

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

¹Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углекислоты СО РАН, 650065, г. Кемерово пр. Ленинградский, 10

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

*E-mail: am_besten@mail.ru

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ЕДИНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ РОТОРОВ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

***Аннотация:** В настоящей статье рассмотрены критерии предельного состояния механического оборудования карьерных экскаваторов, содержащие дефекты типа дисбаланс ротора. На основе результатов статистического анализа отказов карьерных экскаваторов показано, что неуравновешенность роторов является одной из преобладающих причин аварийного выхода из строя данного типа технологического оборудования. Также приведены некоторые результаты исследований в области разработки алгоритма создания единого диагностического критерия для диагностики неуравновешенности элементов энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов. Дано обоснование и приведена формализация диагностических признаков и правил в области анализа вибрации, пригодных для разработки единого диагностического критерия. На основе результатов мониторинга вибрационной активности опор были обоснованы нормы вибрации для роторов электрических машин карьерных экскаваторов, учитывающие их условия эксплуатации. Доказано, что предложенная методология создания единого критерия имеет принципиальную состоятельность, и может быть использована для выполнения качественной оценки и прогнозирования процессов деградации сложных механических систем. Применение на практике полученных результатов позволит повысить безопасность работы горных предприятий и минимизировать количество непроизводительных простоев сложной и дорогостоящей горной техники.*

***Ключевые слова:** дисбаланс, вибродиагностика, единый диагностический критерий, энергомеханическое оборудование, карьерные экскаваторы.*

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

*Информация о статье: принята 31 мая 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-4-52-59*

Введение

Мониторинг технического состояния парка экскаваторного оборудования на разрезах Кузбасса показал, что основной причиной аварийных остановок карьерных экскаваторов были отказы механического оборудования (рисунок 1) [1-3].

Для выявления характерных дефектов, послуживших причиной аварийного выхода оборудования из строя, все аварийные простои были разделены на следующие группы: механическая часть, электрические машины, наладка, кабели, вентиляторы и маслососы, подшипники и прочее. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 1.

К группе «механическая часть» были отнесены все отказы оборудования, связанные с выходом из строя редукторов и металлоконструкций. Группа «электрические машины» представляет собой сово-

купность отказов электрических машин постоянного и переменного тока большой единичной мощности. Отказы, связанные с нарушением подачи питающего напряжения на экскаватор, отнесены к группе «кабели, линии и фидеры». Группа «наладка» сформирована из отказов систем управления электроприводами и другими системами. К группе «вентиляция и маслососы» отнесены все дефекты вентиляторов принудительного охлаждения электрических машин и маслососов циркуляции смазки. Отказы подшипников качения редукторов и электрических машин составляют группу «подшипники». Организационные причины простоев, такие как отсутствие транспорта, отсутствие запасных частей и др., отнесены в группу «прочее».

Приведенные результаты свидетельствуют, что основными причинами аварийных остановок электрических карьерных экскаваторов, эксплуатируемых в Кузбассе, являются отказы механического и

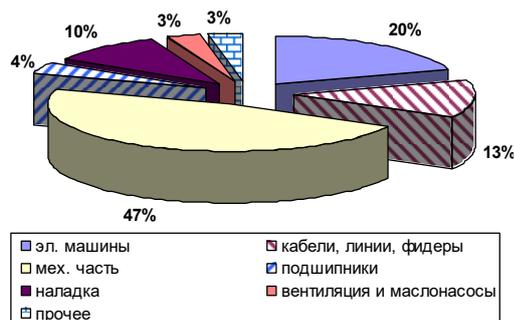


Рис. 1. Соотношение причин аварийных простоев электрических карьерных экскаваторов в Кузбассе
Fig. 1. Correlation of causes emergency downtime of electrical mining excavators in Kuzbass

Таблица 1. Причины простоев электрических карьерных экскаваторов
Table 1. Reasons for downtime for electric mining shovels

