

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 53.083(430.1)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ЭКГ КАК ИСТОЧНИК ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБА- НИЙ

ENERGOMECHANICAL EQUIPMENT OF MINING SHOVELS (EKG-TYPE) AS A SOURCE OF HIGH-LEVEL MECHANICAL VIBRATIONS

Герике Павел Борисович

канд. техн. наук, доцент, e-mail: am_besten@mail.ru

Gericke P.B.,

C.Sc. (Engineering), Associate Professor

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

Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation.

Аннотация. В настоящей работе приведена подробная классификация наиболее распространенных дефектов генераторных групп экскаваторов типа ЭКГ, эксплуатируемых в условиях угольных разрезов Кузбасса. Предоставлена оценка эффективности использования научных результатов, полученных с применением методов контроля по параметрам механических колебаний, сформулированы основные диагностические признаки выявления повреждений данного типа оборудования по результатам анализа параметров виброакустических волн, генерируемых при его работе. Обоснована эффективность применения комплексного диагностического подхода для оценки технического состояния энергомеханического оборудования горных машин. Проведенные исследования позволили создать комплекс из более чем 100 диагностических правил, предназначенных для автоматизированного выявления основных повреждений оборудования на базе селективных групп предупреждающих частот для систем интеллектуального обслуживания горных машин. Результаты выполненных исследований безапелляционно доказывают необходимость осуществления перехода ремонтных и обслуживающих подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию, платформой для реализации базовых элементов концепции которой послужит разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний.

Abstract. On an example of dynamic equipment for mining shovels operating in the Kuzbass give a classification the most common defects. Evaluate the effectiveness of nondestructive inspection and functional diagnostics. The basic diagnostic signs of damage detection of this type of equipment as a result of the dynamic analysis of the parameters of vibroacoustics waves generated during its operation. The efficiency of an integrated diagnostic approach for the evaluation of the technical state of the mining machinery. A set of more than 100 diagnostic rules for automated detection of major damage to property on the basis of selective frequency bands warning systems for predictive maintenance of mining machines. The results of these researches demonstrate the need to move categorically repair and maintenance departments of industrial enterprises in the service system technology on its actual technical condition, a platform for the implementation of the basic elements of the concept which will serve as a designed complex of diagnostic rules detecting defects on the analysis of the parameters of mechanical vibrations.

Ключевые слова: вибродиагностика, энерго-механическое оборудование, карьерный экскаватор, дефекты электрических машин.

Keywords: vibration analysis, energomechanical equipment, mining shovel, defects of electric machines.

Сегодня значительное количество технических устройств, эксплуатируемых в условиях открытых горных работ на предприятиях

Кузбасса и выработавших свой нормативный ресурс, находится в недопустимом техническом состоянии. Дальнейшая эксплуатация такой

