

УДК 53.083(430.1)

ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЕЗВОЖИВАЮЩИХ ЭЛЕВАТОРОВ

THE CHOICE OF THE DIAGNOSTIC CRITERIA FOR ASSESSING THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF DEWATERING ELEVATORS

Герике Павел Борисович

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

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

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

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

Аннотация.

В работе обоснована необходимость использования данных комплексного диагностического подхода к оценке технического состояния оборудования ковшовых обезвоживающих элеваторов по результатам анализа параметров генерируемой при их работе вибрации. Доказано, что только широкое применение современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляет возможность для эффективного диагностирования дефектов энерго-механического оборудования. В рамках настоящей работы проанализированы существующие методологические подходы к разработке единых диагностических критериев, основанные на принципах вибродиагностики сложных механических систем. Статистическое обобщение результатов анализа виброакустических характеристик, генерируемых при работе энерго-механического оборудования обезвоживающих элеваторов (выборка из 20 единиц), позволило провести распределение дефектов данного типа оборудования по причинам их возникновения и степени опасности, а также сформировать кластер из более чем ста диагностических признаков по параметрам вибрации, формализованных для удобства их использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по частотным наборам базовых признаков. Разработанный кластер диагностических правил, а также создаваемый единый диагностический критерий для оценки и прогнозирования технического состояния, могут выступить в качестве составляющих платформы для реализации основных элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию. Результаты краткосрочного адаптивного моделирования процессов деградации технического состояния как нельзя лучше вписываются в концепцию системы обслуживания оборудования угольной и горнорудной промышленности по его фактическому состоянию. Выполненные в рамках настоящей работы исследования безапелляционно доказывают возможность создания единого критерия оценки технического состояния энерго-механического оборудования ковшовых элеваторов, что является необходимым условием для осуществления эффективного краткосрочного прогнозирования моделируемых диагностических параметров.

Abstract

In this paper substantiates the necessity of applying the results of comprehensive diagnostic approach to the assessment of the technical condition of the equipment dewatering elevators on the analysis of the parameters generated when the vibration. It is proved that only widespread use of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive testing provides an opportunity for effective diagnosis of defects in energy-mechanical equipment. As part of this paper we analyze the existing methodological approaches to the development of uniform diagnostic criteria, based on the principles of vibration diagnostics of complex mechanical systems. A statistical summary of the results of analysis of vibration parameters generated by equipment of the dewatering of elevators (a sampling of 20 units), allowed for the distribution of defects for reasons of their occurrence and their degree of danger. In addition, the cluster has been formed from more than one hundred and diagnostic features for vibration parameters, formalized for ease of use in the development of the algorithm code of the automated control of complex systems on the frequency set of basic features. This cluster, as well as create a single diagnostic criterion for the assessment and prediction of technical condition, can serve as components of a platform for the implementation of the main elements of the service system of the actual state. The results of short-term adaptive modeling of degradation processes is the best fit into the concept of the coal and mining equipment maintenance system in its actual state. This research prove categorically the possibility of creating a single criterion of technical condition of the energy-mechanical equipment of dewatering elevators.

tion for evaluating the technical condition of energy-mechanical elevator equipment, which is a prerequisite for effective short-term forecasting of the simulated diagnostic parameters.

Ключевые слова: вибродиагностика, спектральные маски, управление техническим обслуживанием, дробильно-сортировочное и углеобогатительное оборудование.

Keywords: vibration analysis, the spectral mask, maintenance management, crushing and screening and coal concentrating equipment.

Проведенные исследования параметров вибрационных волн на примере выборки из 150 единиц обогатительного и дробильно-сортировочного оборудования позволили сформировать статистику аварийных отказов и выявить основные группы дефектов, развитие которых приводит к выходу из строя диагностируемого оборудования.

Среди главных причин выхода оборудования ковшовых элеваторов из строя необходимо выделить следующие:

- неуравновешенность ротора электродвигателя;
- нарушение жесткости системы;
- дефекты подшипников (перекосы и ослабления посадок, дефекты наружного и внутреннего колец, тел качения и сепараторов, нарушение режима смазки);
- износ зубчатых зацеплений, нарушение соосности и перекос валов редуктора;
- нарушение соосности системы «электродвигатель – редуктор»;
- дефекты двигателей электромагнитного происхождения.

