

**Герике Павел Борисович**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, **Герике Борис Львович**<sup>1,2,3</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, 650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>3</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск, 653039, Россия, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а.

E-mail: am\_besten@mail.ru

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Аннотация:** в рамках решения задачи по обеспечению безопасной эксплуатации предельно изношенного оборудования карьерных экскаваторов была осуществлена разработка методики создания единого диагностического критерия для диагностики подшипников качения и соединительных муфт. Для формирования единого критерия использованы четыре единичных показателя – общий уровень несинхронных подшипниковых составляющих, вычисленный по спектру виброскорости, нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения, мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей, и высокочастотный эксцесс, – характеризующие техническое состояние анализируемых узлов. Разрабатываемые критерии позволят снизить требования к квалификации специалистов по вибродиагностике, уменьшат трудоемкость анализа вибрации и минимизировать вероятность возникновения ошибок I и II рода.

**Цель работы:** Разработка и обоснование методологии создания единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки и прогнозирования процессов деградации технического состояния горных машин.

**Методы исследования:** В настоящей статье был использован методический подход оптимальной скаляризации результатов вибродиагностического обследования, предложенный Р. Фишером и развитый И. Герцбахом.

**Результаты:** Полученные научные результаты позволяют создать методику разработки единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки фактического состояния объектов контроля и построения краткосрочного прогноза его изменения. Результаты апробации критериев убедительно свидетельствуют о правильности выбранного подхода для диагностики уникальных сложных технических систем, к которым относится энергомеханическое оборудование карьерных экскаваторов.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, карьерные экскаваторы, механические дефекты, методика диагностирования, прогнозное моделирование, единый критерий.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420010\21**

**Информация о статье:** принята 09 марта 2021 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-17-22

**Постановка задачи.** Отсутствие нормативов на допустимые значения диагностических критериев и необходимость их комплексного использования затрудняют формализацию процедуры диагностики, при этом возникает дополнительная сложность, связанная с влиянием человеческого фактора, а именно с квалификацией оператора-диагноста. Ключевыми факторами, определяющими достоверность анализа, служат накопленный опыт и знания специалиста, производящего диагностику. Особенности работы отдельных групп сложных технических систем, к которым относится энергомеханическое оборудование экскаваторов, не позволяют перенести этот опыт

на другие объекты, поэтому возникает необходимость создания единого обобщенного критерия оценки технического состояния диагностируемой системы.

Различные оценки состояния подшипников качения, рассмотренные в работах [1-8], позволяют выделить в качестве основных четыре критерия оценки их состояния по параметрам вибрации:

- общий уровень несинхронных подшипниковых составляющих, вычисленный по спектру виброскорости;
- нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения;

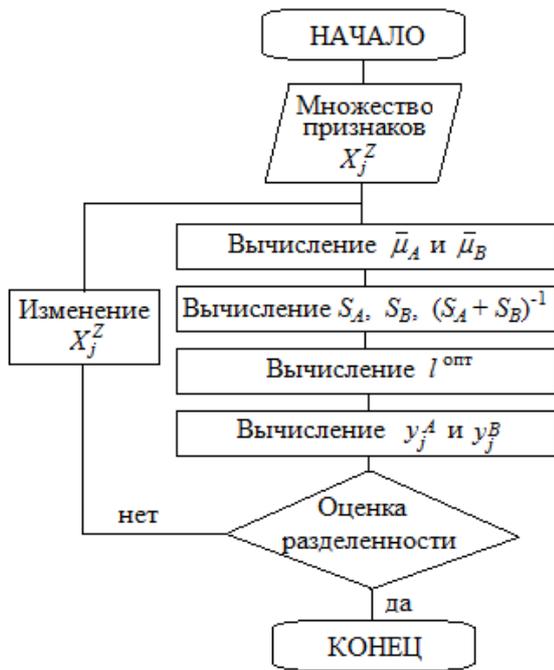


Рис. 1. Алгоритм формирования единого диагностического критерия  
 Fig. 1. Algorithm for the formation of a single diagnostic criterion

– мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей;

– высокочастотный эксцесс.

