

# Моделирование деградации фактического состояния подшипников на основе использования единого диагностического критерия

П.Б. Герике<sup>1</sup>✉, Б.Л. Герике<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация  
✉ am\_besten@mail.ru

**Резюме:** Актуальность. В данной статье без претензий на полноту освещения приведены некоторые результаты моделирования процессов деградации технического состояния подшипников качения на энерго-механическом оборудовании горных машин. Результаты комплексной диагностики горного оборудования по параметрам вибрации позволили предложить новый подход к моделированию процессов изменения фактического состояния горной техники.

**Цель.** Выполнить среднесрочное прогнозирование процессов развития дефектов подшипников качения, установленных на энерго-механическом оборудовании горных машин. Показать эффективность нового единого диагностического критерия при использовании его в качестве моделируемого параметра адаптивной деградационной математической модели. **Методы исследования.** В настоящей работе применялись результаты комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей спектра и эксцесс. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного набора диагностических признаков и правил выявления дефектов в области анализа параметров механических колебаний применительно к решению задачи по созданию единого диагностического критерия оценки технического состояния подшипников качения.

**Результаты.** Полученные научные результаты доказывают принципиальную эффективность предложенного решения задачи, связанной с проблематикой комплексного подхода к анализу параметров вибрации горного оборудования и моделированием процессов изменения фактического технического состояния энерго-механического оборудования горных машин с использованием нового единого критерия для диагностики подшипников качения. Результаты работы могут найти свое применение при создании базовых элементов стратегии обслуживания горных машин по их фактическому состоянию, что позволит минимизировать непроизводительные простои парка горной техники и повысить общий уровень безопасности при проведении открытых горных работ за счет уменьшения количества технических устройств, находящихся в недопустимом техническом состоянии.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, подшипники качения, карьерные экскаваторы, единый диагностический критерий, управление техническим обслуживанием, механические дефекты, прогнозное моделирование

**Благодарности:** 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. Моделирование деградации фактического состояния подшипников на основе использования единого диагностического критерия. *Горная промышленность*. 2023;(S2):32–36. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-32-36>

## Modeling degradation of the actual state of rolling bearings based on a unified diagnostic criterion

P.B. Gerike<sup>1</sup>✉, B.L. Gerike<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation  
✉ am\_besten@mail.ru

**Abstract:** Background. Without any claims for comprehensive coverage, this article presents some results of modeling technical degradation of the rolling bearings used in the power and mechanical components of mining machines. The results of comprehensive diagnostics of mining equipment based on vibration parameters made it possible to propose a new approach to modeling the processes of changing the actual state of mining machines.

*Objective.* The research aims at performing mid-term forecasting of defect development in the rolling bearings installed in the power and mechanical components of mining machines as well as at demonstrating the efficiency of the new unified diagnostic criterion when it is used as a simulated parameter in an adaptive mathematical model of degradation.

*Research methods.* Results of a complex diagnostic approach to analyzing vibration parameters were applied in the this research, including the spectral analysis in the extended frequency and dynamic range, spectrum envelope and kurtosis analysis. The results obtained confirm the efficiency of the proposed set of diagnostic features and defect detection rules in analyzing mechanical vibration parameters as applied to the task of creating a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of rolling bearings.

*Results.* The obtained research results prove the fundamental efficiency of the proposed solution to the challenges concerned with comprehensive approach to analyzing the vibration parameters of mining equipment and modeling the processes of changes in the actual technical condition of the power and mechanical components of mining machines using a new unified criterion for diagnostics of rolling bearings. The research results can be applied in designing the core elements in the maintenance strategy for mining machines according to their actual condition, which will minimize unproductive downtime of the mining fleet and increase the overall level of safety in surface mining operations by reducing the number of equipment which technical condition is unacceptable.

**Keywords:** vibration analysis, rolling bearings, mining shovels, single diagnostic criterion, maintenance management, mechanical defects, predictive modeling

**Acknowledgments:** The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0002 'Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating without permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction' (Reg. No. AAAA-A21-121012290021-1).

