

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-3-13-22

Герике Павел Борисович^{1,*}, канд. техн. наук, доцент, Герике Борис Львович^{1,2}, доктор техн. наук, профессор

¹ Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН,

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*E-mail: am_besten@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЕДИНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПРЕССОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

Аннотация.

В рамках настоящего исследования предпринята попытка обобщения результатов анализа параметров вибрации, генерируемой при работе поршневых компрессоров в составе пневматических систем карьерных экскаваторов, применительно к решению вопроса о разработке алгоритма единого диагностического критерия, пригодного для выявления и оценки степени опасности развития дефектов оборудования горных машин. Данная работа является частью комплексного исследования параметров вибронегруженности энерго-механического оборудования горных машин, главной целью которого является разработка методологии создания единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки и прогнозирования процессов деградации технического состояния сложных механических систем. В настоящей работе использовались подходы математического анализа с применением многомерного пространства диагностических признаков, описываемого при помощи алгоритмов оптимальной скаляризации диагностических данных, полученных с использованием комплексного подхода к диагностике машин по параметрам вибрации, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, синхронное накопление, анализ огибающей спектра и эксцесс. Анализ диагностической информации, полученной на выборке из десяти поршневых компрессоров, установленных на электрических карьерных экскаваторах-драглайнах, позволил выявить оборудование, находящееся в недопустимом техническом состоянии, и осуществить апробацию разработанного единого критерия. Результаты проведенной апробации убедительно свидетельствуют в корректности предложенного методологического подхода к разработке единых критериев на основе анализа параметров вибрации, способных заменить собой большое количество громоздких диагностических признаков и правил виброанализа и уменьшить влияние человеческого фактора на результаты контроля параметров фактического состояния технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах.



Информация о статье

Поступила:

18 ноября 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

20 апреля 2022 г.

Принята к печати:

22 июня 2022 г.

Ключевые слова:

вибродиагностика, карьерные экскаваторы, единый диагностический критерий, поршневые компрессоры, горное оборудование, управление техническим обслуживанием.

Для цитирования: Герике П.Б., Герике Б.Л. Применение единых критериев для диагностики компрессоров электрических экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 3 (161). С. 13-22. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-3-13-22

Введение. Безопасность при проведении горных работ является важнейшим приоритетом развития угольной промышленности России. Большое количество горной техники на предприятиях Кузбасса отработало свой нормативный эксплуатационный срок, фактическое состояние оборудования наприя-

мую влияет на уровень безопасности при проведении горных работ. Действующие в настоящее время на предприятиях нормы системы планово-предупредительных ремонтов не позволяют эффективно и безаварийно эксплуатировать горную технику, нередко находящуюся в предельно изношен-

ном техническом состоянии. Эффективного повышения безопасности при ведении горных работ невозможно добиться без широкого применения методов и средств вибродиагностики и неразрушающего контроля, а также без совершенствования действующей системы управления ремонтами и обслуживанием горной техники на основе результатов контроля параметров вибрации – единственного метода неразрушающего контроля, позволяющего максимально быстро получать достоверную информацию о фактическом состоянии динамического оборудования [1, 2, 3, 4].

В настоящее время на базе Института угля ФИЦ УУХ СО РАН и КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках выполнения научного проекта № 20-48-420010 проводится изучение параметров вибрации оборудования горных машин, в том числе находящихся в предельном техническом состоянии, а также ведутся исследования в области прогнозного моделирования процессов деградации технического состояния энерго-механического оборудования горной техники.

В рамках выполненного этапа данной работы была рассмотрена возможность создания единых диагностических критериев, способных заменить собой большое количество диагностических признаков и правил, уменьшить количество ошибок и время проведения анализа, снизить требования к квалификации специалистов, осуществляющих контроль вибрации. В качестве объектов исследования выбраны штатные компрессора электрических карьерных экскаваторов, что объясняется необходимостью комплексного подхода к созданию единых диагностических критериев для всего энерго-механического оборудования.

В пневмосистемах электрических карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ применяются компрессора поршневого типа. Для проведения исследова-

ний была использована выборка из 15 единиц поршневых компрессоров типа ПК-1,7 (см. пример на рис. 1). Данный тип поршневого компрессора является элементом пневматической системы одноковшовых карьерных экскаваторов – драглайнов ЭШ 10/70 и их модификаций, эксплуатируемых при проведении открытых горных работ в Кузбассе. На примере анализа параметров вибрации, зафиксированных при обследовании данной выборки, ниже приведены некоторые результаты контроля, которые были использованы при создании единого критерия для диагностики поршневых компрессоров, используемых в конструкции карьерных экскаваторов.

Как правило, оценка технического состояния поршневых компрессоров осуществляется на основе анализа параметров виброскорости и виброускорения как в стандартном, так и расширенном до 7-10 кГц частотном диапазоне методом прямого спектрального анализа [5, 6, 7, 8]. Наибольшее распространение на данном типе оборудования получили следующие основные типы дефектов [9]:

- расцентровка двигателя с компрессором;
- нарушение жесткости системы;
- износ рабочих элементов компрессора (включая поршневую группу);
- ослабление посадки и увеличение зазоров, разнообразные дефекты подшипников качения (трещины колец, наклеп сепараторов и т.п.), а также нарушение режима их смазки;
- повреждения привода компрессора различной природы (дисбаланс ротора электродвигателя, дефекты двигателя электрической природы, повреждения ременных передач и т.п.).