Разработка метода исследования

Один из наиболее эффективных подходов при формировании обобщенного критерия, т.е. при замене вектора диагностических признаков скалярной величиной – «оптимальная» скаляризация, предложенный Фишером [9] и развитый в трудах Герцбаха [10, 11].

Рассмотрим этот подход более подробно. Пусть существуют две группы объектов: А – «после монтажа» (в хорошем состоянии) и В – «предаварийные» (в крайне неудовлетворительном состоянии). Объекты каждой из групп характеризуются выборками  $X_1^A, \dots, X_{NA}^A$  и  $X_1^B, \dots, X_{NB}^B$ , соответственно, где  $NA$  – количество объектов в группе А, а  $NB$  – количество объектов в группе В. Каждый вектор в выборке  $X_j^Z$  ( $j = 1 \dots NZ$ ,  $Z = A, B$ ) является  $n$ -мерным  $X_j^Z = (X_{j1}^Z, \dots, X_{jn}^Z)$ , где  $X_{ji}^Z$  –  $i$ -ый ( $i=1 \dots n$ ) диагностический критерий  $j$ -го объекта. Идея формирования «наилучшей» скаляризации базируется на замене вектора  $X_j^Z$  скаляром

$$r_j^z = \sum_i^n l_i X_{ji}^z, \quad (1)$$

где коэффициенты выбираются некоторым «оптимальным образом» [8].

Наиболее наглядно процедуру определения «наилучшей» скаляризации можно представить, используя геометрическую интерпретацию. Замена вектора диагностических критериев  $X_j^Z$  скаляром  $r_j^z$  по формуле (1) эквивалентна проектированию каждого вектора  $X_j^Z$  на некоторую прямую с направляющим вектором  $l = (l_1, \dots, l_n)$ .

Фишер предложил выбирать направление  $l$  таким образом, чтобы отношение квадратов разностей, спроектированных на  $l$  средних значений, к сумме дисперсий спроектированных выборок было максимальным [7]. Предположим, что каждый вектор наблюдений заменен его проекцией на направление  $l$

$$y_j^z = l_1 X_{j1}^z + \dots + l_n X_{jn}^z. \quad (2)$$

В этом случае среднее значение спроектированной выборки равно

$$\bar{y}^z = \sum_j^{NZ} \sum_k^n l_k \frac{X_{jk}^z}{N_z} = l \bar{\mu}. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{\mu}$  – математическое ожидание. По формуле (3) могут быть рассчитаны математические ожидания для каждой группы векторов (А и В).

$$\bar{\mu}_A^i = \sum_m^{NA} \frac{X_{mi}^A}{N_A}; \quad \bar{\mu}_B^i = \sum_m^{NB} \frac{X_{mi}^B}{N_B}. \quad (4)$$

Дисперсия проекций обеих выборок

$$D = ll^T \left[ \sum_{A,B} (N_z)^{-1} \sum_j^{NZ} (X_j^z - \bar{\mu}_z)(X_j^z - \bar{\mu}_z)^T \right] = ll^T (S_A + S_B). \quad (5)$$

Здесь  $S_A$  и  $S_B$  – суть оценки ковариационных матриц для групп А и В, знак  $T$  относится к транспонированной матрице

$$S_Z = \|V_{ij}^Z\|, \quad V_{ij}^Z = N_Z^{-1} \sum_m (X_{mj}^Z - \bar{\mu}_z^i)(X_{mj}^Z - \bar{\mu}_z^j), \quad i, j = 1 \dots n, \quad Z = A, B \quad (6)$$

Таким образом, оптимальный вектор Фишера  $l$  максимизирует следующее выражение:

$$D_{\text{opt}} = \frac{ll(\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_B)^2}{ll^T(S_A + S_B)}. \quad (7)$$

Для квадратных матриц, определитель которых отличен от нуля,

$$l_{\text{opt}}^T = \frac{\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_B}{S_A + S_B}. \quad (8)$$

Для того, чтобы определить, достаточно ли четко разделены группы А и В, может быть использован следующий полуматричный критерий [8]

$$|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2,5(S_A - S_B). \quad (9)$$

Алгоритм формирования обобщенного критерия  
 Для формирования единого диагностического критерия по множеству имеющихся диагностических признаков предлагается следующий алгоритм (рис. 1).