**For citation:** Gerike P.B., Gerike B.L. Modeling degradation of the actual state of rolling bearings based on a unified diagnostic criterion. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):32–36. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-32-36>

## Введение

Совершенствованию существующих методологических подходов к анализу параметров вибрации и созданию новых единых диагностических критериев (ЕДК) для оценки фактического состояния горных машин был посвящен научный проект РФФИ и Кемеровской области №20-48-420010, выполненный учеными и специалистами ФИЦ УУХ СО РАН и Кузбасского государственного технического университета в 2020–2022 гг. Основная идея данной работы заключалась в том, что новые критерии оценки вибрации смогут заменить собой большое количество диагностических признаков, правил и методологических подходов, таким образом, получится снизить требования к квалификации специалистов по неразрушающему контролю и диагностике, а также минимизировать количество ошибок при анализе вибрации, уменьшив влияние человеческого фактора на результаты виброконтроля, при одновременном снижении затрат времени и труда на обработку и анализ диагностических данных. Для разработки единых критериев использовался метод оптимальной скаляризации результатов эксперимента, позволяющий обобщить разнородные данные наблюдений и рассчитать на их основе новый единый диагностический критерий [1–3]. Выборка диагностических данных насчитывала двадцать пять единиц электрических карьерных экскаваторов, наблюдение и сбор диагностической информации по параметрам вибрации на данном технологическом оборудовании осуществлялись на протяжении трех лет. Для фильтрации исходных диагностических данных от ошибок, искажений и случайного шума применялся алгоритм поиска грубых погрешностей, а для исключения из расчетов неинформативных составляющих вибрации, появление которых вызвано причинами иной природы, по сравнению с рассматриваемой, использовался принцип клипирования результатов эксперимента [2; 4; 5]. В результате выполненных работ удалось создать и апробировать восемь

единых диагностических критериев, по одному для диагностики наиболее распространенных на горном оборудовании групп дефектов – расцентровки валов агрегатов, дисбаланса, нарушения жесткости системы, дефектов подшипников и соединительных муфт, дефектов зубчатых передач в составе редукторов, повреждений поршневых компрессоров и дефектов электрической природы. Полученные результаты были использованы для построения кратко- и среднесрочного прогноза деградации фактического состояния горной техники, для чего применялись методы математической статистики и адаптивного математического моделирования.

В рамках настоящей статьи без претензий на полноту освещения приведены некоторые основные результаты работы по созданию и апробации нового единого критерия для диагностики подшипников качения, используемых в конструкции энерго-механического оборудования горных машин. Каждый разрабатываемый единый диагностический критерий основан на использовании своего уникального набора диагностических характеристик, выбор и обоснование которого проводились с учетом специфики условий эксплуатации горной техники и существующих ограничений на область применения ряда методов вибродиагностики. Принципиальной отличительной особенностью создаваемого в рамках настоящей работы диагностического критерия является распределенный подход к оценке и выбору характеристик для описания предельного состояния подшипников качения, используемых при разработке ЕДК, в то время как большинство существующих единых критериев для диагностики подшипников имеют в своей основе не более трех базовых параметров, оставляя при этом за рамками исследований значительную часть диагностической информации, полученную с использованием комплексного подхода к анализу параметров вибрации [2; 6–8].

**Результаты и их применение**

В рамках проведенных исследований из всего существующего на сегодняшний день набора диагностических методологий и признаков выявления дефектов по результатам анализа вибрации были выбраны несколько основных показателей, применение на практике которых наилучшим образом зарекомендовало себя при осуществлении контроля по параметрам механических колебаний подшипников качения, установленных на энерго-механическом оборудовании горных машин. В частности, использовались такие параметры, как анализ уровня синхронных составляющих, вычисленный по спектру виброскорости, нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения, мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей, и высокочастотный эксцесс. Было доказано, что сочетание именно этих диагностических признаков является наиболее эффективным с точки зрения практического виброанализа с учетом специфики условий эксплуатации и особенностей конструкции диагностируемого горного оборудования.

В одной лишь области спектрального анализа дефектам подшипников качения соответствует более тридцати базовых диагностических признаков, все они были классифицированы по степени опасности и характеру соответствующих им механических повреждений, и после осуществления их формализации были реализованы в алгоритме создания единого диагностического критерия, разработанного с учетом специфики условий эксплуатации и конструктивных особенностей энерго-механического оборудования горной техники.

