



УДК 621.879:681.518.5

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕСООСНОСТИ ВАЛОПРОВОДОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Герике П.Б.¹, Герике Б.Л.^{1,2,3}, Шахманов В.Н.³

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

³ Прокопьевский филиал государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

01 сентября 2021 г.

Рецензирование:

06 октября 2021 г.

Принята к печати:

15 ноября 2021 г.

Ключевые слова:

карьерные экскаваторы,
диагностика, валопровод,
вибрация, вибродиагностика,
несоосность

Аннотация.

В статье рассмотрены критерии предельного состояния механического оборудования карьерных экскаваторов, содержащие дефекты типа расцентровка валопроводов. На основе результатов статистического анализа отказов карьерных экскаваторов показано, что несоосность соединения роторов является одной из основных, наряду с дисбалансом, причин аварийного выхода их из строя. На основе 3-летнего мониторинга вибрационной активности опор были обоснованы нормы вибрации для допустимой несоосности соединения валов карьерных экскаваторов, учитывающие условия их эксплуатации.

Для цитирования: Герике П.Б., Герике Б.Л., Шахманов В.Н. Выбор и обоснование критерия для диагностики несоосности валопроводов карьерных экскаваторов // Техника и технология горного дела. – 2021. – № 3 (14). – С. 50-60. – DOI: 10.26730/2618-7434-2021-3-50-60

Введение

Мониторинг технического состояния парка экскаваторного оборудования на разрезах Кузбасса показал, что основной причиной аварийных остановок одноковшовых 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 маслонасосы, 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 совокупность 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 маслонасосы» отнесены все дефекты вентиляторов принудительного охлаждения электрических машин и маслонасосов 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».

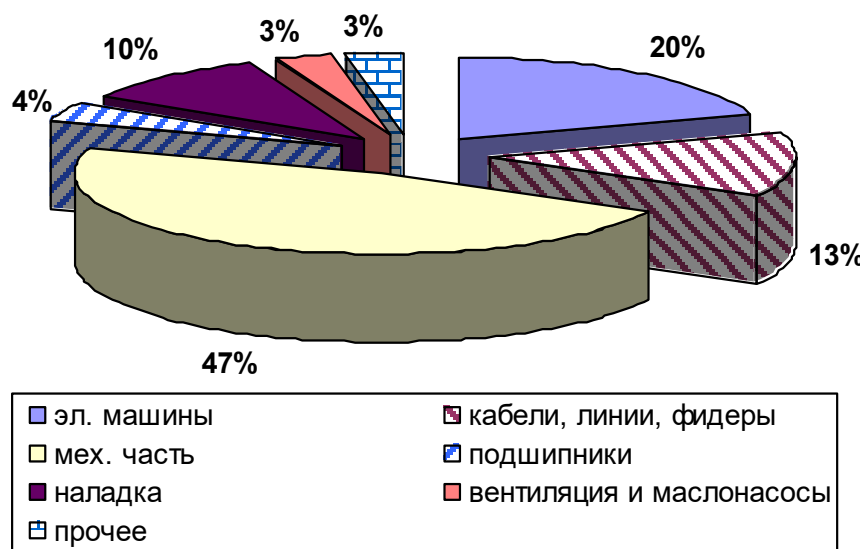


Рис. 1. Соотношение причин аварийных простоев электрических карьерных экскаваторов в Кузбассе
Fig. 1. Correlation of causes of emergency downtime of electric open-pit excavators in Kuzbass

Таблица 1. Причины простоев электрических карьерных экскаваторов
Table 1. Causes of downtime of electric open-pit excavators

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 маслонасосы	117	3
Прочее	70	3

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

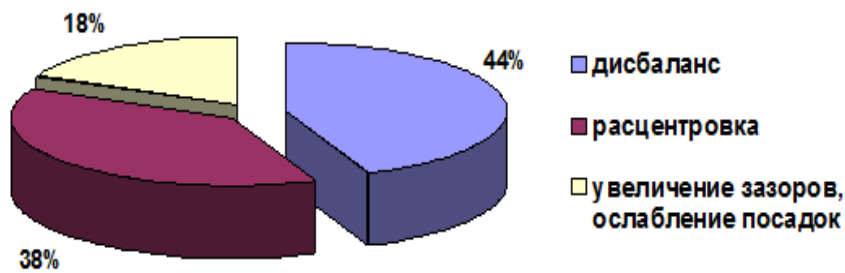


Рис. 2. Распределение первопричин аварийных отказов механического оборудования одноковшовых карьерных экскаваторов
Fig. 2. Distribution of the primary causes of emergency failures of mechanical equipment of single-bucket open-pit excavators

Состав полученной совокупности дефектов подтверждается результатами проведенных диагностических обследований экскаваторного парка, выполненных ранее [5-7].