Причина простоя	Время простоя, час	%
Механическая часть	1720	47
Электрические машины	771	20
Кабели, линии и фидеры	440	13
Наладка	299	10
Подшипники	170	4
Вентиляция и маслососы	117	3
Прочее	70	3

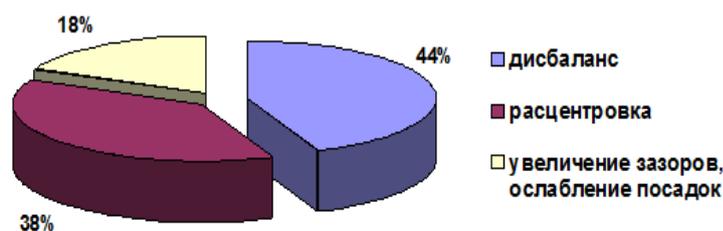


Рис. 2. Распределение первопричин аварийных отказов механического оборудования одноковшовых карьерных экскаваторов
Fig. 2. Distribution of the root causes of emergency mechanical failures equipment for single-bucket mining excavators

электрического оборудования, при этом в этих группах выявлен ряд дефектов, появление и развитие которых является главенствующей причиной выхода оборудования из строя. Критериями для отбора характерных дефектов были приняты следующие параметры:

- частота появления дефекта;
- время, необходимое на восстановление механизма;
- ориентировочная стоимость восстановительных работ.

В результате проведенного анализа были выявлены представленные на рисунке 2 группы характерных дефектов механического оборудования одноковшовых экскаваторов, явившиеся первопричиной аварийных отказов [4].

Постановка задачи и методы ее решения

Единственным методом функциональной диагностики, позволяющим с высокой степенью достоверности выявить большинство указанных дефектов, является анализ механических колебаний, зафиксированных в характерных точках исследуемого объекта [5-11]. Для повышения достоверности выдвинутого предположения о наличии и степени опасности дефекта, а также возможности построения прогноза о скорости протекания деградацион-

ных процессов необходимо создание системы объективных критериев распознавания данных повреждений и определение закономерности их развития [12, 13].

Как свидетельствуют данные, полученные при вибродиагностических обследованиях экскаваторного парка Кузбасса, наиболее часто встречающимся дефектом электромеханического оборудования является неуравновешенность ротора (дисбаланс). Практически каждый третий подвергшийся обследованию вал нуждается в проведении работ по его балансировке, а неуравновешенность каждого шестого ротора переводит механизм в недопустимое техническое состояние [5, 6].

Неуравновешенность ротора в большинстве случаев вызывается возникновением (в силу различных причин) отклонений геометрических размеров ротора от номинальных конструктивных. При вращении такого ротора с некоторой угловой скоростью в каждом поперечном сечении, имеющем отклонение от номинальных размеров, возникает центробежная сила, вращающаяся вместе с ротором и вызывающая переменные нагрузки на опоры. Условно все валы можно разделить на две категории [14, 15]:

- жесткие, частота вращения которых меньше собственной резонансной частоты;