Спектры, иллюстрирующие примеры развития некоторых дефектов, приведены на рисунках 1-4. Так, например, на рисунке 1 представлен спектр, типичный для перекоса валов редуктора, часто являющегося следствием неквалифицированного

ремонта [1]. Кроме того, в спектре присутствуют составляющие, свидетельствующие об абразивном износе зубьев первой ступени редуктора и ярко выраженным нарушении жесткости системы.

Применительно к данному типу диагностируемого оборудования, анализ параметров вибрации существенно затрудняют труднодоступность измерительных точек на редукторе и барабане и низкая частота вращения самого барабана, источники случайной высокочастотной вибрации, отсутствие ремонтной документации на объект диагностики (например, данных о замене подшипников двигателя, редуктора и барабана не на штатные, а на подходящие по посадочному диаметру).

В этом случае наиболее эффективным способом оценки текущего состояния энергомеханического оборудования ковшовых элеваторов становится комплексный диагностический подход, результаты которого позволяют эффективно выявлять основные типы неисправностей и повреждений, в том числе, находящиеся на начальной стадии своего развития.

С точки зрения эффективности результатов анализа параметров вибрационных волн, генерируемых во время работы ковшового элеватора, комплексный подход к диагностике оборудования должен включать спектральный анализ по параметрам виброскорости и виброускорения как в стандартном, так и в расширенном до 7000 Гц частотном диапазоне, эксцесс, анализ кепстра, а

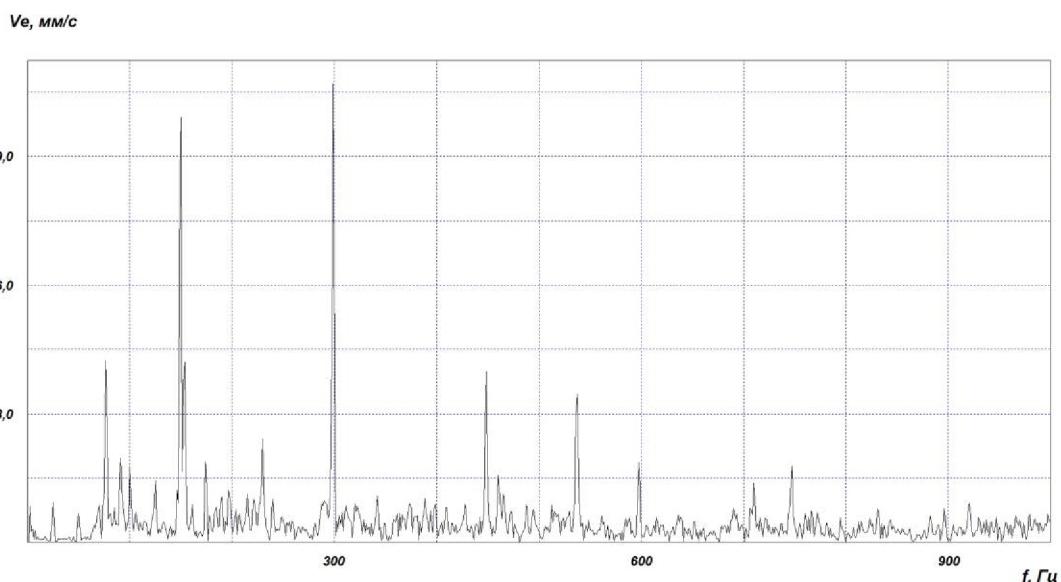


Рис. 1. Износ зубчатых зацеплений первой ступени и перекос осей валов редуктора обезвоживающего элеватора ЭО-10С, признаки общего нарушения жесткости опорной системы.

также анализ огибающей [2]. Как показывает практика виброанализа, именно такое сочетание методов является наиболее оптимальным для эффективного выявления дефектов диагностируемого оборудования и позволяет получить максимум ценной диагностической информации при оптимальных временных затратах [3, 4].

Решение задачи по разработке и внедрению системы обслуживания эксплуатируемой техники по ее фактическому состоянию является невозможным, в том числе, без наличия четко структурированной базы данных, содержащей информацию о динамике изменения диагностических параметров для широкого типового и модельного

ряда эксплуатируемой техники [5].