При создании единого диагностического критерия для подшипников качения решалась задача реализации многомерного пространства разнородных диагностических признаков и правил выявления дефектов различными методами виброанализа с применением алгоритмов «оптимальной» скаляризации [9; 10], что, в конечном итоге, позволило решить задачу поиска новой эффективной оценки степени развития деградиационных процессов, сопровождающих изменение фактического состояния подшипников горных машин. При этом использовался принцип пошаговой сегментации диагностических данных обследованных подшипников на несколько отдельных групп,

в зависимости от степени развития их механических повреждений.

В рамках выполнения настоящей работы была создана база данных, содержащая более 40 000 записей результатов комплексного анализа параметров вибрации оборудования горной техники (рис. 1).

Из-за специфики применяемой сегодня на предприятиях угольной промышленности Кузбасса схемы технического обслуживания эксплуатируемой техники, сочетающей принципы планово-предупредительных ремонтов с элементами аварийного обслуживания, построение долгосрочных прогнозов изменения технического состояния горных машин не будет востребовано, т.к. диагностируемые элементы энерго-механического оборудования горных машин (в данном случае, подшипники качения) будут обслуживаться или заменяться раньше, чем наступит прогнозируемый при реализации долгосрочных математических моделей срок эксплуатации подшипника. Именно поэтому для заданных условий наиболее эффективным будет использование кратко- и среднесрочных деградиационных моделей, позволяющих осуществить поиск ответа на наиболее актуальный для системы плановых ремонтов вопрос, сможет ли горное оборудование проработать до момента наступления ближайшего ремонта или же нет?

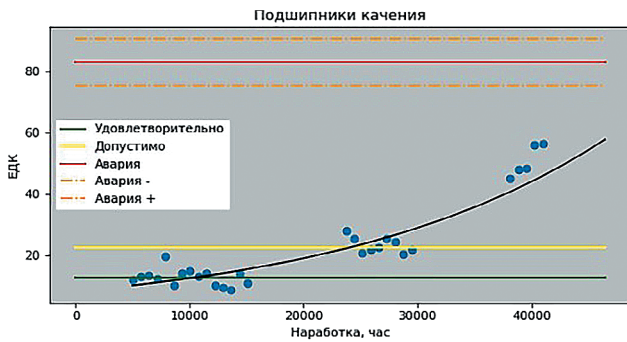
Главными минусами существующих математических прогнозных моделей, использующих данные анализа механических колебаний, являются узкая область применения результатов моделирования и использование в качестве моделируемых параметров малоинформативного набора диагностических признаков, обычно ограниченно самыми банальными критериями, вроде величины общего уровня вибрации или амплитуд отдельных значащих гармоник спектра в стандартной полосе частот [2; 8; 11–13]. Отличие настоящей работы заключается в том, что здесь впервые был применен предложенный принцип реализации новых единых диагностических критериев в качестве параметров адаптивной математической модели, использующей данные нескольких предыдущих измерений вибрации (6 измерений для прогноза на период 30 календарных дней), что позволяет адаптировать параметры модели к изменению наиболее свежей поступающей диагностической информации и использовать на все 100% преимущества ЕДК, основанные на результатах комплексного подхода к анализу параметров механических колебаний подшипников.

Одним из необходимых этапов реализации алгоритма создания ЕДК стала процедура фильтрации, необходимая для исключения из дальнейших расчетов диагностической информации, содержащей ошибки, вызванные выбросами исходных данных [14; 15]. В рамках настоящей работы для решения этой проблемы использовалась методика поиска грубых погрешностей в ограниченном наборе экспериментально полученных данных, основанная на реализации принципов математической статистики для осуществления анализа и исключения из выборки априори недостоверной диагностической информации.