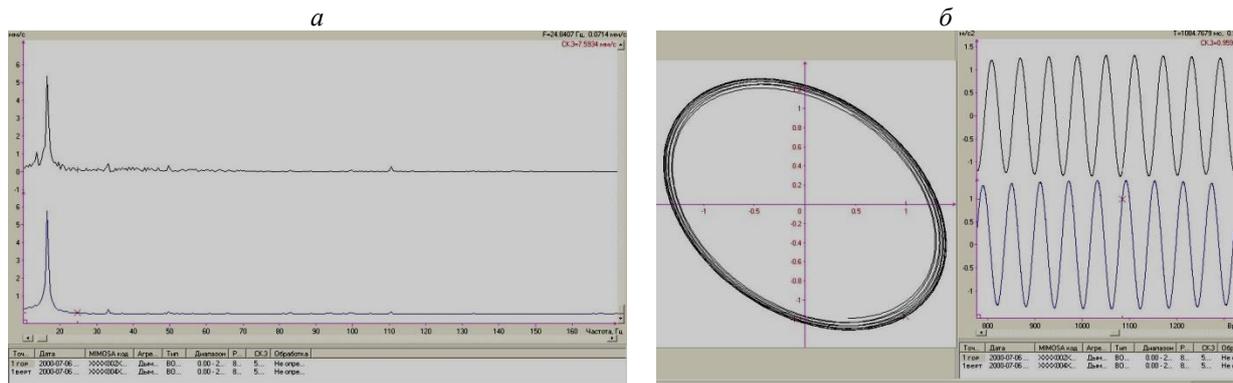


Рис. 3. Спектр (а) и годограф движения центра вала (б)
 Fig. 3. Spectrum (a) and hodograph of the shaft center (b)

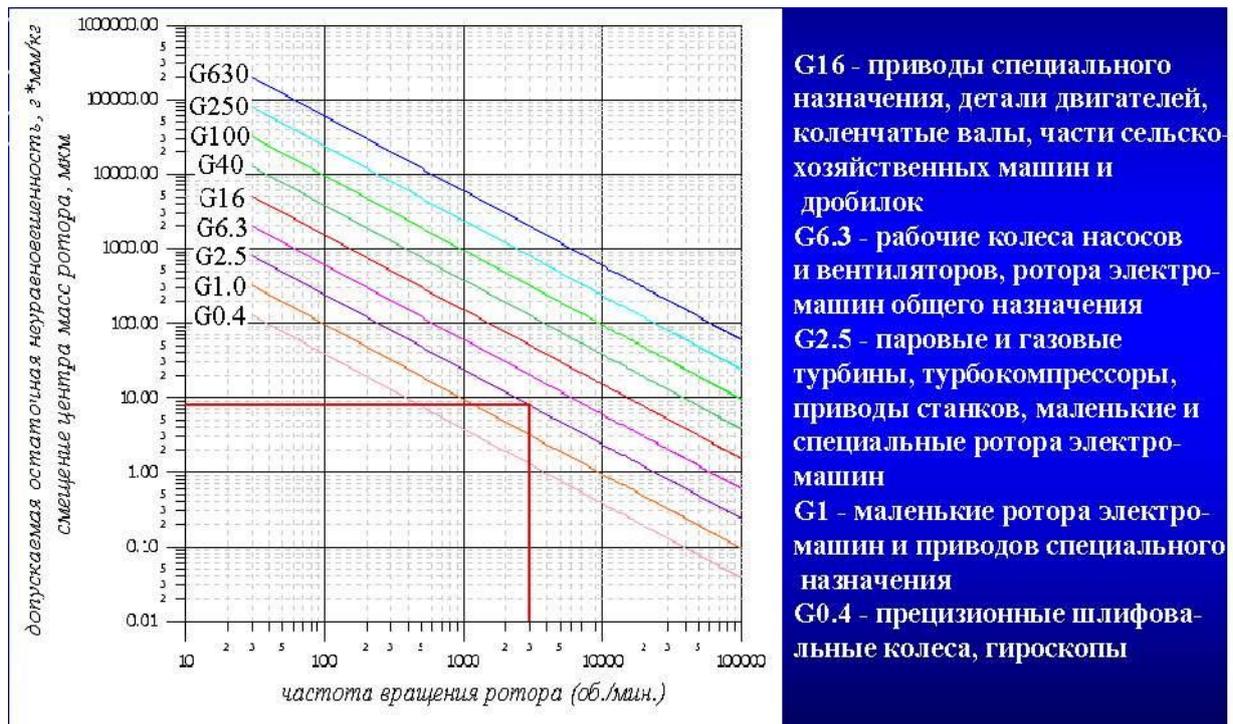


Рис. 4. Номограмма оценки допустимой неуравновешенности
 Fig. 4. Nomogram for assessing the permissible imbalance

