

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-76-82

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

* для корреспонденции: am_besten@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЕДИНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ**Информация о статье**

Поступила:

10 февраля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 июня 2025 г.

Принята к печати:

01 августа 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:

вибродиагностика, подшипники качения, горное оборудование, прогнозирование, механические дефекты

Аннотация.

Актуальность работы. В данной статье приведены некоторые результаты диагностики по параметрам вибрации подшипников, установленных на генераторных группах электрических карьерных экскаваторов. Изучение вопросов комплексного анализа механических колебаний подшипников позволило осуществить прогнозирование процессов развития их дефектов с использованием новых единых диагностических критериев.

Цель работы: использовать результаты диагностики по параметрам вибрации для получения прогноза технического состояния подшипников генераторных групп. Доказать целесообразность реализации единого диагностического критерия оценки подшипников при моделировании процессов их деградации и разрушения.

Методы исследования: в рамках настоящего исследования выполнялся комплексный анализ параметров механических колебаний, возникающих при работе динамического оборудования карьерных экскаваторов. Для решения этой задачи применялись различные методы вибродиагностики, среди которых центральное место заняли результаты спектрального анализа, данные эксцесса и анализа огибающей.

Результаты: Результаты оценки и прогнозирования динамики процессов развития дефектов подшипников качения свидетельствуют об эффективности разработанной методологии создания единых критериев оценки вибрации. Результаты работы могут быть применены для совершенствования действующих схем технического обслуживания горных машин, что в перспективе предоставит возможность снизить уровень аварийности при проведении горных работ в угольной отрасли за счет прогнозирования возникновения аварийных ситуаций и минимизации непроизводительных простоев эксплуатируемой горной техники.

Для цитирования: Герике П. Б., Герике Б. Л. Применение единых критериев для диагностики и прогнозирования технического состояния подшипников // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 4 (180). С. 76-82. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-76-82, EDN: UGTLBI

Введение.

Традиционно значительная часть горных машин, эксплуатируемых на разрезах и карьерах Кузбасса, подлежит обязательной экспертизе промышленной безопасности и, как следствие, обязательному проведению виброконтроля всех основных элементов их энергомеханического оборудования. Результаты диагностики зачастую регистрируют превышение параметров вибрации горного оборудования, находящегося в предельно допустимом или недопустимом техническом состоянии. Под-

шипники качения, получившие широкое распространение в конструкции горных машин, являются одним из самых нагруженных узлов, воспринимающих динамические нагрузки от работающего энергомеханического оборудования. Для их диагностики разработано и применяется большое количество специализированных методов контроля вибрации, среди которых пик-фактор, метод ударных импульсов, эксцесс, метод анализа огибающей [1]. Все они обладают рядом как достоинств, так и недостатков, включая, например, невозможность

определения конкретного типа дефекта, сложность проводимого анализа и потребность в высокой степени квалификации специалистов неразрушающего контроля.

Новые единые диагностические критерии (ЕДК), созданные совместно учеными ФИЦ УУХ СО РАН и КузГТУ, предоставляют дополнительные возможности для анализа параметров вибрации основного энергомеханического оборудования горных машин, включая экскаваторы, буровые станки, дробильно-сортировочное и углеобогащительное оборудование. Принцип их создания заключался в использовании наборов диагностических данных, строго определенных для каждой отдельной группы дефектов, включающих результаты комплексного анализа параметров вибрации. На основе специальным образом отобранных и профильтрованных данных с использованием принципов оптимальной скаляризации, необходимой для обобщения разнородной диагностической информации, производился расчет ЕДК для каждой измерительной точки диагностируемого агрегата. Использование новых критериев вместо традиционных диагностических признаков, подтверждающих наличие дефектов горного оборудования, способно снизить время, затрачиваемое на анализ данных, и повысить эффективность прогнозирования процессов изменения фактического технического состояния объектов вибрационного контроля. Кроме того, при условии совершенствования новых критериев и развития соответствующего программного обеспечения для автоматизированного анализа диагностических данных в перспективе станет возможным уменьшение роли человеческого фактора при проведении диагностики и повышение точности результатов анализа вибрации.

