

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11>

УДК 622.232.054.54-044.952-047.36:621.83.061.1:534.63.087 (045)

Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний

Часть 1. Методика исследований

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, А. С. Романович²⁾,
канд. техн. наук И. А. Конопляник²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Унитарное производственное предприятие «Нива» Романовича С. Г. (Солигорск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Вибромониторинг – наиболее методически развитый и технически обеспеченный средствами регистрации и обработки полученных данных подход. Однако в источниках научно-технической информации о горной технике он представлен гораздо реже, чем иные методы мониторинга. Один из перспективных путей решения этой проблемы, в частности мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительных органов, – использование параметров собственных колебаний частей редукторов, возникающих при импульсном нагружении, обусловленном такими поломками. Следует отметить, что в технически сложном оборудовании горной отрасли, в частности в горных комбайнах, существует немало источников вибрации, колебания которых накладываются друг на друга. И не всегда можно выделить и идентифицировать с источником требуемый информативный сигнал. С учетом этого в статье приведена методика исследований о возможности мониторинга поломок резцов исполнительного органа на примере горного комбайна «Универсал 600» по параметрам возникающих при поломке резцов собственных колебаний режущих дисков исполнительного органа. Определено место регистрации этих колебаний – рукояти редуктора, на выходных валах которых размещены режущие диски. Установлена частота таких колебаний, равная ~5 Гц. Обоснована возможность использования в качестве средств дальнейших исследований виброанализатора «АГАТ-М» с датчиками вибрации M/AC102-1A. Рассмотрен вариант размещения датчиков вибрации на невращающихся корпусах редукторов привода исполнительного органа. Разработан алгоритм регистрации параметров вибрации, позволяющий разделить ее источники.

Ключевые слова: алгоритм, вибрация, горный комбайн, мониторинг, поломка резцов, собственные колебания

Для цитирования: Шелег, В. К. Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 1: Методика исследований / В. К. Шелег, А. С. Романович, И. А. Конопляник // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11>

Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters

Part 1. Research Methodology

V. K. Sheleg¹⁾, A. S. Romanovich²⁾, I. A. Konoplianiuk²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Unitary Production Enterprise [UPE] “Niva” of Romanovich S. G. (Soligorsk, Republic of Belarus)

Abstract. Vibromonitoring is the most methodologically developed and technically equipped with recording tools and data processing approach. However, in the sources of scientific and technical information about mining it is presented much less than other monitoring methods. One of the promising ways to solve this problem, in particular monitoring the breakage

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

of cutting disc cutters of an executive body, is to use parameters of natural oscillations of the parts of gearboxes that occur during impulse loading due to such breakages. It should be noted that in the technically complex equipment of the mining industry, in particular in mining machines, there are many sources of vibration, the vibrations of which are superimposed on each other. And it is not always possible to isolate and identify the required informative signal with the source. With this in mind the paper presents a research methodology on the possibility of monitoring the breakage of the executive body cutters on the example of the continuous miner "Universal 600" according to the parameters of natural vibrations of the executive body cutting discs arising from the breakage of the cutters. The place of registration of these vibrations is determined – the gearbox handles, on the output shafts of which cutting discs are placed. The frequency of such vibrations is set equal to ~5 Hz. The possibility of using the AGAT-M vibration analyzer with M/AC102-1A vibration sensors as a means of further research has been substantiated in the paper. The paper considers an option of placing vibration sensors on non-rotating gear housings of the executive body drive. An algorithm for recording vibration parameters has been developed, which makes it possible to separate its sources.

Keywords: algorithm, vibration, continuous miner, monitoring, cutter breakage, natural vibrations

For citation: Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konopliank I. A. (2022) Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters. Part 1: Research Methodology. *Science and Technique*. 21 (1), 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-5-11> (in Russian)

Введение

Вибромониторинг приводных систем можно отнести к одному из наиболее интенсивно развивающихся направлений в технике [1–15]. При его реализации используются различные методы обработки зарегистрированного в режиме реального времени сигнала о колебаниях, генерируемых зубчатыми колесами или подшипниками на крышках подшипниковых узлов или корпусных деталях. Вибромониторинг – методически развитое и технически обеспеченное средство регистрации и обработки полученных данных. Однако в источниках научно-технической информации о горной технике он упоминается гораздо реже, чем иные методы мониторинга. Это может быть обусловлено тем фактором, что в наиболее распространенном и технически сложном оборудовании горной отрасли, в частности в горных комбайнах, существует значительное число источников вибрации, колебания которых накладываются друг на друга. И не всегда можно выделить и идентифицировать с источником требуемый информативный сигнал. Кроме того, многие источники вибрации генерируют колебания на близких частотах. К одному из перспективных путей решения таких проблем, в частности в области мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительных органов, можно отнести использование параметров собственных колебаний частей редукторов, возникающих при импульсном нагружении, обусловленном этими поломками.