Результаты и их применение. Результаты анализа данных по параметрам вибрации, генерируемой при работе компрессорного оборудования, показали, что на первом месте по распространенности

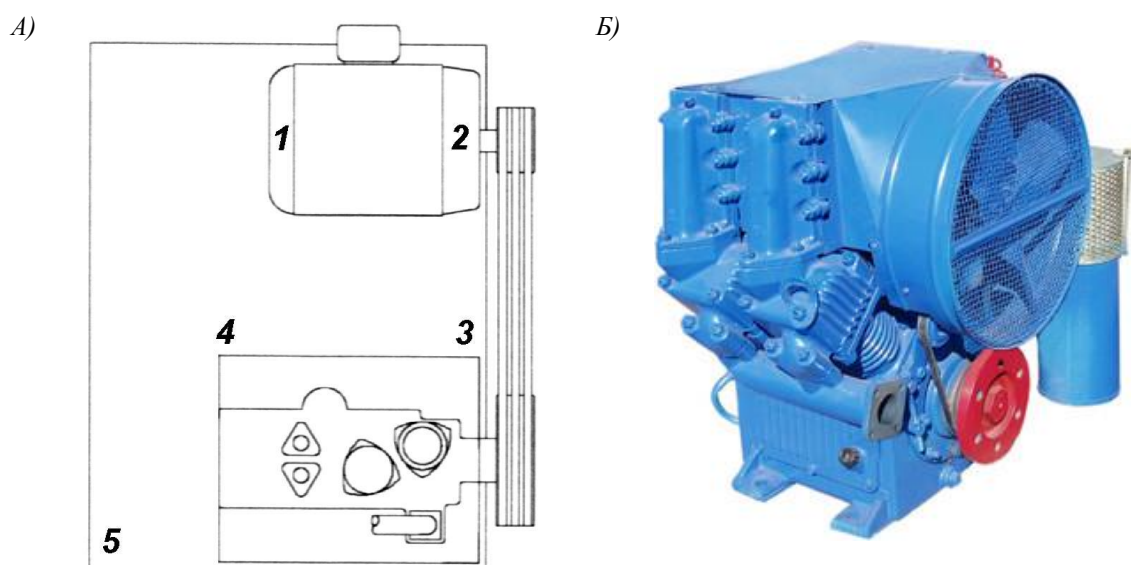


Рис. 1. Компрессор ПК-1,7 (А – схема замеров, Б – общий вид)
Fig. 1. Compressor PK-1,7 (A – scheme of measurements, B – general view)

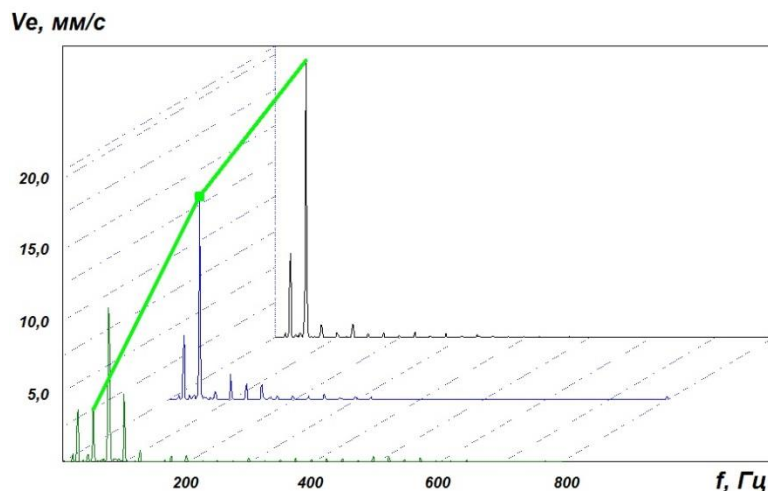


Рис. 2. Расцентровка электродвигателя с поршневым компрессором ПК-1,7 в горизонтальной плоскости (пневматическая система драглайна ЭШ 10/70)
 Fig. 2. Misalignment of an electric motor with a piston compressor PK-1.7 in a horizontal plane (pneumatic system of dragline ESh 10/70)