Алгоритм создания ЕДК включал в себя две процедуры фильтрации сигналов вибрации – поиск грубых погрешностей (ошибки в записи, зашумленность и искажения) и клиппирование (удаление части гармоник спектра, не связанных напрямую с исследуемым дефектом) данных [2].

Ниже представлены результаты анализа и прогнозирования деградации технического состояния с использованием ЕДК, полученные на выборке из тридцати двух подшипников качения, установленных на генераторных группах электрических карьерных экскаваторов типа ЭКГ. Наблюдение за выборкой контролируемых подшипников осуществлялось на протяжении полугода, результаты комплексного анализа вибрации добавлены в созданную базу данных формата SQLite с фиксированной структурой, содержащую данные по более чем сотне тысячам записей результатов диагностики оборудования карьерных экскаваторов. Основной особенностью, которая отличает разработанный ЕДК от других типов единых диагностических критериев оценки вибрации подшипников [3], является расширенный набор диагностических параметров, используемых для оценки фактического технического состояния подшипниковых узлов, в основе которого специфика конструкции, режимов и условий эксплуатации карьерной техники в Кузбассе.

Результаты и их применение.

При разработке нового критерия для диагностики подшипников была проведена оценка всех доступных на данный момент диагностических признаков, правил и методологий поиска дефектов на основе анализа параметров механических колебаний. С учетом специфики проведения измерений и особенностей конструкции электрических карьерных экскаваторов (ограниченное время проведения замеров, запыленность, затрудненный доступ к некоторым измерительным точкам) для создания ЕДК было принято решение использовать данные спектрального анализа, а также результаты оценки огибающей спектра в области подшипниковых частот и данные высокочастотного эксцесса. Использование комбинации выбранных методологий и диагностических признаков в области анализа и контроля вибрации позволяет оценить состояние обследованных подшипников и получить диагностические данные для расчета единых критериев.

Реализация алгоритма расчета единого критерия для подшипников основана на решении задачи оценки разнородных диагностических признаков с помощью применения алгоритмов оптимальной скаляризации и распределения получаемых результатов в зависимости от степени развития присущих подшипникам дефектов.

Использованный алгоритм включал в себя подпрограммы уточнения оборотной, выявления значимых гармоник спектра и проведения их нормирования, удаления из спектра всех лишних составляющих «не подшипниковой» природы, удаления шумовых составляющих с применением методики поиска грубых погрешностей и получения результирующего клиппированного спектра.

Расчитанные величины единых критериев можно использовать в качестве моделируемых параметров при осуществлении математического моделирования процессов развития повреждений диагностируемых подшипников. Для действующей системы плановых ремонтов практическую ценность имеют результаты краткосрочного прогнозирования изменения технического состояния, поскольку любой диагностируемый узел будет обслуживаться раньше, чем наступит срок реализации долгосрочного прогноза [4, 5].

Существующие программные комплексы, в функционал которых входит возможность прогнозирования процессов развития дефектов энергомеханического оборудования, имеют ряд значительных ограничений на область своего применения, в частности, такие комплексы очень чувствительны к качеству и объему диагностической информации и требуют детальной настройки своих параметров и разработки диагностических правил, учитывающих всю специфику диагностируемого оборудования (конструктивные и кинематические особенности, границы предельного состояния и т. п.) с привлечением экспертов со стороны фирм-разработчиков [6, 7].

Все это значительно усложняет процесс использования таких систем, и в некоторых случаях делает их применение нецелесообразным и нерента-

большим. Другая часть программного обеспечения, предусматривающая возможность прогнозирования технического состояния промышленного оборудования, «заточена» под решение конкретных задач по поиску, выявлению и прогнозированию разрушительных процессов деградации технического состояния для узкой группы однотипных элементов технических устройств [8].

При этом до сих пор не создана универсальная прогностическая модель оценки технического состояния сложных механических систем по параметрам механических колебаний, которая могла бы с одинаковым успехом осуществлять прогнозирование на основе результатов контроля вибрации самого разного технологического оборудования, от единичных подшипников до карьерных экскаваторов, самосвалов и буровых станков [9, 10]. Главными причинами отсутствия такой модели являются затруднения, возникающие при анализе изменяющегося спектрального состава регистрируемых диагностических характеристик различного горного оборудования, и недостаточная изученность вопросов динамики предельно изношенных горных машин [11, 12].