G16 - приводы специального назначения, детали двигателей, коленчатые валы, части сельскохозяйственных машин и дробилок
G6.3 - рабочие колеса насосов и вентиляторов, ротора электромашин общего назначения
G2.5 - паровые и газовые турбины, турбокомпрессоры, приводы станков, маленькие и специальные ротора электромашин
G1 - маленькие ротора электромашин и приводов специального назначения
G0.4 - прецизионные шлифовальные колеса, гироскопы

– гибкие, частота вращения которых больше собственной резонансной частоты, при разгоне или торможении которых под действием динамических сил возникают изгибные колебания ротора при прохождении резонансной частоты.

Валы и валопроводы, используемые в конструкции карьерных одноковшовых экскаваторов, относятся к жестким, поэтому причинами возникновения в них дисбаланса могут быть:

- дефекты, связанные с нарушением технологии изготовления, сборки и балансировки ротора после сборки, с заменой или перестановкой деталей в процессе монтажа, характеризующиеся большим уровнем вибрации непосредственно по завершению ремонтных или монтажных работ;
- эксплуатационные дефекты, связанные с разрушением частей ротора в процессе работы, характеризующиеся внезапными скачкообразными изменениями амплитуды и/или фазы вибрации, и различные виды износа поверхностей ротора, отложения в

процессе работы, нарушения посадок деталей вала, в большинстве случаев характеризующиеся постепенными изменениями амплитуды и/или фазы вибрации [16].

При механическом дисбалансе параметры вибрации зависят от частоты вращения ротора и практически не зависят от режима работы, внешних условий и других факторов. Вибрация может проявляться как в радиальном, так и в осевом направлениях, что объясняется различной жесткостью опор в разных направлениях [17]. Физический смысл неуравновешенности ротора предполагает, что главенствующий признак данного дефекта – уровень вибрации на частоте вращения ротора [18]. Данное утверждение легко подтверждается экспериментальными данными. На рисунке 3 представлены спектры механических колебаний не отбалансированного ротора в вертикальной и горизонтальной плоскостях и годограф движения центра ротора в опорном подшипнике.

Таблица 2. Экспериментально полученные уровни допустимой вибрации, соответствующие допускаемой остаточной неуравновешенности роторов электрооборудования одноковшовых экскаваторов
 Table 2. Experimentally obtained levels of permissible vibration, corresponding to the permissible residual imbalance of rotors of electrical equipment of single-bucket excavators

Вид оборудования	Общий уровень вибрации, мм/с	Границы доверительного интервала (P=0,95)
Генераторы постоянного тока мощностью 200-1250 кВт, синхронные двигатели мощностью 520-1250 кВт	2,4	2,21 – 2,57
Генераторы постоянного тока мощностью 50-200 кВт, двигатели постоянного тока мощностью более 50 кВт.	2,5	2,27 – 2,73
Асинхронные двигатели мощностью более 10 кВт, машины постоянного тока мощностью до 50 кВт	1,7	1,54 – 1,86
Асинхронные двигатели мощностью менее 10 кВт.	1,1	0,98 – 1,22

Таблица 3. Оценки технического состояния электрооборудования одноковшовых экскаваторов по результатам вибродиагностики, мм/с
 Table 3. Estimates of the technical condition of electrical equipment single-bucket excavators according to the results of vibration diagnostics, mm / s

Вид оборудования	Оценка технического состояния, $V_{СКЗ}$			
	Хорошо	Удовлетворительно	Допустимо	Недопустимо
Генераторы постоянного тока мощностью 50-1250 кВт, синхронные двигатели мощностью 520-1250 кВт, двигатели постоянного тока мощностью более 50 кВт	< 2,4	2,4 – 6,0	6,0 – 9,6	> 9,6
Асинхронные двигатели мощностью более 10 кВт, машины постоянного тока мощностью до 50 кВт	< 1,8	1,8 – 4,5	4,5 – 7,2	> 7,2
Асинхронные двигатели мощностью менее 10 кВт	< 1,1	1,1 – 2,8	2,8 – 4,4	> 4,4

