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

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ
SOME RESULTS OF MINING SHOVELS' TECHNICAL CONDITION FORECASTING

В данной статье приводятся некоторые научные результаты, полученные при осуществлении прогнозирования процессов развития дефектов на оборудовании карьерных экскаваторов с использованием единых диагностических критериев оценки технического состояния сложных механических систем, основанных на анализе параметров вибрации энерго-механического оборудования горных машин. Осуществить практическую оценку результатов прогнозного моделирования процессов деградации технического состояния оборудования горных машин, выполненного с использованием адаптивной модели и единых диагностических критериев. В работе использовался комплексный подход к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования горных машин, включая результаты спектрального анализа данных в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ эксцесса и огибающей спектра. Полученные в рамках выполнения настоящей работы научные результаты доказывают эффективность предложенного подхода к адаптивному математическому моделированию процессов деградации технического состояния сложных механических систем при использовании в качестве моделируемых параметров величин новых единых диагностических критериев, основанных на комплексном анализе параметров вибрации.

This article presents some scientific results obtained when forecasting the defect development processes on the equipment of mining shovels, together with the use of unified diagnostic criteria for assessing the technical condition of complex mechanical systems based on the vibration analysis parameters of mining machines' power-mechanical equipment. The purpose of the work is to carry out a practical assessment of predictive modeling performed results using an adaptive model and a selected set of common diagnostic criteria. Research methods: An integrated approach was used to analyze the parameters of vibration generated during the operation of mining machine power-mechanical equipment, including the results of data spectral analysis in an extended frequency and dynamic range, analysis of kurtosis and spectrum envelope. The scientific results obtained within the framework of this work prove the effectiveness of the proposed approach to adaptive mathematical modeling of complex mechanical system technical condition degradation processes when using

the values of new unified diagnostic criteria as the modeled parameters.

Ключевые слова: *ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИБРОДИАГНОСТИКА, ДЕГРАДАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, КАРЬЕРНЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ, ЕДИНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ, ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.*
Key words: *FORECASTING MODELING, VIBRATION ANALYSIS, TECHNICAL CONDITION DEGRADATION, MINING SHOVELS, A UNIFIED DIAGNOSTIC CRITERION, MINING EQUIPMENT.*

Введение. На сегодняшний день в области контроля систем управления техническим состоянием сложного технологического оборудования по параметрам вибрации отсутствует универсальная прогнозная математическая модель, предназначенная для прогнозирования процессов развития дефектов широкого спектра энерго-механического оборудования горной техники. Этот факт объясняется рядом причин, среди которых недостаточная степень изученности вопросов динамики горных машин и ограниченный объем диагностической информации по параметрам вибрации для широкого типового и модельного ряда горного оборудования, а также сложности, возникающие при интерпретации экспериментальных данных контроля вибрации [1…7]. Так, например, большинство исследователей ограничиваются использованием в качестве параметров математических моделей для прогнозирования развития дефектов простыми диагностическими параметрами, используя для этой цели общий уровень вибрации по параметру виброскорости в стандартном частотном и динамическом диапазоне или огибающую спектра в узкой частотной полосе, в которой потенциально могут быть обнаружены диагностические признаки наличия искомых дефектов.

Большинство математических моделей, предназначенных для прогнозирования деградационных процессов, имеют крайне узкую область применения, обычно ограниченную однотипными конструктивными элементами (например, подшипники вращателя буровой установки [8]) или рассчитаны на выполнение оценки рисков развития только лишь какой-то одной группы дефектов энерго-механического оборудования.

Решению задачи прогностического моделирования процессов деградации сложных механических систем на основе результатов анализа параметров вибрации посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов [1…4, 8…11]. Однако до сих пор отсутствует универсальная деградационная модель, при помощи которой можно было бы промоделировать процессы развития всей совокупности основных повреждений энерго-механического оборудования горных машин. Пороги общих уровней вибрации для энерго-механического оборудования горной техники регламентируются руководящими документами Ростехнадзора, для ряда технических устройств с учетом специфики их конструкции разработаны спектральные маски, однако спрогнозировать момент аварии, даже в краткосрочной перспективе, достаточно затруднительно или даже невозможно из-за ограниченности применяемых диагностических критериев и прогнозных моделей [12]. В таких условиях переход на систему обслуживания горной техники по ее фактическому техническому состоянию в данный момент невозможен. Именно поэтому поиск новых подходов к построению прогнозов с использованием единых диагностических критериев (ЕДК) оценки вибрации является актуальной научной задачей, ее решение позволит отказаться от использования сочетания норм системы планово-предупредительных ремонтов и аварийного обслуживания техники, нередко встречающегося на предприятиях угольной промышлености России.

