

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-57-67

Герике Павел Борисович¹, Герике Борис Людвигович^{1,2}, Телегуз Александр Сергеевич¹¹ Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*E-mail: am_besten@mail.ru

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЕГРАДАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация.

В работе представлена технология для разработки глубоководных **Актуальность работы.** В настоящей работе приведены некоторые результаты расчетов с использованием новых единых диагностических критериев оценки технического состояния оборудования горных машин по параметрам вибрации, что позволило приступить к решению задачи кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов деградации технического состояния объектов диагностирования, а также создать на основе реализации предложенной адаптивной математической модели программное обеспечение для осуществления автоматизированного прогнозирования процессов развития дефектов и изменения фактического состояния энерго-механического оборудования горной техники.

Цель работы: Доказать эффективность созданного программного обеспечения для получения в автоматизированном режиме с использованием новых единых диагностических критериев результатов кратко- и среднесрочного прогнозирования технического состояния карьерных экскаваторов. На примере подшипников качения, используемых в конструкции энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, провести апробацию разработанного программного обеспечения для получения прогноза деградации технического состояния горных машин, созданного на основе адаптивной математической модели и новых единых диагностических критериев. Провести оценку достоверности результатов прогнозирования, полученных при использовании разработанного программного обеспечения, а также предложить направление для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний применительно к решению задачи по осуществлению среднесрочного прогноза возникновения аварийных отказов горной техники.

Методы исследования: Для выполнения анализа вибрации использовался комплексный подход к диагностике, включающий результаты спектрального анализа в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ характеристики выбега, эксцесс и анализ огибающей спектра. Для моделирования процессов деградации сложных механических систем была реализована адаптивная математическая модель, использующая в качестве моделируемых параметров новые единые диагностические критерии, при разработке которых применялись принципы оптимальной скаляризации результатов эксперимента.

Результаты: Полученные в рамках выполнения настоящей работы научные результаты доказывают эффективность разработанного программного обеспечения для прогнозирования технического состояния горных машин, созданного с использованием предложенной адаптивной модели и новых единых диагностических критериев. Реализация на практике полученных результатов позволит модернизировать действующую на угольных предприятиях систему управления ремонтами горной техники, что приве-



Информация о статье

Поступила:

16 марта 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

18 апреля 2023 г.

Принята к печати:

27 апреля 2023 г.

Опубликована:

17 мая 2023 г.

Ключевые слова:

вибродиагностика, прогнозное моделирование, программное обеспечение диагностики, дефекты горного оборудования, управление техническим обслуживанием, прогноз деградации.

дет к оптимизации затрат на ремонты и логистику, а также позволит уменьшить количество несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием эксплуатируемого горного оборудования. 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).

Для цитирования: Герике П.Б., Герике Б.Л., Телегуз А.С. Оценка параметров деградации технического состояния горных машин с использованием разработанного программного обеспечения // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 57-67. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-57-67, EDN: FPKYNT

Введение. В области контроля технического состояния сложных механических систем по параметрам генерируемой при их работе вибрации на сегодняшний день отсутствует универсальная деградационная модель, использование которой на практике позволило бы получить достоверные результаты прогнозирования процессов изменения технического состояния для всех основных узлов и агрегатов горной техники. Большинство существующих моделей позволяют строить прогноз только для какого-либо единичного элемента конструкции (например, для подшипника сетевой группы), обладая, таким образом, крайне узкой областью применения, что исключает возможность оценки и прогнозирования технического состояния всей сложной механической системы в целом, включая все элементы энерго-механического оборудования горных машин. Кроме того, к существенным недостаткам большинства существующих математических моделей деградации технического состояния технических устройств можно отнести низкий уровень апробации полученных данных и ограниченность применения результатов моделирования [1, 2, 3].

Причины отсутствия на рынке диагностического программного обеспечения адекватной деградационной модели для прогнозирования технического состояния горного оборудования заключаются в проблематике изучения вопросов динамики горных машин и дополнительных сложностях, возникающих при интерпретации вибрационных характеристик некоторых типов дефектов, например, зубчатых передач планетарного и переборного типов в составе редукторов, используемых в конструкции электрических одноковшовых карьерных экскаваторов [2]. При том, что границы допустимого состояния по параметрам вибрации для данного энерго-механического оборудования регламентируются действующей межотраслевой нормативной документацией, а также руководящими документами Ростехнадзора, получить достоверный прогноз деградации технического состояния горных машин бывает крайне затруднительно из-за низкого уровня проработки реализуемых прогнозных моделей и использования несовершенных критериев предельного состояния.