Результаты исследования

Для эффективной оценки уровня дисбаланса приводных и исполнительных механизмов карьерных электрических экскаваторов были проведены экспериментальные исследования, состоящие из пробных пусков агрегатов с заведомо отбалансированными роторами и пусков этих же агрегатов с внесенным допустимым дисбалансом, определенным по номограмме (рисунок 4), с одновременной регистрацией параметров механических колебаний.

Было принято, что все испытуемые машины относятся к группе G6.3. За частоту вращения роторов электрических машин принята максимальная рабочая частота вращения. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Полученные результаты проведенных обследований свидетельствуют, что первые две группы ма-

шин могут быть объединены в одну, поскольку полученные результаты по вибрационной нагруженности этих агрегатов практически идентичны.

Если принять полученные экспериментальные результаты за верхнюю границу зоны «состояние агрегата хорошее» [15], то тогда, согласно рекомендациям этого стандарта, можно получить оценки для других технических состояний этого оборудования. В этом случае для оборудования 1 группы зона «состояние агрегата удовлетворительное» находится в диапазоне $V_{СКЗ} = 2,4-6,0$ мм/с, зона «состояние агрегата допустимое» находится в диапазоне $V_{СКЗ} = 6,0-9,6$ мм/с, а зона «состояние агрегата недопустимое» – при превышении величины $V_{СКЗ} > 9,6$ мм/с.

Аналогичным образом получены оценки технического состояния для электрооборудования 2 и 3 групп (таблица 3).

Таблица 4. Статистические оценки технического состояния электрооборудования одноковшовых экскаваторов по результатам вибродиагностики, мм/с

Table 4. Statistical assessments of technical condition electrical equipment of single-bucket excavators according to the results vibration diagnostics, mm / s

Вид оборудования	Статистическая оценка границы недопустимого технического состояния (P=0,95)
Генераторы постоянного тока мощностью 50-1250 кВт, синхронные двигатели мощностью 520-1250 кВт, двигатели постоянного тока мощностью более 50 кВт	9,6±0,76
Асинхронные двигатели мощностью более 10 кВт, машины постоянного тока мощностью до 50 кВт	7,2±0,64
Асинхронные двигатели мощностью менее 10 кВт	4,4±0,48