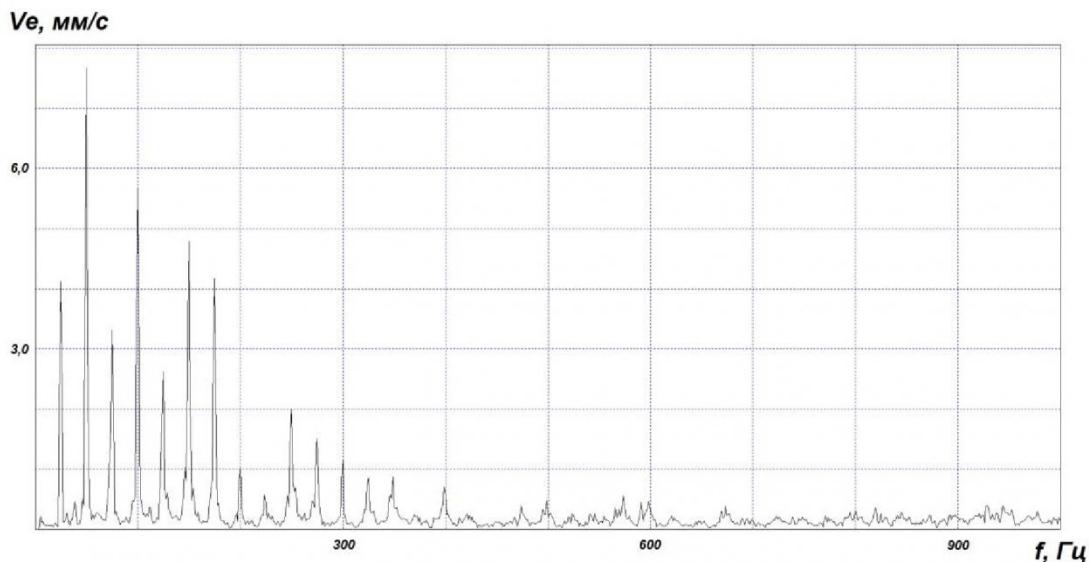


Рис. 1. Генераторная группа экскаватора ЭКГ-5А. Недопустимый уровень расцентровки сетевого двигателя с генератором подъема, ярко выраженное нарушение жесткости системы

техники при отсутствии своевременных ремонтных мероприятий и должного технического обслуживания неминуемо приведет к возникновению аварийных ситуаций, росту непроизводительных простоев и финансовых издержек, повысится вероятность несчастных случаев на производстве, связанных с техническим состоянием эксплуатируемого оборудования.

Мировая практика показывает, что именно оценка технического состояния машин и механизмов на основе анализа параметров генерируемой при их работе вибрации является тем единственным методом неразрушающего контроля, который позволяет быстро и достоверно определить фактическое состояние сложного промышленного оборудования. Данный факт обусловлен высокой информативностью регистрируемых сигналов и способностью вибрационных волн распространяться в сплошных средах без заметного искажения на весьма значительной скорости [1, 2].

Результаты полученных в ходе выполнения настоящего исследования данных по параметрам вибрации свидетельствуют о широком распространении большого числа типовых неисправностей и повреждений энергомеханического оборудования горных машин.

Объектом данного исследования является изучение процессов формирования, распространения и особенности анализа параметров вибрационных волн, генерируемых при работе преобразовательных агрегатов экскаваторов типа ЭКГ. В общем виде все основные причины возникновения и развития дефектов генераторных групп можно укрупненно классифицировать по трем основным сегментам: нарушение технологии изготовления узлов и деталей; неквалифицированный монтаж;

эксплуатационные дефекты.

Примеры спектрального представления параметров полигармонических волн, генерируемых при работе преобразовательных агрегатов экскаваторов типа ЭКГ, представлены на рисунках 1...5, иллюстрирующих специфику анализа параметров волны и алгоритмы выявления основных типов дефектов и повреждений.

Наилучшим образом оценить фактическое техническое состояние генераторных групп, с точки зрения быстроты и точности получаемых результатов, возможно с применением анализа параметров виброскорости ивиброускорения в расширенном до 6-8 кГц частотном диапазоне при помощи прямого спектрального анализа [3]. Именно такой подход к оценке полигармонических колебаний позволяет безошибочно выявить большинство дефектов исследуемого типа оборудования, таких как: расцентровку валопровода агрегата, нарушение жесткости системы и структурный резонанс, разнообразные повреждения подшипников качения и нарушение режима их смазки, дефекты элементов соединительных муфт, дефекты электрической природы (замыкание обмоток статора, асимметрия электромагнитного поля, дефекты стержней и т.п.).

Ремонтные подразделения эксплуатирующих предприятий и организаций, специализирующиеся на обслуживании и наладке энерго-механического оборудования экскаваторов типа ЭКГ, в т.ч. при помощи методов и средств вибранализа, уделяют достаточное внимание состоянию преобразовательных агрегатов. Однако, не всегда квалификация специалистов позволяет поддерживать техническое состояние обслуживаемого оборудования на допустимом уровне.