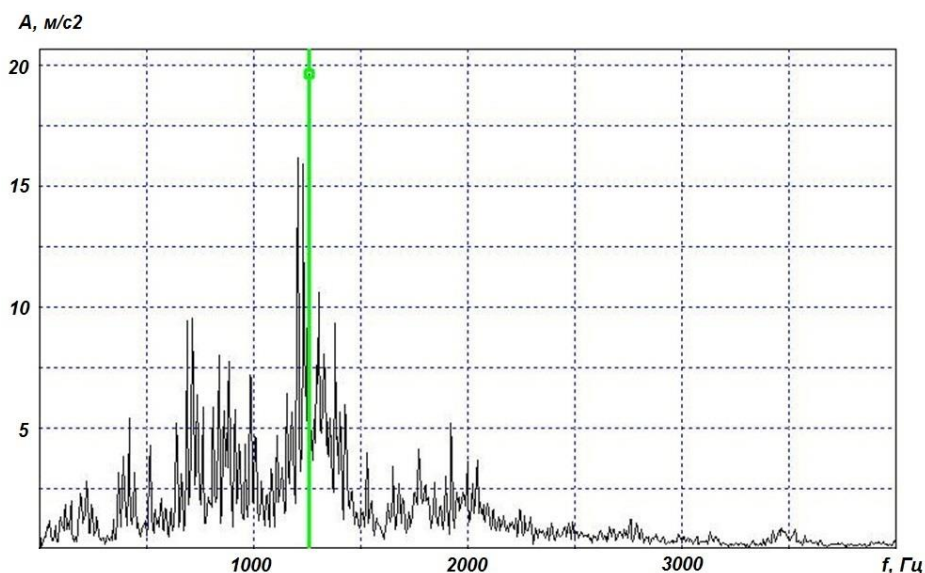


Рис. 3. Спектр по параметру виброускорения, записанный на подшипниковой опоре компрессора ПК-1,7. Общий уровень $A=142,1$ м/с²
 Fig. 3. The spectrum according to the vibration acceleration parameter, recorded on bearing support of the PK-1.7 compressor. General level $A=142.1$ m/s²

среди дефектов такого класса машин находится нарушение центровки привода установки (см. рис. 2).

Наибольшую опасность представляют два типа нарушения соосности – это осевой изгиб вала и нарушение центровки валопровода в горизонтальной плоскости, основной причиной возникновения которых является нарушение технологии монтажа агрегатов после проведения ремонтов или замены крупных узлов [10, 11]. Как показывает практика, больше всего среди динамического оборудования горных машин распространены коленчатая и горизонтальная расцентровка валов сопрягаемых агрегатов.

Обычно за достаточно короткий период времени этот дефект может привести к значительному росту величин параметров вибрации, эксплуатаци-

онный ресурс подшипников при этом уменьшается в несколько раз, выходят из строя соединительные муфты, происходит общее нарушение жесткости системы и т.д. [12, 13, 14].

Нарушение жесткости системы, ослабление крепежа, вызванное переменными нагрузками на агрегат в процессе его эксплуатации, опять же может привести к нарушению центровки (обратный взаимосвязанный процесс), что в свою очередь является одной из причин выхода из строя подшипников привода компрессора. Спектр по параметру виброускорения, представленный на рис. 3, записанный на подшипниковой опоре компрессора ПК-1,7 во второй измерительной точке, содержит четкие диагностические признаки развития таких дефектов.

