

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИИ НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ОБОРУДОВАНИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

**Аннотация:** *Актуальность работы.* В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты цикла проводимых исследований, связанных с совершенствованием методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горной техники, что имеет высокое практическое значение для выявления критериев, позволяющих оценить и спрогнозировать деградацию технического состояния сложных механических систем.

**Цель работы:** Обосновать выбор направлений для совершенствования существующих методологий нормирования вибрации на основе результатов анализа вибрации механизмов и агрегатов горной техники. Доказать на практике эффективность предложенных рекомендаций по выбору совокупностей диагностических признаков и создаваемых спектральных масок для выполнения оценки фактического состояния объектов диагностирования. Разработать предпосылки для создания группы единых диагностических критериев, пригодных для выявления дефектов и прогнозирования процесса деградации технического состояния оборудования горных машин.

**Методы исследования:** В рамках настоящего исследования реализован комплексный подход к диагностике энерго-механического оборудования горных машин по параметрам вибрации, который включает в себя спектральный анализ в расширенном частотном диапазоне, эксцесс, анализ огибающей, вейвлет-преобразование, анализ характеристики разгона/выбега. Доказано, что именно такое сочетание диагностических методологий позволяет эффективно выявлять все дефекты энерго-механического оборудования горных машин, в том числе, находящихся на стадии зарождения.

**Результаты:** Полученные научные результаты доказывают принципиальную состоятельность предложенного подхода к совершенствованию методологических аспектов нормирования вибрации горных машин и эффективность разрабатываемых спектральных масок. Кроме того, данное направление открывает возможности создания группы эффективных диагностических критериев, пригодных для выявления дефектов горного оборудования, использование которых позволит повысить эффективность управления техническим обслуживанием оборудования, эксплуатируемого в условиях угольной промышленности Кузбасса.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, горные машины, прогнозное моделирование, карьерные экскаваторы, энерго-механическое оборудование, неразрушающий контроль.

**Информация о статье:** принята 19 ноября 2018 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-22-28

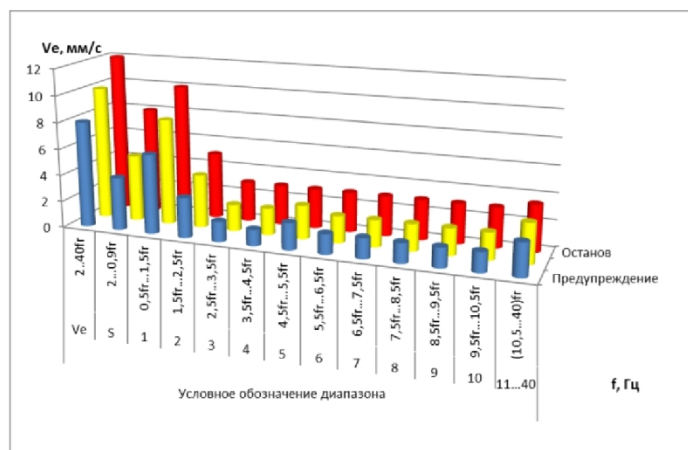
Существующие сегодня методы нормирования параметров механических колебаний, с использованием которых осуществляется оценка фактического состояния горных машин, являются несовершенными (например, оценка по общему уровню, оценка по интенсивности в полосах частот, оценка с применением спектральных масок, оценка по амплитудному вкладу групп составляющих одинаковой природы и т.д.). До сих пор отсутствует универсальный комплексный критерий, пригодный для выполнения оценки фактического состояния сложных механических систем по параметрам генерируемой при их работе вибрации, а также для осуществления достоверного прогнозирования процесса изменения фактического состояния объектов диагностирования.

