

Научная статья

УДК 621.879

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-40-49

Лагунова Юлия Андреевна^{1,2}, Макарова Валерия Викторовна^{1,2},
Быков Дмитрий Владимирович³, Адамков Аркадий Викторович⁴

¹Уральский государственный горный университет²Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина³ООО НПО "Диатех"⁴Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*E-mail: yu.lagunova@mail.ru

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРА ХОДА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА



Информация о статье

Поступила:

01 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к печати:

01 марта 2024 г.

Опубликована:

04 апреля 2024 г.

Ключевые слова:

карьерный экскаватор, редуктор хода, вибродиагностика, перемещение, скорость, ускорение, анализ данных.

Аннотация.

Широкое внедрение различных методов диагностики технического состояния металлоконструкций отечественных карьерных экскаваторов сдерживается отсутствием стратегии, учитывающей современные тенденции развития техники, зарубежный и отечественный опыт неразрушающего контроля при эксплуатации техники. Такая стратегия должна базироваться на системном подходе к анализу и оценке прежде всего конкретных методов диагностики для соответствующих элементов конструкции карьерного экскаватора с учетом его функционирования. Поскольку выход из строя ходового оборудования карьерных экскаваторов находится на уровне 35% от всех видов простоев (плановых, организационных и аварийных), то разработка методики диагностики ходового оборудования карьерных экскаваторов, которая позволит повысить технико-экономические показатели процесса экскавации горных пород, является актуальной научно-технической задачей, отвечающей потребностям горного производства. Целью исследования является обоснование и разработка методики неразрушающего контроля функционирования ходового оборудования для повышения эффективности отечественных карьерных экскаваторов типа «механическая лопата». Методы исследования включают обобщение и анализ литературных источников, теоретические и экспериментальные методы исследования, базирующиеся на классических законах математики, физики, вибрации. В результате проведенных исследований предложен новый подход к предупреждению аварийной ситуации до ее наступления за счет применения отечественного диагностического оборудования.

Для цитирования: Лагунова Ю.А., Макарова В.В., Быков Д.В., Адамков А.В. Оценка технического состояния редуктора хода карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1 (171). С. 40-49. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-40-49, EDN: BIONMR

Карьерные экскаваторы нашли широкое применение во всех областях промышленности, в частности, в горной промышленности, где они используются на открытых разработках месторождений полезных ископаемых для выемки и погрузки взорванной горной массы в транспорт [1-2].

Чтобы планировать мероприятия по увеличению надежности работы ходового оборудования карьерного экскаватора, целесообразно попытаться осуществить расчетную оценку долговечности редуктора хода по критерию износа. Износ и механи-

ческая усталость относятся к деградиционным процессам, при которых свойства металла необратимо ухудшаются со временем, что приводит к простоям, предупредить которые можно с помощью методов неразрушающего контроля [3-10].

Одним из методов неразрушающего контроля, который был применен нами при оценке технического состояния ходового редуктора экскаватора ЭКГ-10 на ПАО «Ураласбест», был метод вибродиагностики [11-16]. Использование такого метода неслучайно, так как он является одним из двух ме-

Таблица 1. Скорости вращения ступеней редуктора
Table 1. Speed of rotation of gearbox

Ступень редуктора/ передаточное число	Скорость вращения, об/мин = частота, Гц
Ведущий вал	750 об/мин = 12,5 Гц
1 / 4,61	162 об/мин = 2,7 Гц
2 / 4,56	35,5 об/мин = 0,59 Гц
3 / 6,18	17,04 об/мин = 0,28 Гц
Выходной вал	5,7 об/мин = 0,01 Гц

тодов неразрушающего контроля, который позволяет оценить техническое состояние оборудования в процессе его эксплуатации без остановки производственного цикла. Вибродиагностический метод является единственным методом, позволяющим локализовать с точностью до узла зону возникновения дефекта в агрегате.

Метод вибродиагностики основан на измерении процесса перемещения агрегата при механических колебаниях от положения равновесия системы. Для описания технического состояния системы есть три главных параметра (колебательные величины) вибрационного состояния и около десяти дополнительных параметров вибрации, которые учитываются при выполнении вибрационного анализа данных. Мгновенное значение координаты положения точки относительно положения своего равновесия называют виброперемещением $s(t)$. Если по вертикальной оси графика отложить положение объекта, испытывающего простые гармонические колебания, а по горизонтальной шкале – время, то результатом будет синусоида, описываемая уравнением:

$$s = S \times \sin(\omega \times t)$$

где: s – мгновенное смещение; S – максимальное смещение; $\omega = 2\pi F$ – угловая частота.