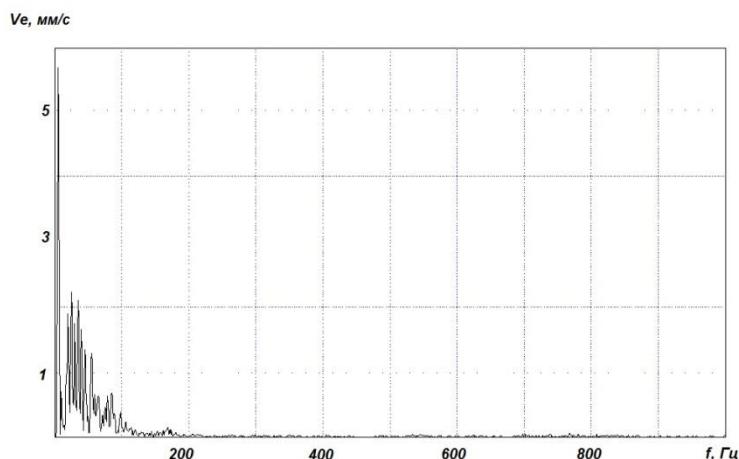


Рис. 4. Недопустимое биение и износ ременной передачи привода компрессора ПК-1,7

Fig. 4. Inadmissible runout and wear of the drive belt drive compressor PK-1.7

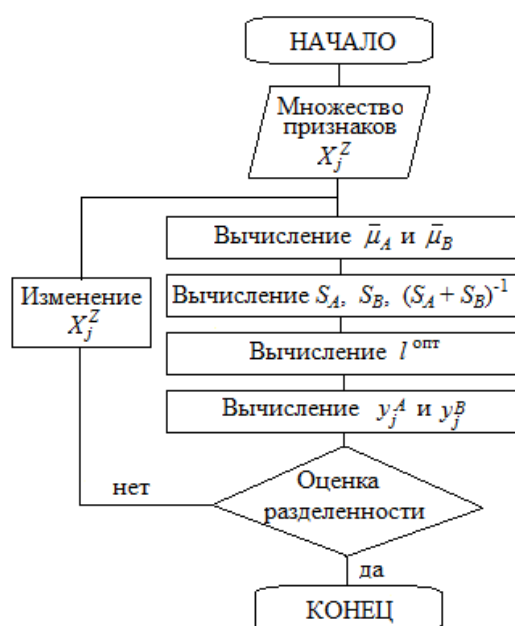


Рис. 5. Алгоритм формирования единого диагностического критерия

Fig. 5. Algorithm for the formation of a single diagnostic criterion

Наиболее интересные результаты позволяет получить комплексное использование нескольких методов виброконтроля, обоснованное сочетание которых дает возможность максимально точной интерпретации результатов анализа, пригодных для разработки достоверных прогнозных моделей развития типовых повреждений промышленных компрессоров различной мощности, типа и конструкции [13]. Как правило, комплексный подход к диагностике компрессоров по параметрам вибрации включает в себя метод прямого спектрального анализа параметров виброакустической волны в стандартном и расширенном частотном диапазонах, синхронное накопление, анализ огибающей спектра и эксцесс. Помимо прочего, при проведении исследовательских работ, связанных с определением характеристик предельного состояния мощных компрессорных установок, к этой группе методов целесообразно добавить результаты вейвлет-преобразования вибрации.

Таким образом, именно результаты комплексного диагностического подхода к анализу параметров виброакустических волн, генерируемых при работе сложных механических систем, позволяют извлечь максимальное количество полезной информации из

исходных полигармонических волн, сформулировать точные диагностические признаки дефектов исследуемого оборудования и критерии предельно допустимого состояния техники, минимизировать недостатки и ограничения применяемых методов диагностики, а также наиболее эффективно произвести оценку и осуществить прогнозирование изменения параметров фактического технического состояния динамически работающих машинных агрегатов. Предложенный комплексный диагностический подход и наработки в области совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний технологического оборудования предприятий угольной промышленности могут быть приняты в качестве базовой платформы для осуществления качественного перехода на более совершенные формы технического обслуживания и ремонта [15, 16, 17]. Созданные базы данных по параметрам виброакустического сигнала, сформулированные критерии предельного технического состояния, а также прогнозные математические модели изменения состояния и развития основных дефектов динамического оборудования могут быть использованы при переходе на систему обслуживания техники по ее фактическому техническому со-

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

№ п/п	Место измерения			Результаты виброобследования					Результаты дефектовки	
	Агрегат		Точка Направ- ление	Часто- та вра- щения, Гц	$A_{скз}$ (2...3000 Гц), м/с ²	$V_{скз}$ (2...10 00Гц), мм/с	$S_{скз}$ (2...20 0 Гц), мкм	ПИК А (2Гц... 10кГц, м/с ²	ПИК S (2... 200Г ц), мкм	
1	Аг- ре- гат 1	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	15,22	2,01	10	8,03	7	Норма
2			2 Рад	25,00	11,08	1,80	12	7,15	7	Норма
3		Ком- прессор	1 Рад	25,00	8,32	3,12	18	3,12	13	Норма
4			2 Рад	25,00	10,11	2,82	17	5,05	11	Норма
5	Аг- ре- гат 2	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	15,22	4,01	30	14,02	14	Предельное
6			2 Рад	25,00	16,01	3,89	29	11,39	12	Предельное
7		Ком- прессор	1 Рад	25,00	43,12	8,12	46	39,18	35	Авария
8			2 Рад	25,00	49,60	7,26	49	42,70	38	Авария
9	Аг- ре- гат 3	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	16,15	2,36	8	4,23	6	Норма
10			2 Рад	25,00	18,02	2,97	15	8,17	10	Норма
11		Ком- прессор	1 Рад	25,00	30,01	4,23	39	14,12	15	Предельное
12			2 Рад	25,00	116,20	11,32	108	20,63	40	Авария
13	Аг- ре- гат 4	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	20,12	2,05	8	6,23	4	Норма
14			2 Рад	25,00	15,42	3,12	12	8,69	9	Норма
15		Ком- прессор	1 Рад	25,00	21,35	2,90	9	4,12	3	Норма
16			2 Рад	25,00	18,42	1,86	15	11,23	5	Норма
17	Аг- ре- гат 5	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	12,15	1,15	7	6,01	3	Норма
18			2 Рад	25,00	16,98	2,01	9	5,12	4	Норма
19		Ком- прессор	1 Рад	25,00	15,23	1,98	9	8,22	4	Норма
20			2 Рад	25,00	31,40	4,44	22	12,01	17	Предельное
21	Аг- ре- гат 6	Эл.двиг.	1 Рад	25,00	8,31	3,01	17	4,12	5	Норма
22			2 Рад	25,00	15,17	3,12	15	11,32	5	Норма
23		Ком- прессор	1 Рад	25,00	80,42	6,78	51	18,23	14	Авария
24			2 Рад	25,00	106,71	7,45	48	32,19	17	Авария
25	Аг- ре- гат 7	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	29,41	3,98	31	15,23	5	Предельное
26			2 Рад	25,00	30,15	3,45	30	14,18	11	Предельное
27		Ком- прессор	1 Рад	25,00	14,08	1,80	8	7,03	2	Норма
28			2 Рад	25,00	7,12	2,01	13	2,09	3	Норма
29	Аг- ре- гат 8	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	21,32	3,01	12	11,21	6	Норма
30			2 Рад	25,00	18,59	2,98	12	8,65	7	Норма
31		Ком- прессор	1 Рад	25,00	29,32	2,57	8	8,97	3	Норма
32			2 Рад	25,00	22,04	2,81	11	13,08	5	Норма
33	Аг- ре- гат 9	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	90,25	6,18	46	22,35	18	Авария
34			2 Рад	25,00	76,18	6,87	108	18,06	36	Авария
35		Ком- прессор	1 Рад	25,00	105,30	5,12	112	32,17	32	Авария
36			2 Рад	25,00	97,18	8,02	36	19,27	15	Авария
37	Аг- ре- гат 10	Эл. двиг.	1 Рад	25,00	22,40	3,42	10	8,12	4	Норма
38			2 Рад	25,00	18,56	2,98	8	6,03	3	Норма
39		Ком- прессор	1 Рад	25,00	24,18	3,11	15	11,25	4	Норма
40			2 Рад	25,00	119,23	9,28	55	29,40	18	Авария