Статистика результатов проведенных исследований позволяет утверждать, что на первом месте по распространенности среди дефектов энерго-механического оборудования ковшовых элеваторов находится нарушение жесткости системы, признаки которого присутствуют практически повсеместно (см. рисунок 1).

Кроме того, крайне широкое распространение получили разнообразные дефекты подшипников, используемых в конструкциях исследуемого оборудования. К ним относят ослабление посадки и изменение зазоров, нарушение режима и качества смазки, повреждения внутреннего и наружного

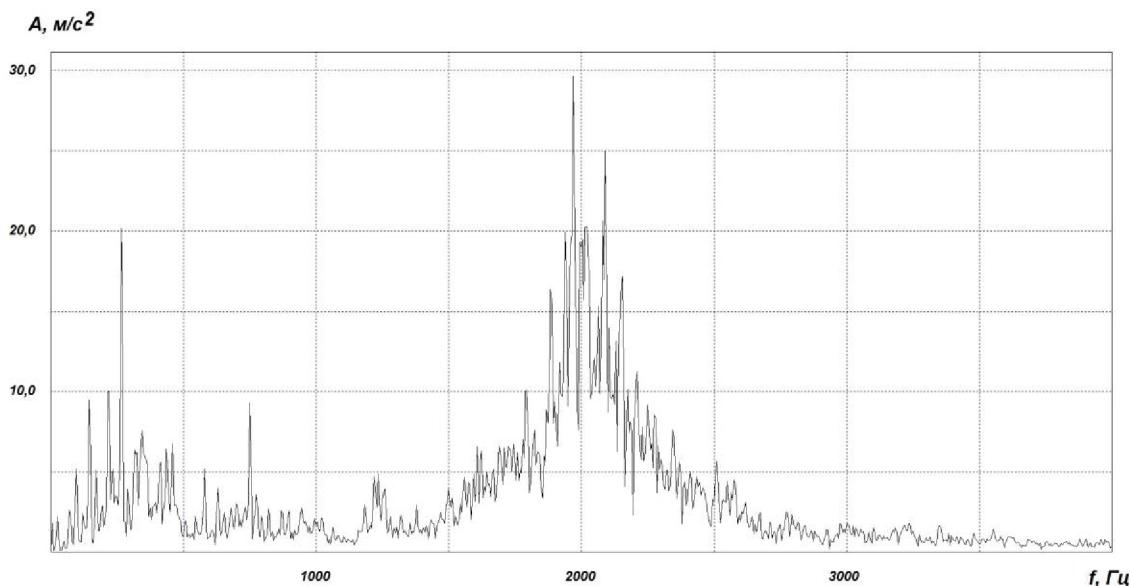


Рис. 2. Множественные дефекты подшипника электродвигателя элеватора ЭО-10С (раковина внутреннего кольца, изменение формы тел качения), ярко выраженное нарушение жесткости системы.