Параметр виброперемещения в большинстве технических задач измеряется в мкм и отражает динамику передвижения измеряемой точки в процессе вибрации. Измерение виброперемещения выполняют по амплитуде или по размаху. Основным параметром вибрационного состояния являет-

ся виброскорость. Чтобы определить скорость измерения положения тела относительно точки равновесия, нам необходимо получить первую производную по времени от виброперемещения. При дифференцировании получим уравнение:

$$V = \frac{ds}{dt} = \omega \times S \times \cos(\omega \times t)$$

где: V – мгновенная скорость;

Виброскорость измеряется в мм/с. В нормативной документации пороговые уставки предельных уровней вибрации в большинстве своем заданы именно по величине виброскорости. Третьим главным параметром вибрационного состояния оборудования является виброускорение. Его получают путем взятия второй производной по времени от виброперемещения. Данный параметр характеризует скорость изменения скорости объекта и показывает потенциальную энергию вибрационной системы.

$$A = \frac{dv}{dt} = \omega^2 \times S \times \sin(\omega \times t)$$

где: A – мгновенное ускорение.

Виброускорение измеряется в м/с^2 . Из приведенных формул видно, что скорость пропорциональна смещению, умноженному на частоту, а ускорение – смещению, умноженному на квадрат частоты. Это означает, что большие смещения на высоких частотах сопровождаются очень большими скоростями и чрезвычайно большими ускорениями. Например, если объект испытывает смещение 1 мм с частотой 100 Гц, максимальная скорость такого колебания будет равна смещению, умноженному на частоту:

$$V = 1 \times 100 = 100 \text{ мм/с}$$

Ускорение будет равно $A = 1 \times (100)^2 = 10\,000 \text{ мм/с}^2 = 10 \text{ м/с}^2$

При увеличении частоты до 1000 Гц мы получим:

$$V = 1 \times 1000 = 1000 \text{ мм/с} = 1 \text{ м/с}$$

$$A = 1 \times (1000)^2 = 1\,000\,000 \text{ мм/с}^2 = 1000 \text{ м/с}^2$$

Таким образом, высокие частоты не могут сопровождаться большими смещениями, поскольку

Таблица 2. Значения вибрации СКЗ виброскорости
Table 2. Vibration values of the mean square value of vibration velocity

Агрегат	Точка контроля	Параметр СКЗ виброскорости, мм/с	Отбраковочная величина «Предупреждение»	Отбраковочная величина «Авария»	Результат
Правый редуктор хода	T1	1,88	4,5	7,1	Норма
	T2	4,95			Предупрежд.
	T3	2,14			Норма
	T4	2,91			Норма
	T5	2,45			Норма
	T6	3,67			Норма
	T7	3,11			Норма
Левый редуктор хода	T1	7,67	4,5	7,1	Авария
	T2	2,29			Норма
	T3	2,99			Норма
	T4	2,73			Норма
	T5	5,83			Предупрежд.
	T6	2,35			Норма
	T7	4,47			Норма

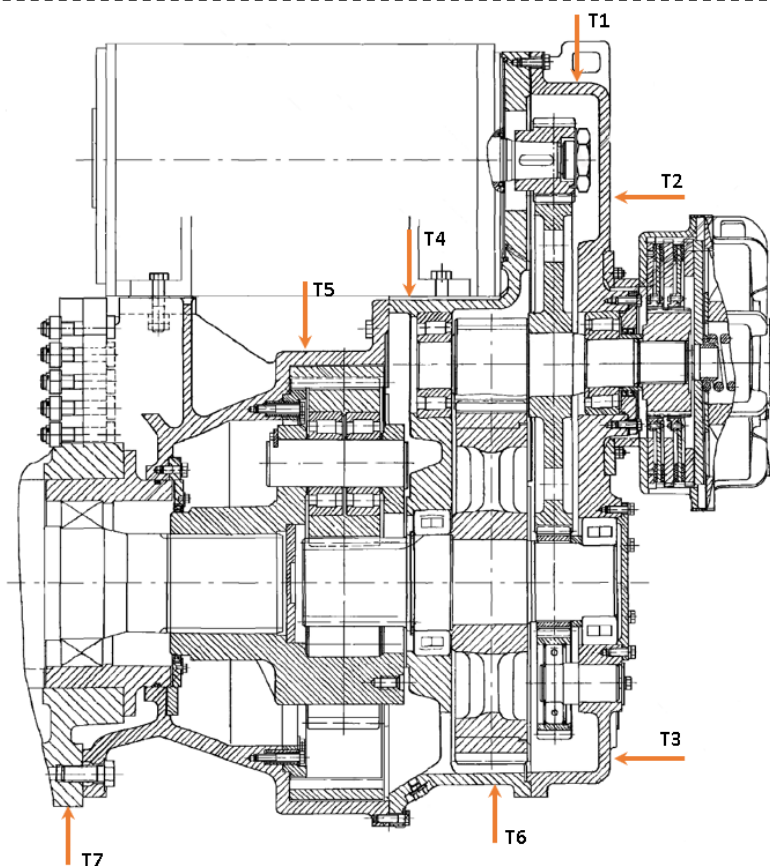


Рис. 1. Точки контроля вибрации на редукторе хода
 Fig. 1. Vibration monitoring points on the stroke gearbox