Новые единые диагностические критерии были созданы с использованием разработанной методологии сбора и анализа диагностических данных по параметрам вибрации с учетом специфики конструкции карьерных экскаваторов и условий их эксплуатации (низкие температуры, запыленность, затрудненный доступ к точкам измерения и т.п.). Проведенная формализация совокупности диагностических признаков в области анализа параметров вибрации оборудования горной техники позволила создать ЕДК для выявления всех базовых дефектов энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, включая дефекты подшипников качения, соединительных муфт, поршневых компрессоров, дефекты электрической природы, неуравновешенность вращающихся деталей, расцентровку валов, нарушение жесткости системы и дефекты зубчатых передач [1, 12]. Задачей настоящего исследования являлась разработка кратко- и среднесрочного прогноза процессов деградации технического состояния оборудования одноков-

шовых карьерных экскаваторов с применением новых единых диагностических критериев, для чего необходимо было определить предельные критические значения новых ЕДК и осуществить их нормирование.

Результаты и их применение.

Объектом настоящего исследования стала выборка из двадцати пяти экскаваторов типа механическая лопата и драглайн, сбор диагностической информации проводился на протяжении шести лет. При проведении первичного анализа диагностических данных использовался комплексный диагностический подход к анализу параметров вибрации, в том числе спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, эксцесс и анализ огибающей спектра. Обоснование применению результатов комплексного анализа параметров вибрации горных машин и выбор конкретных диагностических методологий даны в работах [1, 12], данное сочетание методов было принято оптимальным для создания единых диагностических критериев оценки технического состояния оборудования карьерных экскаваторов.

На основе анализа диагностических данных по параметрам вибрации, полученных в рамках выполнения настоящей работы, была осуществлена группировка всех базовых дефектов энерго-механического оборудования горных машин в зависимости от типа дефекта, степени его развития и опасности для устойчивой работы агрегата. Результаты анализа большого объема клиппированных диагностических данных с применением формализованных правил и признаков выявления дефектов в области анализа вибрации позволили создать новые критерии, основанные на принципе «оптимальной» скаляризации результатов эксперимента. С помощью реализованной методологии клиппирования были протестированы исходные диагностические данные на предмет исключения из расчетов результатов априори некорректных замеров вибрации (искажение сигнала может быть вызвано использованием неверно выбранных измерительных точек, неподготовленной поверхностью агрегата, ошибками при установке датчиков, наличием резко отрицательной температуры или её резких перепадов в месте проведения измерений, повреждением соединений в системе «датчик-кабель-прибор», погрешностью математической обработки сигнала и т.д.), а также для исключения все составляющие сигнала иной природы по сравнению с рассматриваемой (так, например, при клиппировании сигналов для разработки ЕДК нарушения жесткости из источника убирались все составляющие, вызванные влиянием других повреждений – дефектами подшипников, соединительных муфт, неуравновешенностью и другими причинами) [1]. Всего в рамках настоящего исследования было разработано восемь ЕДК по числу базовых групп дефектов горного оборудования, причем для создания каждого из новых критериев применялся свой комплекс диагностических признаков и правил выявления дефектов, позволяющий с наибольшей достоверностью определить фактическое состояние объекта исследований [12].

В качестве примера, иллюстрирующего выполнение кратко- и среднесрочного прогнозирования процесса деградации фактического состояния технических устройств, в настоящей работе рассматривается реализация полученных результатов при моделировании величин ЕДК для нарушения жесткости системы. Основной диагностический признак наличия данного дефекта находится в области спектрального анализа (см. рисунок 1).

