, и разработке новых единых диагностических критериев (ЕДК) и осуществлению их нормирования. Использование на практике единых критериев позволит получить качественно новую оценку и прогнозирование процессов изменения фактического состояния горных машин, уменьшить время контроля, уменьшить уровень зависимости результатов

анализа от квалификации специалистов контроля.

Решение задачи по разработке критериев предельного состояния сложных механических систем и созданию прогнозных математических моделей развития дефектов энерго-механического оборудования было бы невозможным без выявления закономерностей изменения технического состояния оборудования горных машин на основе анализа параметров вибрации [1]. Комплексного критерия для оценки технического состояния по параметрам вибрации, пригодного для выявления различных дефектов узлов и агрегатов горной техники и оценки вклада дефектов в степень риска возникновения аварийных отказов оборудования, на сегодняшний день не существует [2, 3]. Совершенствование методологии

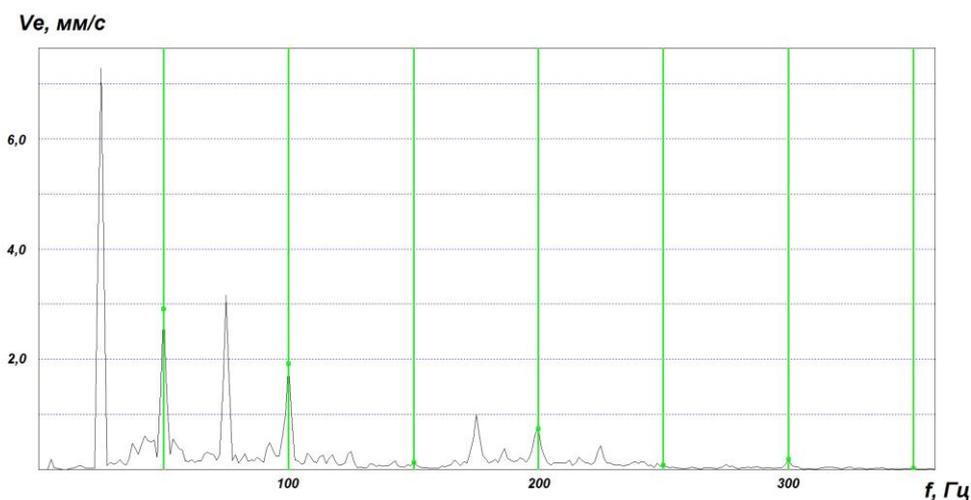


Рис. 1. Спектр вибрации сетевого двигателя ЭКГ-5А, содержащий признаки наличия дефекта электрической природы

нормирования параметров механических колебаний и создание единых диагностических критериев, способных заменить собой большое количество диагностических признаков и правил выявления дефектов, является, таким образом, актуальной научной задачей. Для решения этой задачи необходимо дополнить и систематизировать уже имеющиеся знания в области изучения процессов формирования и развития виброакустических волн, несущих признаки наличия дефектов технологического оборудования, что позволит приступить к разработке единых диагностических критериев.

Первым этапом решения этой задачи является разработка программы функциональной диагностики, учитывающей особенности сбора диагностических данных на предельно изношенных карьерных экскаваторах с учетом специфики условий их эксплуатации и конструктивных особенностей. Программа диагностирования должна включать обоснование комплексного подхода к диагностике в зависимости от конструктивных, кинематических и эксплуатационных особенностей объектов диагностирования. Комплексный подход к диагностике должен обеспечить получение максимума ценной диагностической информации и исключить случаи неявного толкования результатов контроля, при этом затраты времени и труда на проведение замеров и последующий анализ регистрируемых характеристик должны быть по возможности минимальными [4, 5].

На процесс проведения замеров вибрации на оборудовании карьерных экскаваторов значительное влияние оказывают следующие факторы – цикличность работы агрегатов (циклы опускания и подъема ковша экскаватора, циклы работы механизмов напора и т.д.), изменяющиеся во время работы оборотные частоты, знакопеременные ударные нагрузки, труднодоступность некоторых измерительных точек, ограниченность времени на проведение контроля. Кроме того, заметные искажения регистрируемых

характеристик привносят наличие неподготовленных измерительных поверхностей, отрицательная температура окружающего воздуха или ее резкий перепад, повреждения в системе «датчик-кабель-прибор» и т.д. По этим причинам использование на практике только лишь какого-то одного метода виброанализа для осуществления полноценной диагностики, исключающей получение ложных заключений о фактическом состоянии объектов диагностирования, является невозможным. Конкретное сочетание методов виброанализа определяется только наборами типов объектов диагностирования и режимами их работы. Наибольшей эффективности при проведении анализа параметров вибрации, генерируемой при работе оборудования карьерных экскаваторов, удастся добиться при условии реализации принципов комплексного диагностического подхода, включающего спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазонах, эксцесс и анализ огибающей спектра. В ряде случаев к данной совокупности целесообразно добавить вейвлет-преобразование сигнала и анализ характеристики разгона/выбега агрегата. Комплексный подход к анализу должен учитывать взаимное перекрытие частот диагностических признаков наличия дефектов диагностируемого оборудования, для чего необходимо предусмотреть использование алгоритма фильтрации исходного сигнала с учетом кинематических особенностей объектов испытаний [6, 7].