Так, например, в настоящее время в мире проводится мало исследований в области изучения вибрационной активности редукторов горных машин и оборудования, что связано с уникальностью эксплуатационных условий для каждого конкретного эксперимента. Серьезные отечественные и зарубежные фирмы-производители диагностического оборудования и программного обеспечения вынуждены отказываться от разработки специализированных программных комплексов, т.к. на них отсутствует спрос у эксплуатирующих горное оборудование угольных и горнорудных компаний, либо они осуществляют поставки и техническую поддержку узкоспециализированного программного обеспечения для химической промышленности, судового и железнодорожного транспорта. Сейчас в нашей стране практически не выходит свежих публикаций, в которых освещались бы результаты исследований, связанных с изучением проблематики вопросов диагностики горных машин по параметрам вибрации. В то же время решением задач практического виброанализа активно стали заниматься китайские ученые применительно к определению технического состояния машин и агрегатов общего машиностроения, таких как электродвигатели и генераторы, подшипники качения и т.п. устройства [4], однако задача по созданию универсальной прогнознй математической модели для оборудования горных машин по состоянию на сегодняшний день так и не решена. Именно поэтому прогнозирование технического состояния горных машин на основе использования адаптивных методов моделирования и новых диагностических критериев является актуальной научной задачей.

В качестве объекта настоящего исследования выступает выборка из двадцати пяти единиц электрических карьерных экскаваторов, включая драглайны, наблюдение за которой осуществлялось на протяжении пяти лет. Результаты анализа регистрируемых характеристик, полученные с применением комплексного подхода к диагностике технических устройств по параметрам механических колебаний (см. некоторые примеры на Рис. 1), позволили приступить к разработке математической прогнознй деградационной модели, использующей в качестве моделируемых параметров новые

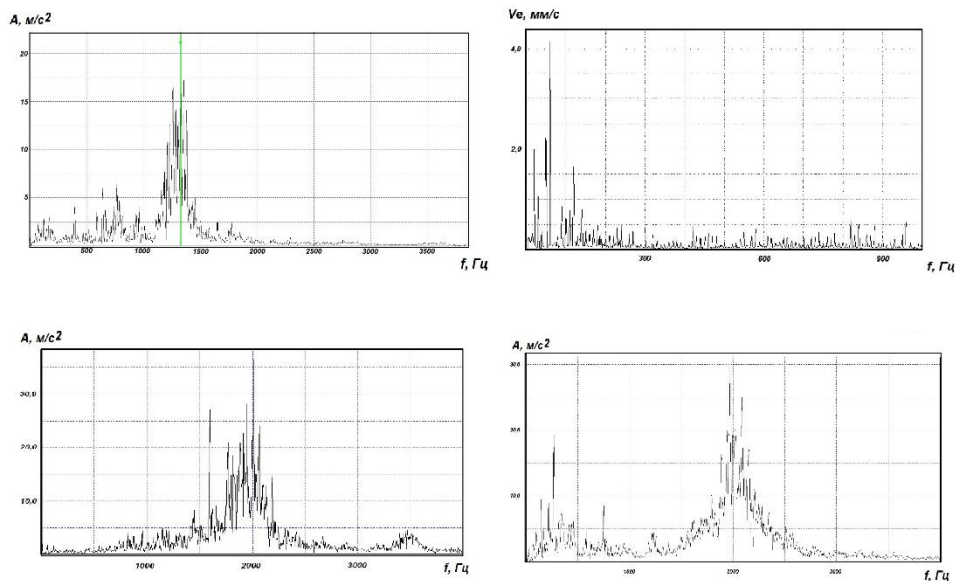


Рис. 1. Некоторые базовые диагностические признаки наличия дефектов подшипников качения на энерго-механическом оборудовании карьерных экскаваторов

Fig. 1. Some basic diagnostic signs of defects in rolling bearings on the power-mechanical equipment of mining shovels

единые диагностические критерии (ЕДК) оценки технического состояния сложных механических систем.