На основании полученного множества диагностических признаков для двух групп объектов (А – в хорошем состоянии и В – в неудовлетворительном состоянии)  $X_1^A, \dots, X_{NA}^A$  и  $X_1^B, \dots, X_{NB}^B$  последовательно по формуле (3) рассчитываются соответственно математические ожидания  $\bar{\mu}_A$  и  $\bar{\mu}_B$ , ковариационные матрицы  $S_A$  и  $S_B$ , матрица обратная их сумме  $(S_A + S_B)^{-1}$  и оптимальный вектор Фишера  $l$ .

На основании этих данных по формуле (2) вычисляются одномерные выборки единых диагностических критериев  $y_j^A, y_j^B$ . Для оценки «разделяемости» групп А и В используется неравенство (9). Если неравенство справедливо, то признаки таковы, что группы А и В достаточно разделены, если нет, то

Таблица 1. Результаты вибрационной диагностики подшипников  
Table 1. Results of vibration diagnostics of bearings

№ п/п	Место измерения			Результаты виброобследования				Результаты дефектовки
	Агрегат	Точка Направление	Частота вращения	Спектр V	Спектр a	Спектр огибающей	Экссесс	
1	Агрегат 1	3 Рад	750	0,41	0,45	20,9	11,79	Предельное
2		4 Рад	-	0,38	0,25	14,1	3,06	Норма
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	4,68	11,33	44,4	5,46	Норма
4		3 Рад	-	0,47	1,49	13,7	3,18	Норма
5		4 Рад	-	0,53	4,57	15,5	3,25	Норма
6	Агрегат 4	2 Рад	1000	0,97	10	119,5	18,49	Авария
7		3 Рад	-	1,95	2,78	23,1	6,08	Норма
7		4 Рад	-	2,43	4,81	25,0	3,48	Предельное
7	Агрегат 6	2 Рад	750	0,69	6,19	11,4	3,70	Предельное
10		3 Рад	-	0,44	0,97	13,2	3,08	Норма
11		4 Рад	-	0,55	0,33	55,1	3,00	Предельное
12	Агрегат 9	3 Рад	1000	5,33	2,77	17,2	5,48	Норма
13		4 Рад	-	2,91	5,57	10,8	6,27	Норма
14	Агрегат 12	1 Рад	1000	0,86	9,10	16,1	4,08	Предельное
15		2 Рад	-	0,67	4,70	17,2	3,19	Предельное
16		3 Рад	-	1,04	1,56	12,0	4,96	Норма
17		4 Рад	-	0,48	1,49	24,9	3,04	Норма
18	Агрегат 13	1 Рад	1000	1,07	42,88	52,8	3,94	Авария
19		2 Рад	-	0,54	15,20	14,9	3,32	Предельное
20		3 Рад	-	0,69	2,92	4,9	3,05	Предельное
21		4 Рад	-	0,93	3,85	4,6	3,00	Норма
22	Агрегат 14	1 Рад	1000	1,12	7,64	30,0	4,24	Предельное
23		2 Рад	-	0,60	21,88	22,5	3,59	Предельное
24		3 Рад	-	0,69	3,60	23,1	3,09	Норма
25		4 Рад	-	1,04	4,38	13,0	6,00	Авария
26	Агрегат 16	1 Рад	1500	1,05	6,43	10,3	3,1	Норма
27		2 Рад	-	1,43	40,97	7,01	3,29	Предельное
28		3 Рад	-	8,05	125,67	48,2	9,06	Авария
29		4 Рад	-	5,8	65,98	27,7	6,12	Авария

необходимо изменить множества диагностических признаков.

