III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ
III. TECHNOLOGICAL QUESTIONS OF MINING WORK SAFETY

П.Б. Герике // P.B. Gericke
am_besten@mail.ru

канд. техн. наук, доцент Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово пр. Ленинградский , 10
C.Sc. (Engineering), Associate Professor Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, Russian Federation.

Б.Л. Герике // B. L. Gericke
gbl_42@mail.ru

доктор техн. наук, профессор, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово пр. Ленинградский – 10, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650026, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
doctor of technical sciences, professor Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, Russian Federation. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyaya street 28, Kemerovo, Russian Federation

УДК 681.518.5

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЦЕНТРОВКИ ВАЛОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН
SHORT-TERM PREDICTION OF SHAFT MISALIGNMENT ON MINING MACHINERY EQUIPMENT

В данной статье приводятся некоторые результаты расчетов с использованием предложенной математической адаптивной модели и единых диагностических критериев, созданных с учетом комплексного анализа параметров вибрации динамического оборудования горных машин, что позволило авторам настоящей работы приблизиться к решению задачи по созданию комплексного кратко- и среднесрочного прогноза технического состояния оборудования электрических карьерных экскаваторов, без которого невозможно на современном техническом уровне совершенствовать управление системой ремонтов горного оборудования. На примере расцентровки валов динамического оборудования электрических карьерных экскаваторов провести апробацию разработанного программного обеспечения для прогнозирования технического состояния горных машин. Оценить достоверность результатов краткосрочного прогнозирования, получаемых при помощи разработанного специализированного программного обеспечения, и доказать эффективность оценки изменения технического состояния обследованной горной техники. При создании единых диагностических критериев использовались принципы оптимальной скаляризации данных по параметрам механических колебаний. Для анализа вибрации применялся комплексный вибродиагностический подход, который включал результаты спектрального анализа, анализ характеристики выбега, эксцесс и анализ огибающей спектра. В рамках настоящего исследования доказана принципиальная эффективность разработанного на основе предложенной адаптивной модели и новых единых диагностических критериев оригинального программного обеспечения, предназначенного для прогнозирования технического состояния горных машин. Полученные результаты могут быть использованы для включения в существующую систему управления ремонтами горной техники, действующую на угольных предприятиях России, элементов обслуживания по фактическому состоянию, что в конечном итоге послужит сокращению числа непроизводительных простоев экскаваторного парка и позволит уменьшить количество аварий, вызванных недопустимым состоянием эксплуатируемых горных машин.

Relevance of the work. In this article, without claiming completeness of coverage, the results of calculations are presented using the proposed mathematical adaptive model and unified diagnostic criteria created from the results of a comprehensive analysis of the vibration parameters of the dynamic equipment of mining shovels, which allowed the authors of this work to approach the solution of the problem of creating a short- and medium-term forecast the technical condition of the equipment of electric mining excavators, without which it is impossible to improve the management of the mining equipment repair system at the modern technical level. On the example of one of the most common defects in the dynamic equipment of electric mining shovels, to test the developed software for predicting the technical condition of mining machines. Assess the reliability of the results of short-term forecasting obtained using the developed specialized software, and prove the effectiveness of the forecasts made for changes in the technical condition of the diagnosed mining equipment. When creating unified diagnostic criteria, the principles of optimal scalarization of data on the parameters of mechanical vibrations were used. For vibration analysis, a complex vibrodiagnostic approach was used, which included the results of spectral analysis, analysis of the run-out characteristic, kurtosis, and spectrum envelope analysis. In the framework of this research, the fundamental effectiveness of the original software developed on the basis of the proposed adaptive model and new unified diagnostic criteria, designed to predict the technical condition of mining machines, has been proved. The results obtained can be used to include maintenance elements according to the actual state into the current mining equipment repair management system operating at coal enterprises in Russia. As a result, all this will serve to reduce unproductive downtime of mining shovels and will reduce the number of accidents caused by the unacceptable state of operated mining machines.