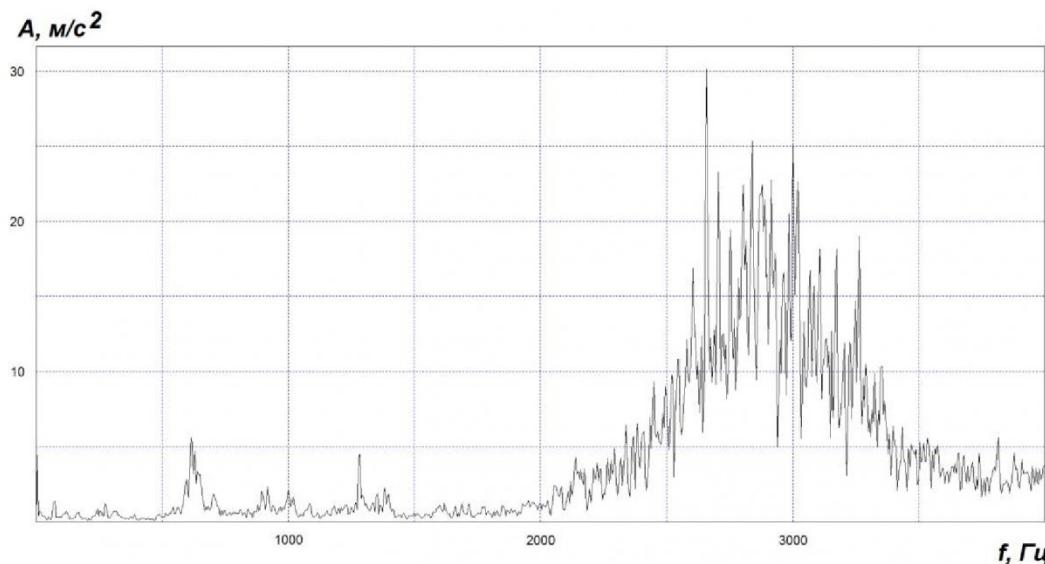


Рис. 2. Развитый дефект подшипника генератора напора экскаватора ЭКГ-8И, общий уровень сигнала по параметру виброускорения $A_{CK3}=98,6 \text{ м/с}^2$.

Ve, мм/с

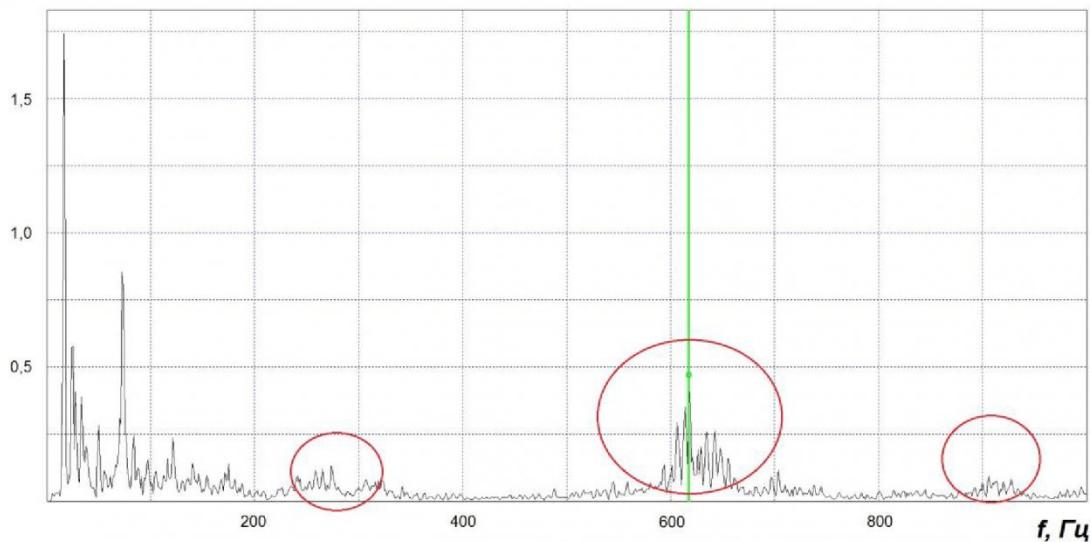


Рис. 3. Износ тел качения и нарушение режима смазки подшипника генератора подъема экскаватора ЭКГ-10.

Приблизительно в 30% случаев здесь имеет место повышенный уровень механических колебаний, специфику выявления причин которого рассмотрим ниже. Вместе с тем, следует отметить, что степень развития дефектов генераторных групп экскаваторов ЭКГ иногда оказывается достаточно серьезной, даже недопустимой, что вызвано, в первую очередь, нарушением центровки и дисбалансами различной природы.