Именно поэтому большое количество существующих математических моделей ограничивается моделированием величин базовых диагностических параметров, например, пика виброускорения или отдельных значащих гармонических составляющих спектра, что значительно снижает потенциал применения этих моделей [13, 14]. Моделирование с использованием новых ЕДК при условии использования нескольких последовательных измерений вибрации позволит получить все преимущества комплексного анализа вибрации и значительно расширить область применения получаемых результатов.

Так, в качестве примера на Рис. 1 представлен график, иллюстрирующий зависимость величины

единого критерия ЕДК_{подш} от наработки конкретного подшипника. При проведении среднесрочного прогнозирования с использованием разработанных алгоритмов расчета ЕДК при прогнозировании на период в два календарных месяца расчетная величина составит ЕДК_{подш}=99,1 ед., что превышает предельно допустимое значение с перекрытием его оптимистической границы. Для диагностируемого генератора даны рекомендации по проведению ревизии дефектного подшипника с его последующей заменой и проведением центровки валопровода агрегата.

Использованная методология определения грубых погрешностей в диагностических данных основывалась на применении стандартных проверок статистических гипотез, призванных подтвердить или опровергнуть предположение о наличии в выборке некорректных замеров, резко отличающихся от обычно измеряемых величин [15, 16]. Но вместе с тем отказ от части диагностической информации, заметно выбивающейся из ряда других результатов, может привести к тому, что проблемные точки на агрегате не будут должным образом продиагностированы, и будет упущена возможность вовремя выявить тот или иной развивающийся дефект [17, 18]. С ростом объема поступающей в алгоритм расчета ЕДК диагностической информации, особенно при увеличении количества обследуемых технических устройств, методологию фильтрации входных данных необходимо будет изменить. Здесь наиболее перспективным может оказаться реализация принципов машинного обучения, например алгоритма изоляционного леса или алгоритма кластеризации [19, 20], но конкретное обоснование применения того или иного метода является предметом дальнейших исследований, в рамках которых при комплексном анализе параметров вибрации горных машин должно проводиться совершенствование разработанных единых диагностических критериев.

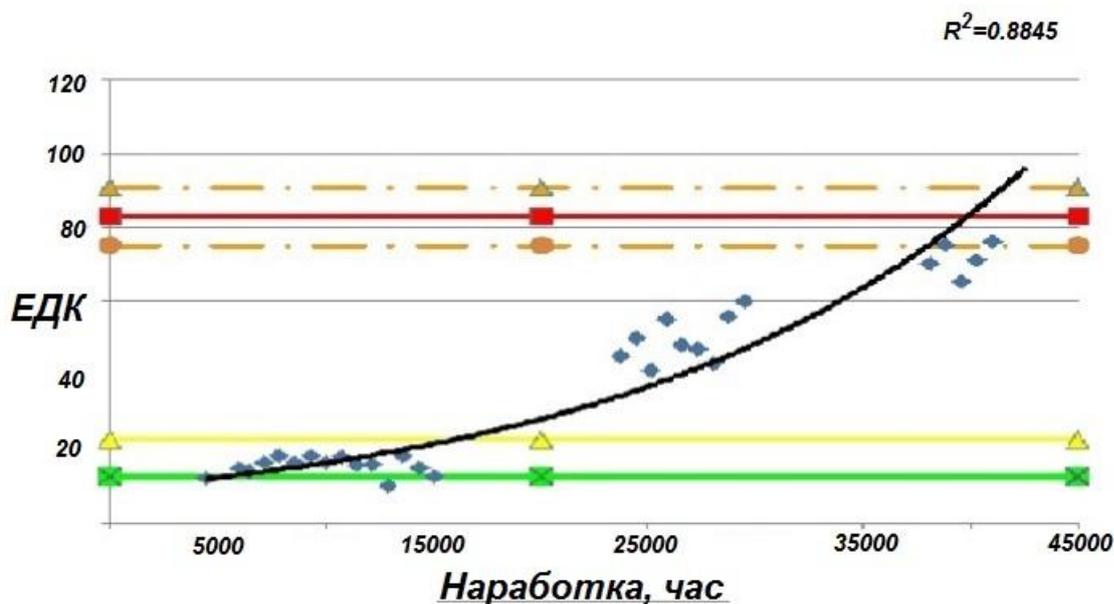


Рис. 1. Прогноз технического состояния подшипника генераторной группы экскаватора ЭКГ-5А
 Fig. 1. Forecast of the technical condition of the generator group bearing on the EKG-5A type mining shovel