Цель исследований – возможность мониторинга поломок резцов режущих дисков исполнительного органа горного комбайна по параметрам собственных колебаний, регистри-

руемых на невращающихся частях корпусов редукторов его привода.

Методика исследований

Поломка резца в режущем диске приводит к увеличению, по меньшей мере вдвое, нагруженности следующего за ним на режущем диске резца. Поскольку с породой одновременно взаимодействуют около 30–40 % резцов режущего диска, это может практически не сказываться на нагруженности электродвигателя привода исполнительного органа, но оказывать существенное влияние на ресурс зубчатого редуктора привода режущих дисков и увеличивать неравномерность распределения нагрузки между рукоятями редуктора двухпоточного исполнительного органа горного комбайна. Как следствие – одна из рукоятей редуктора исполнительного органа может оказаться более нагруженной при сохранении общей номинальной мощности электродвигателя. Более того, при поломке нескольких резцов в ряде случаев может произойти поломка зубчатых колес или выход из строя подшипникового узла в кинематической цепи привода вращения режущего диска.

Учитывая существенное увеличение близкой к импульсной нагруженности резца (следующего за поломанным резцом) при его взаимодействии с породой, в исполнительном органе могут возникать механические колебания его компонентов с собственной частотой. Эти колебания накладываются на колебания, генерируемые значительным числом источников, состоящих в основном из зубчатых передач редуктора двухпоточного привода исполнительного органа, схема которого показана на рис. 1. Наиболее значимые по амплитуде зубцовые частоты этих передач приведены в табл. 1.