Ключевые слова: *ВИБРОДИАГНОСТИКА, РАСЦЕНТРОВКА, ЕДИНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ, ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, КАРЬЕРНЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ.*
Key words: *VIBRATION ANALYSIS, MISALIGNMENT, A SINGLE DIAGNOSTIC CRITERION, ENERGY-MECHANICAL EQUIPMENT, MINING SHOVELS.*

Введение. Значительная часть из эксплуатируемых в Кузбассе электрических карьерных экскаваторов, подлежащих прохождению обязательной процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах (ЭПБ ТУ ОПО), находится сегодня в предельно допустимом, или даже в аварийном техническом состоянии, что оказывает прямое влияние на безопасность проводимых открытых горных работ и итоговую себестоимость добычи полезных ископаемых. Доля таких машин, по некоторым оценкам, может достигать до 10…20% от общего числа технических устройств, подлежащих ЭПБ ТУ ОПО [1].

В рамках выполнения совместного научного проекта администрации Кемеровской области и Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 20-48-420010 учеными ФИЦ УУХ СО РАН и ФГБОУ ВО КузГТУ был осуществлен анализ диагностической информации по параметрам механических колебаний, полученной на выборке из двадцати пяти карьерных экскаваторов типа ЭШ и ЭКГ, наблюдение за которой осуществлялось на протяжении трех лет. В результате удалось создать новые единые диагностические критерии (ЕДК), которые могут использоваться для диагностики и прогнозирования технического состояния самых разных элементов энерго-механического оборудования горных машин – от подшипников качения до зубчатых передач в составе редукторов различных типов и конструкций. Использование этих ЕДК в качестве параметров математической адаптивной модели открыло инновационный путь к решению проблемы адекватного средне- и краткосрочного прогнозирования процессов деградации фактического состояния горного оборудования.

Анализ исходных диагностических данных по параметрам вибрации позволил заключить, что широкое распространение на энерго-механическом оборудовании горных машин получили такие дефекты энерго-механического оборудования, как нарушение жесткости опорной системы, дефекты подшипников качения (включая ослабление посадки и нарушение режима смазки), повреждения зубчатых передач и соединительных муфт, а также дефекты электрической природы [1]. Из всех этих дефектов особо следует выделить такой высокоэнергетический процесс, как нарушение соосности валопроводов динамически работающих агрегатов, который влечет за собой появление и развитие множества других дефектов, способствуя быстрому выходу из строя подшипников и увеличивая общий уровень вибронагруженности агрегата [2…10].

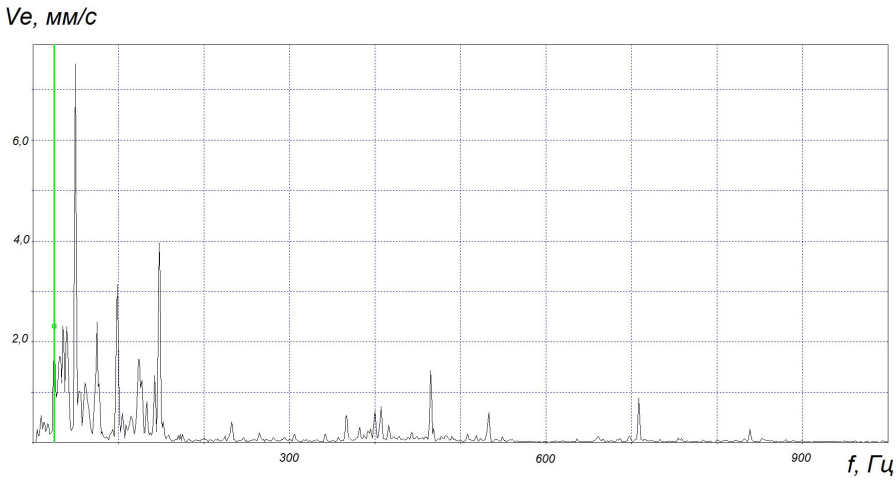

Рисунок 1. Базовый диагностический признак расцентровки валов на примере преобразовательного агрегата ЭКГ-5А
Figure 1. Basic diagnostic feature of shaft misalignment on the example of the ECG-5A converter unit