Результаты и их применение. Выполненный в рамках настоящей работы анализ комплексных диагностических данных по параметрам вибрации энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов и другого горного, горно-транспортного и углеобогачительного оборудования позволил выявить узлы и агрегаты, находящиеся в недопустимом техническом состоянии, и осуществить группировку всей обследованной выборки по степени опасности развития дефектов и потенциальной вероятности возникновения аварийных отказов. Всем базовым повреждениям рассматриваемого оборудования соответствуют более ста сорока диагностических признаков в области вибродиагностики, часть которых была подвергнута формализации с целью их использования при разработке единых диагностических критериев для оценки фактического состояния и прогнозирования развития процессов деградации оборудования горных машин. Наличие на обследуемой технике большого количества дефектов сделало необходимым использование алгоритмов клиппирования, предназначенных для выявления информативных признаков того или иного конкретного дефекта в реальных условиях, когда зачастую оборотные частоты не имеют ярко выраженного амплитудного максимума [5, 6].

Всего в результате выполненных исследований, было разработано восемь алгоритмов клиппирования, по числу созданных единых диагностических критериев (ЕДК для диагностики подшипников, для зубчатых передач, компрессоров, нарушения жесткости системы, выявления неуравновешенности и расцентровки, для повреждений соедини-

тельных муфт и дефектов электрической природы). Для реализации каждого из созданных единых диагностических критериев был обретен свой, присущий только данному конкретному критерию набор диагностических признаков и правил выявления дефектов, позволяющий получить максимально точное описание фактического технического состояния объекта проводимых исследований [7]. Кроме того, были осуществлены нормирование и апробация всех разработанных единых диагностических критериев, что позволило определить границы предельного технического состояния горной техники, выработавшей свой нормативный эксплуатационный ресурс.

При создании группы единых диагностических критериев для диагностирования основных дефектов энерго-механического оборудования горных машин по параметрам вибрации использовался метод оптимальной скаляризации, основанный на замене векторов диагностических признаков скалярными величинами. Такой подход является одним из наиболее эффективных способов формирования обобщенных критериев оценки механических систем [8], при этом оригинальность и новизна разработанных единых критериев для оценки технического состояния горных машин были определены набором диагностических правил, признаков и методологий, использованных для оптимальной скаляризации результатов контроля вибрации. В тех случаях, когда реализация оптимальной скаляризации была невозможной по причине затруднений, возникающих при формализации большого количества признаков и правил выявления дефектов с применением комплексного подхода к диагностике сложных технических систем, тогда на роль единых диагностических критериев были отобраны диагностические признаки, обладающие максимальной

	date	station	excavator	unit	point	va	a
1	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В		0
2	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	5	0.45601
3	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	10	0.3904
4	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	15	0.40844
5	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	20	0.97271
6	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	25	1.8823
7	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	30	0.91694
8	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	35	0.41582
9	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	40	0.46257
10	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	45	0.52572
11	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	50	1.0523
12	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	55	0.50932
13	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	60	0.42484
14	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	65	0.4232
15	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	70	0.14353
16	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	75	0.17469
17	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	80	0.11974
18	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	85	0.093498
19	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	90	0.13041
20	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	95	0.13533
21	15.02.2011	5_10482	ЭКГ-5А 10482	ПА	1В	100	0.19684

Рис. 2. Фрагмент листинга базы данных
 Fig. 2. An excerpt of the database listing

информативностью и позволяющие дать оценку фактическому состоянию обследуемых технических устройств.

Так, например, при создании ЕДК для выявления дисбаланса в рамках настоящей работы использовалась оценка вклада в общий уровень сигнала совокупности амплитуд виброскорости на гармониках $(1-5)f_p$ для всех трех пространственных положений измерительных точек диагностируемого агрегата. Для расцентровки валов оборудования горных машин использовался принцип оценки величины вклада отдельных составляющих спектров на информативных составляющих оборотной и удвоенной оборотной частоте, а для выявления дефектов зубчатых зацеплений в редукторах горной техники применялись спектральные маски, учитывающие все основные диапазоны проявления «зубчатых» частот. Данные маски разрабатывались с учетом специфики работы и конструктивных особенностей редукторов карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ, что подтверждает корректность полученных при их использовании результатов анализа диагностических данных для решения задачи по разработке ЕДК для оценки фактического состояния зубчатых передач, используемых в редукторах горных машин.

Эффективность предложенного подхода к применению результатов оптимальной скаляризации комплексных данных по параметрам вибрации горного оборудования и корректность использования предложенных диагностических параметров в качестве единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки фактического со-

стояния и прогнозирования процессов деградации горной техники, получили свое обоснование в рамках выполнения гранта РФФИ и Кемеровской области №20-48-420010. Полученные научные результаты позволяют утверждать, что использование единых диагностических критериев в качестве моделируемых параметров адаптивной модели открывает широкие возможности для прогнозирования технического состояния горной техники при снижении влияния человеческого фактора на результаты моделирования и контроля технического состояния оборудования горных машин по параметрам генерируемой при их работе вибрации. При этом первые же полученные данные процессов моделирования деградации технического состояния горных машин с использованием подходов кратко- и среднесрочного прогнозирования свидетельствуют об эффективности предложенной методологии создания и нормирования разработанных ЕДК, что подтверждается результатами выполненных обследований и ремонтов горной техники.