Постановка задачи и методы её решения.

Единственным методом функциональной диагностики, позволяющим с высокой степенью достоверности выявить большинство указанных дефектов, является анализ механических колебаний, зафиксированных в характерных точках исследуемого объекта [8-11]. Для повышения достоверности выдвинутого предположения о наличии и степени опасности дефекта, а также возможности построения прогноза о скорости протекания деградиционных 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, одним, из наиболее часто встречающихся дефектов электромеханического оборудования, наряду с дисбалансом, является несоосность соединения валопроводов (расцентровка).

Несоосностью называют состояние, при котором центральные оси соединенных валов на совпадают, что приводит к:

- сильному износу и нагреву муфты;
- передаче осевой нагрузки через соединительный элемент (муфту);
- усталостному повреждению вала вследствие изгибных колебаний;
- перегрузке и преждевременному выходу из строя подшипников.

Несоосность обычно вызывается следующими причинами:

- неточной сборкой составных частей валопроводов;
- относительным смещением составных частей после сборки;
- деформацией податливых опор;
- тепловым расширением конструкции машины;
- неперпендикулярностью торцов муфты осям валов;
- податливостью основания.

Практически каждое третье соединение валов, подвергшихся обследованию, нуждается в проведении работ по его центровке, причем в каждом пятом случае расцентровка валопровода переводит механизм в недопустимое техническое состояние [5, 6].

Параллельная несоосность создает как поперечную силу, так и изгибающий момент на связанном конце каждого вала (рисунок 3а). На подшипниках с каждой стороны муфты возникают высокие уровни вибрации на частоте $2 \times f_r$, а также на $1 \times f_r$ в радиальном и (или) тангенциальном направлениях, причем эти вибрации находятся в противофазе (рисунок 3б). При изменении частоты вращения приводного механизма (электродвигателя) уровень вибрации, вызванной несоосностью, не изменяется.

