

УДК 681.518.5

Герике Павел Борисович, канд. техн. наук, доцент.

¹Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН,
650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

E-mail: am_besten@mail.ru

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ЭКГ

Аннотация: *Актуальность работы.* В данной статье приведены некоторые результаты оценки эффективности использования различных методов вибрационного контроля в качестве составляющих элементов комплексного диагностического подхода применительно к анализу параметров вибрации энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ. Полученные результаты имеют высокое практическое значение для решения задач, связанных с техническим диагностированием, прогнозированием процесса деградации фактического состояния объектов контроля и разработкой единых диагностических критериев, способных заменить собой большое число громоздких признаков и правил.

Цель работы: Обосновать выбор диагностических методологий, который был бы пригоден для выявления дефектов оборудования карьерных экскаваторов, в том числе, в случаях, когда проведение анализа параметров вибрации стандартными методами затруднено или невозможно. Доказать эффективность предложенных рекомендаций по выбору совокупности диагностических методологий для выполнения оценки фактического состояния объектов диагностирования.

Методы исследования: В рамках выполнения работы использовался комплексный подход к диагностике параметров вибрации, включающий в себя спектральный анализ, эксцесс, анализ огибающей, вейвлет-преобразование, анализ характеристики разгона/выбега, анализ временной реализации сигнала, кепстральный анализ.

Результаты: Доказано, что предложенный комплекс методов вибродиагностики пригоден для выявления дефектов энерго-механического оборудования экскаваторов ЭКГ, а получаемые результаты комплексного анализа параметров исходных полигармонических волн также могут быть эффективно применены для осуществления краткосрочного прогнозирования процесса деградации фактического состояния узлов и агрегатов горного оборудования и использоваться в качестве базового элемента системы обслуживания техники по её фактическому состоянию.

Ключевые слова: вибродиагностика, карьерный экскаватор, комплексный подход, управление техническим обслуживанием.

Информация о статье: принята 01 февраля 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-13-19

Обоснование параметров комплексного подхода к анализу параметров вибрации различного технологического оборудования является актуальной научной задачей, решению которой посвящены работы целого ряда отечественных и зарубежных авторов, однако до сих пор отсутствует методика проведения комплексного анализа параметров механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования экскаваторов ЭКГ, включающая обоснованный выбор конкретного набора методов и средств диагностирования. Выбор и обоснование параметров такого комплексного подхода к диагностике сложных механических систем необходимо осуществлять с учетом технических ограничений на область применения существующих методологий, характеристик аппаратного и программного обеспечения, а также конструктивных и

кинематических особенностей обследуемых технических устройств [1, 2].

В рамках настоящей работы предпринята попытка обобщить полученные результаты анализа вибрации применительно к решению задачи совершенствования методологии нормирования параметров вибрации оборудования экскаваторов типа ЭКГ и выявления основных закономерностей деградации его технического состояния. При проведении анализа использовался целый ряд различных диагностических методологий, в том числе метод ударных импульсов, спектральный анализ, анализ огибающей, анализ характеристики разгона/выбега агрегата, анализ траектории движения вала ротора, вейвлет-преобразование, кепстральный и временной анализа.