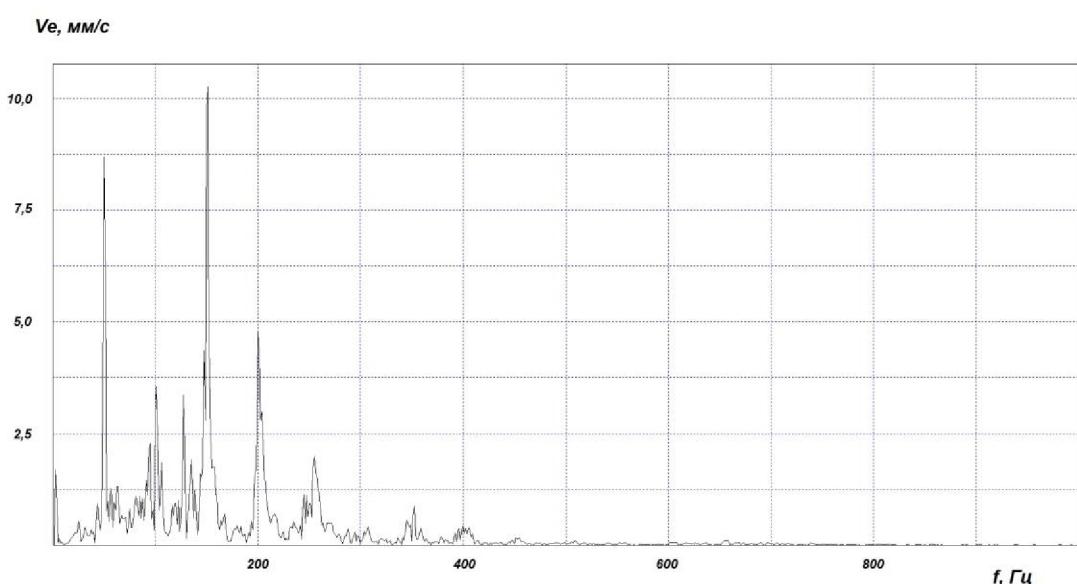


Рис. 3. Перекос осей валов первой и второй ступеней редуктора обезвоживающего элеватора, питинг зубчатых зацеплений первой ступени.

$V_e/V_0, \text{дБ}$

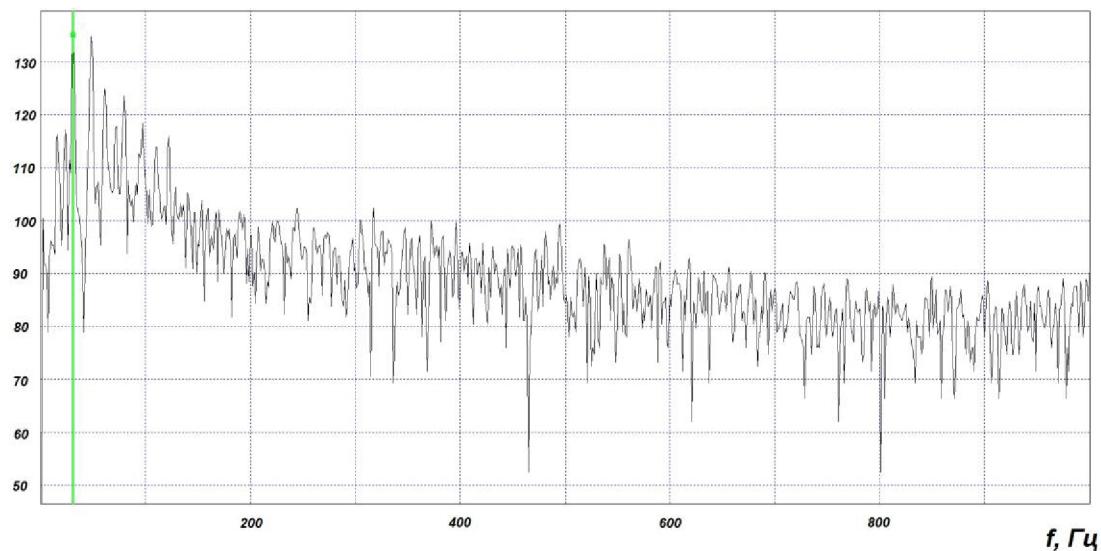


Рис. 4. Развитый дисбаланс ротора электродвигателя, расцентровка с редуктором элеватора ЭО-6С.

колец, трещины и наклёт сепараторов, дефекты тел качения, часто встречаются множественные повреждения этих элементов (см. рисунок 2).

Дефекты редукторов переборного типа, используемых в конструкции привода обезвоживающих элеваторов, среди которых следует выделить абразивный износ и выкрашивание зубьев, а также перекосы валов, также получили довольно широкое распространение. Причинами формирования и развития таких дефектов являются низкоквалифицированный монтаж деталей и узлов, нарушение заводской технологии изготовления зубчатых колес, эксплуатационный износ [6, 7]. Статистика проведенных исследований показывает, что различные дефекты редукторов примерно в двадцати процентах случаев являются причиной аварийного выхода агрегата из строя (см. рисунок 3). На третьем месте по распространенности на данном диагностируемом оборудовании, после нарушения жесткости и дефектов подшипников [8, 9] находятся дефекты, связанные с расцентровкой валов агрегатов и неуравновешенностью вращающихся элементов конструкций (см. рисунок 4). На примере энерго-механического оборудования ковшовых элеваторов довольно часто встречается неуравновешенность ротора электродвигателя (один из типичных дефектов, быстро приводящий к формированию аварийного отказа), реже – неуравновешенность деталей редуктора (зубчатых колес, валов) или элементов соединительных муфт.