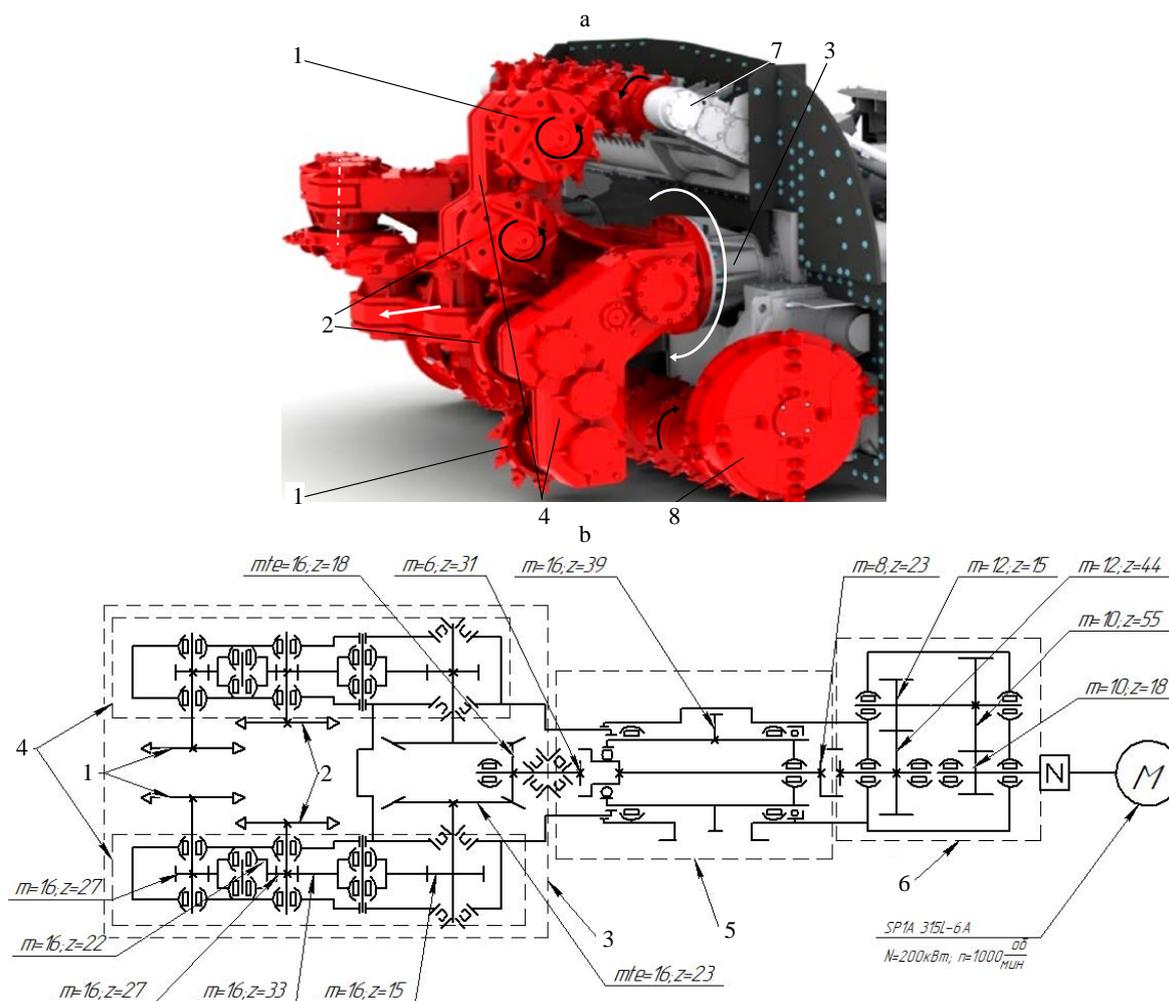


Рис. 1. Общий вид режущих органов горного комбайна «Универсал 600» (а) и кинематическая схема привода исполнительного органа (б): 1, 2 – наружный и внутренний режущие диски; 3 – зубчатый редуктор привода вращения режущих дисков с коническими зубчатыми колесами z18 и z23; 4 – рукояти зубчатого редуктора привода вращения режущих дисков, в которых размещена цепь прямозубых шестерен z27, z22, z33 и z15; 5 – корпус редуктора привода вращения исполнительного органа с приводной шестерней z39; 6 – корпус входного зубчатого редуктора с z44, z15, z55 и z18; 7 – отбойное устройство; 8 – бермовый орган

Fig. 1. General view of cutting elements of the “Universal 600” continuous miner (a) and drive kinematic diagram of executive body (b): 1, 2 – external and internal cutting discs; 3 – gear reducer of cutting disc rotation drive with bevel gears z18 and z23; 4 – handles of drive gearbox for rotation of cutting discs, in which the chain of spur gears z27, z22, z33 and z15 is placed; 5 – gearbox housing of actuator rotation drive with drive gear z39; 6 – input gearbox housing with z44, z15, z55 and z18; 7 – fender; 8 – berm organ

Таблица 1

Обратные и зубцовые частоты колебаний, возникающих при работе привода исполнительного органа горного комбайна «Универсал 600»
 Revolving and cutter vibration frequencies arising during operation of executive body drive of “Universal 600” continuous miner

| Вал трансмиссии | Частота, Гц | | |
|--|-------------|----------|---------------------------------|
| | оборотная | зубцовая | взаимодействия резцов с породой |
| Зубчатое колесо m16z27, установленное на валу наружного режущего диска 1 редуктора 3 | 0,8 | 21,5 | 9,6 |
| Зубчатое колесо m16z27, установленное на валу внутреннего режущего диска 2 редуктора 3 | 0,8 | 21,5 | 4,8 |
| Коническая шестерня mte16z18 редуктора 3 | 1,9 | 33,5 | – |
| Электродвигатель | 16,6 | – | – |

Необходимо отметить, что регистрация колебаний вращающихся компонентов привода режущих дисков в условиях агрессивной, чрезвычайно запыленной внешней среды и повышенных требований к обеспечению взрывобезопасности не совсем тривиальная задача. С учетом этого при мониторинге поломок резцов горного комбайна возникает необходимость решения следующих взаимосвязанных между собой задач:

- выбора той части исполнительного органа, у которой возникают механические колебания с собственной частотой при начальном взаимодействии резцов с породой, и определения значения этой частоты для ее использования при мобильном мониторинге поломок резцов;

- выявления наличия приведенных выше механических колебаний с собственной частотой на невращающихся частях комбайна, оценки возможности их регистрации и выделения из спектра вибрации;

- оценки возможности определения по изменению амплитуды регистрируемых механических колебаний с собственной частотой изменения импульсной нагруженности механической системы, обусловленной ее возрастанием (по меньшей мере вдвое) при начальном взаимодействии с породой следующего за поломанным резца, формирования соответствующих требований к средствам мониторинга.