Действующие рекомендации по контролю параметров вибрации [1, 2] в недостаточной степени регламентируют оценку риска возникновения, скорость развития и степень опасности дефектов

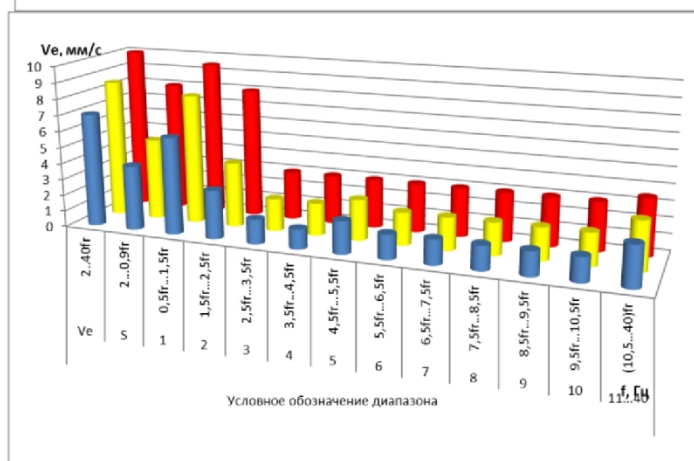
энерго-механического оборудования горных машин. Основные причины такой ситуации заключаются в недостаточном объеме диагностических данных по параметрам виброакустического сигнала для некоторых типов групп горного оборудования и ограниченных возможностях применения методов диагностирования и критериев предельного технического состояния горных машин и комплексов. Таким образом, совершенствование методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе горного оборудования, является актуальной научной задачей, для решения которой необходимо проведение дополнительных научных исследований процессов зарождения и развития повреждений горного оборудования.

Без использования высокоэффективных критериев нормирования параметров вибрации невозможно решить задачу по созданию единых диагностических критериев, необходимых для выполнения

А) Вертикальное  
направление  
измерений



Б) Горизонтальное  
направление  
измерений



В) Осевое  
направление  
измерений

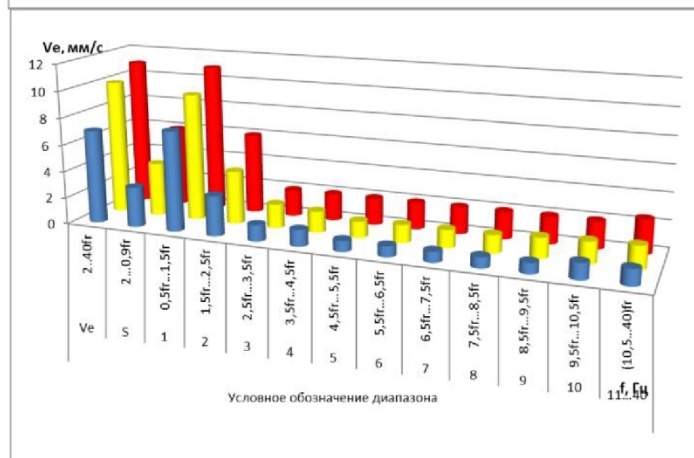


Рис. 1. Спектральные маски, разработанные для нормирования уровня механических колебаний двигателя механизма поворота экскаватора ЭШ 10/70.

автоматизированной оценки состояния динамического оборудования горных машин и разработки математических прогнозных моделей развития типовых дефектов и повреждений.

Диагностическая выборка, на основе которой проводились исследования параметров вибрации в рамках настоящей работы, включает 30 единиц экскаваторов типа механическая лопата и драглайн, а также 150 единиц дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования. На примере полных диагностических обследований горных машин, выполняемых с периодичностью от одного до трех раз каждые три года при полном цикле измерений более десяти лет в данном исследовании

предпринята попытка систематизирования основных закономерностей изменения характеристик технического состояния и совершенствования на основе выявляемых закономерностей методологии нормирования механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горной техники.

Одним из направлений такого совершенствования стало осуществление нормирования уровней широкополосной вибрации по частотным диапазонам с учетом количества нормируемых компонент и оценки опасности степени вклада в общий уровень сигнала (см. рисунок 1), выполняемое для энерго-механического оборудования некоторых моделей

экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ (генераторные группы, тяговые и подъемные лебедки, механизмы поворота). Рамками настоящей работы не удалось охватить весь номенклатурный ряд карьерных электрических экскаваторов, а также некоторые их узлы и агрегаты (например, напорные лебедки, малые генераторные группы, компрессорные установки и т.д.). Этот факт объясняется рядом сложностей, которые сопровождают разработку спектральных масок, таких как отсутствие рекомендаций по выбору частотных полос и обоснованной оценки вклада отдельных составляющих виброакустического сигнала для оборудования угольной промышленности, дополнительные сложности вызывает изменение в процессе работы ряда агрегатов горной техники частотного состава групп информативных гармоник. В тех случаях, когда работа агрегатов горной техники подразумевает установившиеся режимы с длитель-



Рис. 2. Схема проведения измерений вибрации на механизме поворота экскаватора ЭШ 10/70.