Результаты проведенных исследований позволили сформулировать следующие семь наиболее эффективных диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки фактического состояния по параметрам вибрации, которые могут быть использованы при разработке единого диа-

гностического критерия оценки и прогнозирования изменения состояния дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования:

1. Нормированный общий уровень среднеквадратического значения виброскорости в стандартном частотном диапазоне;
2. Общий уровень подшипниковых частот по параметру виброскорости ($2\ldots3000 \text{ Гц}$);
3. Общий уровень и пиковые значения отдельных максимальных по амплитуде гармоник по параметру виброускорения в диапазоне $50\ldots5000 \text{ Гц}$;
4. Общий уровень по параметру виброскорости и максимумы амплитуд значащих гармоник в низкочастотном диапазоне ($5\text{Гц} \ldots 20f_{R1}$);
5. Глубина модуляции спектра огибающей вибrosигнала в области зубчатых частот редуктора, а также флуктуация амплитуд соответствующих гармоник;
6. Мера подобия, определяемая по результатам сравнения характеристик временной волны реального и «эталонного» сигналов;
7. Результаты нормирования параметров вибрации при помощи спектральных масок высокой степени детализации, разработанных для широкого спектра оборудования.

Обобщение результатов анализа вибрационных характеристик, генерируемых работающим оборудованием ковшовых элеваторов, предоставило возможность разработать три типа спектральных масок – для типов сигнализации «предупреждение», «тревога» и «останов» (с 80%, 90% и 95% доверительной вероятностью соответственно). Маски имеют высокую степень детализации, для их разработки использовалась выборка из 20 единиц однотипного диагностируемого оборудования (см. рисунок 5).

Разработка единых диагностических критери-

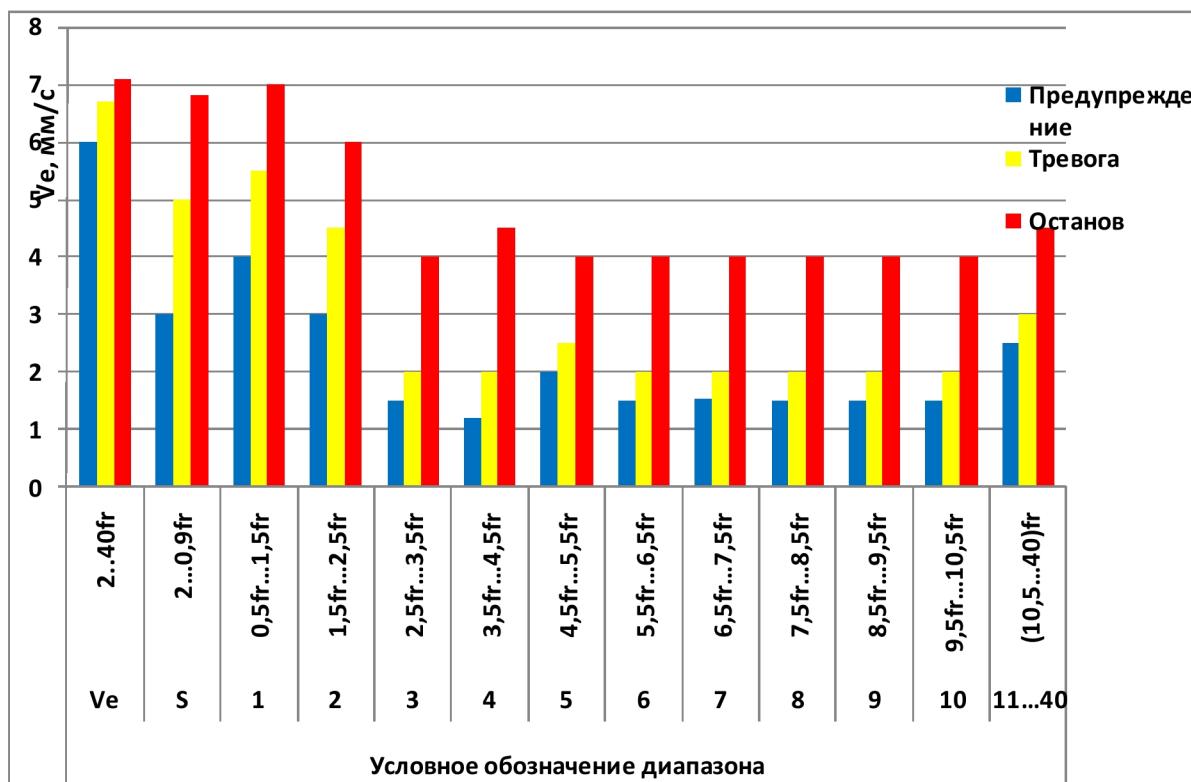


Рис. 5. Спектральная маска, разработанная для диагностики энерго-механического оборудования элеватора ЭО-10С.