Примером, подтверждающим необходимость использования результатов комплексного подхода к анализу параметров вибрации, может служить представленная на рисунке 1 характеристика, иллюстрирующая полное совпадение частотных признаков расцентровки валопровода агрегата и дефекта электродвигателя. В данном случае наличие межвиткового замыкания обмотки ротора сетевого двигателя экскаватора ЭКГ-5А можно было подтвердить только с использованием анализа характеристики выбега

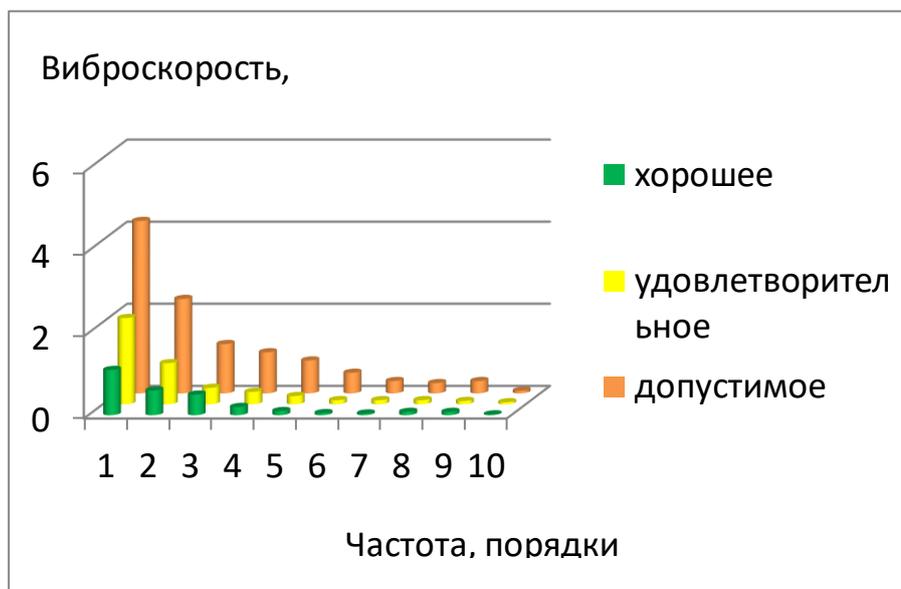


Рис. 2. Пример нормирования состава вибрации преобразовательного агрегата на экскаваторе ЭШ 10/70

роторного агрегата, что позволило избежать неявных результатов анализа и подтвердить наличие на агрегате «электрического» дефекта. Кинематические особенности работы агрегата делают крайне затруднительным диагностирование дефектов электрической природы на генераторных группах экскаваторов этой модели из-за того, что частотные признаки данной группы дефектов перекрываются признаками другой природы, например, нарушением жесткости системы или расцентровкой. В данном случае характеристика выбега подтверждает наличие диагностированного замыкания обмотки, что было бы невозможно сделать, опираясь только на результаты анализа спектра.

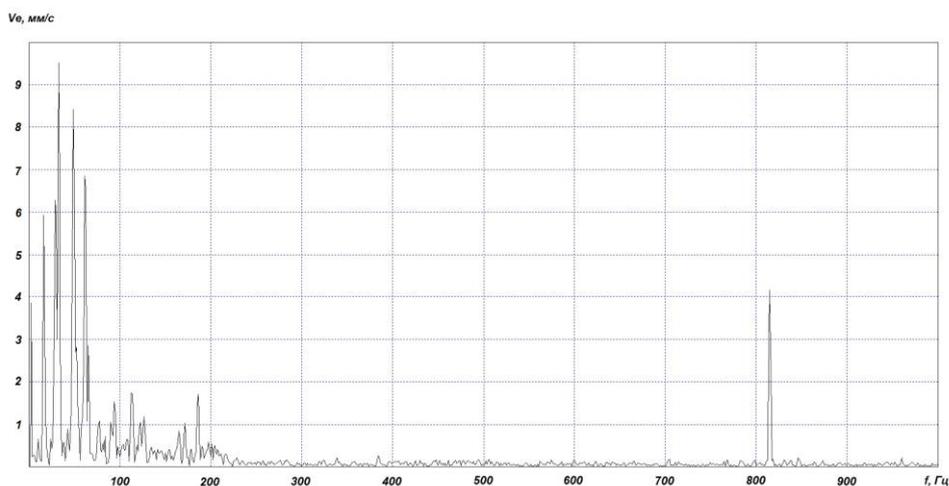
Единые диагностические критерии оценки технического состояния могут применяться для осуществления математического моделирования процессов развития дефектов горных машин и определения на основе результатов моделирования величины остаточного гарантийного минимального ресурса эксплуатируемой техники [4, 8, 9]. Специфика технического обслуживания технологического оборудования на угольных разрезах и карьерах Кузбасса подразумевает существование на практике сочетания системы планово-предупредительных ремонтов, где все сроки проведения ремонтов четко регламентированы, и аварийного обслуживания, когда нормы системы ППР не выполняются в полном объеме при должном качестве запасных частей, а проведение ремонтов по факту возникновения аварийной ситуации может являться нормой.