$A, \text{м/с}^2$

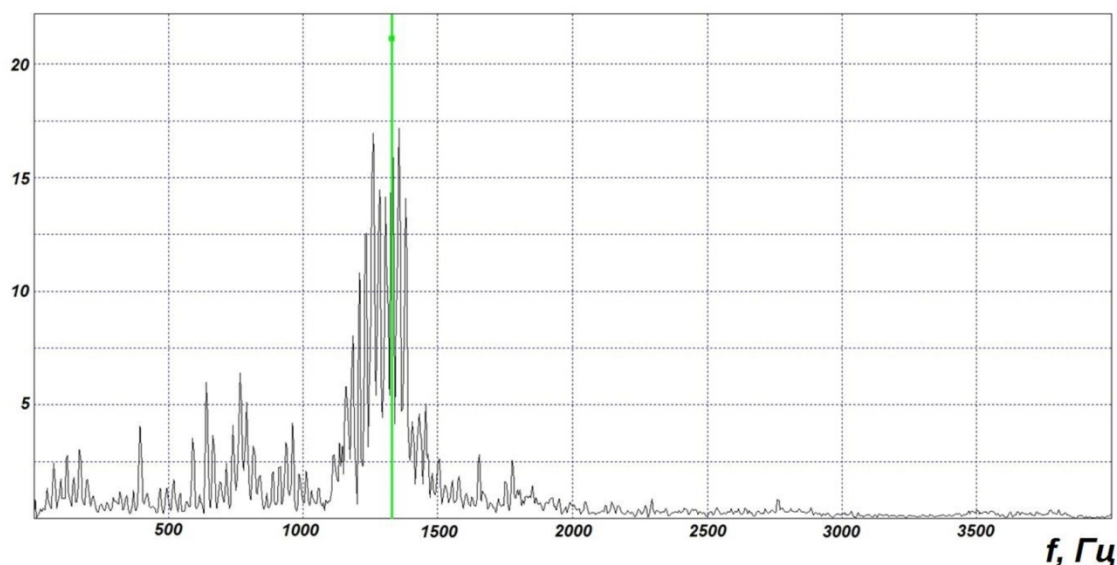


Рис. 1. Трещина сепаратора (недопустимое состояние) подшипника качения сетевого двигателя экскаватора ЭКГ-8И

В качестве объекта настоящего исследования использовалась выборка, состоящая из тридцати экскаваторов типа ЭКГ, подлежащих экспертизе промышленной безопасности и эксплуатируемых на угольных разрезах и каменных карьерах Кузбасса. Наблюдение за выборкой осуществлялись на протяжении двенадцати лет, период сбора диагностической информации составляет от одного до трех раз в три года. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на энерго-механическом оборудовании карьерных экскаваторов наибольшее распространение получили следующие дефекты: нарушение жесткости, дефекты подшипников, неуравновешенность вращающихся деталей, расцентровка узлов и агрегатов; дефекты элементов соединительных муфт; износ и выкрашивание зубчатых зацеплений, нарушение соосности и перекосы валов в редукторах; дефекты электрической природы.

Ниже, на рисунках 1 – 4 представлены некоторые примеры анализа параметров полигармонических волн, генерируемых при работе оборудования экскаваторов ЭКГ. Полученные данные позволили приступить к разработке группы единых критериев, пригодных для выявления базовых дефектов оборудования и построения прогноза деградации технического состояния как отдельных узлов, так и машин в целом. Нередко один спектр может нести в себе информацию сразу о нескольких развитых дефектах, в тех случаях, когда их диагностические признаки в области спектрального анализа совпадают, целесообразно использовать комплексный подход к анализу параметров вибрации [3, 4].

Так, спектр на рисунке 1 иллюстрирует наличие повреждения, относящегося к наиболее распространенной группе дефектов обследуемого оборудования. Трещина сепаратора подшипника качения, в данном случае, является следствием заводского брака, т.к. подшипник до момента аварии отработал только около 300 часов, установка нового

заводского подшипника проводилась с соблюдением регламента, режим смазки соблюдался, центровка валопровода генераторной группы находилась в пределах нормы. Данный дефект первично был выявлен при автоматизированном анализе с применением эксцесса, методе, основанном на оценке величины весовой функции для одномерной плотности вероятности мгновенных значений вибрации. Эксцесс нетребователен к наличию априорной информации о геометрических параметрах подшипника и реализован в большом числе современных виброанализаторов, однако может применяться только на ограниченном количестве объектов (подшипники качения, рабочие частоты которых постоянны во времени), а результаты диагностирования не позволяют определить тип дефекта или их сочетание, а лишь указывают на фактическое состояние исследуемого объекта [5, 6].

Практика виброанализа показывает, что с учетом цикличности работы энерго-механического оборудования экскаваторов типа ЭКГ, изменяющихся рабочих частот и ударных знакопеременных нагрузок, ограниченность диагностики только одним методом существенно затрудняет интерпретацию полученных результатов и не позволяет выявить дефекты, находящиеся на стадии зарождения.

Полученные данные свидетельствуют, что наилучших результатов на объектах угольной промышленности удастся достичь при применении комплексного подхода к диагностике по параметрам вибрации, причем основу такого подхода обычно составляют результаты спектрального анализа, кроме того довольно часто на практике реализуется метод анализа огибающей, метод ударных импульсов и эксцесс [5]. Иногда эффективным может оказаться использование вейвлет-преобразования, анализа траектории ротора и кепстрального анализа [7, 8, 9].