Решение задачи по разработке универсальной прогностической модели, описывающей процессы развития дефектов энерго-механического оборудования горных машин на основе моделирования процессов деградации технического состояния горной техники с использованием единых диагностических критериев позволило приступить к созданию программного кода для осуществления кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния узлов и агрегатов оборудования карьерных экскаваторов различных марок и конструкций.

Для этого в среде программирования Python был разработан программный код, предназначенный для осуществления кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов деградации технического состояния узлов и агрегатов оборудования электрических карьерных экскаваторов, основанный на реализации принципов адаптивного моделирования предложенных единых диагностических критериев.

Созданная программа предназначена для прогнозирования технического состояния энергомеханического оборудования горных машин на основании данных виброанализа и может быть использована при планировании ремонтов горной техники, а также для оценки работоспособности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Функциональные возможности программы включают: кратко- и среднесрочный прогноз технического состояния диагностируемого оборудования (до 60 суток) по выбранным параметрам комплексного подхода к оценке параметров вибрации с оценкой величины достоверности аппроксимации данных; экспорт и импорт базы данных формата SQLite с фиксированной структурой, а также внесение в нее изменений; возможность выбора применяемого для прогнозирования единого диагностического критерия, а также возможность работы с таблицами и графиками диагностической информации и результатами прогнозирования; создание и редактирование отчета по сделанным прогнозам деградации фактического состояния горной техники. Вес программы составляет до 1 Гб, минимальные системные требования – оперативная память 3 и более Гб, процессор CPU: 2+ cores, операционная система Windows / Linux / MacOS.

Кроме того, для корректной работы разработанной программы необходимо было создать базу данных, предназначенную для хранения и использования результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, с использованием которых можно было бы рассчитать единые диагностические критерии для какой-либо группы дефектов динамического оборудования горных машин. Такая база данных была создана. Она содержит в себе более чем 14000 записей контроля вибрации горного оборудования, включая данные спектрального анализа, эксцесса и спектра огибающей. Всего в базе данных содержится диагностическая информация по двадцати пяти карьерным экскаваторам и ста электрическим двигателям (см. пример на Рис. 2).

Предполагалось, что использование данного разработанного программного обеспечения на практике позволит быстро и эффективно, даже при отсутствии у конечного пользователя специальных навыков и квалификации эксперта в области анализа вибрации, осуществить оценку фактического технического состояния диагностируемого оборудования и выполнить прогнозирование процессов безаварийной эксплуатации обследуемой горной техники. Вместе с тем в ходе реализации проекта стало очевидно, что работы по совершенствованию нормирования новых ЕДК необходимо продол-

жить. Как минимум, нужно дополнить базы данных по вибрации редукторов горных машин для более точного определения границ аварийности и осуществления эффективного прогнозирования, а также для уточнения оптимистических и пессимистических доверительных границ предельного состояния горного оборудования.

Так как нормирование отдельных спектральных составляющих «зубцовой» природы является отдельной сложной научной задачей, решение которой невозможно без четкого понимания особенностей кинематики зубчатых зацеплений и специфики эксплуатационного износа редукторов, то основная сложность применительно к решению проблематики поставленных перед настоящим исследованием задач сводится к тому, что при смене типа (марки, модели) карьерного экскаватора работу по нормированию параметров вибрации необходимо начинать практически заново [1, 7, 9].

Полученные результаты расчета средне- и краткосрочного прогнозирования с использованием адаптивного моделирования процессов деградации технического состояния зубчатых передач в составе редукторов подъемных лебедок экскаваторов ЭШ 10/70 можно использовать в качестве примера осуществления прогнозирования с применением предложенного подхода к разработке ЕДК. Зубчатые передачи являются одним из самых сложных технических объектов с точки зрения анализа параметров генерируемой при их работе вибрации, полученные результаты диагностирования имеют значительные трудности в интерпретации, для корректного использования ЕДК и построения максимально реалистичного прогноза работу по сбору и анализу диагностических данных на редукторах горных машин необходимо продолжить. Результаты прогнозирования ЕДК для зубчатых передач показали принципиальную работоспособность методологии создания ЕДК и предложенной прогнозной математической модели. Использование дополнительного объема диагностических данных позволит более точно определить границы зон допустимого состояния редукторов по оценке величин ЕДК, что увеличит точность прогнозирования и позволит оптимизировать текущую схему ремонтов горного оборудования.