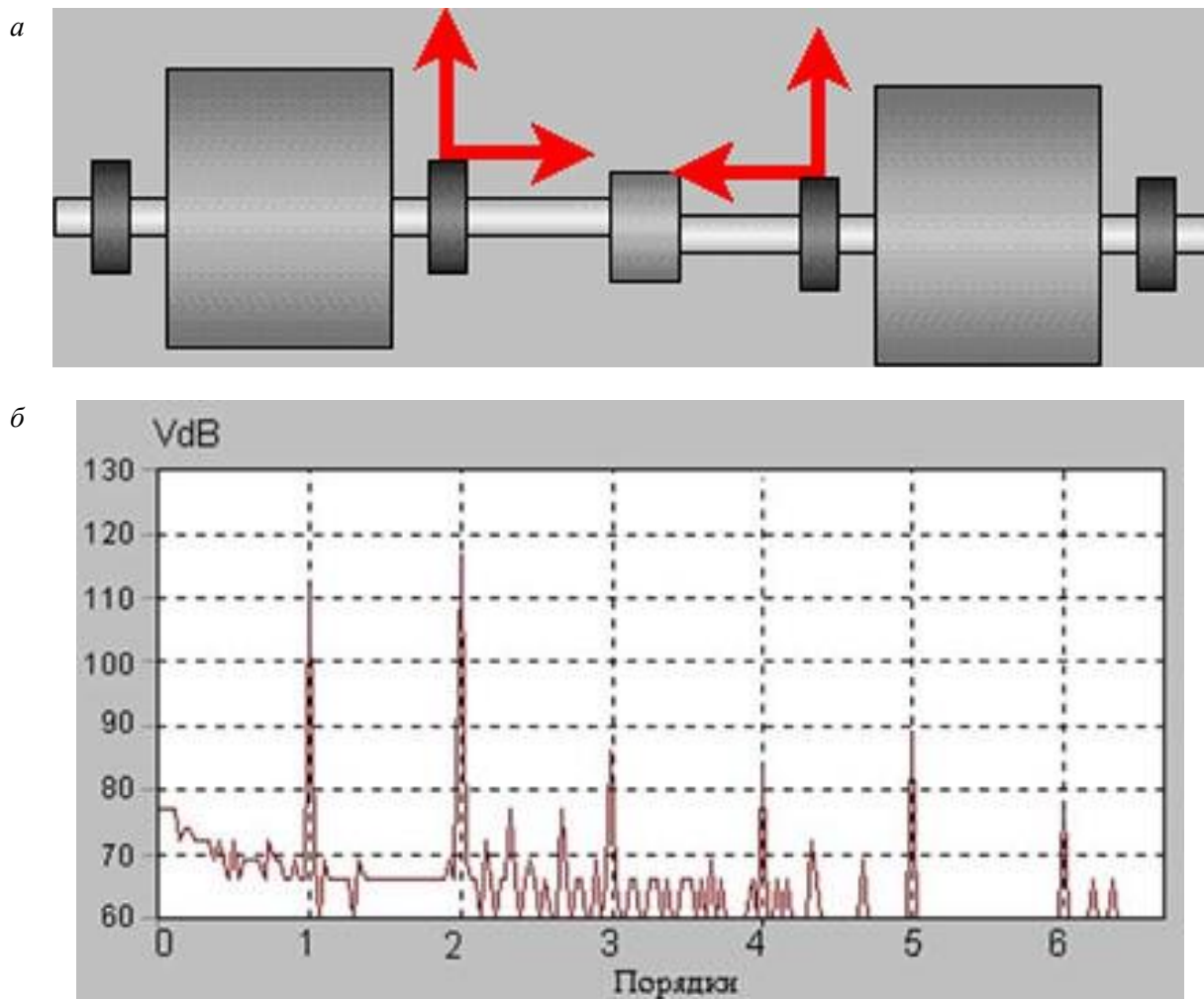


Рис. 3. Параллельная несоосность (а) и радиальная вибрация (б), возникающая на опоре, примыкающей к соединительной муфте

Fig. 3. Parallel misalignment (a) and radial vibration (b) arising on the support adjacent to the coupling

При угловой несоосности на каждом валу возникает изгибающий момент (рисунок 4а). Из-за этого создаются сильные осевые вибрации на частоте $1 \times f_r$ (а также некоторая вибрация на $2 \times f_r$) на обоих подшипниках, находящиеся с противоположных концов соединительной муфты. Кроме того, присутствуют достаточно сильные уровни вертикальной и/или поперечной вибрации на $1 \times f_r$ и $2 \times f_r$, которые имеет одинаковую фазу с двух сторон муфты.

Большинство случаев несоосности являются комбинацией двух описанных выше типов, а их диагностика основана на преобладании пиков $2 \times f_r$ над пиками $1 \times f_r$, и на существовании сильных осевых составляющих на частотах $1 \times f_r$. При этом следует убедиться, что высокие осевые уровни составляющих $1 \times f_r$ не вызваны дисбалансом консольных роторов.

Несоосность сопровождается разными симптомами на разных машинах, и для определения допустимых уровней вибрации на частотах $1 \times f_r$ и $2 \times f_r$ необходимо проводить сравнение с усредненными спектральными масками исправного оборудования.

Результаты исследования.

Для эффективной оценки допустимого уровня расцентровки валопроводов приводных и исполнительных механизмов карьерных электрических экскаваторов были проведены экспериментальные исследования, состоящие из пробных пусков агрегатов с заведомо отцентрованными валопроводами для построения спектральных опорных масок, и пусков этих же агрегатов на работающих экскаваторах, с одновременной регистрацией параметров механических колебаний.

Результаты вибродиагностических обследований экскаваторов на протяжении последних лет позволили установить, что наиболее ярко несоосность валопроводов проявляется в вибрационных сигналах, генерируемых в опорах, расположенных на внешних, относительно соединительных элементах, концах валов [2, 5]. Поэтому за основу для построения спектральных опорных масок приняты результаты измерения виброскорости на внешних опорах сопрягаемых валов, причем нормирование вибрации производилось в соответствии с методикой, изложенной в [14].