Среди типичных дефектов генераторных групп, привносящих наиболее значительный вклад в превышение общего уровня вибрации, следует отметить расцентровку валопровода агрегата (см. рисунок 4). Качество наладочных работ по центровке валов можно оценить только путем определения величины остаточной

несоосности. До 30% всех случаев нарушения соосности валов энерго-механического оборудования горных машин приходится на так называемую «горизонтальную» остаточную несоосность, являющуюся следствием недостаточной компенсации горизонтальной (осевой) компоненты механических колебаний при проведении центровки, что со временем неминуемо приводит к значительному росту величин параметров вибрации. Основным диагностическим признаком, подтверждающим наличие расцентровки валов является присутствие в спектре удвоенной гармоники оборотной частоты $2f_R$; однако в спектре по параметру виброскорости может налицоствовать также гармонической ряд частоты kf_R (где $k=2\dots 6$). Проводимый анализ существенно затруднен

соответствием одних и тех же частотных признаков совершенно различным по своей природе дефектам энерго-механического оборудования. Так, например, тот же гармонический ряд оборотной частоты kf_R может соответствовать как нарушению соосности валов, так и нарушению жесткости опорной системы и некоторым другим типам неисправностей и повреждений [4, 5]. В данном случае число гармоник ряда kf_R и степень их вклада в общий уровень сигнала зависит от нескольких причин, таких как: тип несоосности (угловая, параллельная и т.п.), кинематические особенности работы механизма, уровень неуравновешенности роторных агрегатов, состояние крепежа, количество и степень развития повреждений. Так, пример на рисунке 4 иллюстрирует совпадение некоторых частот значащих гармоник различной

природы. В спектре присутствуют ярко выраженные гармоники частоты питающей сети $kf_{ЭЛ}$ (50, 100, 150, 200 Гц), что вызвано замыканием обмоток статора генератора. Эти же частоты присутствуют в качестве составляющих ряда kf_R , являющегося признаком нарушения жесткости (т.к. оборотная частота для генератора подъема ЭКГ-5А составляет 25 Гц). Кроме того, в спектре явно присутствуют признаки некритичного нарушения соосности валов агрегата. Данное спорное толкование в этом конкретном случае может подтвердить или опровергнуть только использование методологии анализа выбега агрегата, позволяющего провести четкую ассоциацию с наличием дефектов электрической природы, однако на практике данный метод применяется редко из-за жестко регламентированного времени измерений.

Наиболее часто встречающимся следствием расцентровки валов является повышенный уровень механических колебаний и нагрузок, которые испытывают подшипники, срок эксплуатации которых существенно сокращается (до 10 раз по сравнению с номинальным [2]). Развитие таких дефектов подшипников качения, явившихся следствием нарушения центровки валов агрегатов, иллюстрируют спектры, представленные на рисунках 2 и 3. Наиболее эффективно выявить такие дефекты на начальных стадиях их развития удается с применением результатов комплексного диагностического подхода, представляющего собой сочетание нескольких различных методов вибранализа – обычно это прямой спектральный анализ, метод ударных импульсов и анализ огибающей спектра.

Кроме того, отличные результаты предоставляет автоматизированная обработка полигармонических волн с применением алгоритмов эксцесса, позволяющая проводить анализ при отсутствии априорных данных о геометрических параметрах подшипника. Единственным недостатком данного метода является невозможность определения типа конкретного повреждения, однако степень его развития выявляется с вероятностью до 95%. Помимо прочего, быстро оценить фактическое состояние работающего подшипника качения можно также и по общему уровню СКЗ виброускорения в расширенном частотном диапазоне [6].