В качестве базовых диагностических па-

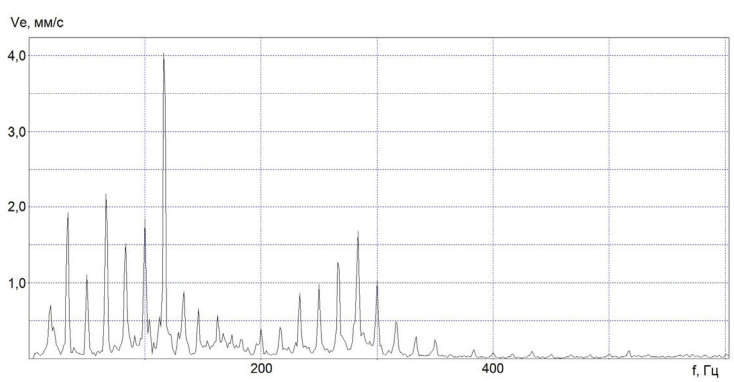

Рисунок 1. Ярко развитое нарушение жесткости системы на генераторе поворота ЭШ 10/70
Figure 1. A vividly developed the system rigidity disturbance on the ESh 10/70 swing generator

раметров, использованных при разработке ЕДК для нарушения жесткости, были выбраны: общий вклад спектральных составляющих гармонического ряда оборотной частоты $n{\cdot}f_R$, вклад в спектр ряда модуляционных боковых гармоник вида $X{=}k{\cdot}f_R{\pm}n{\cdot}f_m$, общий уровень спектра огибающей в частотной области предполагаемого дефекта, а также уровень флуктуации шумовой компоненты спектров виброскорости в стандартном частотном диапазоне.

В таблице 1 в качестве примера, иллюстрирующего работу прогнозной деградационной модели, приведены результаты замеров вибрации по 32 измерительным точкам энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов типа ЭШ 10/70, ЭКГ-5А, ЭКГ-8И. Здесь же приведены результаты расчетов ЕДК для данного оборудования и результаты оценки достоверности полученных данных в соответствии с методикой разработки адаптивной математической модели для осуществления кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния энерго-механического оборудования горных машин [12].

Построение среднесрочного прогноза подразумевало осуществление моделирования деградационных процессов на два интервала диагностики, т.е. около шестидесяти календарных дней. Так как рассматриваемый ряд данных представляет собой непериодический тренд, то следующей задачей прогнозирования было отыскание аналитической зависимости, которая наиболее точно описывала бы детерминированную составляющую временного ряда экспериментально полученных вибрационных характеристик. На практике для этого использовался метод наименьших квадратов, который основывается на допущении о том, что результаты измерения нормально распределены относительно своего математического ожидания. В том случае, когда закон распределения диагностического параметра отличается от принятого нормального, целесообразно применять другие формы законов распределения. Если абсолютные значения различных параметров вибрации на стадии зарождения дефектов оборудования растут экспоненциально, искомый тренд диагностического параметра будет иметь линейный вид

Таблица 1. Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для нарушения жесткости системы

Table 1. Results of vibration diagnostics and calculation of complex criteria for violation of system rigidity