Таблица 3. Значения вибрации СКЗ виброускорения
 Table 3. Vibration values of the mean square value of vibration acceleration

Агрегат	Точка контроля	Параметр СКЗ виброускорения, м/с ²	Отклонение от значений правого редуктора	Результат
Правый редуктор хода	T1	1,18	-	Норма
	T2	2,12	-	Норма
	T3	1,95	-	Норма
	T4	6,82	-	Норма
	T5	2,67	-	Норма
	T6	15,03	-	Возможен дефект
	T7	2,23	-	Норма
Левый редуктор хода	T1	5,21	4,03	Норма
	T2	2,79	0,67	Норма
	T3	2,93	0,98	Норма
	T4	4,33	-2,49	Норма
	T5	4,67	2	Норма
	T6	4,66	-10,37	Норма
	T7	3,34	1,11	Норма

возникающие в этом случае огромные ускорения приведут к разрушению системы.

При контроле параметров вибрации во времени происходит усреднение показателей, но при этом используется не среднее значение, а среднее квадратическое значение (СКЗ) колебательной величины. Оно вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов всех мгновенных значений колебательной величины за период и математически записывается:

$$X_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_t^{1+T} [x(t)]^2 \times dt}$$

где: $X_{\text{СКЗ}}$ – параметр вибрационного сигнала; T – период колебания.

В соответствии с ГОСТ 10816-3-2002 допустимый уровень вибрации для редуктора хода принимается как соответствующий классу 2, имеющему податливые опоры. Как уровень «Предупреждение» принят уровень СКЗ виброскорости, соответству-

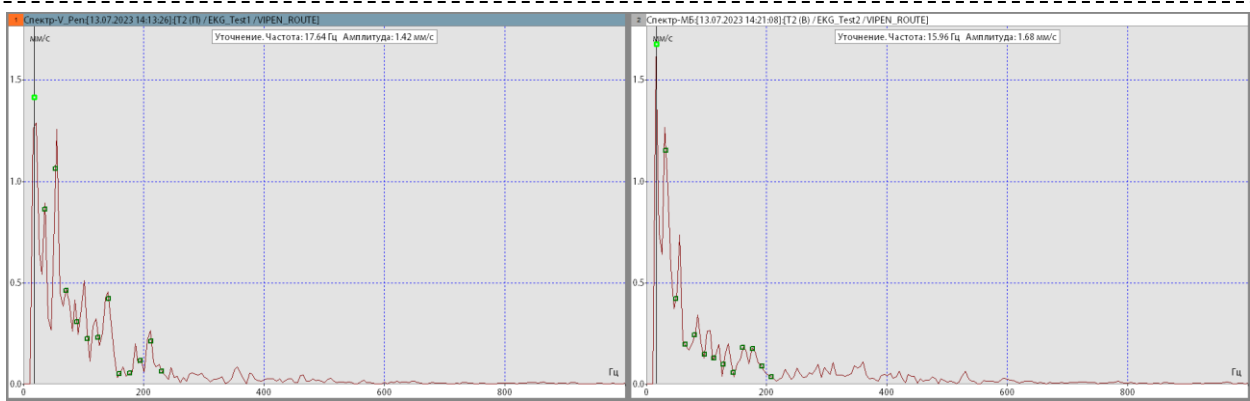


Рис. 2. Спектры виброскорости в T2 правого редуктора хода
 Fig. 2. Vibration velocity spectra in T2 of the right stroke gearbox

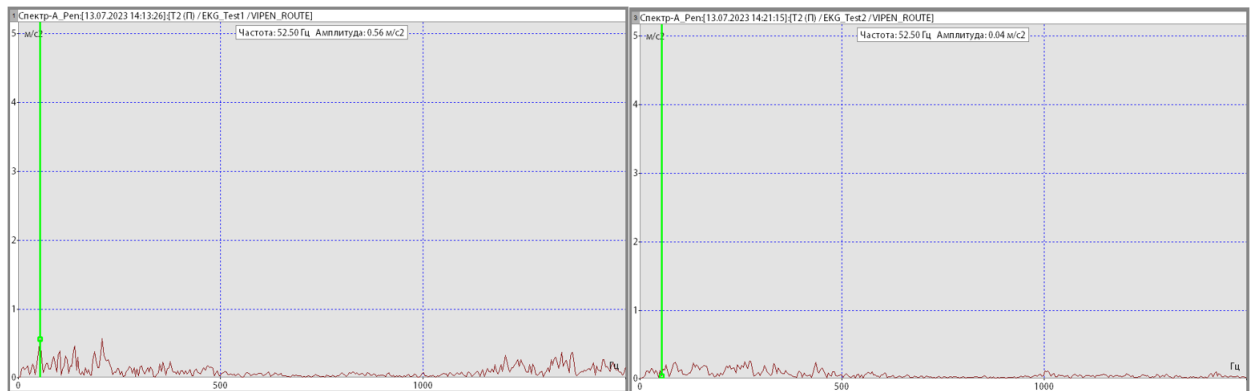


Рис. 3. Спектры виброускорения в T2 правого редуктора хода
 Fig. 3. Vibration acceleration spectra in T2 of the right stroke gearbox



Рис. 4. Спектры виброускорения в T6 правого редуктора хода
 Fig. 4. Vibration acceleration spectra in T6 of the right stroke gearbox

ющий переходу оборудования из зоны В в зону С – 4,5 мм/с. Как уровень «Авария» принят уровень СКЗ виброскорости соответствующий переходу

оборудования из зоны С в зону D – 7,1 мм/с. Скорости вращения ступеней редуктора приведены в Таблице 1.

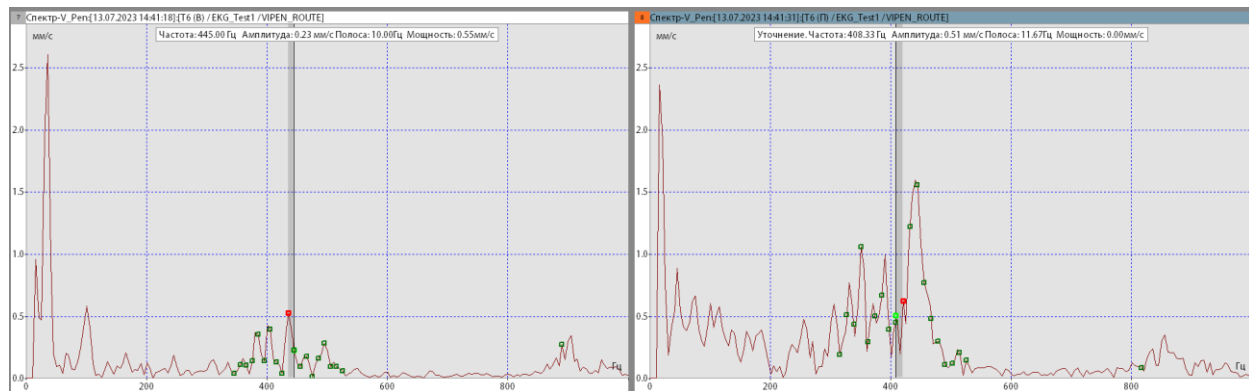


Рис. 5. Спектры виброскорости в Т6 правого редуктора хода
 Fig. 5. Vibration velocity spectra in T6 of the right stroke gearbox

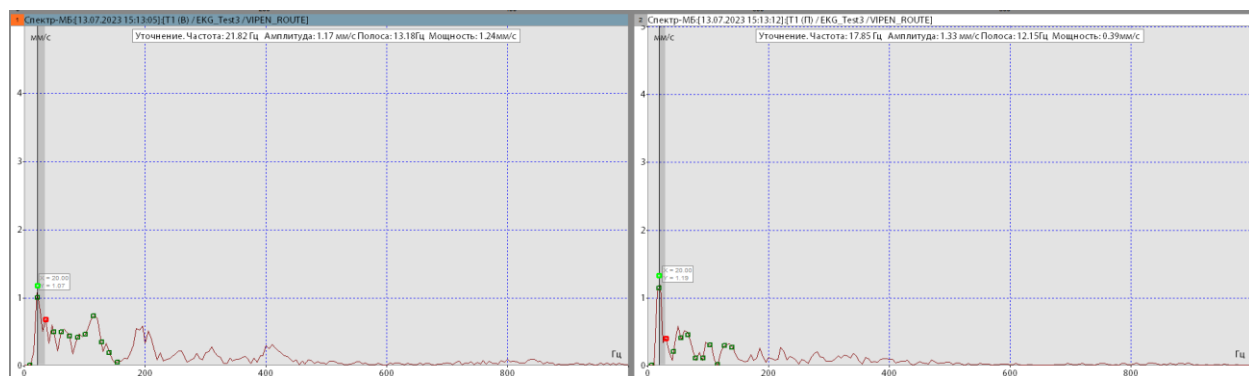


Рис. 6. Спектры виброскорости в Т1 левого редуктора хода
 Fig. 6. Vibration velocity spectra in T1 of the left stroke gearbox

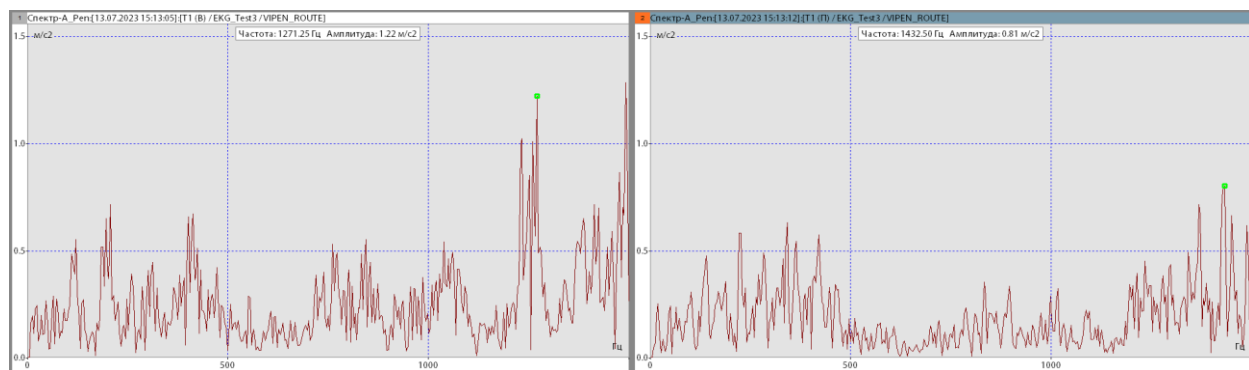


Рис. 7. Спектры виброускорения в Т1 левого редуктора хода
 Fig. 7. Vibration acceleration spectra in T1 of the left stroke gearbox

Схема контроля приведена на Рис. 1. Полученные значения вибрации СКЗ виброскорости в сравнении с допустимыми уровнями вибрации приведены в Таблице 2.

Общий уровень вибрации правого редуктора хода находится в зоне «предупреждение», а общий уровень вибрации левого редуктора превышает значение «Авария», установленное ГОСТ 10816-3-2002.

Полученные значения вибрации СКЗ виброускорения приведены в Таблице 3. На параметр виброускорения нет фиксированных предельных значений, поэтому мы будем использовать сравнение показателей двух редукторов друг с другом.

Общий уровень вибрации даст понимание о наличии или отсутствии в системе критических

проблем, но не позволяет определить источник повышенной вибрации, а также реагирует повышением своего уровня только тогда, когда дефект имеет значительный уровень развития дефекта. Для определения источников повышенной вибрации необходимо производить анализ спектров параметров вибрации и анализ формы сигнала. Виброручка ViPen, с помощью которой производился сбор данных об уровне вибрации и температуре, позволяет получить спектр виброускорения с диапазоном частот от 10 до 1,5 кГц с количеством линий 400, ширина линий 3,72 Гц. Для получения более детального спектра необходимо использовать более совершенные виброметры и виброручки, такие как ViPen2 или STD-510. Хранение данных и анализ спектров производился в программном обеспечении Safe Plant.

Анализ спектров виброскорости и виброускорения правого редуктора показывает, что:

1. Повышенный уровень виброскорости в Т2 не нашел подтверждения наличия дефекта по спектру виброскорости и виброускорения. В спектрах виброскорости (Рис. 2) не обнаружены гармонические ряды, что свидетельствует о том, что повышенный уровень вибрации не является в данном случае признаком дефекта, а является следствием воздействия случайных ударных нагрузок, вызванных нормальной работой оборудования.

В спектре виброускорения (Рис. 3) максимальная величина не превышает $0,57 \text{ м/с}^2$, и отсутствуют признаки гармонических рядов, что свидетельствует также об отсутствии признаков дефектов в оборудовании.

2. Наибольший вклад в повышенный уровень вибрации в спектре виброускорения в точке Т6 (Рис. 4) вносит модуляционный ряд на частоте $431,25 \text{ Гц}$ с полосой частот около $11,25 \text{ Гц}$. По форме модуляционного ряда он похож на дефект износа зубчатого колеса.

Аналогичный модуляционный ряд можно встретить на спектре виброскорости в данной точке (Рис. 5). Наличие на двух разных спектрах одного и того же модуляционного ряда с учетом погрешности, вызванной низкой разрешающей способностью прибора, свидетельствует о действительном наличии определенного износа в элементах редуктора.

Анализ спектров виброскорости и виброускорения левого редуктора показывает, что:

1. На спектре виброскорости Т1 (Рис. 6) нет

явных признаков значительных дефектов. Максимальная амплитуда не превышает $1,19 \text{ мм/с}$. На спектре виброускорения Т1 (Рис. 7) максимальная амплитуда не превышает $1,22 \text{ м/с}^2$, однако при этом в спектре достаточно большой вклад вносят высокочастотные вибрации (более 1000 Гц), что может быть признаком недостаточного объема масла в редукторе или деградацией смазочных свойств масла. Однако аварийное состояние анализом спектров не подтверждено.

2. На спектре виброскорости Т5 (Рис. 8) также отсутствуют признаки дефектов. Максимальная амплитуда не превышает $0,75 \text{ мм/с}$. На спектре виброускорения Т5 (Рис. 9) максимальная амплитуда не превышает $1,15 \text{ м/с}^2$, однако при этом в спектре достаточно большой вклад вносят высокочастотные вибрации (более 1000 Гц), что может быть признаком недостаточного объема масла в редукторе или деградацией смазочных свойств масла. Однако аварийное состояние анализом спектров не подтверждено.

Заключение

Анализ спектров показал, что разрешающей способности прибора ViPen недостаточно для проведения детального анализа спектров вибрационных показателей. Для конкретизации корневых причин повышенной вибрации оборудования необходимо проведение дополнительных измерений с использованием приборов с повышенной разрешающей способностью, имеющих не менее 1600 линий в диапазоне от 2 до 1000 Гц , что позволит уменьшить ширину линий в спектре до $0,62 \text{ Гц}$ и

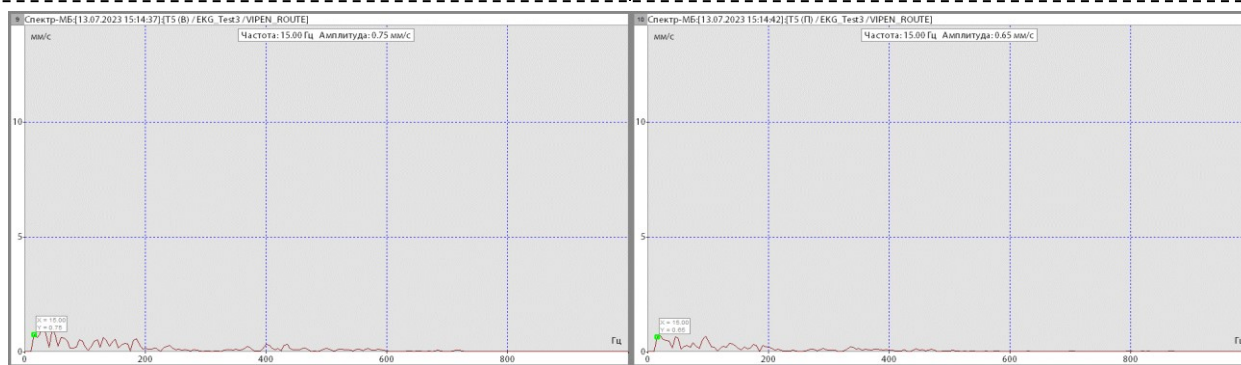


Рис. 8. Спектры виброскорости в Т5 левого редуктора хода
Fig. 8. Vibration velocity spectra in T5 of the left stroke gearbox

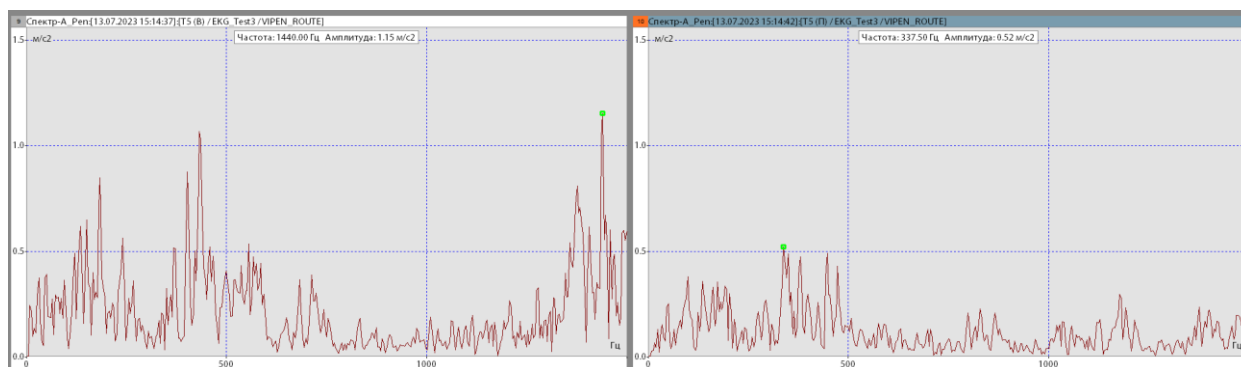


Рис. 9. Спектры виброускорения в Т5 левого редуктора хода
Fig. 9. Vibration acceleration spectra in T5 of the left stroke gearbox

повысит детализацию получаемых сигналов. Ширина линии использованного прибора ViPen меньше скорости вращения элементов второй ступени редуктора (3,72 Гц и 2,7 Гц соответственно), поэтому определение виброметром ViPen дефектов в элементах далее 2-й ступени редуктора возможно только путем мониторинга определенной полосы частот, характерной для выявленного дефекта и мониторинга общего уровня вибрации в агрегате.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что только в одном случае из четырех высокий уровень СКЗ параметра вибрации нашел подтверждение при анализе спектров. Несмотря на низкую разрешающую способность принятого прибора, такой результат свидетельствует о необходимости не только использовать замеры скалярных показателей, таких как виброскорость, виброускорение, но и производить анализ спектров параметров вибрации с максимально возможной разрешающей способностью оборудования.

Применение вибродиагностического метода для исследования надежности элементов карьерных экскаваторов позволяет на ранней стадии регистрировать и диагностировать с точностью до узла зону возникновения дефекта элементов ходового механизма.

По полученным результатам исследования будет составлена оценка технического состояния ходового оборудования карьерного экскаватора для условий ПАО «УРАЛАСБЕСТ» и предложен новый график технического обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрни Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ. М. : Недра, 1985. 544 с.
2. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Проектирование карьерных экскаваторов. М. : Инновационное машиностроение, 2017. 228 с.
3. Андреева Л. И. Комплексные решения для управления активами в системе технического обслуживания и ремонта горной техники // Проблемы недропользования. 2023. № 3(38). С. 79–88. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.079.
4. Андреева Л. И. Методический подход к оценке состояния горной техники и целесообразного срока ее эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 6(158). С. 38–43. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-38-43. EDN TTOOWA.
5. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
6. Лагунова Ю. А., Макарова В. В., Набиуллин Р. Ш. Анализ методов диагностирования состояния металлоконструкций на примере экскаваторостроения // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6(164). С. 17–25. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25.
7. Макарова В. В. Обзор и анализ применения методов диагностики напряженно-деформированного состояния элементов карьерных экскаваторов // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 1. С. 48–60. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-48-60
8. Герике Б. Л., Клишин В. И., Кузин Е. Г. Распознавание технического состояния редукторов горнотранспортного оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 184–192.
9. Kim S. H., Park J. W., Kim J. H. Functional data analysis for assessing the fatigue life of construction equipment attachments // Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35. P. 495–506. DOI: 10.1007/s12206-021-0108-0.
10. Zhang Z., Zhang H., Chen Y., Yan H. Research on dynamic load estimation method of crawler travel system // Journal of Mechanical Science and Technology. 2023. Vol. 37. P. 555–567. DOI: 10.1007/s12206-023-0102-9.
11. Bouhalais M. L., Djebala A., Ouelaa N., Khemissi M. CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. P. 2475–2489. DOI: 10.1007/s00170-017-1044-0.
12. Дрыгин С. Ю. Обоснование метода вибродиагностики технического состояния одноковшовых карьерных экскаваторов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дрыгин Сергей Юрьевич. – Кемерово, 2005. – 18 с. – EDN NIAYEP.
13. Дорошев А. Ю., Николайчук Д. Н. Вибродиагностика технического состояния подшипников электрических машин карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S38. С. 30–33. EDN XDYFUJ.
14. Герике П. Б. Выбор и обоснование параметров комплексного подхода для анализа вибрации экскаваторов типа ЭКГ // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 1(141). С. 13–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-13-19. – EDN OQRPIX.
15. Герике Б. Л., Абрамов И. Л., Герике П. Б. Спектральный метод вибродиагностики подшипниковых узлов карьерных экскаваторов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 3(61). С. 7–9.
16. Досайкин В. М., Фенстер Д. Б., Порозов Д. И. [и др.] Вибродиагностическое обследование электромеханического оборудования карьерных экскаваторов-мехлопат // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015. № 5(18). С. 22–25.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Лагунова Юлия Андреевна, проф., доктор техн. наук, Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Макарова Валерия Викторовна, аспирант, старший преподаватель, Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Быков Дмитрий Владимирович, руководитель проектов, ООО НПО «Диатех» (107061, Россия, г. Москва, Преображенская площадь, д. 8)

Адамков Аркадий Викторович, кандидат техн. наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Заявленный вклад авторов:

Лагунова Юлия Андреевна – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; проведение вибродиагностических испытаний; написание текста, выводы.

Макарова Валерия Викторовна – обзор соответствующей литературы; проведение вибродиагностических испытаний; написание текста.

Быков Дмитрий Владимирович – обработка экспериментальных данных; написание текста; сбор и анализ данных.

Адамков Аркадий Викторович – обработка экспериментальных данных; написание текста; сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-40-49

Yuliya A. Lagunova^{1,2}, **Valeriya V. Makarova**^{1,2}, **Dmitry V. Bykov**³, **Arkady V. Adamkov**⁴

¹Ural State Mining University

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

³LLC NPO “Diatekh”

⁴T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*E-mail: yu.lagunova@mail.ru

EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE STROKE GEARBOX OF A MINING EXCAVATOR



Article info

Received:

01 February 2024

Accepted for publication:

15 February 2024

Accepted:

01 March 2024

Published:

04 April 2024

Abstract.

The widespread introduction of various methods for diagnosing the technical condition of metal structures of domestic mining excavators is hampered by the lack of a strategy that takes into account modern trends of technology development, foreign and domestic experience in non-destructive testing during operation of machinery. Such a strategy should be based on a systematic approach to the analysis and assessment, first of all, of specific diagnostic methods for the relevant elements of the design of a mining excavator, taking into account its functioning. Since the failure of the undercarriage equipment of mining excavators is at the level of 35% of all types of downtime (planned, organizational and emergency), the development of a diagnostic method for the undercarriage equipment of mining excavators, which will improve the technical and economic indicators of the rock excavation process, is an urgent scientific issue. A technical task that meets the needs of mining production. The purpose of the research is to substantiate and develop a methodology for non-destructive testing of the functioning of undercarriage equipment to increase the efficiency of

Keywords: mining excavator, stroke gearbox, vibration diagnostics, displacement, velocity, acceleration, data analysis

domestic mining excavators of the "mechanical shovel" type. Research methods include generalization and analysis of literary sources, theoretical and experimental research methods based on the classical laws of mathematics, physics, and vibration. As a result of the research, a new approach to preventing of emergency before its occurrence through the use of domestic diagnostic equipment is proposed.

For citation: Lagunova Yu.A., Makarova V.V., Bykov D.V., Adamkov A.V. Evaluation of the technical condition of the stroke gearbox of a mining excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 1(171):40-49 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-40-49, EDN: BIOHMR

REFERENCES

1. Poderni P.Iu. Mining machines and systems for opencast. Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ).
2. Lagunova Ju.A., Komissarov A.P., Shestakov V.S. Proektirovanie kar'ernyh jekskavatorov. M.: Innovacionnoe mashinostroenie; 2017. Pp. 228. (In Russ).
3. Andreeva L.I. Complex solutions for asset management in the system of maintenance and repair of mining equipment. *Problems of Subsoil Use*. 2023; 3(38):79–88. (In Russ). DOI 10.25635/2313-1586.2023.03.079.
4. Andreeva L.I. Methodological approach to evaluating the condition of mining machines and the practical period of its operation. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021; 6(158):38–43. (In Russ). DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-38-43.
5. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemelyanov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):86–94. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
6. Lagunova Ju.A., Makarova V.V., Nabiullin R.Sh. Analysis of methods for diagnosing the state of metal structures on the example of excavator construction. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2022; 6(164):17–25. (In Russ.) Available from: DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25.
7. Makarova V.V. Analysis and review of the application of diagnostic methods for mining excavator elements stress-strain state assessment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 1: 48–60 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-48-60
8. Gerike B.L., Klishin V.I., Kuzin E.G., 2017. Raspoznavanie tekhnicheskogo sostoyaniya reduktorov gornotransportnogo oborudovaniya [Recognition of the technical condition of gearboxes of mining and transport equipment]. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017; 3:184–192. (In Russ).
9. Kim S.H., Park J.W., Kim J.H. Functional data analysis for assessing the fatigue life of construction equipment attachments. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021; 35:495–506. DOI: 10.1007/s12206-021-0108-0.
10. Zhang Z., Zhang H., Chen Y., Yan H. Research on dynamic load estimation method of crawler travel system. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023; 37:555–567. DOI: 10.1007/s12206-023-0102-9.
11. Bouhalais M.L., Djebala A., Ouelaa N., Khemissi M. CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 94:2475–2489. DOI: 10.1007/s00170-017-1044-0.
12. Drygin S.Yu. Obosnovanie metoda vibrodiagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya odnokovshovykh kar'ernyh ekskavatorov : special'nost' 05.05.06 "Gornye mashiny" : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Drygin Sergej Yur'evich. Kemerovo, 2005. 18 s. (In Russ).
13. Doroshev A.U., Nikolaychuk D.N. Vibrodiagnostika a technical condition of the bearings of electrical machines mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016;(S38):30–33.(In Russ).
14. Gericke P.B. Choice and justification of integrated approach parameters for the analysis of vibration of EKG-type mining shovels. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019; 1(141):13–19. (In Russ).
15. Gerike B.L., Abramov I.L., Gerike P.B. Spectral method of vibration diagnostics of bearing units of mining excavators. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of The Kuzbass State Technical University*. 2007; 3(61):7–9. (In Russ).
16. Dosaykin V.M., Fenster D.B., Porozov D.I., Terentiev E.A., Gubantsev A.N. Vibrodiagnostic survey of electromechanical equipment on quarry shovels. *Modern science: current problems and ways for their solutions*. 2015; 5(18):22–25. (In Russ).

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Yuliya A. Lagunova, Professor, Dr. Sc. in Engineering, Ural State Mining University (30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, 620144, Russia), Ural Federal University (19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia)

Valeriya V. Makarova, Postgraduate, Senior Lecturer, Ural Federal University (19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia), Ural State Mining University (30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, 620144, Russia)

Dmitry V. Bykov, Project manager, LLC NPO “Diatekh”, (8 Preobrazhenskaya Square, Moscow, 107061, Russia)

Arkady V. Adamkov, C. Sc. in Engineering, Associate Professor of the Department of Mining, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28)

Contribution of the authors:

Yuliya A. Lagunova – research problem statement; scientific management; conceptualisation of research; conducting vibration diagnostic tests; writing the text, drawing the conclusions.

Valeriya V. Makarova – reviewing the relevant literature; conducting vibration diagnostic tests; writing the text.

Dmitry V. Bykov – processing of experimental data; writing text; data collection; data analysis.

Arkady V. Adamkov – processing of experimental data; writing text; data collection; data analysis.

Author have read and approved the final manuscript.