Такое сочетание диагностических методологий позволяет получить исчерпывающую информацию

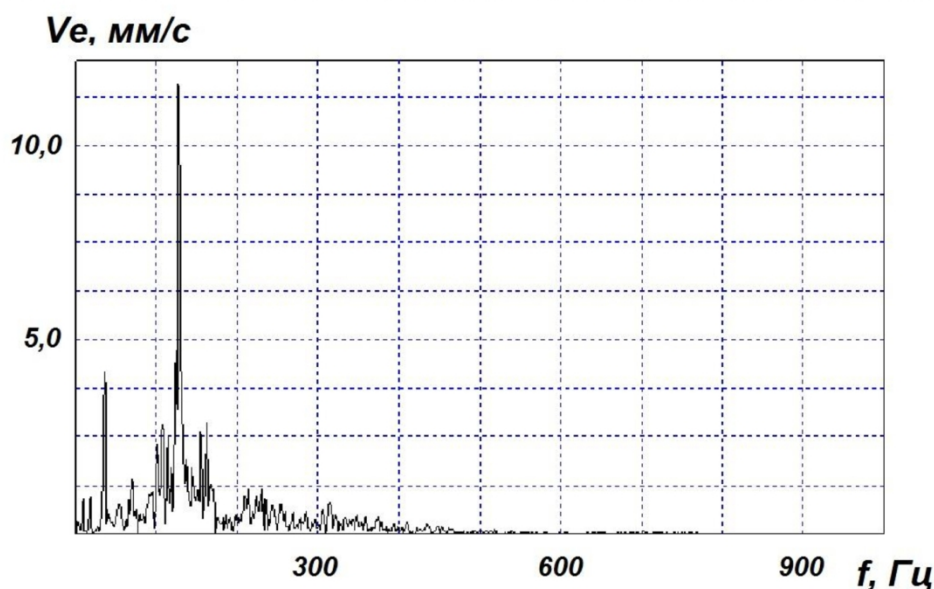


Рис. 2. Несоосная установка провала редуктора механизма подъема экскаватора ЭКГ-5А

о фактическом состоянии эксплуатируемых в угольной промышленности технических устройств, однако требует значительных затрат времени на сбор информации и ее анализ. Конкретное сочетание методов вибродиагностики в конечном итоге зависит от типа объекта диагностирования и режимов его работы, таким образом при смене типа объекта диагностирования должен меняться и набор диагностических методологий.

В существующих отраслевых методиках Ростехнадзора определен ряд требований к оборудованию для проведения неразрушающего контроля, сформулированы критерии предельного состояния для оборудования карьерных экскаваторов, однако никак не учитываются результаты комплексного подхода к анализу параметров вибрации.

Ярким примером, иллюстрирующим преимущество применения принципов комплексного подхода, может служить спектр на рисунке 2. Выявленный здесь дефект лебедки подъема экскаватора ЭКГ-5А диагностирован при помощи спектрального анализа параметров исходной полигармонической волны, однако в процессе записи сигнала рабочие частоты постоянно изменяются, происходит разгон лебедки, меняются положения командконтроллера, цикл подъема ковша сменяется роспуском лебедки, запись сигнала может сорвать остановка лебедки перед новым циклом, значительные ударные нагрузки из-за дефектов редуктора или нарушения жесткости и т.д., все эти факторы затрудняют интерпретацию полученных результатов контроля и приносят ошибки в результаты диагностирования. В этих