Признаки недостаточно качественно проведенной центровки присутствуют практически повсеместно, при желании их можно найти почти на каждом карьерном экскаваторе, отслужившем свой нормативный срок и подлежащем прохождению обязательной процедуры экспертизы промышленной безопасности. Ценность результатов выполненных работ по созданию комплекса ЕДК, используемых в качестве моделируемых параметров математической деградационной модели и разработанного программного обеспечения для прогнозирования процессов развития различных дефектов горного оборудования заключается в том, что внедрение на практике результатов прогнозирования позволит минимизировать количество ошибок в анализе данных и планировании логистики, появление которых связано с наличием человеческого фактора, а также оптимизировать трудозатраты на выполнение контроля параметров вибрации и обработку получаемых данных [1, 11].

Результаты и их применение. Научные результаты, полученные в рамках выполнения гранта Кемеровской области и РФФИ № 20-48-420010 [12], позволяют заключить, что наиболее надежным признаком, который можно эффективно использовать в качестве единого диагностического критерия для расцентровки валопродов агрегатов динамически работающего оборудования карьерных экскаваторов является вклад в общий уровень стандартного спектра по параметру виброскорости амплитуд гармоник оборотной (f_p) и удвоенной оборотной ($2f_p$) частот, для достоверного распознавания которых целесообразно использовать спектральные маски, полученные на основе статистической обработки результатов вибромониторинга. Собранный обширный статистический материал по параметрам вибрации энерго-механического оборудования электрических карьерных экскаваторов, позволил с высокой доверительной вероятностью (P≥0,95) обосновать оценки технического состояния электромеханического оборудования по параметрам механических колебаний, которые могут быть использованы для построения прогностических моделей исчерпания его ресурса [1].

В качестве примера на рисунке 1 приведен спектр генераторной группы экскаватора ЭКГ-5А, иллюстрирующий развитие ярко выраженной расцентровки валопровода преобразовательного агрегата. В данном конкретном случае нарушение технологии монтажа генератора напора привело к появлению несоосности валов электрических машин, а также к развитию еще ряда сопутствующих дефектов – ослаблению посадки и появлению множественных повреждений подшипника со стороны генератора подъема.

Для идентификации данной группы дефектов существует большое количество узкоспециализированных методов контроля вибрации, а также имеются представительные базы данных вибрации по однотипному оборудованию горной техники, работающему на постоянных частотах (в частности, для генераторных групп карьерных экскаваторов). Полученные в рамках выполнения комплексного анализа данных научные результаты были использованы при создании ЕДК для диагностики расцентровки, основу которого составили признаки из области спектрального анализа, обобщенные с использованием прин-

Таблица 1. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для расцентровки валов оборудования карьерных экскаваторов
Table 1. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for shaft alignment of equipment of quarry excavators

№ п/п	Место измерения			Результаты виброобследования		Результаты дефектовки	Комплексный критерий	Недостоверные результаты	Наработка, час
	Агрегат	Точка Направление	Частота вращения	*fp*	2**fp*				
1	Агрегат 1	3 Рад	750	1,23	3,23	Предельное	3,4562		2784
2		4 Рад	-	2,48	2,6	Норма	3,5931		3120
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	1,58	4,12	Предельное	4,4125		6821
4		3 Рад	-	2,47	1,97	Норма	3,1593		3792
5		4 Рад	-	1,15	2,45	Норма	2,7064		1776
6	Агрегат 4	2 Рад	1000	4,51	1,39	Предельное	4,7193		6918
7		3 Рад	-	3,47	15,87	Авария	16,2449	+	7312
8		4 Рад	-	1,15	2,41	Норма	2,6703		2112
9	Агрегат 6	2 Рад	750	4,12	2,14	Предельное	4,6426		7215
10		3 Рад	-	2,58	4,01	Предельное	4,7682		7050
11		4 Рад	-	2,17	3,78	Предельное	4,3585		6700
12	Агрегат 9	3 Рад	1000	3,23	2,12	Предельное	3,8635		5472
13		4 Рад	-	3,15	5,35	Авария	6,2084		7488
14	Агрегат 12	1 Рад	1000	2,18	3,11	Предельное	3,7979		5808
15		2 Рад	-	1,97	2,54	Норма	3,2144		3890
16		3 Рад	-	1,54	2,04	Норма	2,5561		1440
17		4 Рад	-	2,01	1,87	Норма	2,7453		2448
18	Агрегат 13	1 Рад	1000	2,01	2,59	Норма	3,2784		4258
19		2 Рад	-	3,18	1,1	Предельное	3,3648		5010
20		3 Рад	-	4,21	5,87	Авария	7,2236		7152