ной периодичностью при неизменной частоте вращения привода (например, генераторные группы экскаваторов или приводные станции ленточных конвейеров), процесс нормирования частотных полос не представляет интереса для настоящего исследования в отличие от оборудования, работу которого отмечает наличие изменяющихся частот при достаточном для проведения измерений диагностическом цикле (лебедки подъема, тяги и напора, механизмы поворота электрических экскаваторов – см. пример схемы измерений на рисунке 2).

Создание масок для некоторого энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов проводилось впервые, что объясняется недостаточным количеством статистической информации по параметрам механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин [3, 4]. Процесс их разработки усложняют отличия в конструкции и кинематике диагностируемых механизмов, в результате чего частотные

полосы выявления дефектов для разных моделей экскаваторов могут заметно отличаться, именно поэтому работу по созданию масок для каждого нового типа (марки, модели) горных машин необходимо начинать заново, что сопряжено с большими затратами времени на сбор и анализ диагностической информации. Кроме того, при разработке спектральных масок необходимо учитывать взаимосвязь между трудоемкостью разработки и необходимой достаточной информативностью ожидаемых результатов нормирования. Использование большого числа частотных полос, частично перекрывающих друг друга, с индивидуально настроенными значениями соотношений амплитуд и частотных диапазонов усложняет процедуру создания маски, вместе с тем увеличивая степень ее детализации, что позволяет с высокой достоверностью предупредить момент перехода агрегата в недопустимое техническое состояние.

Совершенствование методологии нормирования параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования горных машин, было бы невозможным без наличия четко структурированных представительных баз данных по однотипному оборудованию, что позволило провести комплексных анализ диагностических признаков применительно к каждому из базовых дефектов и выявить основные закономерности изменения технического состояния обследуемых машин и агрегатов.

Очевидно, что только результаты комплексного подхода к анализу диагностических данных могут предоставить возможность точной оценки фактического состояния объектов исследования. Доказано [3, 5, 6], что наиболее объективные результаты для оборудования угольной промышленности предоставляет анализ с использованием принципов комплексного диагностического подхода, который обычно включает спектральный анализ, эксцесс, а также анализ огибающей. В ряде случаев, когда необходимо дополнительно подтвердить полученные ранее результаты, используют вейвлет-преобразование, кепстральный анализ, анализ траектории/процессии ротора, а также метод ударных импульсов [7].

Некоторые примеры анализа параметров полигармонических волн, содержащих признаки наличия базовых дефектов энерго-механического оборудования горных машин, приведены на рисунках 3...5, где наглядно проиллюстрированы некоторые совокупности диагностических признаков, используемых для выявления основных закономерностей изменения технического состояния динамических агрегатов горной техники.

Приведенный на рисунке 3 пример иллюстрирует наличие нескольких распространенных среди энерго-механического оборудования драглайнов дефектов, а именно развитой расцентровки двигателя с редуктором и нарушения жесткости опорной системы. В данном случае диагностическими признаками выступают составляющие гармонических рядов обратной частоты и высокий уровень низкочастотных шумов в спектре.