Таким образом, для осуществления перечисленных выше задач необходимо:

- определить части привода режущих дисков исполнительного органа, у которых возникают собственные механические колебания при импульсном нагружении, обусловленном начальным взаимодействием резцов с породой;

- выделить невращающиеся части привода исполнительного органа, в вибрации которых могут присутствовать частоты приведенных выше механических колебаний с собственной частотой, и оценить ориентировочное влияние на них вибраций, связанных с этими частями зубчатых приводов горного комбайна.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ конструкции исполнительного органа горного комбайна «Универсал 600» показал, что к наиболее рациональной части привода данного органа, у которой могут возникать механические колебания с собственной частотой при импульсном нагружении режущих дисков,

можно отнести достаточно упругоподатливые консольно расположенные рукояти 4 зубчатого редуктора 3 (рис. 1), на выходных валах которого размещены режущие диски. Для определения совпадения частот механических колебаний с собственной частотой рукоятей зубчатого редуктора привода исполнительного органа на крышке подшипникового узла корпуса этого редуктора размещали с магнитной фиксацией пьезоэлектрический датчик М/АС102-1А (рис. 2а). После этого на резце режущего диска импульсным молотком создавалось ударное нагружение. Возникающие при этом колебания фиксировались виброанализатором «АГАТ-М».

Виброанализатор «АГАТ-М», используемый совместно с программным обеспечением «ДИАМАНТ-2», имел частотный диапазон 2–10000 Гц, АЦП 14 бит, количество линий спектра 100, 200, 400 и 800, длину выборки сигналов 256, 512, 1024, 2048, объем памяти 2 Мбит. В его комплект, кроме двух датчиков вибрации М/АС102-1А, входили установочный магнит и импульсный молоток. Важная особенность виброанализатора «АГАТ-М» – это то, что при его исполнении 2ExpLПСТ4Х прибор может использоваться во взрывоопасных условиях эксплуатации категорий В-1а, В-1б, В-1г для измерения параметров вибрации.

В результате анализа полученных данных установлено, что частота собственных механических колебаний рукоятей зубчатого редуктора двухпоточного привода исполнительного органа ~5 Гц. При изучении конструктивного исполнения привода исполнительного органа комбайна выделены части этого привода (рис. 1): корпус зубчатого редуктора с коническими зубчатыми колесами z18 и z23, передающими вращение на две рукояти с выходными валами для установки режущих дисков.

Для разделения источников вибрации в качестве базового принимали алгоритм, в котором ее регистрация осуществлялась:

- при вращении только режущих дисков;
- при вращении режущих дисков и исполнительных органов;
- при работе приводов бермового и отбойного органов горного комбайна.

В процессе обработки диагностической информации определяли и анализировали пять основных (наиболее значимых по амплитуде) частот спектра вибрации. При этом выявляли наиболее характерные частоты колебаний, приведенные в табл. 1.