ципа «оптимальной» скаляризации, предложенного и развитого в трудах Герцбаха и ряда других авторов [6, 13…16].

Расчет параметров среднесрочного прогнозирования с использованием ЕДК для расцентровки.

В таблице 1 без претензий на полноту освещения приведены результаты измерений по 20 измерительным точкам агрегатов энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ. Также добавлены результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с разработанной Методикой создания адаптивной математической деградационной модели [1].

Как следует из анализа проведенных расчетов и графика (см. таблицу 1 и рисунок 2), на заданном интервале диагностирования (T=60 календарных дней) уровень АВАРИЯ не будет достигнут. Уровень $ЕДК_{АВАРИЯ—РАСЦЕНТРОВКА}$=6,71, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ - пессимистическая 5,28 и оптимистическая 8,15, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 8 928 часов ЕДК=6,32. Расчетная величина достоверности аппроксимации R^2=0.802. Вместе с тем, превышен уровень пессимистического прогноза аварийности (6,32 > 5,28). Рекомендовано сократить период диагностического обследования в 2 раза.

Расчет параметров краткосрочного прогнозирования с использованием ЕДК для расцентровки валов агрегатов. В соответствии с рекомендациями для данного типа оборудования с учетом специфики его эксплуатации принимаем S_{t-1}=3,86 и α=0,3 (α – параметр экспоненциального сглаживания, S_{t-1} – текущий результат измерений [1]). Принимаем в расчете краткосрочного прогнозирования (интервал прогнозирования T=30 календарных дней) адаптивную модель вида .$S_t = \alpha K_t + \beta S_{t-1}$. Тогда краткосрочный прогноз в соответствии с принятой моделью в момент

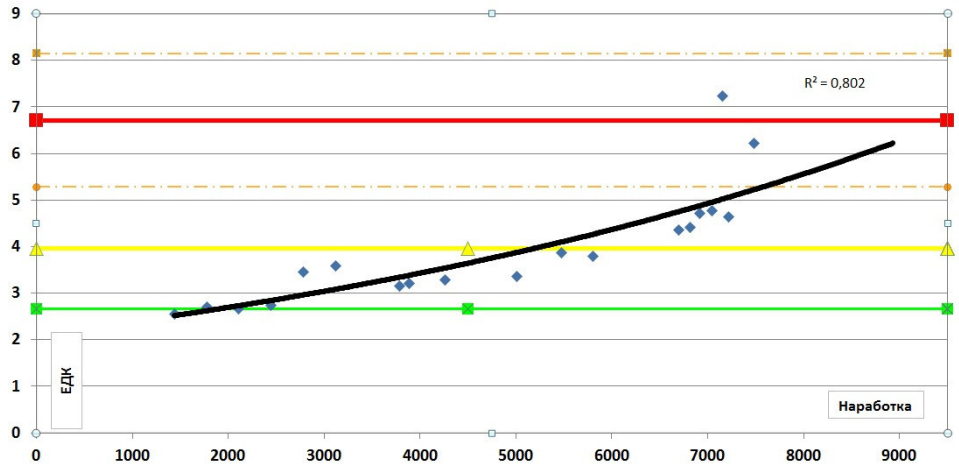

Рисунок 2. Обобщение результатов расчета ЕДК для расцентровки валов энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки
Figure 2. Generalization of the results of the calculation of the EDC for the alignment of shafts of power-mechanical equipment of quarry excavators and the construction of a medium-term forecast depending on the operating time

наработки t=5 808 час (комплексный критерий равен 3,80, см. таблицу 1) на один период диагностирования равен S_t=0,3*3,80+0,7*3,86= 3,84 <6,71 следовательно, на рассматриваемом диагностическом интервале по критерию расцентровки валов уровень АВАРИЯ достигнут не будет. Рекомендуется продолжить эксплуатацию агрегата с соблюдением режимных параметров.