Максимальную ценность для безопасной эксплуатации техники в данных условиях представляет информация о возможности работы эксплуатируемых технических устройств до момента наступления ремонта без возникновения аварий. Поэтому в данных условиях наибольший интерес представляют результаты математического

моделирования, направленные на осуществление краткосрочного прогнозирования деградиционных процессов и способные ответить на основную задачу прогнозирования в условиях системы ППР, а именно – смогут ли в данных условиях проработать объекты диагностирования до момента проведения ближайшего ремонта или технического обслуживания [10, 11]? Работами отечественных и зарубежных авторов доказана эффективность использования экспоненциального адаптивного краткосрочного прогнозирования для получения решения этой задачи. Высокая достоверность результатов моделирования обеспечивается способностью модели приспосабливаться к изменяющимся внешним условиям, что позволяет осуществлять корректировку параметров модели на основании изменяющихся входных данных.

Использование разрабатываемых ЕДК позволит усовершенствовать методологию нормирования параметров вибрации, на основе чего появится возможность осуществить прогнозирование процессов деградации горных машин [12, 13].

Одним из перспективных направлений в нормировании вибрации является использование индивидуальных спектральных масок, каждая из которых разрабатывается с учетом конструктивных и кинематических особенностей диагностируемых технических устройств (см. пример на рисунке 2). Данный метод представляет широкие возможности для нормирования в отличие от оценки по общему уровню, что объясняется значительными возможностями по индивидуализации разрабатываемых масок и предоставляет дополнительные возможности при создании прогнозных моделей развития дефектов оборудования горных машин [14]. Достаточно низкий уровень проработки вопросов по выбору границ и предельных значений частотных диапазонов, а



*Рис. 3. Пример наличия множественных дефектов на двигателе лебедки подъема экскаватора ЭШ 10/70, включая недопустимый уровень расцентровки правого электродвигателя с редуктором, ярко выраженное нарушение жесткости опорной системы, ослабление посадки подшипника со стороны редуктора, дефект соединительной муфты*

также вариативность частотного состава групп значащих составляющих спектра, проявляющаяся в процессе работы оборудования, значительно затрудняют нормирование критериев, которые могут использоваться при разработке спектральных масок, что обусловлено недостаточным объемом диагностической информации по энерго-механическому оборудованию горной техники.

Анализ общей совокупности диагностических признаков применительно к созданию наборов признаков и правил для диагностирования каждого из основных дефектов горных машин позволит выявить основные закономерности изменения их технического состояния и приступить к решению задачи по совершенствованию методологии нормирования параметров вибрации, генерируемой при работе сложных механических систем [15].

В ходе выполнения исследования процессов зарождения и развития дефектов оборудования горных машин были подвергнуты формализации более ста диагностических признаков в области анализа параметров вибрации, пригодных для диагностирования всех базовых групп дефектов энерго-механического оборудования, в числе которых нарушение жесткости опорной системы, расцентровка валов, неуравновешенность вращающихся деталей, разнообразные дефекты подшипников, повреждения зубчатых передач, дефекты соединительных муфт и дефекты двигателей и генераторов электрической природы (замыкание обмоток, смещение в магнитном поле и др.). При осуществлении формализации большая часть диагностических признаков относилась к спектральному анализу (до 80% от общего объема выборки). Кроме этого, формализации подверглись результаты анализа огибающей спектра, анализа характеристики разгона/выбега и эксцесса. В результате появилась возможность создать научный задел, необходимый для

разработки применительно к каждому отдельно взятому конструктивному элементу своего уникального единого критерия оценки технического состояния, способного заменить собой использование в процессе анализа большого количества громоздких диагностических признаков и правил, а также использовать результаты комплексного подхода к диагностике с применением нескольких различных методов виброанализа.