station	unit	point	ve_skz	fp	2fp	3fp	4fp	
7	ЭКГ SA № 10502	сетевой двигатель	1В	1,43	0,53	0,84	0,57	0,11
8	ЭКГ SA № 10502	сетевой двигатель	1Г	3,13	1,47	2,23	0,95	0,25
9	ЭКГ SA № 10502	сетевой двигатель	1О	2,12	0,68	1,7	0,4	0,25
10	ЭКГ SA № 10502	сетевой двигатель	2В	1,13	0,25	0,64	0,53	0,07
11	ЭКГ SA № 10502	сетевой двигатель	2Г	4,66	2,03	3,49	1,7	0,32
12	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1В	1,14	0,34	0,58	0,41	0,16
13	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1Г	1,93	1,36	0,74	0,54	0,48
14	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1О	1,54	0,61	0,48	0,27	0,32
15	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	2В	1,25	0,17	0,81	0,47	0,14
16	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	2Г	1,75	1,25	0,64	0,33	0,46
17	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	2О	1,56	0,5	0,58	0,34	0,37
18	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1В	1,59	0,38	0,8	0,93	0,13
19	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1Г	3,42	2,14	2,37	0,41	0,69
20	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	1О	2,58	1,2	1,34	0,19	0,8
21	ЭКГ SA № 10482	сетевой двигатель	2В	1,45	0,16	0,29	1,01	0,18

**Рис. 1**  
Фрагмент листинга базы данных

**Fig. 1**  
A sample of the database listing



**Рис. 2**  
Пример среднесрочного прогнозирования деградации фактического состояния подшипника генератора напора экскаватора ЭКГ-5А

**Fig. 2**  
Example of medium-term forecasting of the actual condition degradation for the bearing used in the thrust generator of the EKG-5A Power Shovel

Очевидно, что при увеличении объема выборки диагностических данных необходимо будет менять подход к фильтрации некорректных данных. В рамках проведения дальнейших исследований для решения этой задачи планируется использование алгоритмов машинного обучения (в частности, локального алгоритма выбросов данных, алгоритма изоляционного леса, алгоритма кластеризации на основе выборочной плотности, метода K-средних). Обоснование применения и выбор оптимального алгоритма машинного обучения будет производиться на этапе анализа дополнительных комплексных диагностических данных, которые в перспективе будут получены при дальнейшем развитии настоящей тематики научных исследований в рамках анализа параметров вибронегруженности динамического оборудования горных машин.

По результатам выполненных работ коллективом авторов в настоящее время подготавливается заявка на патентование предложенного способа неразрушающего контроля с применением разработанных единых диагностических критериев, пригодных для выявления всех основных дефектов динамического оборудования горных машин.

В результате выполненных расчетов были получены величины единых критериев для диагностики подшипников, установленных на выборке энерго-механического оборудования из двадцати пяти электрических карьерных экскаваторов. Разработанные ЕДК были использованы в качестве моделируемых параметров предложенной адаптивной

деградационной модели. Расчеты показали высокую достоверность результатов прогнозирования деградации фактического состояния подшипников (рис. 2), результаты прогнозирования полностью подтвердились в рамках визуального контроля, осуществленного при проведении годового ремонта энерго-механического оборудования карьерного экскаватора. Все диагностируемое оборудование с оценкой прогноза технического состояния «допустимо» и «удовлетворительно» безаварийно отработало весь срок прогнозирования.

Таким образом, полученные в рамках настоящего исследования научные результаты позволяют заключить, что применение нового единого критерия для диагностики подшипников качения позволяет производить эффективную оценку фактического состояния подшипников качения на энерго-механическом оборудовании горной техники.

### Заключение

Использование нового критерия в качестве одного из моделируемых параметров деградационной модели позволило решить задачу краткосрочного (до семи дней) и среднесрочного (до 30 календарных дней) прогнозирования, что полностью перекрывает потребности системы планово-предупредительных ремонтов в области прогнозирования технического состояния эксплуатируемых горных машин. На практике реализация полученных научных результатов будет означать появление окна возможностей для совершенствования существующей системы управления ремонтами горного оборудования, снижения аварийности и непроизводительных простоев эксплуатируемой техники, появления дополнительных возможностей для оптимизации логистики и складского хозяйства угольных предприятий, снижения требований к квалификации специалистов по неразрушающему контролю. Все это позволит поднять общий уровень безопасности при проведении открытых горных работ за счет сведения к минимуму рисков возникновения несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием горных машин. Эффективная оценка технического состояния горной техники и решение задачи по прогнозированию развития деградационных процессов на энерго-механическом оборудовании горных машин позволит создать все необходимые предпосылки для перехода угольной отрасли на качественно более совершенную систему управления техническим обслуживанием эксплуатируемой техники и повысить безопасность открытых горных работ.