Некоторые скриншоты разработанного программного обеспечения, иллюстрирующие общий вид, главное и контекстное меню, а также некоторые возможности программы для прогнозирования технического состояния горной техники, представлены на Рис. 3 и 4. В данный момент авторами настоящей работы подготавливается заявка на получение свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных, а также патента РФ на способ неразрушающего контроля с применением единых диагностических критериев. Апробация разработанной математической деградационной модели и созданного в рамках выполнения настоящего проекта программного обеспечения проведена с использованием выборки данных по параметрам вибрации двадцати пяти карьерных экскаваторов, результаты апробации пред-

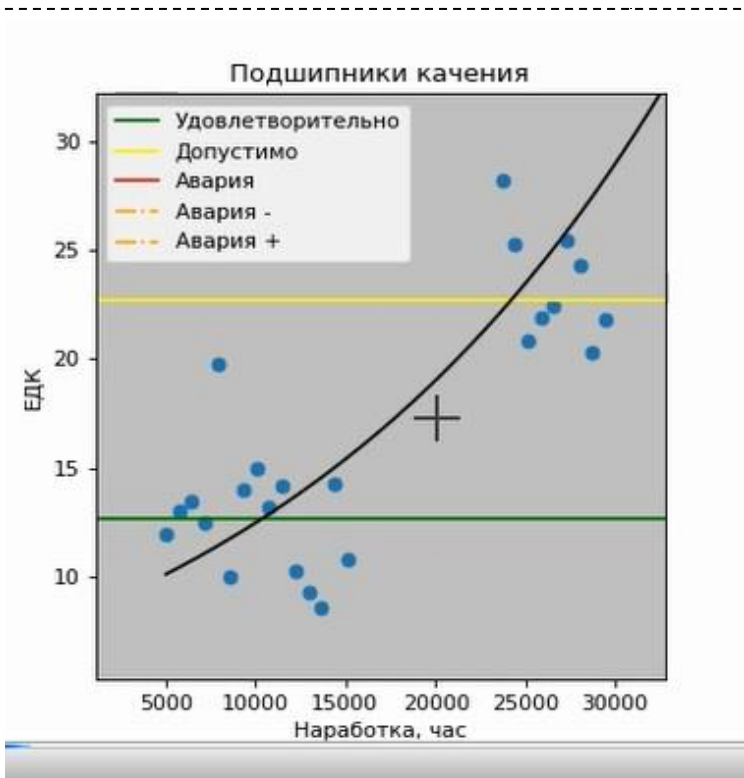


Рис. 3. Пример масштабирования графических результатов среднесрочного прогнозирования процесса развития дефекта подшипника генератора подъема экскаватора ЭКГ-5А

Fig. 3. An example of scaling the graphical results of medium-term forecasting of the development of a rolling bearing defect in the lift generator of an EKG-5A mining shovel