стоянию. Одним из базовых элементов такой системы станет разрабатываемый единый диагностический критерий, предназначенный для выполнения анализа параметров полигармонических волн в автоматизированном режиме.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что в качестве диагностических признаков выявления дефектов компрессорных установок выступают базовые признаки наличия неуравновешенности, расцентровки, нарушения жесткости, повреждения

подшипников, повреждения рабочих элементов компрессоров и признаки развития дефектов ременных передач, которые и положены в основу разрабатываемого единого критерия для диагностики компрессоров.

Так, например, нарушения соосности шкивов и дефекты ременной передачи (растрескивание, биевание, износ ремней и т.д.) являются довольно распространенными явлениями на поршневых компрессорах, эксплуатируемых в составе энерго-

Таблица 2. Значения диагностических критериев НОРМА (группа А)

Table 2. Values of diagnostic criteria NORMA (group A)

№	A СКЗ (2...3000Гц), м/с ²	V СКЗ (2...1000Гц), мм/с	S СКЗ (2...200 Гц), мкм	ПИК А (2Гц...10кГц, м/с ²)	ПИК S (2... 200Гц), мкм
3	8,32	3,12	18	3,12	13
4	10,11	2,82	17	5,05	11
15	21,35	2,90	9	4,12	3
16	18,42	1,86	15	11,23	5
39	24,18	3,11	15	11,25	4

Таблица 3. Значения диагностических критериев АВАРИЯ (группа В)

Table 3. Values of diagnostic criteria ACCIDENT (group B)

№	A СКЗ (2...3000Гц), м/с ²	V СКЗ (2...1000Гц), мм/с	S СКЗ (2...200 Гц), мкм	ПИК А (2Гц...10кГц, м/с ²)	ПИК S (2... 200Гц), мкм
7	43,12	8,12	46	39,18	35
8	49,60	7,26	49	42,70	38
12	116,20	11,32	108	20,63	40
35	105,30	5,12	112	32,17	32
36	97,18	8,02	36	19,27	15

механического оборудования электрических экскаваторов. Причины их возникновения различны – от нарушения технологии монтажа до невыполнения норм системы планово-предупредительных ремонтов и заводского брака. Как правило, такие дефекты приводят к возникновению заметной виброактивности в области низких частот и хорошо интерпретируются с помощью результатов спектрального анализа при использовании минимума необходимой априорной информации (см. пример на рис. 4).

Наличие развитого повреждения приводит к возникновению в спектре гармонического ряда «ременной частоты» с преобладанием субгармоник и обертонов базовой частоты.

Анализ действующих нормативных стандартов и исследований в области их совершенствования свидетельствует о том, что существующие на сегодняшний день критерии оценки состояния поршневых компрессоров не позволяют качественно оценить степень влияния на параметры вибрации таких дефектов, как повреждения поршневой группы, что свидетельствует о недостаточной изученности данной проблемы и актуальности задачи по разработке новых, единых диагностических критериев оценки [9, 18].

Анализ всех рассмотренных диагностических признаков выявления специфических дефектов поршневых компрессоров на карьерных экскаваторах типа ЭШ позволил выделить в качестве базовых пять критериев оценки состояния оборудования по параметрам вибрации, среди них:

- оценка пикового значения амплитуд отдельных составляющих в спектре сигнала вибрации по параметру виброускорения (2...10000 Гц) и виброперемещения (2...200 Гц),
- оценка СКЗ виброскорости, виброускорения и виброперемещения сигнала, регламентированная действующими нормативными стандартами (СКЗ виброускорения в диапазоне 2...3000 Гц, СКЗ

виброскорости в диапазоне 2...1000 Гц, СКЗ виброперемещения в диапазоне 2...200 Гц).

Для формирования единого диагностического критерия по множеству имеющихся диагностических признаков в рамках настоящей работы использовался алгоритм, представленный на рис. 5. Для создания обобщенного критерия использовался принцип «оптимальной» скаляризации, основанный на замене вектора диагностических признаков скалярной величиной [17, 19].

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 рассчитаны 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 вычисляются одномерные выборки единых диагностических критериев y_j^A, y_j^B . Для оценки «разделяемости» групп А и В использовано неравенство вида $|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2,5(S_A - S_B)$, что позволило подтвердить корректность предположения о достаточной разделенности групп А и В.