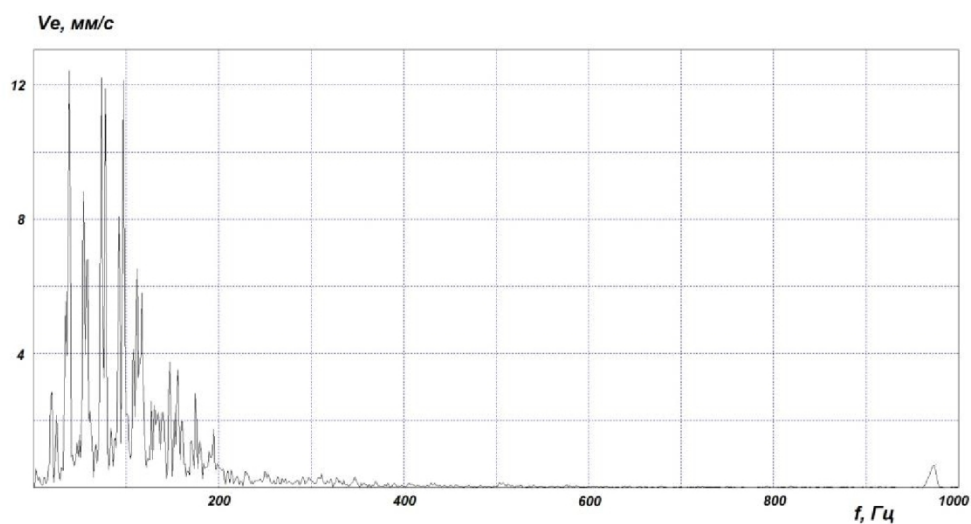


Рис. 3. Нарушение центровки левого электродвигателя с редуктором подъемной лебедки экскаватора ЭШ 10/70, общее нарушение жесткости опорной системы.

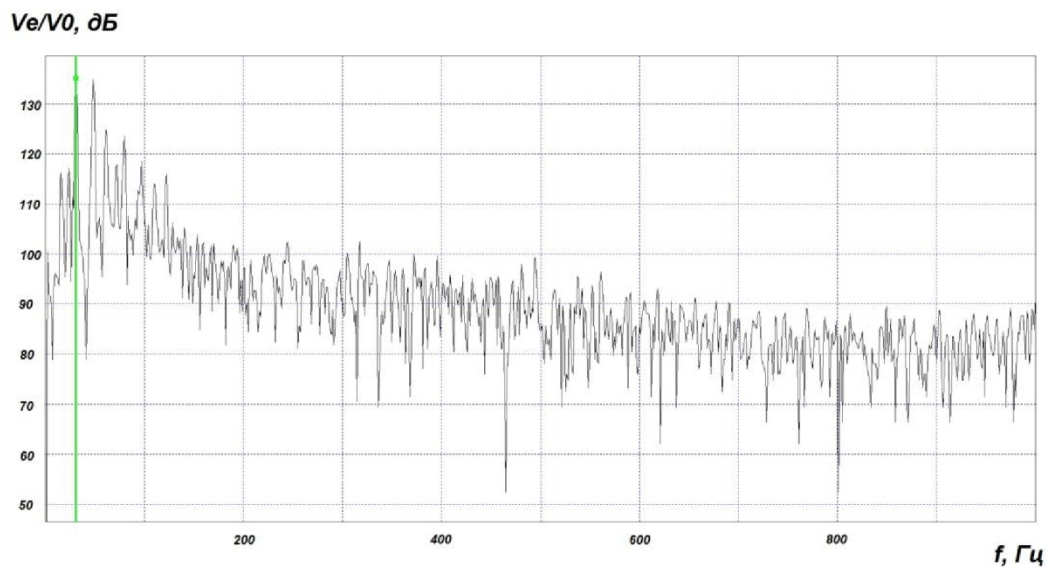


Рис. 4. Развитая неуравновешенность ротора электродвигателя скребкового конвейера В-1600.