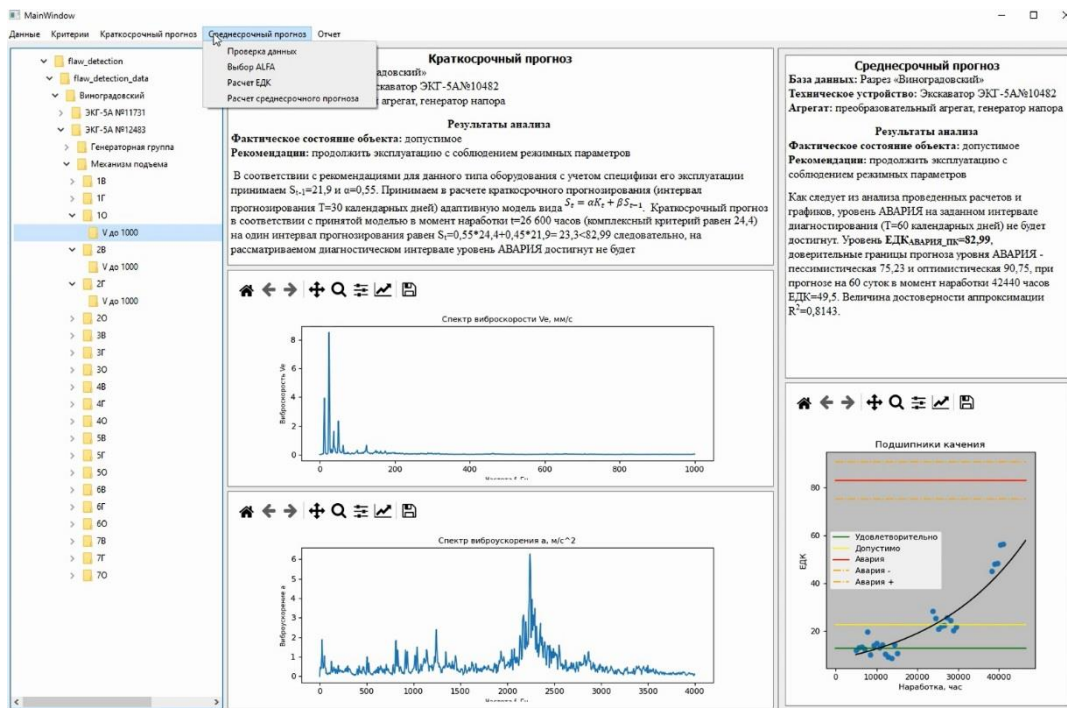


Рис. 4. Общий вид главного окна разработанного программного обеспечения для осуществления прогнозирования процессов деградации технического состояния энерго-механического оборудования горных машин
Fig. 4. General view of the main window of the developed software for predicting the processes of degradation of the technical condition of the energy-mechanical equipment of mining machines

ложенной модели на реальных технических объектах подтвердили эффективность предложенного подхода к прогнозированию с использованием единых диагностических критериев и корректную работу разработанного программного обеспечения. Сделанный прогноз подтверждается данными визуально-измерительного контроля, проведенного в рамках текущих ремонтов обследованного горного оборудования.

Таким образом, результаты исследований доказали принципиальную эффективность применения предложенных наборов диагностических признаков при создании единых диагностических критериев оценки состояния всего основного энерго-механического оборудования горных машин [1, 7]. Реализация возможности использования новых ЕДК в качестве моделируемых параметров предложенной адаптивной модели позволяет осуществить

прогноз безаварийной работы всех агрегатов динамического оборудования экскаваторов типа ЭШ и ЭКГ, что принципиально отличает предложенную модель от большого количества существующих аналогичных прогнозных алгоритмов. Первые же результаты моделирования показали высокий уровень достоверности сделанных прогнозов, основанных на принципе корректирования параметров математической модели с использованием свежих диагностических данных.

Выводы.

В условиях действующей на предприятиях угольной и горнорудной промышленности России системы плановых ремонтов значительный практический интерес представляют результаты кратко- и среднесрочного прогнозирования технического состояния горных машин, зачастую выработавших нормативный срок эксплуатации. Присутствующие сегодня на рынке программного обеспечения прогнозные модели, предназначенные для выполнения оценки и прогнозирования технического состояния динамически работающих агрегатов, имеют крайне ограниченную область применения и являются малоэффективными для решения задач, стоящих перед угольной отраслью.

Данную проблему можно было бы попробовать решить, однако для этого потребуются поиск и выделение трендов детерминированной составляющей виброакустических сигналов горного оборудования, что является необходимым условием для получения результатов кратко- и среднесрочного прогнозирования с использованием адаптивных экспоненциальных моделей, для чего потребуются их дальнейшая модернизация и развитие [10, 11, 12].

Полученные в рамках выполнения настоящей работы исследования показали, что предложенная математическая деградационная модель и разработанное программное обеспечение, созданное на основе новых единых диагностических критериев для оценки технического состояния сложных механических систем, доказали свою принципиальную эффективность при осуществлении кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния энерго-механического оборудования электрических карьерных экскаваторов. Программное обеспечение позволяет использовать любой из разработанных критериев, созданных при помощи алгоритмов скаляризации в многомерном пространстве диагностических признаков, таким образом появляется возможность для осуществления моделирования процессов деградации для всех базовых групп дефектов оборудования карьерных экскаваторов, от подшипников качения до зубчатых передач в составе редукторов. Реализованная математическая модель показала высокую сходимость получаемого прогноза развития процессов деградации технического состояния диагностируемых узлов горной техники, что подтверждается результатами визуально-измерительного контроля, выполненного в рамках проведения годовых ремонтов эксплуатируемого оборудования.

Главным преимуществом предлагаемой прогнозной модели является использование комплексного подхода к диагностике технического состояния обследуемого оборудования по параметрам вибрации, что открывает широкие возможности для прогнозирования деградационных процессов сложных механических систем.