Неуравновешенность ротора генераторов/сетевого двигателя является еще

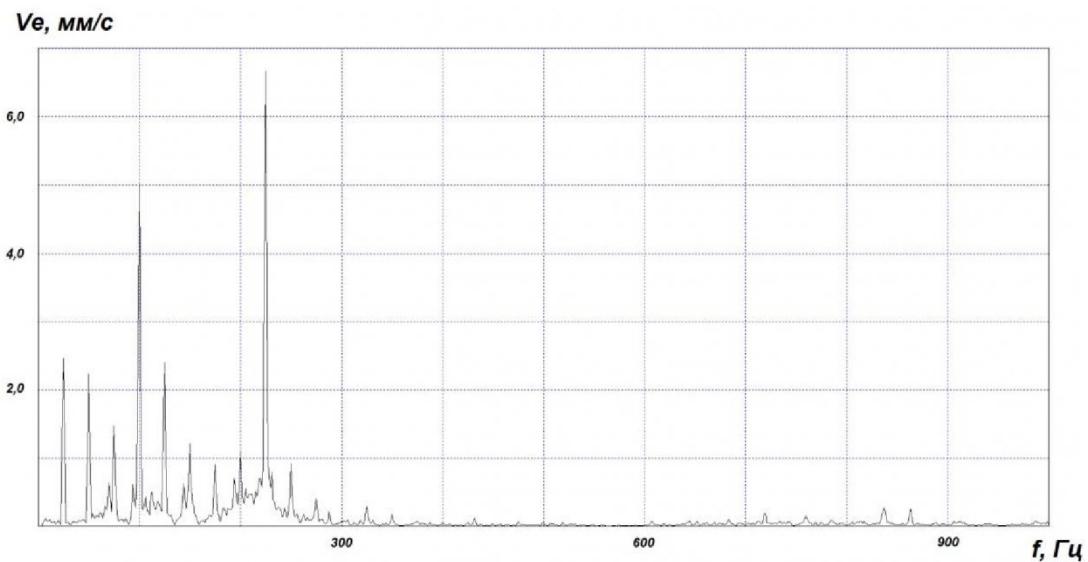


Рис. 4. Спектр полигармонической волны, записанной на генераторе подъема экскаватора ЭКГ-5А.

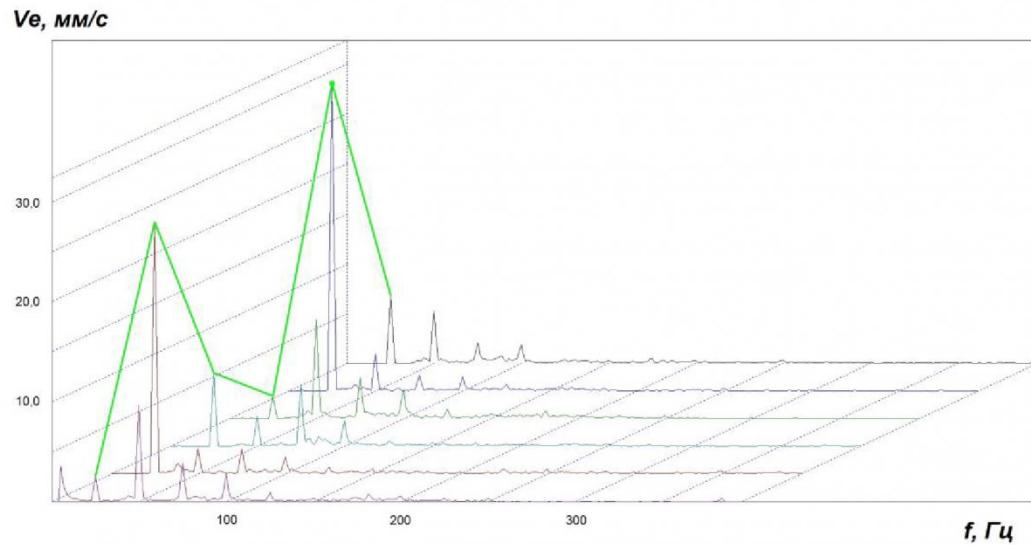


Рис. 5. Сравнение спектров, иллюстрирующее развитый дисбаланс ротора генератора напора экскаватора ЭКГ-5А (сравнение по шести измерениям в трех ортогональных плоскостях в двух точках, дальний спектр – измерение в вертикальном направлении со стороны свободного конца генератора, направление измерений – вертикальное; далее – в соответствии с методикой проведения измерений).

одной причиной преждевременного выхода из строя подшипников качения. В зависимости от состояния элементов крепежа агрегатов, степени развития и типа неуравновешенности этот дефект может проявлять себя присутствием в спектре различных наборов значащих частотных компонент [6]. Основным диагностическим признаком, подтверждающим наличие данного дефекта, служит присутствие в спектре ярко выраженных гармоник оборотной частоты во всех плоскостях проведения измерений (см. рисунок 5). Кроме результатов спектрального анализа при наличии неуравновешенности вращающихся элементов конструкции высокую эффективность интерпретации полученных результатов предоставляет анализ траектории движения ротора. Форма кривой на фазовой плоскости, полученная при помощи специальной математической обработки синхронного сигнала вибрации по параметру виброперемещения, является надежным диагностическим признаком, по ней можно достоверно судить о наличии тех или иных повреждений роторного агрегата [7].