Выводы. Результаты выполненных исследований позволили проанализировать данные комплексного анализа параметров вибрации, полученные на генераторных группах электрических карьерных экскаваторов. На основе результатов выполненного анализа и предложенной методологии были определены величины ЕДК для подшипников качения на генераторных группах экскаваторов из обследованной выборки. Результаты расчетов использовались для прогнозирования процессов развития дефектов подшипников качения. Осуществленные расчеты показали высокий уровень достоверности полученных результатов прогнозирования процесса изменения технического состояния обследованных подшипников, что подтверждается безаварийной работой четырех обследованных экскаваторов в течение всего срока среднесрочного прогнозирования.

В результате выполненных исследований была доказана не только возможность использования ЕДК для оценки состояния подшипниковых узлов, но и эффективность их применения для прогнозирования безаварийной работы и оценки степени развития основных дефектов подшипников.

Заключение. Реализация принципов моделирования новых критериев позволила спрогнозировать изменение технического состояния обследованных подшипников, установленных на оборудовании электрических карьерных экскаваторов типа ЭКГ. Результаты выполненного прогноза удовлетворяют требованиям системы плановых ремонтов, позволяя получить информацию о вероятности возникновения аварий на протяжении ближайших двух календарных месяцев, перекрывая тем самым величину ближайшего межремонтного интервала. На практике это означает потенциальное уменьшение числа аварийных ситуаций и минимизацию непродuctивных простоев горнодобывающего оборудования, повышение безопасности проведения открытых горных работ и возможность более эффективно планировать возникающие потребности в запасных частях, необходимых для проведения ремонтов. Кроме того, конечно, главным преимуществом использования результатов прогнозирования должна стать минимизация количества несчастных случаев на производстве, из-за уменьшения количества единиц горной техники, находящихся в недопустимом состоянии. Разработанная методология создания новых критериев и их использование для прогнозирования технического состояния горных машин имеют перспективы для практической реализации в качестве элементов системы активного обслуживания карьерных экскаваторов и другого горного оборудования.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «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. 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В. В. Клюева. Т. 7. Москва, 2005. 828 с.
2. Герике П. Б., Герике Б. Л. Моделирование деградации фактического состояния подшипников на основе использования единого диагностического критерия // Горная промышленность, Специальный выпуск №S2/2023. 2023. С 32–36.
3. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. М. : МИФИ, 2007. 170 с.
4. 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. DOI: 10.1007/978-3-319-61927-9_9.
5. Герике Б. Л., Леконцев Ю. М., Новик А. В. Компенсаторы подсоса воздуха в шахтных трубопроводах каптированного метана // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 3 (173). С. 22–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-22-32. EDN: TFXKZS
6. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014*. 2014. Düsseldorf, Germany.
7. Сундуков А. Е., Шахматов Е. В. Субгармоники зубцовой частоты в вибродиагностике износа зубьев редуктора газотурбинного двигателя // Динамика и виброакустика. 2022. Т. 8. № 2. С. 6–11.
8. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan // *Engineering Failure Analysis*. 2014; 37:86–95.
9. 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.
10. 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*. 2018. 2053. 040090. DOI: 10.1063/1.5084528.
11. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва, 1996. 276 с.
12. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. Санкт Петербург : Издательство СПбГМТУ, 2004. 156 с.
13. Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review // *Mechani-*

cal Systems and Signal Processing. 2019. V.126. Pp. 662–685. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.02.051.

14. Ghasemloonia A., Rideout D. G., Butt S. D. Vibration Analysis of a Drillstring in Vibration-Assisted Rotary Drilling: Finite Element Modeling With Analytical Validation // Journal of Energy Resources Technology. 2013. Vol. 135. 032902-1.