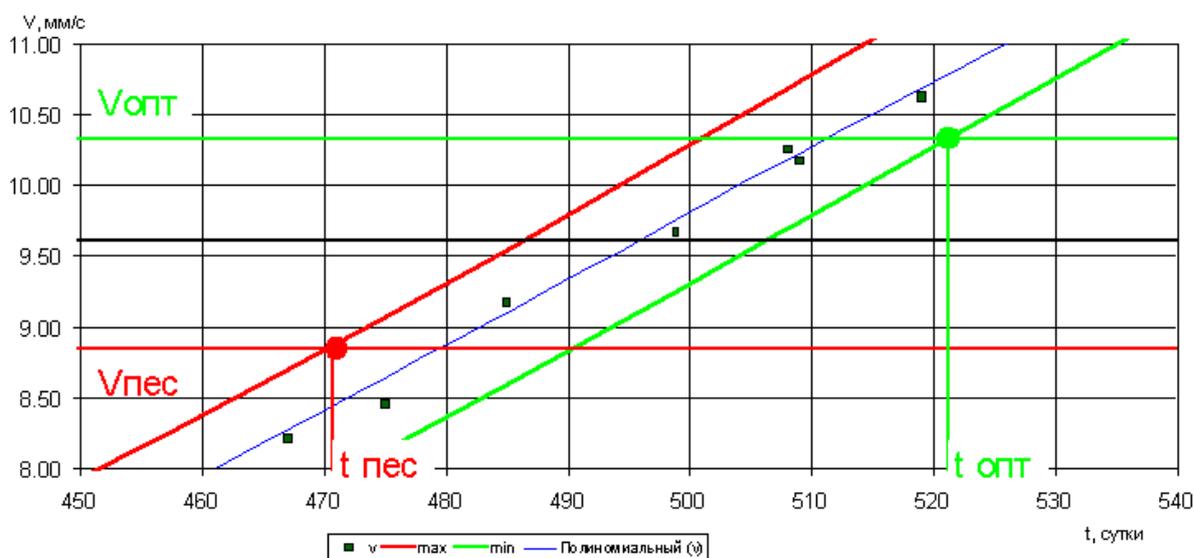


Рис. 5. Построение оптимистических и пессимистических прогнозов
Fig. 5. Building optimistic and pessimistic forecasts

Полученные оценки в дальнейшем были использованы при мониторинге технического состояния электромеханического оборудования карьерных экскаваторов для построения прогностических моделей потери им работоспособности.

Для оценки степени деградации механизма под влиянием сил дисбаланса был проведен ряд экспериментальных исследований на реально действующих агрегатах. Испытуемые агрегаты были разделены на 3 группы, как представлено в таблице 4. Для исследования влияния дисбаланса на исследуемый агрегат был выбран частотный диапазон $(1-5)f_p$, обусловленный тем, что дисбаланс в большинстве случаев является причиной ослабления жесткости опорной системы и посадок подшипниковых узлов, приводящих, в свою очередь, к выходу агрегата из строя. Практика проведения вибродиагностических работ показала достаточность оценки частотного диапазона до пятой гармоники оборотной частоты стандартного спектра виброускорения.

Таким образом, из более чем десятка диагностических признаков наличия неуравновешенности вращающихся деталей, сосредоточенных в таких диагностических методах, как спектральный анализ, анализ временной реализации и анализ траектории

движения вала ротора, был выбран единственный критерий, использование которого на практике позволяет уменьшить затраты времени на анализ данных без потери качества заключений о фактическом состоянии оборудования электрических карьерных экскаваторов. **Таким единым диагностическим критерием стала оценка вклада в общий уровень сигнала амплитуд виброскорости на гармониках $(1-5)f_p$** , измеренных во всех трех пространственных плоскостях диагностируемого агрегата.

Для оценки степени развития дефекта и остаточного ресурса оборудования по информативным критериям технического состояния возможно применение прогностических моделей, использующих статистические данные, называемые предысторией [7, 19, 20, 21]. Для построения прогностической модели необходимо выполнение ряда условий:

- прогностическая модель адекватна для однотипного оборудования;
- критерием оценки состояния служит наиболее информативный параметр;
- необходимо достаточное количество объективной информации.

Исходными данными для построения прогностической модели являются сгруппированные по времени данные о вибрационной активности 7 машин постоянного тока мощностью 560 – 1250 кВт.

На основе использования статистических оценок границ недопустимого технического состояния электрооборудования карьерных экскаваторов, полученных для доверительной вероятности $P=0,95$, возможно получение информации о пессимистических и оптимистических прогнозах поведения агрегата. Для иллюстрации данного подхода на рисунке 5 приведен пример деградации генератора ПЭМ-1250 экскаватора ЭКГ-12УС, эксплуатируемого на разрезе «Черниговец».

Выводы

1. Аварийные простои карьерных электрических экскаваторов связаны в основном с выходом из строя редукторов и металлоконструкций, а также отказами электрических машин постоянного и переменного тока большой единичной мощности, причем свыше 40% отказов энергомеханического оборудования связано с дисбалансом.