В таблице 1 приведены результаты проведенных виброизмерений 29 подшипников различных агрегатов, входящих в механическое оборудование карьерных экскаваторов (лебедки подъема и напора, механизм поворота, преобразовательный агрегат, компрессоры) и результаты дефектации подшипников методом визуального контроля.

Вычислим коэффициенты «оптимальной» скаляризации и значения единых диагностических критериев для каждого из подшипников. Для этого из числа обследованных подшипников были выбраны 4 хороших (группа А) и 4 аварийных (группа В).

Выборки  $X_1^A, \dots, X_4^A$  и  $X_1^B, \dots, X_4^B$  характеризуют состояние подшипников каждой из групп.

Тогда для групп А и В матрицы диагностических критериев можно представить в виде

$$X_{ij}^A = \begin{pmatrix} 0,38 & 0,25 & 14,1 & 3,06 \\ 0,47 & 1,49 & 13,7 & 3,18 \\ 0,44 & 0,97 & 13,2 & 3,08 \\ 0,48 & 1,49 & 24,9 & 3,04 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad X_{ij}^B = \begin{pmatrix} 0,97 & 10,00 & 119,5 & 18,49 \\ 1,07 & 42,88 & 52,8 & 3,94 \\ 1,04 & 4,38 & 13,0 & 6,00 \\ 5,80 & 5,98 & 27,7 & 6,12 \end{pmatrix}.$$

По одномерным выборкам  $\bar{y}_A$  и  $\bar{y}_B$  необходимо проверить разделенность выделенных групп А и В, для чего воспользуемся критерием  $|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2,5(S_A - S_B) = \frac{|\bar{y}_A - \bar{y}_B|}{S_A - S_B} = 3,21 > 2,5$ ,

что свидетельствует о достоверности полученного результата.

Еще одним объектом, для которого был разработан единый критерий, являются зубчатые муфты, получившие широкое распространение в конструкции карьерных экскаваторов. Достоинства зубчатых муфт заключаются в том, что они обладают высокой нагрузочной способностью и могут компенсировать любую несоосность. К их недостаткам можно отнести большие габариты и требование смазки.



Рис. 2. Выявленный дефект подшипника качения  
Fig. 2. Identified defect rolling bearing



Рис. 3. Выявленный дефект зубчатой полумуфты  
Fig. 3. Identified defect toothed coupling half

Поскольку при диагностике зубчатых муфт контролируются те же параметры, что и при диагностике подшипников качения (уровень синхронных составляющих, вычисленный по спектру виброскорости, нормированный отфильтрованный общий уровень виброускорения, мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей и высокочастотный эксцесс), используем тот же подход, что и при диагностике подшипников качения.

После того, как было сформировано две группы соединительных муфт, находящихся заведомо в аварийном и хорошем состоянии соответственно, на следующем этапе было осуществлено вычисление коэффициентов «оптимальной» скаляризации и значений единых диагностических критериев для каждой из соединительных муфт.

Искомые векторы  $\bar{\mu}_A$  и  $\bar{\mu}_B$  будут иметь следующие значения  $\bar{\mu}_A = (4,55; 1,76; 11,76; 7,41)$  и  $\bar{\mu}_B = (12,34; 3,91; 19,21; 8,17)$ , а ковариационные матрицы –

$$S_A = \begin{pmatrix} 0,0016 & 0,0054 & -0,0013 & 0,0257 \\ 0,0039 & -0,226 & -0,0123 & -0,2177 \\ -0,0001 & -0,2123 & 0,1761 & 0,0743 \\ 0,0251 & -0,1367 & 0,0923 & 0,3766 \end{pmatrix}$$

и

$$S_B = \begin{pmatrix} 14,3 & 32,3 & -37,6 & -5,4 \\ 32,3 & 518,4 & -404,1 & -79,1 \\ -23,6 & -167,7 & 975,5 & 114,3 \\ -7,2 & -52,1 & 178,3 & 29,1 \end{pmatrix}.$$