15. Десятников В. Е., Пичков С. Н. Особенности диагностирования подшипников качения методом огибающей // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 9 (303). С. 58–64.

16. Насонов Д. А., Пузакина А. К. Влияние выбора точек контроля при вибродиагностике подшипниковых узлов электродвигателей. Машиностроение и инженерное образование. 2023. № 4 (73). С. 26–30.

17. Wrzochal M. New method of metrological evaluation of industrial rolling bearing vibration measurement systems // The International Journal of Ad-

vanced Manufacturing Technology. 2023. № 124. Pp. 587–600. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10359-0>.

18. Hemati Ali, Shooshtari Alireza Bearing failure analysis using vibration analysis and natural frequency excitation // Journal of failure analysis and prevention. 2023. № 4. Pp. 1431–1437. DOI: 10.1007/s11668-023-01700-0.

19. Kumar R., Anand R. S. Statistical Analysis of Vibration Signal Frequency During Inner Race Fault of Rolling Ball Bearings // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2023. № 5. Pp. 2260–2274. DOI: 10.1007/s11668-023-01760-2.

20. Xu Hong-yang, Zhao Xiang, Ma Hui, Luo Zhong, Han Qing-kai, Wen Bang-chun. Vibration analysis of a gear-rotor-bearing system with outer-ring spalling and misalignment // J. Cent. South Univ. 2024. 31. Pp. 511–525. DOI: 10.1007/s11771-024-5576-9.

© 2025 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, старший научный сотрудник лаборатории угольного машиноведения ФИЦ УУХ СО РАН., am_besten@mail.ru, 650065, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10.

Герике Борис Львович – докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ИУ ФИЦ УУХ СО РАН., gbl_42@mail.ru, 650065, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10., г. Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Заявленный вклад авторов:

Герике Павел Борисович – постановка исследовательской задачи; формирование структуры основных задач; сбор фактографической и статистической информации на предприятии; аналитические расчеты; формулировка заключения.

Герике Борис Львович – постановка исследовательской задачи; формирование структуры основных задач; сбор фактографической и статистической информации на предприятии; аналитические расчеты; формулировка заключения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-76-82

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

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

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: am_besten@mail.ru

APPLICATION OF UNIFORM CRITERIA FOR DIAGNOSTICS AND FORECASTING OF TECHNICAL CONDITION OF BEARINGS



Article info
Received:

Abstract.

Relevance of the work. This article contains the results of vibration parameter monitoring and technical condition assessment of bearings installed on generator groups of electric mining shovels. Analysis of data from complex diagnostics of mechanical vibrations of bearings allowed forecasting the processes of their defect development using new unified

10 February 2025

Accepted for publication:
30 June 2025

Accepted:
01 August 2025

Published:
28 August 2025

Keywords: vibration analysis, rolling bearings, mining equipment, forecasting, mechanical defects.

diagnostic criteria.

The main objective of the work is to use the results of diagnostics by vibration parameters to obtain a forecast of the technical condition of bearings installed in generator groups. It is necessary to prove the feasibility of implementing a single diagnostic criterion for assessing bearings when modeling the processes of their degradation and destruction.

Within the framework of this work, a comprehensive analysis of the parameters of mechanical vibrations arising during the operation of dynamic equipment of mining shovels was carried out. To solve this problem, various methods of vibration diagnostics were used, among which the central place was occupied by the results of spectral analysis, excess data and envelope analysis.

The results of the assessment and forecasting of the dynamics of the processes of development of rolling bearing defects indicate the effectiveness of the developed methodology for creating unified diagnostic criteria. The results obtained may be useful in implementing the concept of servicing mining machines according to their actual condition, which allows reducing the accident rate in the coal industry by forecasting the occurrence of accidents and minimizing unproductive downtime of the mining equipment in operation.