2. Центробежные силы, возникающие при вращении ротора, вызывают механические колебания на частоте его вращения f_p и является наиболее достоверным признаком его неуравновешенности. В качестве единого диагностического критерия выявления дисбаланса вращающихся деталей механизмов карьерных экскаваторов предложено использование величины вклада в общий уровень виброакустического сигнала совокупности амплитуд виброскорости на гармониках $(1-5)f_p$, измеренных во всех трех пространственных плоскостях диагностируемого агрегата.

3. Собранный статистический материал позволил с высокой доверительной вероятностью ($P \geq 0,95$) обосновать оценки технического состояния для электрических машин большой единичной мощности по параметрам механических колебаний, которые могут быть использованы для построения прогностических моделей исчерпания ресурса энергомеханического оборудования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мониторинг технического состояния экскаваторного парка разрезов ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» [Текст]./ В.В. Билибин, Б.П. Демьянов, Б.Л. Герике и [др.]// Безопасность труда в промышленности, №4. – 2005. – С. 22-25.

2. Герике Б.Л., Сушко А.Е., Герике П.Б. Внедрение цифровых технологий в области диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования [Текст].// Техника и технология горного дела. 2018. № 3. – С. 19-28.

3. Герике П.Б. Разработка методики испытаний узлов и элементов горно-шахтного оборудования [Текст].// Известия Уральского государственного горного университета №3. – Екатеринбург, 2017 – С. 60-64. DOI 10.21440/2307-2091-2017-3-60-64.

4. Явленский К.Н. Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем [Текст]. – Л.: Машиностроение, 1983. – 239 с.

5. Герике Б.Л., Герике П.Б. Диагностика технического состояния преобразовательных агрегатов экскаваторов типа драглайн [Текст].//Вестник КузГТУ. № 4, 2014. – С. 16-19.

6. Герике П.Б. Выбор критериев для совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний, генерируемых при работе оборудования драглайнов [Текст].// Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 11-18.

7. Герике П.Б. Опыт создания моделей деградации технического состояния динамического оборудования экскаваторов – драглайнов на основе анализа параметров механических колебаний [Текст].// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 3. – С. 66-73.

8. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis [Text]. – 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).

9. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации [Текст]. – М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ. – 28 с.

10. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию [Текст]: 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. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment [Text]. //Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432.

12. ГОСТ ISO 21940-31-2016. Подверженность и чувствительность машин к дисбалансу [Текст]. М.: Стандартиформ, 2017. – 24 с.

13. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин [Текст]. М.: URSS, 2019. – 640 с.

14. ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса [Текст]. М.: Стандартиформ, 2008. – 30 с.

15. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009. – 18 с.

16. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems [Text]. // Management and Production Engineering Review. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37-49.

17. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.

18. 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).

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

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

21. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. / Барков А.В., Баркова Н.А./ Издательство СПбГМТУ. Санкт Петербург, 2004. – 156 с.

Pavel B. Gericke¹, C.Sc. in Engineering, Associate Professor, **Boris L. Gericke**², Dr. Sc. in Engineering

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

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

SELECTION AND JUSTIFICATION OF A UNIFIED CRITERION FOR DIAGNOSTICS OF UNBALANCED ROTORS OF ENERGY AND MECHANICAL EQUIPMENT FOR ELECTRICAL MINING SHOVELS

Abstract: This article discusses the criteria for the limiting state of the mechanical equipment of mining shovels containing defects such as rotor imbalance. The results of the statistical analysis of mining shovels failures have shown that the imbalance of the rotors is one of the prevailing causes of emergency failure of this type of technological equipment. Also, the article presents some research results in the development of an algorithm for creating a single diagnostic criterion for diagnosing the imbalance of the elements of the power-mechanical equipment of mining shovels. The substantiation and the formalization of diagnostic signs and rules in the field of vibration analysis suitable for the development of a single diagnostic criterion are given. Based on the monitoring results of the supports vibration activity, the vibration standards for rotors of electric machines of mining shovels were substantiated, taking into account their operating conditions. It is proved that the proposed methodology for creating a single criterion has a fundamental consistency, and can be used to perform a qualitative assessment and predict the processes of degradation of complex mechanical systems. Practical application of the results obtained will improve the safety of mining enterprises and minimize the number of unproductive downtime of complex and expensive mining equipment.