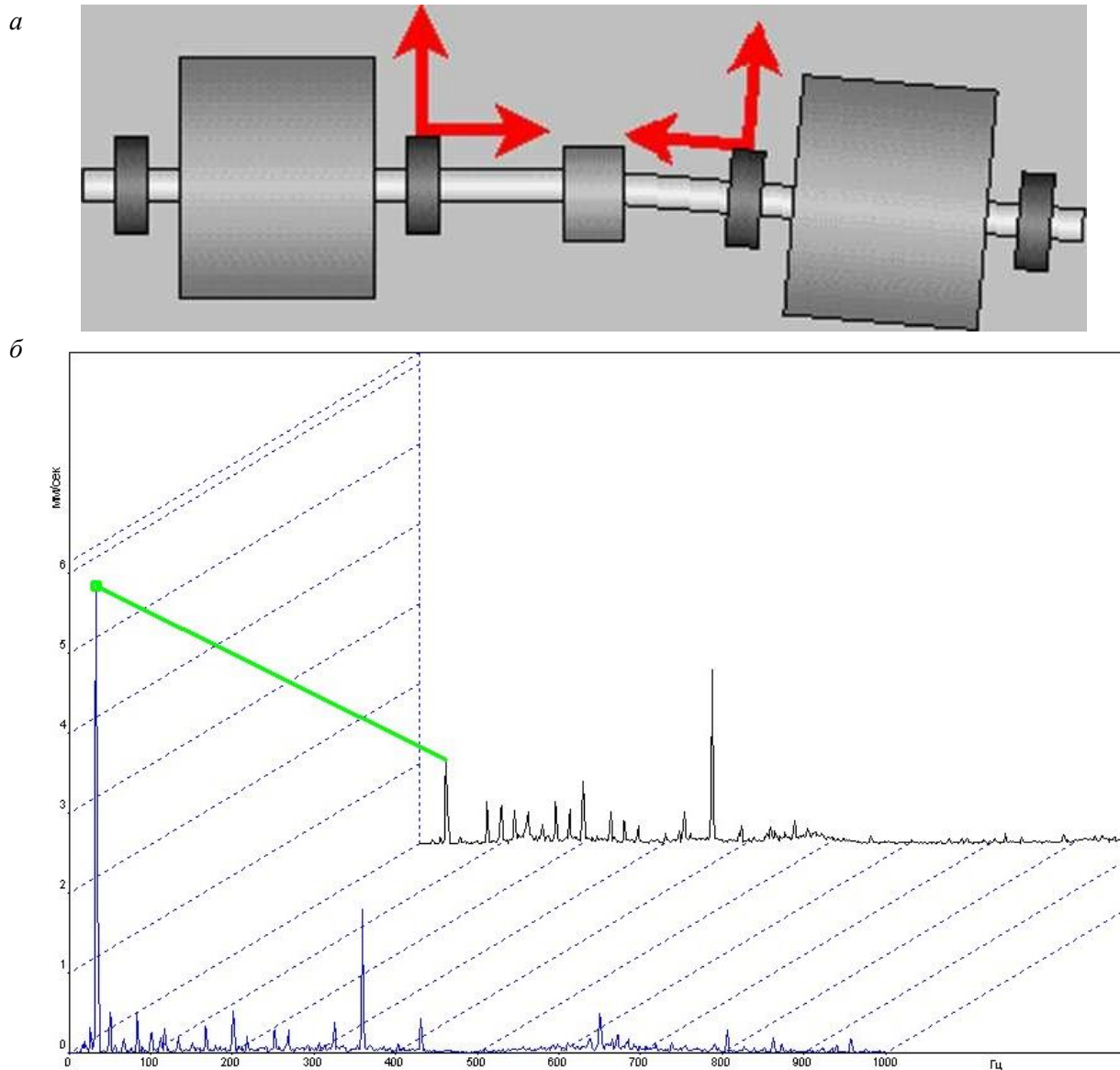


Рис. 4. Угловая несоосность (а) и осевая вибрация (б), возникающая на опоре с противоположного от муфты конца вала (до и после центровки)

Fig. 4. Angular misalignment (a) and axial vibration (b) arising on the support at the shaft end opposite to the coupling (before and after alignment).