По одномерным выборкам  $\bar{y}_A$  и  $\bar{y}_B$  необходимо проверить разделенность выделенных групп А и В, для чего воспользуемся критерием

$$|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2,5(S_A - S_B) = \frac{|\bar{y}_A - \bar{y}_B|}{S_A - S_B} = 4,17 > 2,5.$$

Результаты визуально-измерительного контроля дефектных подшипников качения (рисунок 2 [12]) и зубчатых полумуфт (рисунок 3 [13]), выбракованных с использованием единого диагностического

критерия, убедительно доказывают достоверность результатов диагностики.

Таким образом, можно заключить, что разработанная методика определения единого диагностического критерия для оценки технического состояния подшипников качения и соединительных муфт с использованием алгоритма ее реализации позволяет достоверно различить неисправное состояние узлов и конструктивных элементов энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов.

**Источники финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420010\21

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распознавание дефектов подшипников качения в редукторах горных машин по параметрам вибрационного сигнала./Б.Л. Герике, Ю.В. Дрозденко, П.Б. Герике, Е.Г. Кузин, А.А. Мокрушев//Горное оборудование и электромеханика. № 5, 2017. – С. 43-48.
2. Gajanand Gupta, Rajesh P Mishra, (2016). A SWOT analysis of reliability centered maintenance framework. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 2, pp.130-145.
3. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432.
4. Fedala, Semchedine. Contribution of angular measurements to intelligent gear faults diagnosis [Text] / Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2018. – Jun. – Vol. 29, no. 5. – P. 1115-1131.
5. Предложения по внедрению на предприятии концепции технического обслуживания и

ремонта горнотранспортной техники и оборудования./ И.М. Щадов, В.Ю. Конюхов, А.В. Чемезов и др.// ГИАБ – № 12. – 2015. – С. 134-143.

6. Диагностика неполадок подшипников. / NSK Motion & Control. 2009. – 42 p.

7. Wen, C.; Dong, L; Jin, X. Feature Extraction of Bearing Vibration Signals Using Second Generation Wavelet and Spline-Based Local Mean Decomposition, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), vol. 20, no. 1, pp. 56-60, (2015).

8. Singru, Pravin. Bearing failure prediction using Wigner-Ville distribution, modified Poincare mapping and fast Fourier transform [Text] / Pravin Singru, Vishnuvardhan Krishnakumar, Dwarkesh Natarajan // Journal of Vibroengineering. – 2018. – July. – Vol. 20, no. 1. – P. 127-137.

9. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. М.: Госстатиздат, 1958. – 267 с.

10. 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.

11. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford, 1977.

12. Герике Б.Л., Клишин В.И., Мокрушев А.А. Об одной оценке технического состояния опорных узлов горных машин.//ФТПРПИ, № 6. – 2019. – С. 106-114.

13. Bently D.E., Hatch C.T. «Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics», Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

**Pavel B. Gericke**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Boris L. Gericke**<sup>1,2,3</sup>, D. Sc. in Engineering, Professor

<sup>1</sup>Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation.

<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russia

<sup>3</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopievsk branch, 653039 Prokopievsk, Nogradskaya st. 19a, Prokopievsk, Russia

## CREATION OF A UNIFIED DIAGNOSTIC CRITERION FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF MINING EQUIPMENT

**Abstract:** *The urgency of the discussed issue. As part of solving the problem of ensuring the safe operation of extremely worn out equipment of mining shovels, the development of a methodology for creating uniform diagnostic criteria was carried out. The developed criteria will reduce the requirements for the qualifications of specialists in vibration diagnostics, reduce the labor intensity of vibration analysis and minimize the occurrence of errors.*

**The main aim of the study:** *Development and substantiation of a methodology for creating unified diagnostic criteria suitable for assessing and predicting the degradation processes of the technical state of mining machines.*