Keywords: imbalance, vibration analysis, a single diagnostic criterion, energy-mechanical equipment, mining shovels.

Article info: received May 31, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-4-52-59

REFERENCES

1. V.V. Bilibin, B.P. Dem'janov, B.L. Gericke and etc. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, №4. – 2005. Pp. 22-25 (rus)

2. Gericke B.L., Sushko A.E., Gericke P.B. Tehnika i tehnologija gornogo dela. 2018. №3. Pp 19-28 (rus)

3. Gericke P.B. Izvestija Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta №3. – Ekaterinburg, 2017 – Pp. 60-64. (rus)

4. Javlenskij K.N. Javlenskij A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovanie kachestva mehanicheskikh sistem [Vibration diagnostics and predicting the quality of mechanical systems]. Publishing house "Mashinostroenie", 1983. – 239 p. (rus)

5. Guericke B.L., Guericke P.B. Diagnostics of the technical state of converting units of dragline

excavators. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2014, no.4, pp. 16-19

6. Guericke P.B. The choice of criteria for improving the methodology for standardizing the parameters of mechanical vibrations generated during the operation of dragline equipment. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2015, no.3, pp. 11-18

7. Gericke P.B. Experience in creating models of degradation of the technical state of the dynamic equipment of excavators - draglines based on the analysis of the parameters of mechanical vibrations. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. – 2015. – № 3. – Pp. 66-73. (rus)

8. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis [Text]. – 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering). (eng)

9. GOST R ISO 13373-2-2009. Kontrol' sostojanija i diagnostika mashin. Vibraci-onnyj kontrol' sostojanija mashin. Chast' 2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'ta-tov izmerenij vibracii [Tekst]. – M.: FGUP STANDARTINFORM. – 28 p. (rus)
10. Gertsbakh I. Teoriya 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. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment [Text]. //Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432. (eng)
12. GOST ISO 21940-31-2016. Podverzhenost' i chuvstvitel'nost' mashin k disbalansu [Tekst]. M.: Standartinform, 2017. – 24 p. (rus)
13. Artobolevskij I.I. Teoriya mehanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow. Publishing house " URSS ", 2019. – 640 p. (rus)
14. GOST ISO 1940-1-2007. Vibracija. Trebovanija k kachestvu balansirovki zhestkih rotorov. Chast' 1. Opredelenie dopustimogo disbalansa [Tekst]. M.: Standartinform, 2008. – 30 p. (rus)
15. GOST ISO 10816-1-97. Vibracija. Kontrol' sostojanija mashin po rezul'tatam iz-merenij vibracii

- na nevrashhajushhihsja chastjah. Chast' 1. Obshhie trebovanija [Tekst]. M.: Standartinform, 2009. – 18 p. (rus)
16. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems [Text]. // Management and Production Engineering Review. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37-49. (eng)
17. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P. 726. (eng)
18. 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. (eng)
19. Fisher R.A. Statisticheskie metody dlja issledovatelej [Statistical Methods for Researchers]. Moscow, Gosstatizdat, 1958. 267 p. (rus)
20. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam – New York – Oxford, 1977. (rus)
21. 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)

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б., Герике Б.Л., Выбор и обоснование единого критерия для диагностики неуравновешенности роторов энергомеханического оборудования карьерных электрических экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 4 (156). – С. 52-59.

Reference to article

Gericke P.B., Gericke B.L. Selection and justification of a unified criterion for diagnostics of unbalanced rotors of energy and mechanical equipment for electrical mining shovels. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.4 (156), pp. 52-59.