На рисунке 5 приведены спектральные маски, построенные для преобразовательных агрегатов карьерных экскаваторов (синхронные двигатели мощностью 520-1250 кВт и генераторы постоянного тока 200-1250 кВт).



Аналогичным образом построены спектральные маски для исполнительных механизмов карьерных экскаваторов (механизмы напора и подъема для мехлопат, тяговые и подъемные лебедки для драглайнов, а также механизмы поворота).

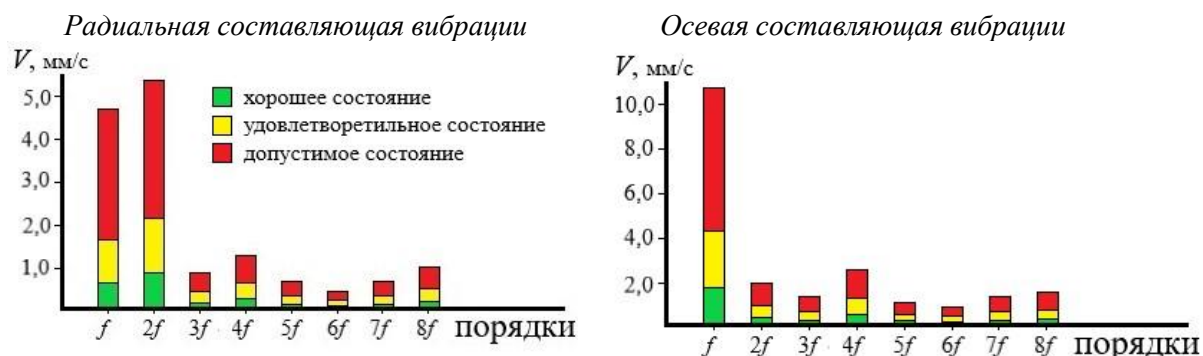


Рис. 5. Спектральные маски для радиальных и осевой компонент виброскорости преобразовательных агрегатов

Fig. 5. Spectral masks for radial and axial components of vibration velocity of converter units

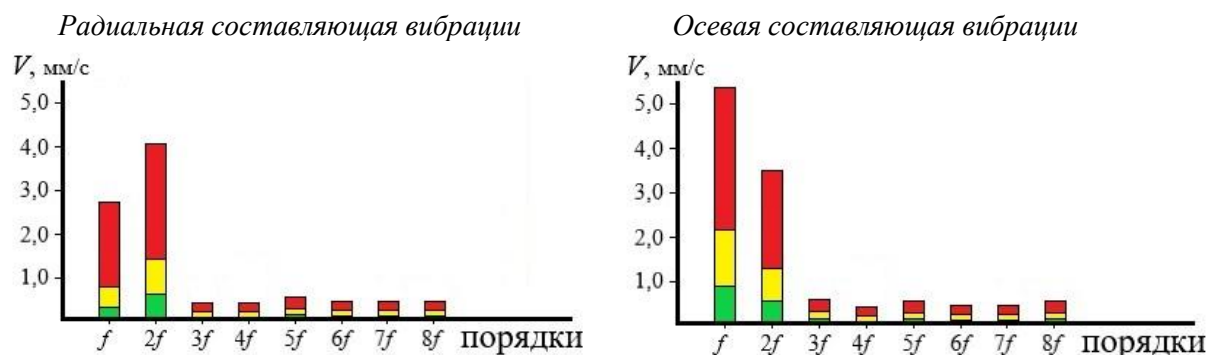


Рис. 6. Спектральные маски для радиальных и осевой компонент виброскорости исполнительных механизмов

Fig. 6. Spectral masks for radial and axial components of vibration velocity of actuators

Уровни допустимых значений виброскорости $[V_{СКЗ}]$ с доверительной вероятностью $P=0,95$, полученные экспериментально для преобразовательных агрегатов и исполнительных механизмов одноковшовых карьерных электрических экскаваторов, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Экспериментально полученные уровни допустимых значений виброскорости $[V_{СКЗ}]$, соответствующие допустимой остаточной несоосности валопроводов