**The methods used in the study:** *In this work, we used the results of an integrated diagnostic approach to the analysis of vibration parameters, including spectral analysis in the extended frequency and dynamic range, analysis of the spectral envelope, excess and analysis of aggregate run-down characteristics. To create unified criteria, the approaches of optimal scalarization of diagnostic data were used.*

**The results:** *The obtained scientific results make it possible to create a methodology for the development of unified diagnostic criteria suitable for assessing the actual state of control objects and constructing a short-term forecast of its change. Criteria testing results clearly demonstrate the correctness of the chosen approach for the diagnosis of the unique complex technical systems, which include electromechanical equipment mining shovels.*

**Keywords:** *vibration analysis, mining shovels, mechanical defects, diagnostic methodology, predictive modeling, single criterion.*

**Funding:** *The reported study was funded by RFBR and Kemerovo region, project number 20-48-420010\21*

**Article info:** *received March 09, 2021*

**DOI:** *10.26730/1816-4528-2021-2-17-22*

#### REFERENCES

1. Gericke B.L., Drozdenko Yu.V., Gericke P.B., Kuzin E.G., Mokrushev A.A. Gornoe oborudovanie i jelektromehanika, №5. – Kemerovo, 2017. Pp. 43-48 (rus)
2. Gajanand Gupta, Rajesh P Mishra, (2016). A SWOT analysis of reliability centered maintenance framework. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 2, pp.130-145.
3. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432.
4. Fedala, Semchedine. Contribution of angular measurements to intelligent gear faults diagnosis [Text] / Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2018. – Jun. – Vol. 29, no. 5. – P. 1115-1131.
5. I.M. Shhadov, V.Ju. Konjuhov, A.V. Chemezov Gornyj informacionno analiticheskij bjulleten'. 2015. №12. Pp 134-143 (rus)
6. Diagnostika nepoladok podshipnikov [Diagnosis of bearing problems]. NSK Motion & Control, 2009. 42 p. (rus)
7. Wen, C.; Dong, L; Jin, X. Feature Extraction of Bearing Vibration Signals Using Second Generation Wavelet and Spline-Based Local Mean

#### Библиографическое описание статьи

Герике П.Б., Герике Б.Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 2 (154). – С. 17-22.

Decomposition, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), vol. 20, no. 1, pp. 56-60. 2015. (eng)

8. Singru, Pravin. Bearing failure prediction using Wigner-Ville distribution, modified Poincare mapping and fast Fourier transform [Text] / Pravin Singru, Vishnuvardhan Krishnakumar, Dwarkesh Natarajan // Journal of Vibroengineering. – 2018. – July. – Vol. 20, no. 1. – P. 127-137.

9. Fisher R.A. Statisticheskie metody dlja issledovatelej [Statistical Methods for Researchers]. Moscow, Gosstatizdat, 1958. 267 p. (rus)

10. 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)

11. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford, 1977. (eng)

12. Gericke B.L., Mokrushev A.A. Podzemnaja ugledobycha XXI vek-1: GIAB. 2018. №11 (special issue 48). Pp 381-386 (rus)

13. Bently D.E., Hatch C.T. «Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics», Bently Pressurized Press, 2002, P.726. (eng)

#### Reference to article

Gericke P.B., Gericke B.L. Creation of a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of mining equipment. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.2 (154), pp. 17-22.

# ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА



**2** <sub>(154)</sub> ♦ **2021**

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
**ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

12+

2(154)  
2021

Основан в 2000 году

Выходит 6 раз в год

ISSN 1816-4528

**Главный редактор:**

Хорешок А.А., д.т.н., проф.

**Зам. гл. редактора:**

Лагунова Ю.А., д.т.н., проф.

Кантович Л.И., д.т.н., проф.

**Редакционный совет:**

Трубецкой К.Н., акад. РАН, д.т.н.

Галкин В.А., д.т.н.

Мерзляков В.Г., д.т.н., проф.

Блюменштейн В.Ю., д.т.н., проф.