### Список литературы

1. Клюев В.В. (ред.) *Неразрушающий контроль. Справочник*. М.: Машиностроение; 2005. Т. 7. 828 с.
2. Сушко А.Е. *Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дисс. ... канд. техн. наук*. М.; 2007. 170 с.
3. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. In: Timofiejczuk A., Chaari F., Zimroz R., Bartelmus W., Haddar M. (eds) *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations*. CMMNO 2016. Springer; 2018. Vol. 9, pp. 91–101. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9)
4. Клишин В.И., Герике П.Б., Герике Б.Л. Инструмент и рабочие органы для выемки прочных полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S60-1):143–150. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/hdjfzj>
5. Balducci F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 7B: Structures and Dynamics, Düsseldorf, Germany, June 16–20, 2014*. ASME; 2014. V07BT32A009. <https://doi.org/10.1115/GT2014-25552>
6. Puchalski A. A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;56-57:173–180. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.007>
7. Trebuna F., Šimčák 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. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.11.015>
8. Герике П.Б., Герике Б.Л., Шахманов В.Н. Динамическая диагностика машинных агрегатов горного оборудования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S5):80–89. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/onbvwn>

9. Герцбах И. *Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию*. [Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева]. М.: Нефть и газ; 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. <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
11. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования*. М.: Наука; 1996. 276 с.
12. Барков А.В., Баркова Н.А. *Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации*. СПб.: 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. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;126:662–685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.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;135(3):032902. <https://doi.org/10.1115/1.4023333>
15. Герике Б.Л., Герике П.Б. Обсуждение результатов промышленной апробации и направлений дальнейших исследований машин для послойного фрезерования. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2006;(1):48–51. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/kxgqmh>

### References

1. Klyuev V.V. (ed.). *Non-destructive testing. Handbook*. Moscow: Mashinostroenie; 2005. Vol. 7. 828 p. (In Russ.)
2. Sushko A.E. *Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems*. [PhD thesis excerpt]. Moscow; 2007. 170 p. (In Russ.)
3. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. In: Timofiejczuk A., Chaari F., Zimroz R., Bartelmus W., Haddar M. (eds) *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations. CMMNO 2016*. Springer; 2018. Vol. 9, pp. 91–101. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9)
4. Klishin V.I., Gerike P.B., Gerike B.L. Tools and end effectors for mining of hard minerals. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S60-1):143–150. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/hdjfzf>
5. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 7B: Structures and Dynamics, Düsseldorf, Germany, June 16–20, 2014*. ASME; 2014. V07BT32A009. <https://doi.org/10.1115/GT2014-25552>
6. Puchalski A. A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;56-57:173–180. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.007>
7. Trebuna F., Šimčák 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. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.11.015>
8. Gerike P.B., Gerike B.L., Shakhmanov V.N. Dynamic diagnostics of mechanical assemblies of mining equipment. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S5):80–89. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/onbvwn>
9. Gertsbakh I. *Reliability theory with applications to preventive maintenance*. Springer; 2000. 219 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04236-6>
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. <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
11. Shirman A.R., Soloviev A.B. *The practical vibration analysis and monitoring of mechanical equipment*. Moscow: Nauka; 1996. 276 p. (In Russ.)
12. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis*. St. Petersburg: SMTU; 2004. 156 p. (In Russ.)
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. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.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;135(3):032902. <https://doi.org/10.1115/1.4023333>
15. Gerike B.L., Gerike P.B. Discussion of industrial validation results and directions of further research into layer-wise mining cutters. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006;(1):48–51. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/kxgqmh>

### Информация об авторах

**Герике Павел Борисович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории угольного машиностроения, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2085-6108>; e-mail: am\_besten@mail.ru

**Герике Борис Львович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры горных машин и комплексов, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9586-8723>; e-mail: gbl\_42@mail.ru

### Information about the authors

**Pavel B. Gerike** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Research Associate, Coal Engineering Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2085-6108>; e-mail: am\_besten@mail.ru

**Boris L. Gerike** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Associate, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9586-8723>; e-mail: gbl\_42@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.07.2023

Поступила после рецензирования: 14.08.2023

Принята к публикации: 14.08.2023

### Article info

Received: 19.07.2023

Revised: 14.08.2023

Accepted: 14.08.2023