For citation: Gericke P.B., Gericke B.L. Application of uniform criteria for diagnostics and forecasting of technical condition of bearings. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 4(180):76-82 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-76-82, EDN: UGTLBI

REFERENCES

1. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik. V 7-kh tomakh [Non-destructive testing: Handbook. In 7 Vol. Vol.7] / Pod. red. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 2005. 828 p. (rus)
2. Gerike P.B., Gerike B.L. Modeling the degradation of the actual condition of bearings based on the use of a single diagnostic criterion. *Mining Industry = Gornaja promyshlennost'*. 2023; S2:32–36. (rus)
3. Sushko A.E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoy obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)
4. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. *Applied Condition Monitoring*. 2018; 9:91–101. DOI: 10.1007/978-3-319-61927-9_9. (eng)
5. Gerike P.B. Gerike B.L. Prospects for using unified diagnostic criteria for predicting the actual state of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics = Gornoe oborudovanie i jelectromehnika*. 2024; 3:33–41. (rus)
6. Balducci F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014*. 2014. Düsseldorf, Germany. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/>. (eng)
7. Sundukov A.E., Shahmatov E.V. Subharmonics of tooth frequency in vibration diagnostics of wear of gearbox teeth of gas turbine engine. *Dinamika i vibroakustika = Dynamics and vibroacoustics*. 2022; 8(2):6–11. (rus)
8. Trebuna F., Šimcak F., Bocko J., Hunady R., Pastor M. «Complex approach to the vibrodiagnostic analysis of excessive vibration of the exhaust fan», *Engineering Failure Analysis* 37 (2014). Pp. 86–95. (eng)
9. Gertsbakh I. Teorija nadezhnosti s prilozhenijami k profilakticheskomu obsluzhivaniju [Reliability theory with applications for preventive maintenance]. Publishing house "Oil and Gas" Russian State University of Oil and Gas named after I.M Gubkin, 2003. 263 p. (rus)
10. 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*. 2018; 2053:040090. DOI: 10.1063/1.5084528. (eng)
11. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [The practical vibration analysis and monitoring of mechanical equipment] Moscow, 1996. 276 p. (rus)
12. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: Handbook]. St. Petersburg, 2004. 156 p. (rus)
13. 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. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.02.051. (eng)
14. Ghasemloonia A., Rideout D.G., Butt S.D. Vibration Analysis of a Drillstring in Vibration-Assisted Rotary Drilling: Finite Element Modeling With Analytical Validation. *Journal of Energy Resources Technology*. 2013; 135:032902-1. (eng)

15. Desjatnikov V.E., Pichkov S.N. Features of diagnostics of rolling bearings using the envelope method. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2023; 26(9(303)):58–64. (rus)

16. Nasonov D.A., Puzakina A.K. The influence of the choice of control points in vibration diagnostics of bearing units of electric motors. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical engineering and engineering education*. 2023; 4(73):26–30. (rus)

17. Wrzochal M. New method of metrological evaluation of industrial rolling bearing vibration measurement systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023; 124:587–600. DOI: 10.1007/s00170-022-10359-0. (eng)

18. Hemati Ali, Shoostari Alireza Bearing failure analysis using vibration analysis and natural frequency excitation. *Journal of failure analysis and prevention*. 2023; 4:1431–1437. DOI: 10.1007/s11668-023-01700-0. (eng)

19. Kumar R., Anand R.S. Statistical Analysis of Vibration Signal Frequency During Inner Race Fault of Rolling Ball Bearings. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2023; 5:2260–2274. DOI: 10.1007/s11668-023-01760-2. (eng)

20. Xu Hong-yang, Zhao Xiang, Ma Hui, Luo Zhong, Han Qing-kai, Wen Bang-chun. Vibration analysis of a gear-rotor-bearing system with outer-ring spalling and misalignment. *J. Cent. South Univ*. 2024; 31:511–525. DOI: 10.1007/s11771-024-5576-9. (eng)

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

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, Vesennyya street 28, Kemerovo, 650026, Russian Federation e-mail: gbl_42@mail.ru

Contribution of the authors:

Pavel B. Gericke – formulation of the research task; review of relevant literature; formation of the structure of the main tasks; collection of factual and statistical information at the enterprise; analytical calculations; formulation of the conclusion.

Boris L. Gericke – formulation of the research task; review of relevant literature; formation of the structure of the main tasks; collection of factual and statistical information at the enterprise; analytical calculations; formulation of the conclusion.

Authors have read and approved the final manuscript.