Аксенов В.В., акад. АГН, д.т.н.

**Редакционная коллегия:**

Андреева Л.И., д.т.н.

Воронова Э.Ю., д.т.н., проф.

Галкин В.И., д.т.н., проф.

Глебов А.В., к.т.н.

Егоров А.Н. (Белоруссия)

Жабин А.Б., д.т.н., проф.

Зырянов И.В., д.т.н.

Ляхомский А.В., д.т.н., проф.

Певзнер Л.Д., д.т.н., проф.

Петров В.Л., д.т.н., проф.

Семыкина И.Ю., д.т.н., проф.

Трифанов Г.Д., д.т.н., доц.

Хазанович Г.Ш., д.т.н., проф.

Юнгмейстер Д.А., д.т.н., проф.

**Учредитель и издатель:**

ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический  
университет имени Т.Ф. Горбачева»

**Адрес учредителя, издателя и  
редакции:**

650000, Россия, Кемеровская область,  
г. Кемерово, ул. Весенняя 28

**Технический редактор:**

Останин О.А.

**Дизайн обложки, компьютерная  
верстка:** Бородин Д.А.

**Телефон редакции:**

+7 (384-2) 39-63-14

Email: gormash@kuzstu.ru

Сайт: http://gormash.kuzstu.ru

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ГОРНЫЕ МАШИНЫ**

Горюнов С.В., Хорешок А.А. Разработка методики оценки ресурса крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов.....	3
Воронов А.Ю., Нестеров В.И., Воронов Ю.Е., Ромашко В.Г., Воронов А.Ю. Сравнительная оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов в летний и переходный периоды года.....	11
Герике П.Б., Герике Б.Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования.....	17
Громыка Д.С., Гоголинский К.В., Кремчев Э.А. Моделирование термической усталости зуба экскаватора при циклическом тепловом воздействии .....	23
Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах.....	30
Евстратов В.А., Воронова Э.Ю., Апачанов А.С., Григорьев В.И., Сухарникова В.А., Бреславцева И.В. Повышение эффективности шнековых модулей горных машин .....	42
Агапов М.Е., Потеряев И.К. Комплексный критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора .....	48
Кузин Е.Г., Пудов Е.Ю., Дубинкин Д.М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации.....	55

**ХРОНИКА**

Поздравление с юбилеем Леонида Ивановича Кантовича .....	62
Вниманию авторов.....	63

Позиция редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых материалов.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала на сайте [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции

Издание соответствует коду 58.14.1 ОКПД 2 ОК 034-2014 (КПЕС 2008)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76284 от 19 июля 2019 г.

Журнал включен в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по направлениям (технические науки):

- 05.02.00 - машиностроение и машиноведение (05.02.02 – машиноведение, системы приводов и детали машин, 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки)
- 05.05.00 – транспортное, горное и строительное машиностроение (05.05.06 – горные машины)
- 05.09.00 – электротехника (05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты, 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы)

Дата подписи в печать: 16.04.2021. Дата выхода в свет: 29.04.2021. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Отпечатано на МФУ. Уч.-изд. л. 8,125. Тираж 70 экз. Заказ 153. Цена свободная

Адрес типографии: Издательский центр УИП КузГТУ  
650000, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, ул. Д.Бедного, 4а

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

# MINING EQUIPMENT AND ELECTROMECHANICS

12+

2(154)

2021

GORNOE OBORUDOVANIE I ELEKTROMEKHANIKA

Founded in 2000

Issued 6 times a year

ISSN 1816-4528

**Editor-in-chief:**

Khoreshok A. A., Dr. Sc., prof.

**Deputy editor-in-chief:**

Lagunova, Yu. a., prof.

Kantowicz L. I., Dr. Sc., prof.

**Editorial board:**

Trubetskoy K. N., Acad. RAS, Dr. Sc.

Galkin V. A., Dr. Sc.

Merzlyakov V. G., Dr. Sc., prof.