Table 2. experimentally obtained levels of permissible values of vibration velocity $[V_{SKZ}]$, corresponding to permissible residual misalignment of shaft lines

Вид оборудования	Допустимый уровень виброскорости $[V] \pm 2S^1$, мм/с	
	Радиальная составляющая	Осевая составляющая
Преобразовательный агрегат (синхронные двигатели мощностью 520-1250 кВт, генераторы постоянного тока мощностью 50-1250 кВт)	6,8±1,07	11,7±1,54
Исполнительные механизмы	5,2±0,81	7,6±1,31

¹ Здесь S – оценка среднего квадратического отклонения



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

Для оценки степени деградации механизмов под влиянием сил, формирующихся из-за расцентровки валопроводов, был проведен ряд экспериментальных исследований на реально действующих агрегатах. Испытуемые агрегаты были разделены на 2 группы, представленные в таблице 1. Для исследования механических колебаний был выбран частотный диапазон $(1-10)f_p$, обусловленный тем, что при несоосности, возникающей при расцентровке валопроводов возникают ослабления жесткости опорной системы и посадок подшипниковых узлов, приводящих, в свою очередь, к выходу агрегата из строя. Практика проведения вибродиагностических обследований показывает, что частотный диапазон, включающий до 10 гармоник оборотной частоты, является достаточным.

Для оценки степени развития дефекта и остаточного ресурса оборудования по информативным критериям технического состояния возможно применение прогностических моделей, использующих статистические данные, называемые предысторией [7, 15, 16]. 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 преобразовательных агрегатов.

На основе использования статистической оценки границы допустимого технического состояния сопряжения электрических машин преобразовательного агрегата по величине осевой компоненты виброскорости $[V]$ возможно получение информации о пессимистической $T_{pissimus}$ и средней \bar{T} оценках наработки по критерию «несоосность». В качестве иллюстрации данного подхода при определении ресурса преобразовательного агрегата на рисунке 7 приведен пример деградации соединения «сетевой двигатель - генератор подъема» экскаватора ЭКГ-12УС.

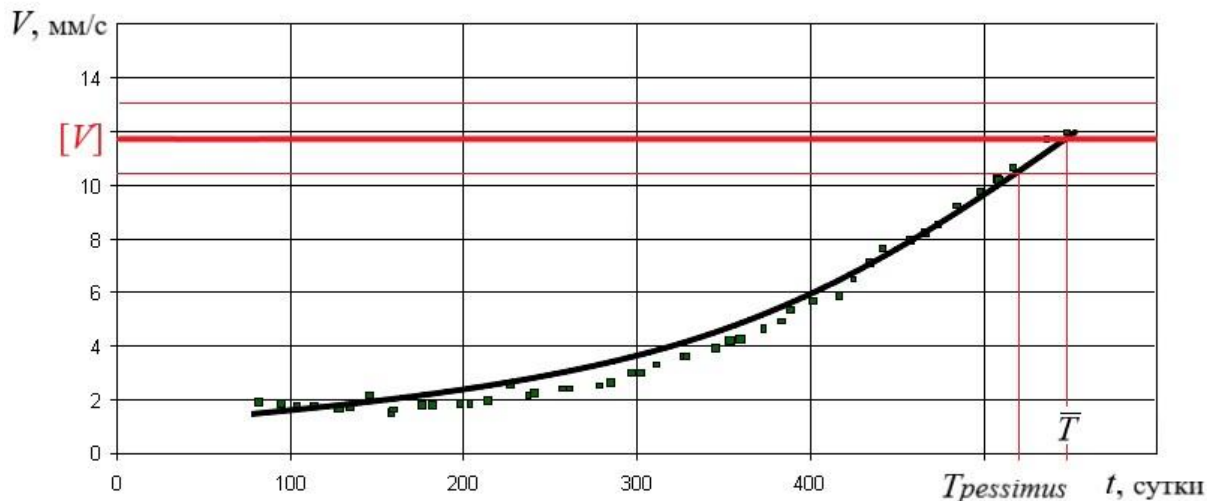


Рис. 7. Прогностическая модель развития дефекта «несоосность» в соединении «сетевой двигатель – генератор подъема»

Fig. 7. Predictive model of "misalignment" defect development in the "mains engine - lift generator" connection

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 около 40% отказов энергомеханического оборудования связана с расцентровкой валопроводов.