Заключение.

Результаты исследований прямо указывают на существующую необходимость в реформировании системы управления ремонтами горной техники, действующей в настоящее время на предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса. Сочетание системы планово-предупредительных ремонтов и аварийного обслуживания горных машин и оборудования в текущих условиях не может эффективно решать проблемы, связанные с качеством проводимых ремонтов и оптимизацией материального снабжения и логистики ремонтных подразделений угольных предприятий [12, 13, 14, 15].

Предложенный в рамках выполнения настоящей работы методологический подход к решению задачи по прогнозированию технического состояния энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов с использованием разработанного программного обеспечения и новых единых диагностических критериев подтвердил свою эффективность и может применяться на практике при решении задач по совершенствованию управления системой ремонтов горной техники, что позволит в дальнейшем использовать его в качестве одного из базовых элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию.

Реализованная в программном обеспечении математическая модель обладает высокой степенью адаптивности и может подстраиваться под изменяющиеся внешние условия, обладая при этом достаточным уровнем точности результатов прогнозирования, что подтверждается высоким уровнем достоверности аппроксимации получаемых результатов. Использование восьми разработанных единых диагностических критериев делает предлагаемую модель по настоящему универсальной, так как предоставляет возможность проводить анализ данных и строить кратко- и среднесрочный прогноз для разнотипных элементов, используемых в конструкции горного оборудования.

Конечным этапом, который определит возможность практического использования полученных в рамках выполнения настоящей работы научных результатов, будет создание на основе предложенной прогнозной деградационной модели и новых единых критериев оценки технического состояния горного оборудования мощного программного комплекса, предназначенного для выполнения прогнозирования процессов изменения фактического технического состояния широкого спектра диагностируемого оборудования. Использование результатов автоматизированного кратко- и среднесрочного прогнозирования на основе разработанных единых диагностических критериев для оценки и прогнозирования процессов деградации фактиче-

ского технического состояния оборудования горных машин позволит уменьшить количество ошибок, возникающих при анализе диагностических данных, а также позволит оптимизировать простой технологического оборудования и повысить уровень безопасности при проведении горных работ на угольных предприятиях Кузбасса.

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. Герике П. Б., Герике Б. Л., Ещеркин П. В. Математическая модель оценки фактического состояния бурового станка // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы международной научно-практической конференции «Уголь и майнинг 2009». Новокузнецк : СибГИУ, 2009. С. 55–58.
2. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yerin 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. Герике Б. Л., Герике П. Б. Диагностика горно-транспортного оборудования. Герике, П // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. 2009. S10. С. 213–225.
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. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск : Издательство ИрГТУ, 1999. 230 с.
10. 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
11. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCS 2016. Pp. 668–672. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179>
12. 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>
13. Герике П. Б., Ещеркин П. В. Анализ технического состояния парка буровых станков ХК «Кузбассразрезуголь» // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы международной научно-практической конференции «Уголь и майнинг 2009». Новокузнецк : СибГИУ, 2009. С. 59–63.
14. 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>
15. Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В., Савченко А. В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Герике Павел Борисович, канд. техн. наук, доцент, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, (650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10), am_besten@mail.ru

Герике Борис Львович, д-р техн. наук, профессор, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, (650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10), Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), gbl_42@mail.ru

Телегуз Александр Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории перспективных методов управления горнотехническими системами, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, (650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10), mr.shion.bd@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Герике П.Б. – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор диагностических данных, выводы

Герике Б.Л. – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, анализ данных и написание текста, выводы

Телегуз А.С. – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор диагностических данных, выводы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-57-67

Pavel B. Gericke¹, Boris L. Gericke^{1,2}, Aleksandr S. Teleguz¹

¹Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

E-mail: am_besten@mail.ru

EVALUATION OF THE DEGRADATION PARAMETERS OF THE TECHNICAL STATE OF MINING MACHINES WITH THE USE OF THE DEVELOPED SOFTWARE

Abstract.

The relevance of the work. This paper presents some results of calculations using new unified diagnostic criteria for assessing the technical condition of mining machinery equipment by vibration parameters, which allowed us to begin solving the problem briefly- and medium-term forecasting of the processes of degradation of the technical condition of diagnostic objects, as well as to create software based on the implementation of the proposed adaptive mathematical model for the implementation of automated forecasting of the processes of defect development and changes in the actual state of the power-mechanical equipment of mining equipment.