В таблице 1 приведены результаты измерений, проведенных на 40 измерительных точках поршневых компрессоров типа ПК, устанавливаемых на карьерных экскаваторах моделей ЭШ 10/70 и ЭШ 11/70.

Для выявления дефектов поршневых компрессоров были определены коэффициенты «оптимальной» скаляризации и значения единых диагностических критериев. Для этого из числа обследованных данных отобраны 5 «хороших» измерений (группа А) и 5 «аварийных» (группа В). В таблицах 2 и 3 представлены значения диагностических критериев для выбранных измерительных точек групп А и В соответственно.

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

$$X_{ij}^A = \begin{pmatrix} 8,32 & 3,12 & 18 & 3,12 & 13 \\ 10,11 & 2,82 & 17 & 5,05 & 11 \\ 21,35 & 2,90 & 9 & 4,12 & 3 \\ 18,42 & 1,86 & 15 & 11,23 & 5 \\ 24,18 & 3,11 & 15 & 11,25 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{и}$$

$$X_{ij}^B = \begin{pmatrix} 43,12 & 8,12 & 46 & 39,18 & 35 \\ 49,60 & 7,26 & 49 & 42,70 & 38 \\ 116,20 & 11,32 & 108 & 20,63 & 40 \\ 105,30 & 5,12 & 112 & 32,17 & 32 \\ 97,18 & 8,02 & 36 & 19,27 & 15 \end{pmatrix}.$$

Искомые векторы имеют следующие значения:

$$\bar{\mu}_A = (16,467; 2,762; 14,8; 6,954; 7,2) \text{ и}$$

$$\bar{\mu}_B = (82,28; 7,968; 70,2; 30,79; 32,0), \text{ а}$$

ковариационные матрицы

$$S_A = \begin{pmatrix} 2,655 - 0,118 - 1,043 & 4,25 - 1,89 \\ 1,618 - 0,015 - 0,56 & 0,484 - 0,967 \\ 0,954 & 0,027 - 1,133 - 0,554 - 0,82 \\ 0,153 & 0,070 & 0,016 & 0,334 & 0,141 \\ 2,38 & 0,107 & 0,062 & 1,949 & 0,247 \end{pmatrix}$$

$$S_B = \begin{pmatrix} 61,34 - 0,1238 & 37,907 - 13,142 - 4,7 \\ 42,719 & 0,925 & 27,713 - 15,569 - 7,843 \\ 46,023 & 4,518 & 51,287 - 13,785 & 10,854 \\ 21,197 & 2,622 & 8,49 & 1,271 & 0 \\ 8,88 & 0,031 - 20,383 - 6,866 - 10,132 \end{pmatrix}$$

При этих значениях оптимальный вектор определится как

$$l_{\text{опт}}^T = \frac{\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_B}{S_A + S_B} = (-2,226; -5,017; 0,005; -5,366; -3,258).$$

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

$$|\bar{y}_A - \bar{y}_B| > 2,5(S_A - S_B) = \frac{|\bar{y}_A - \bar{y}_B|}{S_A - S_B} = 8,9 > 2,5.$$

Выводы. Полученные результаты расчетов свидетельствуют о корректности предложенного подхода к разработке единого критерия для диагностики технического состояния поршневых компрессоров, используемых в пневматических системах карьерных экскаваторов. Сформулированные принципы комплексного диагностического подхода и наработки в области совершенствования методологии нормирования [2, 9, 13] параметров механических колебаний технологического оборудования предприятий угольной промышленности могут быть приняты в качестве базовой платформы для осуществления качественного перехода на более совершенные формы технического обслуживания и ремонта. «Оптимальная» скаляризация экспериментально полученных данных позволила реализовать пошаговое разделение объектов анализируемой выборки на две отдельные группы с различной степенью развития повреждений. Разработанный многомерный вектор использует признаки комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации поршневых компрессоров,

включая оценку пикового значения амплитуд отдельных составляющих в спектре сигнала вибрации по параметрам виброускорения и виброперемещения, а также оценку СКЗ виброскорости, виброускорения и виброперемещения сигнала, регламентированную действующими нормативными стандартами.

Заключение. Одним из базовых элементов системы обслуживания техники по ее фактическому состоянию может стать комплекс единых диагностических критериев, создаваемый в рамках выполнения настоящего исследования. Собранные представительные базы данных по параметрам вибрации горных машин, разработанные единые критерии оценки, а также создаваемые прогнозные модели деградации сложных технических систем могут быть использованы при адаптации системы управления обслуживанием горной техники по фактическому состоянию к реальным условиям угольных предприятий Кузбасса. Внедрение качественно новых форм управления техническим обслуживанием и системой ремонтов позволит приступить к решению ряда острых проблем угольной отрасли, связанных с безопасной и эффективной работой технологического оборудования горных предприятий, а также минимизировать количество аварий, происходящих из-за недопустимого технического состояния эксплуатируемой горной техники.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В. В. Клюева. т.7. М. : 2005. 828 с.
2. Герики П. Б., Буянкин П. В., Завьялов А. Н. Оборудование гидромеханизации как источник полигармонических волн, генерируемых при его работе // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Сборник материалов XI международной научно-практической конференции под редакцией Тайлакова О. В. Кемерово, 2015. С. 35.
3. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
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. Vol. 126. P. 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. P. 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. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. Санкт Петербург : СПбГМТУ, 2004. 156 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. – М. : МИФИ, 2007. 170 с.
9. Герике П. Б., Ещеркин П. В. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. 2021. №2. С. 17-22.
10. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018, Vol. 9. P. 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, ICC. 2016. P. 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. P. 121402/1 - 121402-13. <https://doi.org/10.1115/1.2976803>
13. Герике П. Б., Ещеркин П. В. Предпосылки создания прогнозной модели оценки технического состояния бурового карьерного оборудования на основе современных методов вибродиагностики // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2008. № 3. С. 27-29.
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, P. 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024>
15. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск : Издательство ИрГТУ, 1999. 230 с.
16. 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.
17. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография / Под ред. Рыкова В. В. Пер. с англ. Сухарева М. Г. М. : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 263 с.
18. 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. P. 032902-1.
19. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland : Amsterdam – New York – Oxford, 1977.

© 2022 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, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, (650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10), кандидат технических наук, доцент, am_besten@mail.ru

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

Заявленный вклад авторов:

Герике Павел Борисович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Герике Борис Львович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Pavel B. Gericke^{1,*}, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, **Boris L. Gericke**^{1,2}, Dr. Sc. in Engineering, Professor

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

APPLICATION OF UNIFORM CRITERIA FOR DIAGNOSTICS OF COMPRESSORS OF ELECTRIC MINING SHOVELS

Abstract.

Within the framework of this research, an attempt was made to generalize the results of the analysis of the vibration parameters generated during the operation of reciprocating compressors used in pneumatic systems of mining shovels in relation to solving the issue of developing an algorithm for a single diagnostic criterion suitable for identifying and assessing the degree of risk of developing equipment defects in mining machines. This work is focused on analyzing the parameters of vibration loading of the power-mechanical equipment of mining machines, the main goal of which is to develop a methodology for creating unified diagnostic criteria suitable for assessing and predicting the degradation processes of the technical state of complex mechanical systems. In this work, to create unified criteria, we used approaches of mathematical analysis using a multidimensional space of diagnostic features described using algorithms for optimal scalarization of diagnostic data obtained using an integrated approach to diagnostics of machines by vibration parameters, including spectral analysis in an extended frequency and dynamic range, synchronous accumulation and analysis of the spectrum envelope.

Analysis of diagnostic information obtained on a sample of ten reciprocating compressors installed on electric draglines, made it possible to identify equipment that was in an unacceptable technical condition and to test the developed single diagnostic criterion. The results of the conducted approbation convincingly testify to the correctness of the proposed methodological approach to the development of unified criteria based on the analysis of vibration parameters that can replace many inconvenient diagnostic signs and rules of vibration analysis and reduce the influence of the human factor on the results of monitoring the parameters of the actual state of technical devices operated in coal mines.



Article info

Received:

18 November 2021

Accepted for publication:

20 April 2022

Accepted:

22 June 2022

Keywords: vibration analysis, mining shovels, a single diagnostic criterion, reciprocating compressors, mining equipment, maintenance management.

For citation: Gericke P.B., Gericke B.L. Application of uniform criteria for diagnostics of compressors of electric mining shovels. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2022; 3(161):13-22 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-3-13-22

REFERENCES

1. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik. V 7-kh tomakh [Non-destructive testing: Handbook. In 7 Vol. V.7] / Pod. red. V.V. Klyueva. M.: Mashinostroenie Publishers, 2005. 828 p. (rus)
2. Gericke P.B., Bujankin P.V., Zav'jalov A.N. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti predpriyatij v promyshlennno razvityh regionah. *Sbornik materialov XI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Pod redakciej Tajlakova O. V.* Kemerovo, 2015. P. 35 (rus)
3. 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)

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;123: 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 evalua-

tion of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. 227 p. (rus)

7. 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)

8. Sushko A.E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow : MIFI, 2007. (rus)

9. Gerike P.B., Eshherkin P.V. Formirovanie edinogo diagnosticheskogo kriteriya dlya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya gornogo oborudovaniya. *Gornoe oborudovanie i jelektromekhanika*. 2021; 2: 17-22 (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, ICC, 2016*. P. 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. Gericke P.B., Eshherkin P.V. Predposylki sozdaniya prognoznoy modeli ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya burovogo kar'ernogo oborudovaniya na osnove sovremennykh metodov vibrodiagnostiki. *Vibraciya mashin: izmerenie, snizhenie, zashhita*. 2008; 3: 27-29. (rus)

14. Huňady R., Pavelka P., Lengvarký 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. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. 230 p. (rus)

16. 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)

17. Gertsbakh I. Teoriya nadezhnosti s prilozheniyami k profilakticheskomu obsluzhivaniyu [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)

18. 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)

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

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Pavel B. Gericke, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, (10 Leningradsky Prospekt, Kemerovo, 650065, Russian Federation), Associate Professor, am_besten@mail.ru

Boris L. Gericke, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, 28 Vesennyya St., Kemerovo, Russia), Dr. Sc. in Engineering, Professor, gbl_42@mail.ru

Contribution of the authors:

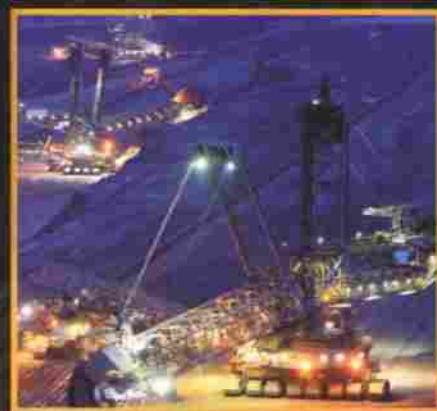
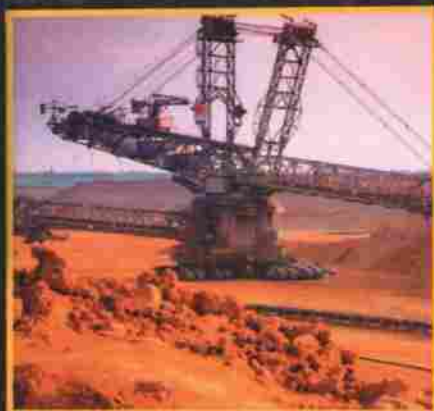
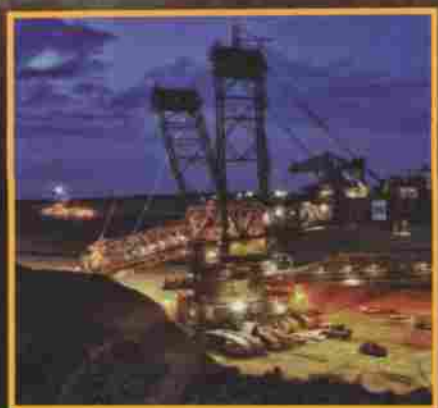
Pavel B. Gericke – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Boris L. Gericke – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.



ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА



3₍₁₆₁₎ ♦ 2022

ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

3(161)
2022

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.
Семькина 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

- Садовец В.Ю., Резанова Е.В., Садовец Р.В., Санников А.К. Разработка требований к системе инерциального позиционирования горных машин 3
- Герике П.Б., Герике Б.Л. Применение единых критериев для диагностики компрессоров электрических экскаваторов 13
- Носенко А.С., Домницкий А.А., Носенко В.В., Кирсанов И.А. Теоретические исследования работы бункер-перегрузателей с гравитационной загрузкой материала 23
- Дубинкин Д.М. Методика определения нагрузок, действующих при погрузке и разгрузке грузовой платформы (кузова) карьерного самосвала 31

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Кренева А.Е., Колокольникова А.И. Использование сингулярного спектрального анализа для прогнозирования показателей энергопотребления 50
- Лобур И.А., Негадаев В.А., Гаргаев А.Н., Котляров Р.В. Автоматизированная система диагностики состояния агрегатов с электроприводом 59

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

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала на сайте 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):

- 05.02.02 – машиноведение, системы приводов и детали машин (технические науки)
- 05.05.06 – горные машины (технические науки)
- 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты (технические науки)
- 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы (технические науки)
- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

Дата подписи в печать: 01.07.2022. Дата выхода в свет: 07.07.2022. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Отпечатано на МФУ. Уч.-изд. л. 8,625. Тираж 70 экз. Заказ 114. Цена свободная

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

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

MINING EQUIPMENT AND ELECTROMECHANICS

GORNOE OBOURODOVANIE I ELEKTROMEKHANIKA

12+

**3(161)
2022**

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 Vesennyya 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

- | | |
|--|----|
| Sadovets V.Yu., Rezanova E.V., Sadovets R.V., Sannikov A.K. Development of requirements for the inertial positioning system of mining machines | 3 |
| Gericke P.B., Gericke B.L. Application of uniform criteria for diagnostics of compressors of electric mining shovels | 13 |
| Nosenko A.S., Domnitskiy A.A., Nosenko V.V., Kirsanov I.A. Theoretical research of the operation of the transfer bunker with gravitational loading of material | 23 |
| Dubinkin D.M. Method of determining the loads acting during loading and unloading of the cargo platform (body) career self-dump | 31 |

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- | | |
|---|----|
| Kreneva A.E., Kolokolnikova A.I. Applying singular spectrum analysis in forecasting indicators of energy consumption | 50 |
| Lobur I.A., Negadaev V.A., Gargaev A.N., Kotlyarov R.V. Automated system for diagnostics of the state of electric drive units | 59 |

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
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):

- 05.02.02 Mechanical engineering, drive systems and machine parts (engineering)
- 05.05.06 Mining machines (engineering)
- 09.05.01 Electromechanics and electrical apparatus (engineering)
- 09.05.03 Electrotechnical complexes and systems (engineering)
- 2.5.5 Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (engineering)

Signed for publication on 01 July 2022. Date of publication: 7 July 2022.
Format 60×84 /8. Offset paper. Imprinted on MFPs. Published sheets 8,625. Edition 70 copies.
Order 1 14 Free price

Address of the printing house:

Publishing center KuzSTU

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