Таким образом, становится совершенно очевидным, что именно результаты комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации позволяют наиболее точно выявлять на стадии зарождения или развития дефекты энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов [8]. Проведенные исследования [9] показали, что необходимым и достаточным условием осуществления эффективного контроля по параметрам вибрации сложного технологического оборудования является использование следующих методов вибранализа: прямого спектрального анализа в расширенном частотном диапазоне, экспесса для экспресс-диагностики подшипников качения, анализа огибающей спектра, вейвлет преобразования сигнала [10], метода анализа траектории/процессии движения ротора и анализа характеристики разгона/выбега агрегата [11, 12]. Помимо прочего, комплексный подход к анализу данных предъявляет повышенные дополнительные требования к используемому аппаратно-программному комплексу. Необходимым требованием обеспечения качественных результатов комплексного диагностического подхода становится

синхронный сбор данных минимум по двум измерительным каналам, дополнительное математическое обеспечение прибора, расширенный частотный и динамический диапазон измерений, высокое разрешение регистрируемых характеристик. Данный программно-аппаратный комплекс предоставляет возможность эффективного решения задач по выявлению большинства дефектов энергомеханического оборудования горных машин на начальной стадии их развития и диагностированию неисправностей с высокой точностью, в т.ч. тогда, когда гармоники, генерируемые различными по своей природе дефектами энергомеханического оборудования, совпадают вплоть до 0,1 Гц. Зачастую только применение результатов комплексного диагностического подхода к обработке параметров вибрации позволяет исключить ложные гипотезы и недостоверные заключения о техническом состоянии объекта диагностирования [13], выявить повреждения узлов и агрегатов еще на стадии их зарождения и минимизировать вероятность аварийного выхода из строя дорогостоящего технологического оборудования [14], тем самым снизив убытки, связанные с непроизводительными простоями, и повысив безопасность работы обслуживающего и ремонтного персонала промышленных предприятий.

Использование современных систем управления техническим обслуживанием было бы невозможным без широкого применения современных методов и средств неразрушающего контроля [15]. Учеными ФИЦ УУХ СО РАН и ГОУ ВПО КузГТУ сегодня созданы все основные научные предпосылки для внедрения на предприятиях угольной и горнорудной промышленности элементов базовой платформы системы обслуживания горной техники по ее фактическому техническому состоянию, обоснованы критерии предельно допустимого состояния отдельных узлов и механизмов в целом, которые могут быть взяты за основу при создании математических моделей прогнозирования развития повреждений динамического оборудования широкого типового и модельного ряда горной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герике Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие. /Б.Л. Герике, Г.И. Козовой, В.С. Квагинидзе, А.А. Хорешок, П.Б. Герике/ Москва, 2012. – 400 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
3. Bently D.E., Hatch C.T. ‘Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics’, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Герике П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности. /Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: Институт угля Сибирского отделения РАН. – М. – изд-во «Горная книга». – 2013. - №ОВ 6. – С. 440 – 446.
9. Герике П.Б. Адаптивное прогностическое моделирование процессов деградации технического состояния генераторных групп карьерных экскаваторов на основе анализа параметров генерируемой при их работе вибрации /П.Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 6. – Кемерово. – 2015. – С. 71-77.
10. 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.
11. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
12. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
13. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
14. 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.
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.

REFERENCES

1. Gericke B.L., Kozovoy G.I., Kvaginidze V.S., Khoreshok A.A., Gericke P.B. Diagnostika gornykh mashin i oborudovaniya [Vibration analysis of mining machinery and equipment]. Moscow, 2012. 400 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. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press. 2002. 726 p. (eng)
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. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskikh 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)
6. 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)
7. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugor'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)
8. Gericke P.B. Otdel'nyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya: Institut uglya Sibirskskogo otdeleniya RAN. Mining book Publishers. 2013. #OV6. Pp. 440-446. (rus)
9. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. #6. Pp. 71-77. (rus)
10. 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)
11. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
12. 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)

13. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)
14. 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)
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA. (eng)

Поступило в редакцию 16.03.2016
Received 16 March 2016