№ п/п	Место измерения				Результаты виброобследования				Результаты дефектовки	Комплексный критерий	Недостоверные результаты
	Агрегат		Точка Направление	Частота вращ., Гц	Общий вклад $n{*}f_R$	Мощность $X{=}k{\cdot}f_R{\pm}n{\cdot}f_m$	Спектр огибающей	Шум			
1	ЭШ 10/70	Генератор подъема	1 Рад	16,25	9,81	6,12	115,46	2,51	***Авария***	**116,0646**	+
2			2 Рад	16,25	12,57	8,02	81,21	3,14	***Авария***	**82,62717**	
3		СД	1 Рад	16,25	4,05	2,01	15,69	1,23	Норма	16,37472	
4			2 Рад	16,25	2,89	2,67	21,53	1,98	Норма	21,97595	
5		Генератор тяги	1 Рад	16,25	5,25	1,5	14,01	0,69	Норма	15,0522	
6			2 Рад	16,25	3,15	0,87	12,98	0,54	Норма	13,39595	
7		Генератор поворота	1 Рад	16,25	2,92	0,23	11,5	1,12	Норма	11,91989	
8			2 Рад	16,25	4,21	1,15	8,43	0,97	Норма	9,542138	
9	ЭКГ-5А	Генератор напора	1 Рад	25	7,06	4,23	21,32	1,32	Норма	22,89151	
10			2 Рад	25	5,12	3,01	19,44	1,23	Норма	20,36421	
11		Генератор подъема	1 Рад	25	4,18	1,97	12,69	0,91	Норма	13,53579	
12			2 Рад	25	9,03	6,97	18,43	1,68	Предельное	21,73957	
13		СД	1 Рад	25	6,32	3,18	9,32	0,58	Норма	11,71553	
14			2 Рад	25	6,15	2,91	7,18	1,23	Норма	9,967743	
15		Генератор поворота	1 Рад	25	15,97	12,4	69,42	4,15	***Авария***	**72,42348**	
16			2 Рад	25	11,93	8,52	64,78	3,81	***Авария***	**66,52729**	
17	ЭШ 11/70	Генератор подъема	1 Рад	16,25	6,23	4,12	15,96	1,13	Норма	17,65746	
18			2 Рад	16,25	7,11	3,22	22,3	1,16	Норма	23,65494	
19		СД	1 Рад	16,25	12,94	8,01	81,67	2,97	***Авария***	**83,1289**	
20			2 Рад	16,25	9,06	6,9	29,31	2,01	Предельное	31,50888	
21		Генератор тяги	1 Рад	16,25	6,87	3,12	21,06	1,15	Норма	22,40039	
22			2 Рад	16,25	4,12	3,08	15,14	1,08	Норма	16,02644	
23		Генератор поворота	1 Рад	16,25	5,39	0,18	7,32	0,32	Норма	9,097763	
24			2 Рад	16,25	4,82	0,42	9,15	0,19	Норма	10,35217	
25	ЭКГ-8И	Генератор подъема	1 Рад	16,25	9,01	5,92	23,69	1,58	Предельное	26,07564	
26			2 Рад	16,25	6,81	3,12	15,4	0,42	Норма	17,13029	
27		СД	1 Рад	16,25	6,23	3,8	12,87	0,4	Норма	14,80033	
28			2 Рад	16,25	7,11	2,54	9,63	0,39	Норма	12,24307	
29		Генератор поворота	1 Рад	16,25	4,54	1,98	8,47	0,28	Норма	9,81587	
30			2 Рад	16,25	5,37	3,01	12,15	0,5	Норма	13,62973	
31		Генератор напора	1 Рад	16,25	2,18	0,98	6,71	0,11	Норма	7,123833	+
32			2 Рад	16,25	3,02	0,15	5,12	0,08	Норма	5,946739	+

[13, 14]. Данная математическая модель позволяет рассчитать величину средней скорости деградации диагностируемой системы и сроки достижения её предельного состояния, в отличие от других моделей, зачастую имеющих неудовлетворительные экстраполяционные свойства. Предельное техническое состояние оборудования горных машин определялось в рамках настоящего исследования с использованием анализа диагностических данных, описывающих фактическое техническое состояния объектов диагностирования, что позволило свести задачу по прогнозированию процессов изменения фактического технического состояния сложной механической системы к экстраполяции найденного полезного диагностического тренда и поиску времени его пересечения с линией, описывающей предельное состояние обследуемого технического устройства, при этом для успешного решения задачи прогнозирования достаточно было определить зависимость погрешности результатов прогнозирования от количества диагностических измерений и минимальный объем измерительных данных, необходимых для осуществления адекватного прогноза.

На основании проведенных исследований для решения задачи прогнозирования процессов деградации фактического состояния энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов адаптивными методами были определены значения параметра адаптивного сглаживания модели α, зависящего от конструктивных и кинематических особенностей обследуемых агрегатов и режимов их эксплуатации с учетом специфики действующей на угольных предприятиях системы планово-предупредительных ремонтов.

Результаты моделирования доказали эффективность использования предложенного набора единых диагностических критериев для построения прогноза деградации фактического состояния оборудования горных машин, что подтверждается результатами визуально-измерительного контроля, выполненного в рамках проведения годового ремонта диагностируемого оборудования.

Для всех новых единых критериев на основании анализа статистической информации были определены границы предельного состояния и осуществлено их нормирование.

Как следует из анализа проведенных расчетов (см. пример на рисунке 2), на заданном интервале диагностирования (T=60 календарных дней) уровень аварийности **будет превышен**. При этом величина предельного значения для данного типа дефекта **ЕДК$_{АВАРИЯ_ЖЕСТКОСТЬ}$=73,86**, доверительные границы для прогноза уровня АВАРИЯ - пессимистическая 60,14 и оптимистическая 87,58, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 9 288 часов расчетный уровень ЕДК=75,94. Величина достоверности аппроксимации R^2=0.8879. Рекомендовано провести ревизию диагностируемого оборудования и восстановить жесткость системы.