The purpose of the work: To prove the effectiveness of the created software for obtaining in automated mode using new unified diagnostic criteria the results of short- and medium-term forecasting of the technical condition of quarry excavators. On the example of rolling bearings used in the construction of energy-mechanical equipment of quarry excavators, to test the developed software to obtain a forecast of the degradation of the technical condition of mining machines, created on the basis of an adaptive mathematical model and new unified diagnostic criteria. To assess the reliability of the forecasting results obtained using the developed software, as well as to propose a direction for improving the methodology for normalizing the parameters of mechanical vibrations in relation to solving the problem of implementing a medium-term forecast of the occurrence of emergency failures of mining equipment.

Research methods: To perform vibration analysis, an integrated approach to diagnostics was used, including the results of spectral analysis in the extended frequency and dynamic range, analysis of the run-out characteristics, kurtosis and analysis of the envelope of the spectrum. To simulate the degradation processes of complex mechanical systems, an adaptive mathematical model was implemented, using new unified diagnostic criteria as modeled parameters, in the development of which the principles of optimal scalarization of experimental results were applied.

Results: The scientific results obtained in the framework of this work prove the effectiveness of the developed software for predicting the technical condition of mining machines, created using the proposed adaptive model and new unified diagnostic criteria. The implementation of the results obtained in practice will make it possible to modernize the mining equipment repair management system operating at coal enterprises, which will lead to



Article info

Received:

16 March 2023

Accepted for publication:

18 April 2023

Accepted:

27 April 2023

Published:

17 May 2023

Keywords: underwater mining of solid minerals, ferromanganese nodules, underwater mining complex, intermediate capsule, hydraulic lifting of nodules

optimization of repair and logistics costs, and will also reduce the number of industrial accidents associated with the unacceptable condition of the mining equipment in operation.

The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Budgetary Institution "Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" project FWEZ-2021-0002 "Development of effective technologies for coal mining by robotic mining complexes without the constant presence of people in mining areas, control systems and methods for assessing the technical condition and diagnostics of their resource and justification for ensuring reproduction mineral resource base" (reg. no. AAAAA-A21-121012290021-1)..

For citation: Gericke P.B., Gericke B.L., Teleguz A.S. Evaluation of the degradation parameters of the technical state of mining machines with the use of the developed software. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 2(166):57-67 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-57-67, EDN: FPKYKNT

REFERENCES

1. Gericke P.B., Gerike B.L., Eshherkin P.V. Mathematical model for evaluating the actual state of the drilling rig. // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources: Proceedings of the international scientific-practical conference «Coal and Mining 2009». Novokuznetsk : SibGIU, 2009. Pp. 55–58. (rus)
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. 2018. 040090. <https://doi.org/10.1063/1.5084528> (eng)
3. 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)
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; 126:662–685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051> (eng)
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> (eng)
6. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
7. B. L. Gerike, P. B. Gerike. Diagnostics of mining and transport equipment. Otdel'nyj vypusk Gornogo informacionno-analiticheskogo bjulletenja. – 2009. – S10. – Pp. 213 – 225 (rus)
8. Eshcherkin P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskih burovykh stankov [Development of a technique of diagnosis and prediction of technical condition of the diesel-hydraulic drilling rigs]: PhD thesis excerpt. Kemerovo. 2012. (rus)
9. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. 230 p. (rus)
10. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018; 9:91–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9 (eng)
11. 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> (eng)
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008; 130:121402/1–121402-13. <https://doi.org/10.1115/1.2976803> (eng)
13. Gerike P.B., Eshherkin P.V. Analysis of the technical condition of drilling rigs of the coal company Kuzbassrazrezugol. Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources: Proceedings of the international scientific-practical conference «Coal and Mining 2009». Novokuznetsk: SibGIU; 2009. Pp. 59–63. (rus)
14. 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; 121:201–214. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024> (eng)
15. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Pavel B. Gericke, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, (10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation), e-mail: am_besten@mail.ru

Boris L. Gericke, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, (10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation), T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (Vesennyyaya street 28, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: gbl_42@mail.ru

Aleksandr S. Teleguz, Junior researcher, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, (10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation), e-mail: mr.shion.bd@mail.ru

Contribution of the authors:

Pavel B. Gericke - scientific management, reviewing the relevant literature, conceptualization of research, data analysis and writing the text.

Boris L. Gericke - research problem statement, reviewing the relevant literature, conceptualization of research, obtaining diagnostic data, drawing the conclusions.

Aleksandr S. Teleguz - scientific management, reviewing the relevant literature, conceptualization of research, data analysis and writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