В настоящий момент авторами данной работы подготовлена заявка на получение свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных (см. пример листинга на рисунке 3), а также оформляются документы на патентование предложенного способа неразрушающего контроля с применением разработанных единых диагностических критериев.

Результаты апробации прогнозной модели получены на диагностических данных, содержащих информацию по параметрам вибрации энерго-механического оборудования более чем двадцати пяти электрических карьерных экскаваторов, они подтвердили эффективность предложенной методологии прогнозирования с использованием принципа адаптивного моделирования величин единых диагностических критериев. Корректность работы программного обеспечения, созданного для прогнозирования

Таблица БД: SD_ECG

	station	unit	point	ve_skz	fp	2fp	3fp	4fp	5fp	operating_time
1	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	1В	1,57	0,24	0,38	0,75	0,4	0,32	9500
2	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	1Г	4,28	3,55	1,76	0,42	1,03	0,29	9500
3	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	1О	2,93	0,73	1,65	1,15	1,52	0,55	9500
4	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	2В	1,76	0,53	0,32	1,01	0,24	0,15	9500
5	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	2Г	3,41	2,16	1,77	1,51	0,6	0,31	9500
6	ЭКГ 5А № 10182	сетевой двигатель	2О	2,64	0,69	1,38	1,25	1,17	0,66	9500
7	ЭКГ 5А № 10502	сетевой двигатель	1В	1,43	0,53	0,84	0,57	0,11	0,4	10220
8	ЭКГ 5А № 10502	сетевой двигатель	1Г	3,13	1,47	2,23	0,95	0,25	0,09	10220
9	ЭКГ 5А № 10502	сетевой двигатель	1О	2,12	0,68	1,7	0,4	0,25	0,18	10220
10	ЭКГ 5А № 10502	сетевой двигатель	2В	1,13	0,25	0,64	0,53	0,07	0,41	10220
11	ЭКГ 5А № 10502	сетевой двигатель	2Г	4,66	2,03	3,49	1,7	0,32	0,19	10220
12	ЭКГ 5А № 10482	сетевой двигатель	1В	1,14	0,34	0,58	0,41	0,16	0,09	10940
13	ЭКГ 5А № 10482	сетевой двигатель	1Г	1,93	1,36	0,74	0,54	0,48	0,25	10940
14	ЭКГ 5А № 10482	сетевой двигатель	1О	1,54	0,61	0,48	0,27	0,32	0,27	10940

Рисунок 3. Скриншот фрагмента базы данных, содержащей информацию по единым диагностическим критерием для диагностики всех базовых групп дефектов энерго-механического оборудования горных машин
Figure 3. Screenshot of a fragment of a database containing information on a single diagnostic criterion for the diagnosis of all basic groups of defects in energy-mechanical equipment of mining machines

технического состояния объектов контроля, подтверждается результатами визуально-измерительного контроля, полученными в ходе текущих ремонтов карьерных экскаваторов.

Выводы. Результаты краткосрочного прогнозирования доказали принципиальную эффективность использования новых единых диагностических критериев в качестве параметров адаптивной деградационной математической модели. Данные анализа и полученный на их основе прогноз полностью подтверждаются результатами контроля, полученными при проведении годового ремонта экскаватора. Правильность сделанных выводов и рекомендаций о проведении виброналадки преобразовательного агрегата подтверждают корректность предложенного для разработки ЕДК набора диагностических признаков, а также в целом всей методологии создания единых критериев, основанной на принципе «оптимальной» скаляризации с учетом использования перехода от используемых многомерных векторов различных диагностических данных в скалярные величины единых критериев, основы которой заложены в трудах отечественных и зарубежных авторов [3, 6, 13].