2. Силы, возникающие при несоосности соединяемых валов, приводят к усталостному повреждению валов вследствие изгибных колебаний, перегрузке и преждевременному выходу из строя подшипников, износу и перегреву соединительных муфт. Наиболее достоверным признаком расцентровки валопроводов является наличие механических колебаний на частотах $2 \times f_p$ и f_p , для достоверного распознавания которых целесообразно использовать спектральные маски, полученные на основе статистической обработки результатов вибромониторинга.
3. Обширный статистический материал, собранный на протяжении 10-летнего наблюдения за работой карьерных экскаваторов, позволил с высокой достоверностью ($P \geq 0,95$) обосновать оценки технического состояния электромеханического оборудования по параметрам механических колебаний, которые могут быть использованы для построения прогностических моделей исчерпания его ресурса.

Список источников

1. Мониторинг технического состояния экскаваторного парка разрезов ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» / В.В. Билибин, Б.П. Демьянов, Б.Л. Герике [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – №4. – 2005. – С. 22-25.
2. Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования / Б.Л. Герике, В.И. Клишин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин // Горный журнал. – №12. – 2017. – С. 68-73.
3. Герике П.Б. Разработка методики испытаний узлов и элементов горно-шахтного оборудования // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – №3. – 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 // Л.: Машиностроение, 1983. – 239 с.
5. Герике Б.Л., Герике П.Б. Диагностика технического состояния преобразовательных агрегатов экскаваторов типа драглайн // 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 // 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 // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 3. – С. 66–73.
8. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis. – 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).
9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 459 с.
10. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я. Техническое диагностирование механического оборудования // Донецк. Юго-Восток, 2009. – 459 с.
11. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации // М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ. – 28 с.
12. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию : Монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 263 с.
13. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования // Новосибирск: Наука, СО РАН, 2005. – 200 с.
14. Герике Б.Л., Герике П.Б. Методология построения спектральных масок для динамического оборудования горных машин // Вестник КузГТУ. № 4, 2014. – С. 20 – 22.
15. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems // Management and Production Engineering Review. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37–49.
16. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment // Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432.



Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Герике Павел Борисович, канд. техн. наук, доцент
e-mail: am_besten@mail.ru

Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, 650065, г. Кемерово, проспект Ленинградский, 10

Герике Борис Львович, главный научный сотрудник, докт. техн. наук, профессор
e-mail: gbl_42@mail.ru

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии, лаборатория угольного машиноведения
Российская Федерация, г. Кемерово, 650010, пр. Ленинградский, 10

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

Филиал Кузбасского государственного технического университета в г. Прокопьевске
Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, 653049, ул. Ногрская, 19а

Шахманов Виталий Николаевич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой
e-mail: shahmanovvn@kuzstu.ru

Филиал Кузбасского государственного технического университета в г. Прокопьевске
Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, 653049, ул. Ногрская, 19а

SELECTION AND JUSTIFICATION OF CRITERION FOR DIAGNOSTICS MISALIGNMENT OF SHAFT LINES OF QUARRY EXCAVATORS

Pavel B. Gerike¹, Boris L. Gerike^{1,2,3}, Vitaly N. Shakhmanov³

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

³ Прокопьевский филиал государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева



Article info

Received:

Abstract.

The article considers the criteria of limiting state of mechanical equipment of quarry excavators, containing defects of shaft line misalignment type. On the basis of the results of statistical analysis of failures of quarry excavators it is shown that misalignment of rotor connection is one of the



01 September 2021

Revised:

06 October 2021

Accepted:

15 November 2021

main, along with imbalance, causes of their emergency failure. On the basis of 3-year monitoring of the vibration activity of the supports the vibration standards for the permissible misalignment of the shaft connection of the quarry excavators, taking into account their operating conditions have been substantiated.