Выводы. Таким образом, результаты прогнозного моделирования, полученные в рамках выполнения настоящей работы, позволили получить ответ на один из наиболее актуальных для системы планово-предупредительных ремонтов горного оборудования вопросов, а именно: сможет ли обследуемое техническое устройство без аварий проработать до момента проведения ближайшего обслуживания или ремонта.

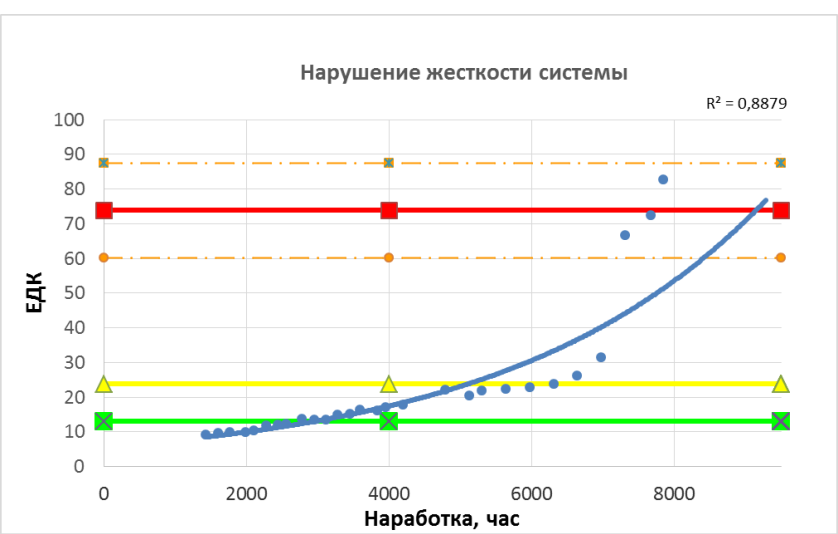

Рисунок 2. Результаты среднесрочного прогнозирования величин ЕДК для нарушения жесткости системы
Figure 2. Results of medium-term forecasting of UDC values for system rigidity violation

Именно такой ответ и дают результаты кратко- и среднесрочного прогнозирования, полученные при использовании единых диагностических критериев в качестве параметров адаптивной математической модели. Реализация алгоритма адаптивной краткосрочной прогнозной модели позволила дать оценку деградационным процессам на энерго-механическом оборудовании горных машин, корректируя на основе результатов наиболее актуальных измерений параметры математической модели и адаптируя её к изменению поступающей извне новой диагностической информации.

Оригинальность предлагаемой модели, которая отличает её от большого количества похожих алгоритмов, заключается в реализации комплексного подхода к диагностике по параметрам механических колебаний и использовании в качестве моделируемых параметров новых единых диагностических критериев. Результаты моделирования с использованием данной модели позволяют получить прогноз не только для единичного узла или агрегата, но и для всей сложной механической системы в целом, например, для карьерного экскаватора или бурового станка, оценивая динамику изменения новых критериев, разработанных для каждой отдельной группы дефектов и реализованных при помощи алгоритмов скаляризации в условиях многомерного пространства диагностических признаков [15].

Разработанная адаптивная математическая модель позволяет осуществлять кратко- и среднесрочное прогнозирование процессов изменения технического состояния горных машин с учетом анализа вибрационной нагруженности на период до двух календарных месяцев, результаты прогнозирования были протестированы на реальном технологическом оборудовании при проведении годового ремонта с применением средств визуально-измерительного контроля, результаты которого полностью подтвердили состоятельность сделанных выводов и рекомендаций.

Заключение.