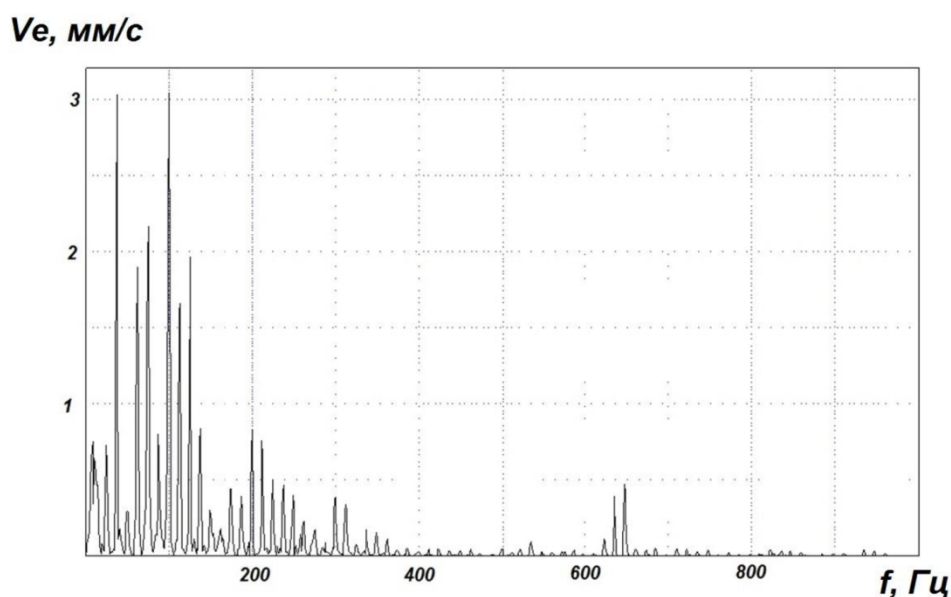


Рис. 3. Нарушение жесткости системы и некритичная расцентровка двигателя с редуктором, выявленные на механизме поворота экскаватора ЭКГ-4,6Б

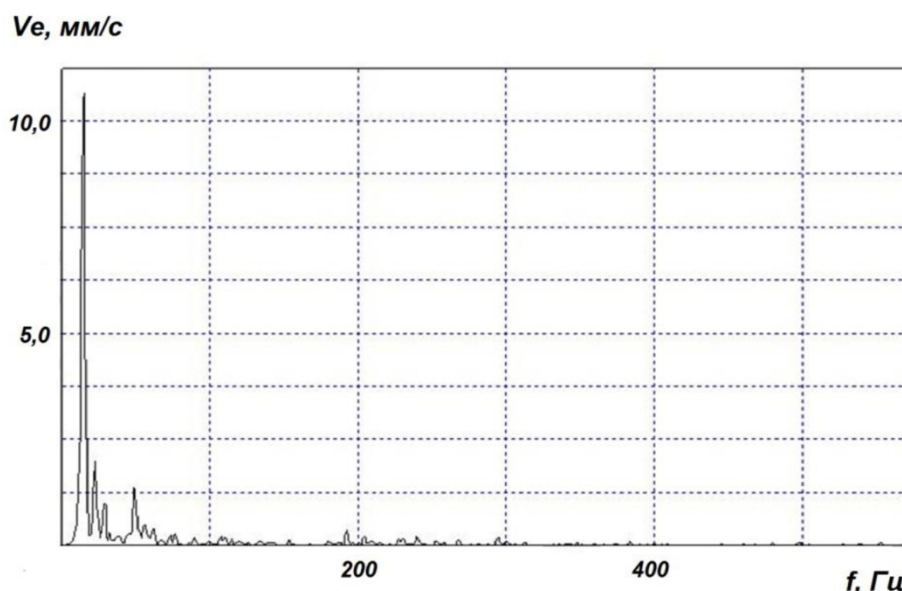


Рис. 4. Недопустимый дисбаланс ротора электродвигателя механизма напора экскаватора ЭКГ-8И

условиях часто необходимо рассмотреть всю существующую совокупность диагностических признаков и правил обнаружения базовых дефектов, которые потенциально могут присутствовать на данном типе оборудования. В данном случае, для обнаружения расцентровки промвала редуктора потребовалось применение вейвлет-обработки параметров исходного сигнала, после чего дополнительно были произведены несколько замеров в стандартном частотном диапазоне, результаты которых подтвердили первоначальное предположение о наличии расцентровки. Были выявлены компоненты, развитие которых вызвано дефектом монтажа промежуточного вала подъемной лебедки экскаватора ЭКГ-5А, а также группа зубцовых частот, что свидетельствует о наличии повреждений зубчатой пары открытой передачи.

Наиболее часто встречающимся дефектом энерго-механического оборудования экскаваторов типа ЭКГ является нарушение жесткости системы, которому соответствует около двадцати диагностических признаков, большинство которых сосредоточены в области спектрального анализа (см. пример спектра на рисунке 3). Часть признаков может быть реализована с применением подходов анализа траектории ротора и анализа временной реализации, однако, из-за трудностей, которые возникают при попытках формализовать эти признаки для удобства их использования при осуществлении автоматизированного контроля, на практике они используются редко [10, 11].