Blumenstein V. Yu., Dr. Sc., prof.

Aksenov V. V., Akad. AMS., Dr. Sc.

**Editorial Team:**

Andreeva L. I., Dr. Sc.

Voronova E. Yu., Dr. Sc., prof.

Galkin V. I., Dr. Sc., prof.

Glebov A. V., Ph. D.

Egorov A. N. (Belarus)

Zhabin A. B., Dr. Sc., prof.

Zyryanov I. V., Dr. Sc.

Lakomski A. V., Dr. Sc., Prof.

Pevzner L. D., Dr. Sc., prof.

Petrov V. L., Dr. Sc., prof.

Semykina I. Yu., Ph. D.

Trifanov G. D., Dr. Sc., Assoc.

Khazanovich G. Dr. Sc., prof.

Jungmeister D. A., Dr. Sc., prof.

**Founder and publisher:**

T. F. Gorbachev Kuzbass state technical university

**Address of the founder, the publisher and the Editorial office:**

Russia, 650000, Kemerovo region, Kemerovo, 28 Vesennyaya str.

**Technical editor:**

Ostanin O. A.

**Cover design,**

**computer layout:** Borodin D. A.

**Tel:** +7 (384-2) 39-63-14

**Email:** gormash@kuzstu.ru

**Website:** http://gormash.kuzstu.ru

## CONTENTS

### MINING MACHINES

Goryunov S.V., Khoreshok A.A. Development of a methodology for assessing the resource of large-sized tires of quarry dump trucks .....	3
Voronov A.Y., Nesterov V.I., Voronov Yu.E., Romashko V.G., Voronov A.Y. Comparative assessment of the operation quality of shovel-truck systems at open-pit coal mines in the summer and transitional seasons.....	11
Gericke P.B., Gericke B.L. Creation of a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of mining equipment.....	17
Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V., Kremcheev E.A. Thermal fatigue modelling of excavator teeth during cyclic heat loading .....	23
Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Dubov G.M., Grigorieva E.A., Nokhrin S.A. Study of the composition of exhaust gas of dual-fuel gas-diesel BelAZ 75131 mining dump trucks .....	30
Evstratov V.A., Voronova E.Y., Apachanov A.S., Grigoryev V.I., Sukharnikova V.A., Breslavtseva I.V. Efficiency improvement of the screw modules of mining machines.....	42
Agapov M.E., Poteryaev I.K. Comprehensive criterion of working process efficiency chain trench excavator.....	48
Kuzin E.G., Pudov E.Yu., Dubinkin D.M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions.....	55

### CHRONICLE

Congratulations on the anniversary of Leonid Ivanovich Kantovich .....	62
Instructions to authors.....	63

The editorial position does not always coincide with the point of view of the authors of the published materials.

Full-text access to the electronic version of the journal is on website [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Tax relief - All-Russian product classifier

The publication corresponds to 58.14.1 OKPD 2 OK 034-2014 (KPEC 2008)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Communications - Certificate PI No. FS77-76284 of July 19, 2019.

The journal is included in the Russia List of the Higher Attestation Commission being the list of the leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of theses for the academic degrees of a doctor and candidate of sciences should be published in the following areas (engineering):

- 05.02.00 - mechanical engineering and engineering science (05.02.02 - mechanical engineering, drive systems and machine parts, 05.02.07 - technology and equipment for mechanical and physical-technical processing)
- 05.05.00 - transport, mining and construction engineering (05.05.06 - mining machines)
- 09.05.00 - electrical engineering (09.05.01 - electromechanics and electrical apparatus, 09.05.03 - electrotechnical complexes and systems)

Signed for publication on 16 April 2021. Date of publication: 29 April 2021. Format 60×84/8. Offset paper. Imprinted on MFPs. Published sheets 8,125. Edition 70 copies. Order 153. Free price

Address of the printing house:

Publishing center UIP KuzSTU

Russia, 650000, Kemerovo region, Kemerovo, 4a, D. Bednogo str