Научные результаты, полученные в рамках выполнения настоящей работы, позволили доказать эффективность предложенной методологии создания адаптивной прогнозной модели для построения кратко- и среднесрочного прогноза процесса деградации фактического технического состояния горных машин и оборудования. Использование в качестве моделируемых параметров разработанных единых диагностических критериев, основанных на принципе комплексного подхода к диагностированию оборудования по параметрам вибрации, является необходимым элементом системы облуживания горных машин по их фактическому техническому состоянию, внедрение которой приведет к снижению аварийности на открытых горных работах, а также позволит оптимизировать логистику и складское хозяйство предприятий угольной и горнорудной промышленности России. Разработанная прогнозная модель обладает высокой степенью адаптивности и может использоваться в качестве базового элемента платформы системы управления ремонтами горной техники по результатам оценки ее фактического состояния. Применение в качестве параметров математической модели единых диагностических критериев, основанных на результатах анализа вибрации, обуславливает ее универсальность, т.к. предоставляет возможность осуществлять прогноз процессов деградации фактического состояния различных по конструкции узлов и агрегатов горной техники. Использование результатов автоматизированного кратко- и среднесрочного прогнозирования на основе моделирования величин единых диагностических критериев, реализованного в разработанном программном обеспечении для прогнозирования безаварийной эксплуатации горных машин, позволит обеспечить сокращение числа аварий на карьерных экскаваторах, вызванных недопустимым техническим состоянием эксплуатируемой горной техники, а также приведет к минимизации количества ошибок при анализе диагностических данных и снижению убытков промышленных предприятий, связанных с простоями сложной и дорогостоящей техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка математической деградационной модели для оборудования карьерных экскаваторов /П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №2. – Кемерово. – 2022. С. 71-78.
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. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005.

– 828 с.
4. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. V.126,. Pp. 662-685. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. https://doi.org/10.1115/1.1379745
6. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
7. Основы диагностики технических устройств и сооружений. / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 445 с.
8. Ещеркин П.В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово – 2012 год. – 18 с.
9. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018, Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC 2016. Pp. 668-672. https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179
11. 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. https://doi.org/10.1115/1.2976803
12. Применение единых критериев для диагностики компрессоров электрических экскаваторов /П.Б. Герике, Б.Л. Герике// Горное оборудование и электромеханика, № 3. – Кемерово. – 2022. – С. 13-22.
13. Huňady, R., Pavelka, P., Lengvarský, P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol.121, Pp. 201-214. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024
14. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford, 1977.
15. Поиск параметров для универсальной прогнозной математической модели на основе анализа вибрации оборудования горных машин /П. Б. Герике, Б. Л. Герике, П. В. Ещеркин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №3. – Кемерово. – 2022. С. 60-69.

REFERENCES

1. Gerike, P.B., & Gerike, B.L. (2022). Development of a mathematical degradation model for mining excavator equipment. Kemerovo: Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 2, 71-78 [in Russian].
2. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. (2018). Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 https://doi.org/10.1063/1.5084528 [in English].
3. Kliuev, V.V. (Eds.). (2005). Unbrakable control. Handbook in 7 volumes.Moscow: [in Russian].
4. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. (2019). Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. Mechanical Systems and Signal Processing. V.126,. Pp. 662-685. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051 [in English].
5. Tse P., Peng Y., Yam R. (2001). Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. Vol. 123. Pp 303-310. https://doi.org/10.1115/1.1379745 [in English].
6. Krakovsky, Yu.M. (2006). Matematicheskiye i programmnyye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software tools for assessing the equipment technical condition]. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
7. Bigus, G.A., Daniev, Yu.F., Bystrova, N.A., & Galkin, D.I. (2015). Technical devices and structures' diagnostics fundamentals. Moscow: N.E. Bauman MGTU Publishing House [in Russian].
8. Yeshcherkin, P.V. (2012). Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskikh burovykh Stankov [Development of a method for diagnosing and forecasting the technical condition of diesel-hydraulic drilling rigs]. Extended abstract of candidate's thesis. Kemerovo [in Russian].
9. Puchalski A., Komorska I. (2018). Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9 [in English].
10. Schreiber, R. (2016). Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC Pp. 668-672. https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179 [in English].
11. Liu G., Parker R. (2008). Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. https://doi.org/10.1115/1.2976803 [in English].
12. Gerike, P.B., & Gerike, B.L. (2022). Application of unified criteria for diagnostics of electric excavator compressors. Kemerovo: Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika - Mining equipment and electromechanics,3, 13-22 [in Russian].
13. Huňady, R., Pavelka, P., Lengvarský, P. (2019). Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.121, Pp. 201-214. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024 [in Russian].
14. Gertsbakh I. (1977). Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford [in English].
15. Gerike, P.B., Gerike, B.L. & Yeshcherkin, P.V. (2022). Search for parameters for a universal forecasting mathematical model based on the analysis of mining machine equipment vibration. Kemerovo: Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 3, 60-69 [in Russian].