ев оценки состояния широкого спектра дробильно-сортировочного, углеобогатительного и горнотранспортного оборудования откроет путь к решению задач, связанных с созданием адаптивных прогностических моделей деградации технического состояния [10, 11, 12]. Использование результатов такого моделирования как нельзя лучше подходит для реальных условий действующей на предприятиях отрасли системы планово-предупредительных ремонтов [13].

Результаты комплексных исследований в области анализа параметров вибрации сложных систем позволили сегодня создать на базе ФИЦ УУХ СО РАН практически все предпосылки для разработки базовых элементов концепции системы обслуживания по состоянию с учетом специфики эксплуатации оборудования на разрезах, обогатительных фабриках и рудниках Кузбасса. Внедрение такой системы позволит вывести безопасность горных работ на качественно новый уровень. Раз-

работанные критерии предельного состояния дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования, предложенный алгоритм выявления единых диагностических критериев, создаваемые математические прогнозные модели деградации технического состояния сложных механических систем позволяют свести к минимуму количество аварийных ситуаций на производстве, вызванных критичным состоянием эксплуатируемых технических устройств [14, 15]. Все эти перечисленные элементы являются неотъемлемыми сегментами системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию, практическое использование результатов настоящего комплексного исследования открывает возможность для внедрения в условиях промышленных предприятий Кузбасса качественно новых форм и концепций систем обслуживания эксплуатируемых машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). 173–180
3. 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.

4. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
5. Герике П.Б. Некоторые вопросы специфики анализа параметров вибрации, генерируемой при работе подъемных лебедок экскаваторов ЭКГ-5А /П. Б. Герике, А. Н. Завьялов// Приоритетные направления развития науки, техники и технологий: Сборник материалов 3 международной научно-практической конференции. Том 1 – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2016 – С. 105-108.
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. Разработка стационарного диагностического комплекса для экскаватора типа ЭКГ. Дрыгин М.Ю., автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 20 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. 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. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. / Москва, 1996. – 276 с.
11. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
12. Лукьянин А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
13. Герике П.Б. Преобразовательный агрегат экскаваторов типа ЭКГ как источник повышенного уровня механических колебаний /П.Б. Герике// Вестник КузГТУ, № 2. – Кемерово. – 2016. – С. 56-64.
14. Krakovskiy, 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

REFERENCES

1. 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). Pp. 86–95 (eng)
2. Puchalski A. «A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics», Mechanical Systems and Signal Processing #56-57(2015). Pp. 173–180 (eng)
3. 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)
4. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726. (eng)
5. Gerike P.B., Zav'yalov A.N. Nekotorye voprosy spetsifiki analiza parametrov vibratsii, generiruemoy pri rabote pod"emykh lebedok ekskavatorov EKG-5A [Some questions the specificity analysis of vibration parameters generated during the equipment operation of mining shovels EKG-5A-type]. Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki, tekhniki i tekhnologiy: Sbornik materialov 3 mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tom 1 [Priority directions of development of science, engineering and technology: 3 Collected materials of the international scientific-practical conference. Vol. 1]. Kemerovo, published of the ZapSibNTs, 2016. P 105-108. (rus)
6. Delvecchio S, DElia G., Mucchi E., Dalpiaz G., 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. Drygin M.Yu. Razrabotka statsionarnogo diagnosticheskogo kompleksa dlya ekskavatora tipa EKG [Development of a stationary diagnostic system for an mining shovel ECG-type]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
8. 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)
9. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection 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. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
13. Gericke P.B. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. #2. Pp. 56-64. (rus)
14. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
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)

Поступило в редакцию 12 октября 2016
Received 12 oktober 2016