Keywords: quarry excavators,
diagnostics, shaft line, vibration,
vibrodiagnostics, misalignment

For citation Gerike P.B., Gerike B.L., Shakhmanov V.N. (2021) Selection and justification of criterion for diagnostics misalignment of shaft lines of quarry excavators. *Journal of mining and geotechnical engineering*, 3(14):50. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-3-50-60

References

1. Monitoring tehnicheskogo sostojanija jekskavatornogo parka razrezov OAO «UK «Kuzbassrazrezugol'» / V.V. Bilibin, B.P. Dem'janov, B.L. Gerike [i dr.] // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. – №4. – 2005. – S. 22-25.
2. Postroenie sistemy intellektual'nogo obsluzhivaniya reduktorov gornoshahtnogo oborudovanija / B.L. Gerike, V.I. Klishin, E.Ju. Pudov, E.G. Kuzin // *Gornyj zhurnal*. – №12. – 2017. – S. 68-73.
3. Gerike P.B. Razrabotka metodiki ispytanzij uzlov i jelementov gorno-shahtnogo oborudovanija // *Izvestija Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. – 2017. – №3. – S. 60-64. DOI 10.21440/2307-2091-2017-3-60-64.
4. Javlenskij K.N. Javlenskij A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovanie kachestva mehanicheskikh sistem // L.: Mashinostroenie, 1983. – 239 s.
5. Gerike B.L., Gerike P.B. Diagnostika tehnicheskogo sostojanija preobrazovatel'nyh agregatov jekskavatorov tipa draglajn // *Vestnik KuzGTU*. № 4, 2014. – S. 16 – 19.
6. Gerike P.B. Vybore kriteriev dlja sovershenstvovanija metodologii normirovanija parametrov mehanicheskikh kolebanij, generiruemyh pri rabote oborudovanija draglajnov // *Vestnik KuzGTU*. – 2015. – № 3. – S. 11–18.
7. Gerike P.B. Opyt sozdaniya modelej degradacii tehnicheskogo sostojanija dinamicheskogo oborudovanija jekskavatorov – draglajnov na osnove analiza parametrov mehanicheskikh kolebanij // *Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*. – 2015. – № 3. – S. 66–73.
8. Kelly, S. Graham. *Advanced vibration analysis*. – 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).
9. Kostjukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa* // Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. – 459 s.
10. Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Sedush V.Ja. *Tehnicheskoe diagnostirovanie mehanicheskogo oborudovanija* // Doneck. Jugo-Vostok, 2009. – 459 s.
11. GOST R ISO 13373-2-2009. Kontrol' sostojanija i diagnostika mashin. Vibracionnyj kontrol' sostojanija mashin. Chast' 2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'tatov izmerenij vibracii // M.: FGUP STANDARTINFORM. – 28 s.
12. Gercbah I. *Teorija nadezhnosti s prilozhenijami k profilakticheskomu obsluzhivaniju* : Monografija / Pod red. V.V. Rykova; per. s angl. M.G. Suhareva. M.: GUP Izd-vo «Nef't' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. – 263 s.
13. Krakovskij Ju.M. *Matematicheskie i programmnye sredstva ocenki tehnicheskogo sostojanija oborudovanija* // Novosibirsk: Nauka, SO RAN, 2005. – 200 s.
14. Gerike B.L., Gerike P.B. Metodologija postroenija spektral'nyh masok dlja dinamicheskogo oborudovanija gornyh mashin // *Vestnik KuzGTU*. № 4, 2014. – S. 20 – 22.
15. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems // *Management and Production Engineering Review*. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 37–49.
16. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz, (2016). Availability forecast of mining equipment // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 22 Iss: 4, pp.418-432.

Conflicts of Interest



The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Pavel B. Gerike, Ph.D. (Tech.), Assistant Professor
e-mail: am_besten@mail.ru

Mining Institute of The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Russian Federation, Kemerovo region – Kuzbass, 650065, Kemerovo, 10 Leningradsky av.

Boris L. Gerike, chief researcher, Dr.Sc., Professor,
e-mail: gbl_42@mail.ru

Coal Machinery Laboratory Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal 10 Leningradsky Av., Kemerovo, Russia, 650003

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University Department of Mining Machines and Complexes
28 Vesennyaya str., Kemerovo, Russia, 650000

Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk
Prokopyevsk, 19a Nogradskaya str., 653049, Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation

Vitaly N. Shakhmanov, Ph.D. (Tech.), Head of Department, e-mail: shahmanovvn@kuzstu.ru

Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical, University in Prokopyevsk
Prokopyevsk, 19a Nogradskaya str., 653049, Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation