

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 Людвигович^{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 поршиневых 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 вибранагруженности 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 скляризации 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 поршиневых 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 вибранализа 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, поршиневые 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 эксплуатационных срок, фактическое состояние оборудования напря-

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 компрессоры 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 иссле-

дований 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 исследовании 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

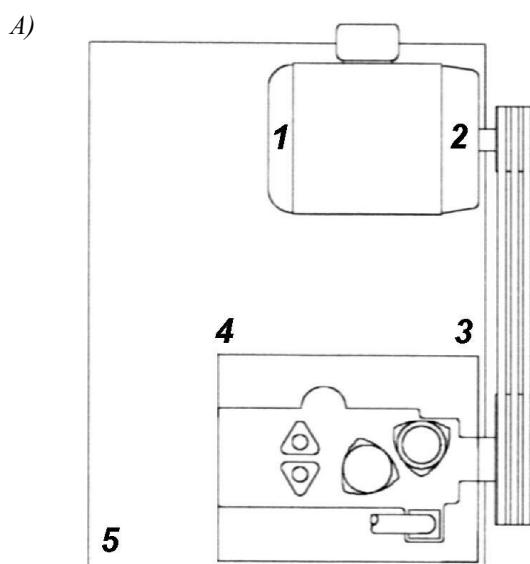


Рис. 1. Компрессор ПК-1,7 (А – схема замеров, Б – общий вид)
Fig. 1. Compressor PK-1,7 (A – scheme of measurements, B – general view)

Ve, мм/с

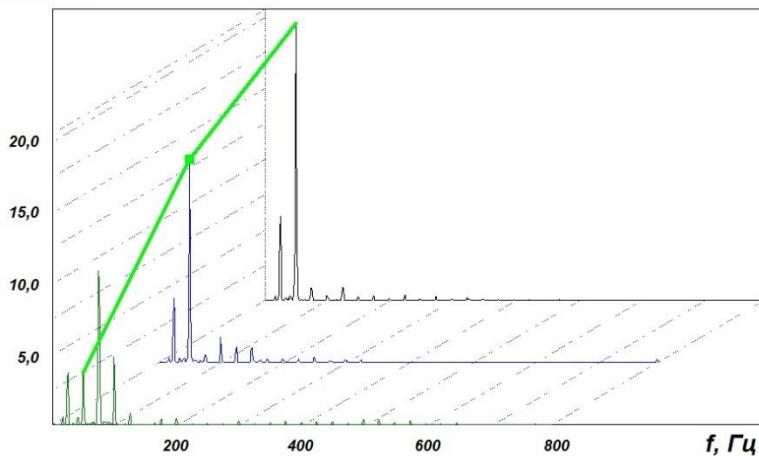


Рис. 2. Расцентровка электродвигателя с поршневым компрессором ПК-1,7 в горизонтальной плоскости (пневматическая система драглайна ЭШ 10/70)

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)

A, м/с^2

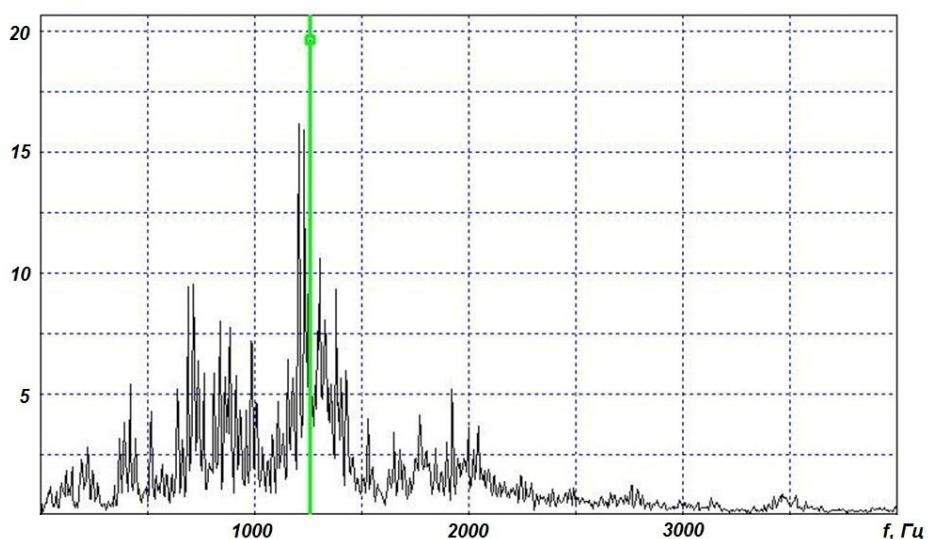


Рис. 3. Спектр по параметру виброускорения, записанный на подшипниковой опоре компрессора ПК-1,7. Общий уровень $A=142,1 \text{ м/с}^2$
Fig. 3. The spectrum according to the vibration acceleration parameter, recorded on bearing support of the PK-1.7 compressor. General level $A=142.1 \text{ m/s}^2$

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.

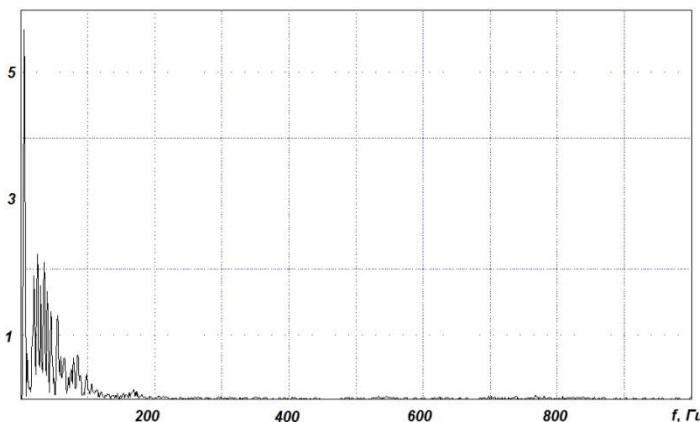


Рис. 4. Недопустимое биение и износ ременной передачи привода компрессора ПК-1,7

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

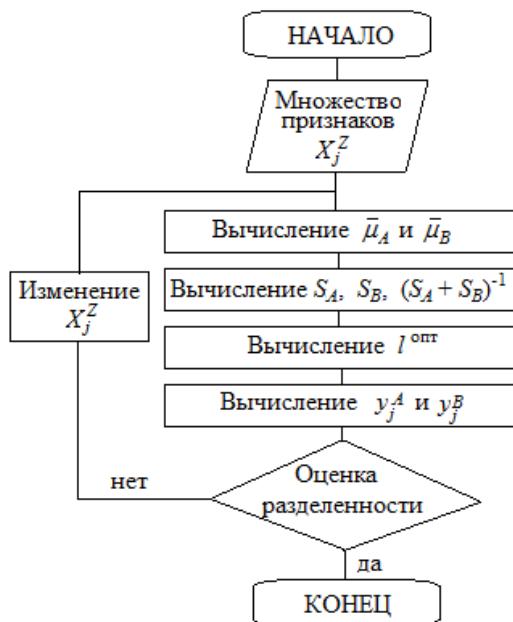


Рис. 5. Алгоритм формирования единого диагностического критерия

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 точноной 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 экспесс. Помимо прочего, при проведении исследовательских работ, связанных с определением характеристик предельного состояния мощных компрессорных установок, к этой группе методов целесообразно добавить результаты вейвлет-преобразования вибраций.

Таким образом, именно результаты комплексно-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 | $A_{\text{скз}}$ (2...3000 Гц), м/с^2 | $V_{\text{скз}}$ (2...10 00Гц), мм/с | $S_{\text{скз}}$ (2...20 0 Гц), мкм | ПИК A (2Гц... 10кГц, м/с^2 | ПИК S (2... 200Г ц), мкм | | |
| 1 | Аг- ре- гат | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 (растягивание, биение, 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)

| № | А 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 |
|-----------|-----------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| <u>3</u> | 8,32 | 3,12 | 18 | 3,12 | 13 |
| <u>4</u> | 10,11 | 2,82 | 17 | 5,05 | 11 |
| <u>15</u> | 21,35 | 2,90 | 9 | 4,12 | 3 |
| <u>16</u> | 18,42 | 1,86 | 15 | 11,23 | 5 |
| <u>39</u> | 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)

| № | А 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 |
|-----------|-----------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| <u>7</u> | 43,12 | 8,12 | 46 | 39,18 | 35 |
| <u>8</u> | 49,60 | 7,26 | 49 | 42,70 | 38 |
| <u>12</u> | 116,20 | 11,32 | 108 | 20,63 | 40 |
| <u>35</u> | 105,30 | 5,12 | 112 | 32,17 | 32 |
| <u>36</u> | 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 вибрации 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 виброскорения (2...10000 Гц) и виброперемещения (2...200 Гц),

- оценка СКЗ виброскорости, виброскорение и виброперемещения сигнала, регламентированная действующими нормативными стандартами (СКЗ виброскорения 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 «разделаемости» 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

$$S_A = \begin{pmatrix} 2,655 - 0,118 - 1,043 & 4,25 - 1,89 \\ 1,618 - 0,015 - 0,56 & 0,484 - 0,967 \\ 0,954 & 0,027 - 1,133 - 0,554 - 0,82 \\ 0,153 & 0,070 & 0,016 & 0,334 & 0,141 \\ 2,38 & 0,107 & 0,062 & 1,949 & 0,247 \\ 61,34 - 0,1238 & 37,907 - 13,142 - 4,7 \\ 42,719 & 0,925 & 27,713 - 15,569 - 7,843 \\ 46,023 & 4,518 & 51,287 - 13,785 & 10,854 \\ 21,197 & 2,622 & 8,49 & 1,271 & 0 \\ 8,88 & 0,031 - 20,383 - 6,866 - 10,132 \end{pmatrix}$$

При этих значениях оптимальный вектор определяется 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. Герике 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., Yerin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
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. Krakovskiy Yu. M. Matematicheskie i programmnnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. Novosibirsk : Nauka, 2006. 227 s.

7. Barkov A. V., Barkova N. A. Vibrazionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibrazii. Uchebnoe posobie. Sankt Peterburg : SPbGTMU, 2004. 156 s.

8. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizированnoi diagnostiki slozhnykh sistem. Diss. ... kand. tekhn. nauk. – M. : MIFI, 2007. 170 s.

9. Gerike P. B., Eshcherkin P. V. Formirovaniye edinogo diagnosticheskogo kriteriya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya gornogo oborudovaniya // Gornoe oborudovaniye i elektromehanika. 2021. №2. C. 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, ICCC. 2016. P. 668-672. <https://doi.org/10.1109/CarpPathianCC.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. Gerike P. B., Eshcherkin P. V. Predposylyki sotsdaniya prognoznoi modeli otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya burovogo karyernogo oborudovaniya na osnovye sovremennykh metodov vibrodiagnostiki // Vibraziya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita. 2008. № 3. C. 27-29.

14. Huňady R., Pavelka P., Lengvarscký 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. Lukyanov A. V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin. Irkutsk : Izdatelstvo IrGTU, 1999. 230 s.

16. Kliшин B. I., Zvorogin L. V., Lebedev A. B., Savchenko A. V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoi razrabotki ugodnykh mestorozhdenii. Novosibirsk, 2011. 524 s.

17. Gerzbach I. Teoriya nadzernoosti s priложeniyami k profilakticheskому obsluzhivaniyu: Monografija / Pod red. Rykova B. B. Per. s angl. Suhareva M. G. M. : GUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. 263 s.

18. Ghasemloo 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 Людвигович, 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 Людвигович – 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 probation 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 predpriatij v promyshlenno razvityh regionah. Sbornik materialov XI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Pod redakcijej 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 programmnnye 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. Formirovaniye edinogo diagnosticheskogo kriteriya dlya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya gornogo oborudovaniya. *Gornoe oborudovanie i elektromehanika*. 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, ICCC, 2016*. P. 668-672. <https://doi.org/10.1109/CarpPathianCC.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 prognoznoj modeli ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya burovogo kar'ernogo oborudovaniya na osnove sovremennoy metodov vibrodiagnostiki. *Vibraciya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2008; 3: 27-29. (rus)

14. Huňady R., Pavelka P., Lengvarsý 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 ugor'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)

17. Gertsbakh I. Teoriya nadezhnosti s prilozhenijami k profilakticheskemu 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. Ghasemloo 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 Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation), Associate Professor, am_besten@mail.ru

Boris L. Gericke, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, 28 Vesennaya 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.