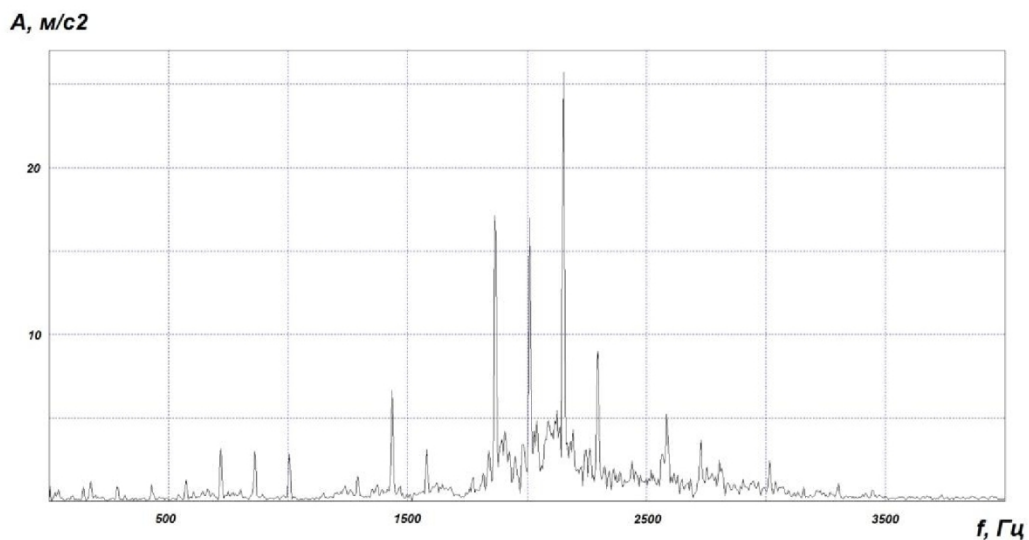


Рис. 5. Множественные дефекты подшипника входного вала редуктора механизма поворота экскаватора ЭШ 13/50.



Еще одним типичным дефектом горного оборудования является неуравновешенность вращающихся деталей, используемых в конструкции машин [3, 7, 8]. Наиболее ярким примером такого дефекта является дисбаланс ротора электрических машин (см. рисунок 4). В данном случае на диагностируемом оборудовании отмечается наличие основного диагностического признака – ярко выраженной во всех плоскостях пространственного положения агрегата гармонической составляющей спектра на оборотной частоте.

Наконец, одной из самых распространенных групп дефектов энерго-механического оборудования горных машин после нарушения жесткости системы являются повреждения подшипников, в частности, трещины и/или наклеп сепаратора, изменение формы тел качения, повреждения внутреннего и внешнего колец, нарушение режима смазки, ослабление посадки и увеличение эксплуатационных зазоров [9]. Так, приведенный на рисунке 5 пример иллюстрирует наличие множественного дефекта – раковин на внутреннем кольце подшипника и изменение формы тел качения. Подшипники являются самым изученным с точки зрения практического вибродиагноза объектом. Как следствие, для их выявления разработано большое количество как диагностических признаков, так и отдельных методов контроля и специализированных критериев, позволяющих заменить собой правила выявления дефектов, тем самым экономится время, затрачиваемое на анализ и повышается точность проводимых расчетов.

Вместе с тем на сегодняшний день в мире практически отсутствуют единые критерии по параметрам вибрации, пригодные для диагностики, например, элементов соединительных муфт, дисбалансов вращающихся элементов, дефектов зубчатых передач редукторов, различных дефектов электромагнитного происхождения (магнитная асимметрия якоря, перекося фаз, смещение в магнитном поле и т.д.), нарушения соосности валов агрегатов, нарушения жесткости системы, структурного резонанса и т.д. [10, 11, 12]. Таким образом, если ограничить рамки исследования только карьерными электрическими экскаваторами, имеется 7 базовых групп дефектов энергомеханического оборудования (расцентровка, жесткость, дисбалансы, подшипники, зубчатые передачи, муфты, электричество), которым только в области спектрального анализа соответствуют около ста диагностических признаков.

Для части оборудования карьерных экскаваторов были разработаны спектральные маски, учитывающие, в частности, частотные диапазоны дефектов зубчатых зацеплений, нарушения соосности агрегатов и перекося валов в редукторах, флуктуацию амплитуд зубчатых частот, изменение уровня шума в разных полосах, глубину модуляции зубчатых частот, подшипниковые частоты, низкочастотные составляющие спектра [13]. При разработке масок было принято решение ограничиться стандартным частотным диапазоном, т.к. это позволит осуществлять максимально детализированное нормирование спектра без существенного увеличения затрат

времени на сбор дополнительной диагностической информации и ее анализ.