Первым этапом разработки ЕДК является фильтрация исходных диагностических данных с использованием алгоритмов клиппирования, позволяющих очистить спектр от гармоник иной (по сравнению с рассматриваемым типом дефекта) природы [4, 15]. Как правило, реальные спектры вибрации динамического оборудования горных машин содержат информацию об одновременном наличии на агрегате множественных дефектов, различающихся по природе своего возникновения, степени развития и опасности с точки зрения возникновения аварийного отказа (см. пример на рисунке 3). В рамках выполнения настоящего исследования использовался алгоритм фильтрации, предложенный в работах А. Сушко, доказавший свою эффективность при работе со спектрами подшипников качения [4].

Развитая теоретическая база, учитывающая характер изменения спектрального состава полигармонических волн, является необходимой для осуществления разработки математических моделей, способных адекватно спрогнозировать процессы развития дефектов основных конструктивных элементов сложных механических систем. Реализация прогнозных моделей изменения технического состояния оборудования открывает новые возможности для совершенствования методологии нормирования параметров вибрации горных машин, причем использование таких моделей позволит спрогнозировать деградиционные процессы в различных по типу и конструкции узлах горных машин, а применение ЕДК в

качестве моделируемых параметров в прогнозных моделях позволяет получить принципиально новые результаты моделирования.

Как следствие, полученные в рамках настоящей работы результаты позволили доказать принципиальную состоятельность разрабатываемой методологии создания единых диагностических критериев, основанных на принципах реализации комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации. Применение разрабатываемых подходов на практике позволит повысить надежность эксплуатируемой горной техники, свести к минимуму вероятность возникновения аварийных отказов сложного технологического оборудования и повысить уровень безопасности при проведении открытых горных работ.

Единые критерии оценки технического состояния оборудования горных машин могут использоваться в качестве моделируемых параметров при прогнозировании развития деградационных процессов в математических моделях, реализация которых является неотъемлемым элементом систем обслуживания эксплуатируемого оборудования по его фактическому состоянию. Применение принципов краткосрочного моделирования процессов деградации на основе прогнозирования трендов изменения величин ЕДК позволит удовлетворить потребности угольных предприятий в получении краткосрочных прогнозов изменения фактического технического состояния экскаваторного парка и сократить затраты на ремонт и обслуживание оборудования, а также оптимизировать логистику и избежать дорогостоящих аварийных простоев горной техники.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gerike P.B., Klishin V.I. Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels /Gerike P.B., Klishin V.I.// В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019. С. 012020
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. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180

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. Управление фракционным составом продуктов разрушения горной породы при реализации режима силового малоциклового скалывания массива /Герике П. Б.// Вестник Кузбасского государственного технического университета, №5. – Кемерово. – 2013. – С. 117 – 119.

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. 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.

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

15. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E., "Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aero-static Bearing" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 134(18) – 2012.

**Pavel B. Gericke**<sup>1</sup>, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, **Pavel V. Eshherkin**<sup>2</sup>, C.Sc. (Engineering), Associate Professor

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

<sup>2</sup>T.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.** In this paper we made a generalization of some results in the analysis of vibration parameters of research generated in the dynamic equipment of electric mining shovels, operated in the coal and mining industry of Kuzbass in relation to the challenge to develop a single diagnostic criterion for assessing and predicting degradation of technical condition of rolling bearings and couplings.

**The main aim of the study:** The main purpose of this work is the development of a methodology for creating algorithms for common diagnostic criterion based on the results of an integrated approach to the diagnosis of mechanical systems by vibration parameters and scalarization of different signs of identifying defects in mining shovels equipment.

**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 creating a set of features and rules for creating a comprehensive criterion for evaluating and predicting the degradation of the technical condition of mining equipment.

**The results:** The obtained scientific results prove the principal effectiveness of the proposed approach to the analysis of vibration parameters and modeling the degradation of the technical condition of equipment for mining shovels using the developed unified criterion.

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

**Article info:** received July 10, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-42-48

### REFERENCES

1. Gerike P.B., Klishin V.I. Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels /Gerike P.B., Klishin V.I.// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019. C. 012020 (eng)
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. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180 (eng)
4. 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)
5. F. Balducci, 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, Knoxville, 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. 2013. #5. Pp. 117-119. (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. 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)

14. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)

15. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E., "Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aero-static Bearing" *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 134(18) – 2012 (eng)

#### **Библиографическое описание статьи**

Герике П.Б., Ещеркин П.В. Использование результатов виброанализа для создания единых диагностических критериев // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 3 (148). – С. 42-48.

#### **Reference to article**

Gericke P.B., Eshcherkin P.V. Using the results of vibration analysis to create of unified diagnostic criterion. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2020, no.3 (148), pp. 42-48.