Заключение. Полученные научные результаты свидетельствуют о том, что новые единые диагностические критерии, разработанные на основе результатов комплексного анализа параметров вибрации, могут быть использованы для оценки фактического состояния динамически работающего оборудования горных машин, а также применяться для решения задач, связанных с построением кратко- и среднесрочных прогнозов процессов деградации технического состояния эксплуатируемой горной техники.

Кроме того, использование данных критериев при осуществлении краткосрочного моделирования процессов деградации фактического состояния горных машин позволит внедрить на угольных предприятиях Кузбасса некоторые элементы системы обслуживания техники по её фактическому состоянию, что откроет дополнительные возможности для осуществления качественного перехода от действующих сегодня схем проведения плановых ремонтов и повышения уровня безопасности при проведении открытых горных работ.

Дальнейшее совершенствование разработанного программного обеспечения откроет инновационные возможности для внедрения на угольных предприятиях Кузбасса элементов системы обслуживания горной техники на основе анализа её фактического состояния, что позволит провести оптимизацию логистики и складского хозяйства эксплуатирующих предприятий, снизить количество аварий, а также уменьшить итоговую себестоимость добычи полезных ископаемых.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогнозирование ресурса горного оборудования с использованием единого диагностического критерия его технического состояния /Б.Л. Герике, П.Б. Герике //Техника и технология горного дела, № 3. –Кемерово. – 2022. – С. 4-22.
2. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5084528
3. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
4. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
5. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
6. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 263 с.
7. 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
8. 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.
9. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
10. 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.
11. P B Gerike and P V Eshcherkin 2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 823 (2021) 012014. Developing the methodology on creating unified criterion for diagnosing the mining machinery equipment defects. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/823/1/012014
12. Исследование процессов формирования и распространения виброакустических волн для создания единых диагностических критериев оценки технического состояния горных машин. НИР: грант №20-48-420010. РФФИ. 2020
13. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
14. 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.
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
16. Герике П.Б. Высокочастотные грохота как объект диагностики по параметрам механических колебаний. Вестник Кузбасского государственного технического университета, №1. – Кемерово. – 2017 – С. 59-67.

REFERENCES

1. Forecasting the resource of mining equipment using a single diagnostic criterion of its technical condition / B.L. Gericke, P.B. Gericke //Mining Engineering and Technology, No. 3. –Kemerovo. – 2022. – pp. 4-22
2. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5084528
3. Goldin A. S. Vibration of rotary machines. – M.: Mashinostroenie, 1999. – 344 p.
4. Non-destructive testing. Handbook in 7 volumes edited by chl.-correspondent. RAS V.V. Klyueva, vol.7 – Moscow, 2005. – 828 p.
5. Lukyanov A.V. Classifier of vibration diagnostic signs of defects of rotary machines. / Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 1999. – 230 p.
6. Herzbach I. Theory of reliability with applications to preventive maintenance: Monograph / Edited by V.V. Rykov; translated from the English by M.G. Sukharev. M.: GUP Publishing House "Oil and Gas" Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2003. – 263 p.
7. 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
8. 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.
9. Krakovsky, Yu. M. Mathematical and software tools for assessing the technical condition of equipment. / Novosibirsk: Nauka, 2006. – 227 p.
10. Barkov A.V. Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis. Study guide. / Barkov A.V., Barkova N.A. / SPbGMTU Publishing House. St. Petersburg, 2004. — 156 p.
11. P B Gerike and P V Eshcherkin 2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 823 (2021) 012014. Developing the methodology on creating unified criterion for diagnosing the mining machinery equipment defects. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/823/1/012014
12. Investigation of the processes of formation and propagation of vibroacoustic waves to create unified diagnostic criteria for assessing the technical condition of mining machines. Research and development: Grant No. 20-48-420010. RFBR. 2020
13. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
14. 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
15. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
16. Gericke P.B. High-frequency screens as an object of diagnostics according to the parameters of mechanical vibrations. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, No. 1. – Kemerovo. – 2017 – pp. 59-67.