Результаты реализации предложенной концепции совершенствования методологии нормирования могут использоваться при создании единых диагностических критериев оценки фактического состояния механизмов и разработке прогностических моделей развития основных дефектов различного энерго-механического оборудования горной техники [14, 15]. В полной мере разрешить данную проблематику представляется возможным только при условии создания большого числа деградационных математических моделей, учитывающих процессы развития дефектов на основе предложенной схемы управления нормированием и создаваемых единых критериев для широкого типового и номенклатурного ряда горно-шахтного оборудования. Это позволит спрогнозировать необходимость наличия запасных частей на складе «точно в срок», решить многие проблемы снабжения и логистики, минимизировать количество аварийных простоев сложной дорогостоящей техники, повысить эффективность управления системой технического обслуживания и ремонтов. Кроме того, полученные результаты убедительно свидетельствуют, что решение вопросов, связанных с совершенствованием методологии нормирования, прогнозированием деградационных процессов и определением критериев предельного состояния горной техники послужит платформой для внедрения системы обслуживания по фактическому состоянию, позволит избежать несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием эксплуатируемой горной техники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
3. Герики П.Б. Оценка технического состояния мультипликаторов компрессоров по параметрам механических колебаний /Б.Л. Герики, П.Б. Герики, В.В. Акимочкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета, №5. – Кемерово. – 2007. С. 55-57.
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. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.

9. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

10. 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.

11. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, 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. Гери́ке П.Б. Диагностика технического состояния преобразовательных агрегатов экскаваторов типа драглайн /Б. Л. Гери́ке, П. Б. Гери́ке// Вестник Кузбасского государственного технического университета. №4. – Кемерово. – 2014. С. 20-22.

14. 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.

15. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.

**Pavel B. Gericke, C.Sc. (Engineering), Associate Professor**

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

## IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ESTIMATING VIBRATION PARAMETERS USING THE EXAMPLE OF MINING EQUIPMENT

**Abstract: The urgency of the discussed issue.** In this paper, we consider some aspects of the cycle of ongoing research related to the improvement of the methodology for normalizing the parameters of mechanical oscillations generated by the operation of electromechanical equipment of mining machines, which is of great practical importance for identifying criteria that allow estimating and predicting the degradation of the technical state of complex mechanical systems.

**The main aim of the study:** Make a choice of directions for improving existing methodologies for assessing vibration based on the results of analysis of vibration mechanisms and aggregates of mining equipment. Prove in practice the effectiveness of the proposed recommendations for the selection of sets of diagnostic features and created spectral masks to perform an assessment of the actual state of diagnostic facilities. Develop prerequisites for creating a group of common diagnostic criteria suitable for detecting defects and predicting the degradation of the technical condition of mining equipment.

**The methods used in the study:** Within the framework of the work, the necessity of using the results of an integrated approach to the diagnosis of electromechanical equipment of mining machines, based on the parameters of vibration generated during their operation is substantiated. This approach implies the use of several diagnostic methodologies, including spectral analysis, spectral envelope analysis, wavelet transform, excess and analysis of the rotor aggregate run-out characteristics. It is shown that a comprehensive approach to diagnostics by vibration parameters opens wide opportunities for timely diagnosis of defects in equipment of mining machines, including those at the stage of nucleation.

**The results:** The obtained scientific results prove the principled consistency of the proposed approach to the improvement of the methodological aspects of the evaluation of the vibration of mining machines and the effectiveness of the developed spectral masks. In addition, this area opens the possibility of creating a group of effective diagnostic criteria suitable for detecting defects in mining equipment, the use of which will improve the efficiency of maintenance management for the equipment operated in the coal industry of Kuzbass.

**Keywords:** vibration analysis, mining machines, predictive modeling, mining shovels, electromechanical equipment, non-destructive testing.

**Article info:** received November 19, 2018

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-22-28

### REFERENCES

1. Gol'din A. S. Vibratsiya rotornykh mashin [Vibration of rotating machines]. Moscow: Mashinostroenie Publishers, 1999. – 344 p. (rus)

2. 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)

3. Gericke B.L., Gericke P.B., Akimochkin V.V. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. #5. Pp. 55-57. (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 programnye 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. 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)
9. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)

10. 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)
11. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, 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. Gericke P.B., Gericke B.L. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. #4. Pp. 20-22. (rus)
14. 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)
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)

#### Библиографическое описание статьи

Герике П.Б. Совершенствования методологии нормирования параметров вибрации на примере оборудования угольной отрасли // Горное оборудование и электромеханика — 2018. — № 5 (139). — С. 22-28.

#### Reference to article

Gericke P.B. Improvement of the methodology for estimating vibration parameters using the example of mining equipment. Mining Equipment and Electromechanics, 2018, no. 5 (139), pp. 22-28.