Представленный на рисунке 3 спектр наглядно иллюстрирует наличие ярко выраженных диагностических признаков нарушения жесткости системы, а также расцентровки электродвигателя с редуктором механизма поворота. Гармонический ряд нарушения жесткости, в данном случае, имеет малый шаг дискретизации, поэтому имеет место взаимное перекрытие значащих гармоник, несущих признаки наличия расцентровки и дефектов электрической природы, проявляющихся на гармониках, субгармониках, обертонах и модуляционных

частотах ряда электрической частоты [12, 13]. В результате, именно результаты комплексного подхода к анализу параметров полигармонических колебаний (включая спектральный анализ и метод выбега агрегата) позволили сформулировать корректное заключение о фактическом состоянии диагностируемого объекта. Кроме прочего, исследованиями доказано [5, 8, 13], что для достижения наилучших результатов при диагностировании нарушения жесткости системы комплексный подход должен включать анализ флуктуационной активности базовых гармонических рядов, типичных для проявления такого рода дефектов, а также уровня шумов в широком частотном диапазоне и выявление флуктуаций боковых модуляционных частот.

Одним из наиболее опасных дефектов оборудования экскаваторов ЭКГ по степени возможных последствий является неуравновешенность вращающихся узлов и деталей, в частности, роторов сетевых двигателей и генераторов. Данный дефект опасен прежде всего тем, что его развитие часто является причиной перехода оборудования в недопустимое состояние, по этой же причине нередко происходит преждевременный выход из строя подшипников качения, элементов соединительных муфт, может происходить отрыв агрегата от опор или разрушение элементов ротора [5, 14]. Различают статический, динамический, моментный, тепловой дисбаланс [11], в одном только частотном анализе этому дефекту соответствует около десяти диагностических признаков. Для выявления признаков наличия неуравновешенности вращающихся деталей эффективным может оказаться также применение результатов временного анализа и анализа траектории движения ротора. Однако основным частотным признаком наличия дисбаланса является присутствие в спектре ярко выраженной гармоники на частоте вращения ротора или малого ($k \leq 4$) гармонического ряда оборотной частоты (см. пример на рисунке 4).

В условиях действующей системы планово-предупредительных ремонтов и фактически аварийного обслуживания эксплуатируемой техники основная

сложность заключается не в установлении наличия факта развитой неуравновешенности, а в отсутствии специалистов и техники для проведения виброналадки на месте. Именно поэтому часто двигатели и генераторы с недопустимыми дефектами дорабатывают до момента поломки, после чего списываются или отправляются для восстановления на завод. Такой подход не только значительно увеличивает стоимость и время проведения ремонтов, но и влечет за собой увеличение доли непроизводительных простоев экскаваторного парка и, в некоторых случаях, рост числа несчастных случаев на производстве.

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что для решения задачи полного диагностического обследования оборудования экскаваторов типа ЭКГ комплексный подход к анализу параметров вибрации должен включать в себя, как минимум, следующий набор диагностических методологий – прямой спектральный анализ по параметрам виброскорости и виброускорения в расширенном частотном диапазоне, эксцесс, анализ огибающей спектра, а также анализ характеристики разгона/выбега. Для проведения расширенного анализа виброакустических характеристик зубчатых передач в составе редукторов переборного и планетарного типов целесообразным может оказаться применение результатов вейвлет-преобразования и кепстрального анализа [15, 16]. Очевидно, что результаты комплексного анализа параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования экскаваторов типа ЭКГ, могут быть использованы для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний, в том числе, при разработке индивидуальных спектральных масок высокой степени детализации. Применение на практике результатов комплексного подхода к диагностике по параметрам вибрации открывает инновационное направление для разработки алгоритмов создания единых диагностических критериев оценки технического состояния сложных механических систем, пригодных для использования в качестве моделируемых параметров при осуществлении прогнозного моделирования процессов деградации фактического состояния технических устройств. Совершенствование методологии нормирования параметров механических колебаний и использование единых критериев позволит перейти к внедрению в условиях угольной промышленности Кузбасса системы обслуживания техники по её фактическому состоянию, что неминуемо повлечет за собой отказ от морально устаревшей системы планово-предупредительных ремонтов. В результате удастся снизить количество аварий, минимизировать время непроизводительных простоев техники и повысить безопасность обслуживающего и ремонтного персонала при проведении горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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

2. 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.
3. 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
4. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Герике П.Б. Вибродиагностика дизель-гидравлических буровых установок в рамках проведения процедуры экспертизы промышленной безопасности. //П.Б. Герике// Горное оборудование и электромеханика, № 4. – Кемерово. – 2018. – С. 12-18.
6. S. Delvecchio, G. DElia, E. Mucchi, G. Dalpiaz, Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests, *Journal of Vibration and Acoustics*, April 2010, Vol. 132, Issue 2, 021008-10, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807
7. В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. В. Буцкин Повреждения подшипников качения в результате износа // Горное оборудование и электромеханика. - № 2, 2013. – С. 45-47.
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. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
10. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования // Москва, 1996. – 276 с.
11. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Крюева, т. 7 – Москва, 2005. – 828 с.
12. 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
13. В.И. Клишин, Б.Л. Герике, П.Б. Герике. Применение системы профилактического обслуживания горно-добывающего оборудования на разрезах Кузбасса // Материалы IV международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». - Междуреченск, 2015 г. С. 11-12.
14. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
15. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E., "Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing" *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 134(18) – 2012

Pavel B. Gericke, C. Sc.in Engineering, Associate Professor

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

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF AN INTEGRATED APPROACH FOR ANALYZING THE VIBRATION OF EKG-TYPE MINING SHOVELS

Abstract: *The urgency of the discussed issue.* This article presents some results of assessment of the efficiency of using various methods of vibration control as constituent elements of the integrated diagnostic approach in relation to the analysis of parameters of vibration of the energy-mechanical equipment of mining shovels. The received results have a high practical value for solving the tasks related to technical diagnostics, prediction of a process of degradation of the actual state of subjects under control and development of uniform diagnostic criteria capable of replacing a large number of diagnostic features and rules.

The main aim of the study: To prove the choice of diagnostic methodologies which would be suitable for identification of defects of the equipment of mining shovels including, in cases when the analysis of vibration parameters by standard methods is complicated or impossible to carry out. To prove efficiency of the offered recommendations on the choice of a set of diagnostic methodologies for assessment of actual state of subjects under diagnostics.

The methods used in the study: Within the framework of the work, the 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 transformation, excess and analysis of the rotor aggregate run-out characteristics, analysis of cepstrum.

The results: It is proved that the offered complex of methods of vibration diagnostics is suitable for identification of defects of the electromechanical equipment of EKG-type mining shovels, and the received results of the complex analysis of parameters of initial polyharmonic waves can be also effectively applied to implementation of short-term forecasting of process of degradation of actual state of technical devices and be used as basic element of the system performing maintenance of the equipment in accordance to its actual state.

Keywords: vibration analysis, mining shovels, integrated approach, maintenance management.

Article info: received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-13-19

REFERENCES

1. 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)
2. 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. (eng)
3. 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)
4. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

5. Gerike P.B. Gornoe oborudovanie i jelektrome-hanika, № 4. – Kemerovo. – 2018. – Pp. 12-18. (rus)
6. S. Delvecchio, G. DELia, E. Mucchi, G. Dal-piaz. Advanced signal processing tools for the vibratory surveillance of assembly faults in diesel engine cold tests, Journal of Vibration and Acoustics, April 2010, Vol. 132, Issue 2, 021008-10, ISSN: 1048-9002, doi:10.1115/1.4000807 (eng)
7. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2013. #2. Pp. 45-47. (rus)
8. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo ma-tematicheskogo i programmnoho obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [De-velopment special mathematical and software for auto-mated diagnosis of complex systems]: PhD thesis ex-cerpt. Moscow. 2007. (rus)
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detec-tion via selective frequency band alarming in PC-based

predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)

10. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [The practical vibration analysis and monitoring of mechanical equipment] Moscow: Spectrum engineering Publishers, 1996. 276 p. (rus)

11. 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)

12. 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)

13. V.I. Klishin, B.L. Gerike, P.B. Gerike//Materials IV of the international scientific and practical conference "Current Trends and Innovations in Science and Production". - Mezhdurechensk, 2015. Pp. 11-12. (rus)

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б. Выбор и обоснование параметров комплексного подхода для анализа вибрации экскаваторов типа ЭКГ // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 1 (141). — С. 13-19.

14. 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)

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

16. 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)

Reference to article

Gerike P.B. Choice and justification of integrated approach parameters for the analysis of vibration of EKG-type mining shovels. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 1 (141), pp. 13-19.