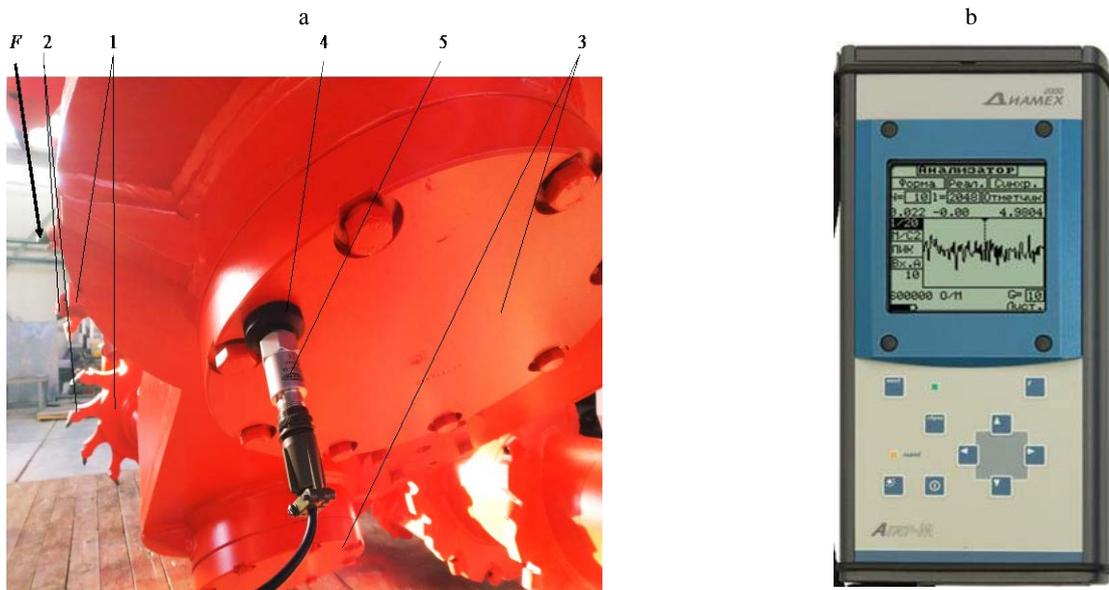


Рис. 2. Место установки датчика вибрации M/AC102-1A на крышке подшипникового узла вала зубчатого редуктора привода вращения режущих дисков (а) и вибронализатор «АГАТ-М» фирмы «Диамех» (б): 1 – режущий диск; 2 – резец; 3 – крышка подшипниковых узлов валов с режущими дисками; 4 – установочный магнит; 5 – датчик вибрации M/AC102-1A; F – импульсная сила

Fig. 2. Mounting location of vibration sensor M/AC102-1A on the cover of bearing unit installed on gear reducer shaft in cutting disc rotation drive (a) and vibration analyzer AGAT-M of “Diamekh” company (b): 1 – cutting disc; 2 – cutter; 3 – cover of bearing shaft units with cutting discs; 4 – adjusting magnet; 5 – vibration sensor M/AC102-1A; F – impulse force

В результате анализа определяли возможность осуществления мониторинга и наиболее рациональное место установки датчика M/AC102-1A с позиций:

- его размещения на невращающихся частях приводов механической системы;
- выделения возникающих при начальном взаимодействии резца режущего диска с импульсным молотком колебаний с частотой 5 Гц из амплитудного спектра;

- формирования требований к аппаратным средствам, позволяющим достоверно определить амплитуду выделяемых колебаний;
- невращающегося относительно основания комбайна корпуса редуктора 5 привода вращения исполнительного органа;
- невращающегося относительно основания комбайна корпуса входного редуктора 6.

Внутренние и внешние источники возникающих колебаний на корпусе зубчатого редуктора (рис. 1) с коническими зубчатыми колесами z18 и z23 показаны на рис. 3.

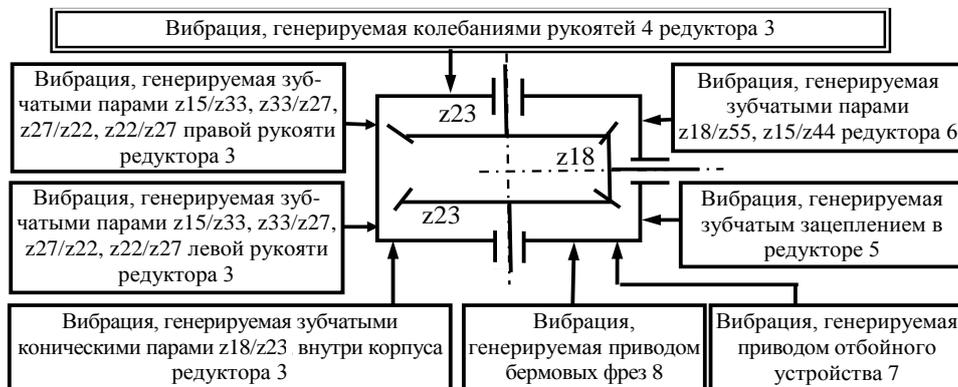


Рис. 3. Источники колебаний, возникающих на корпусе зубчатого редуктора 3 с коническими зубчатыми колесами z18 и z23 привода исполнительного органа горного комбайна

Fig. 3. Sources of vibrations arising on the gearbox housing 3 with bevel gears z18 and z23 of the executive body drive of the continuous miner

С учетом анализа источников колебаний, возникающих на корпусе зубчатого редуктора с коническими зубчатыми колесами $z18$ и $z23$, были установлены датчики вибрации М/АС102-1А (рис. 4), коммутированные с виброанализатором «АГАТ-М», на невращающихся корпусах

редуктора вращения исполнительного органа (рис. 4а) и входного редуктора (рис. 4б). Кроме того, датчики вибрации М/АС102-1А устанавливали также на корпусах редукторов бермовых фрез (рис. 4с) и отбойного устройства (рис. 4д).

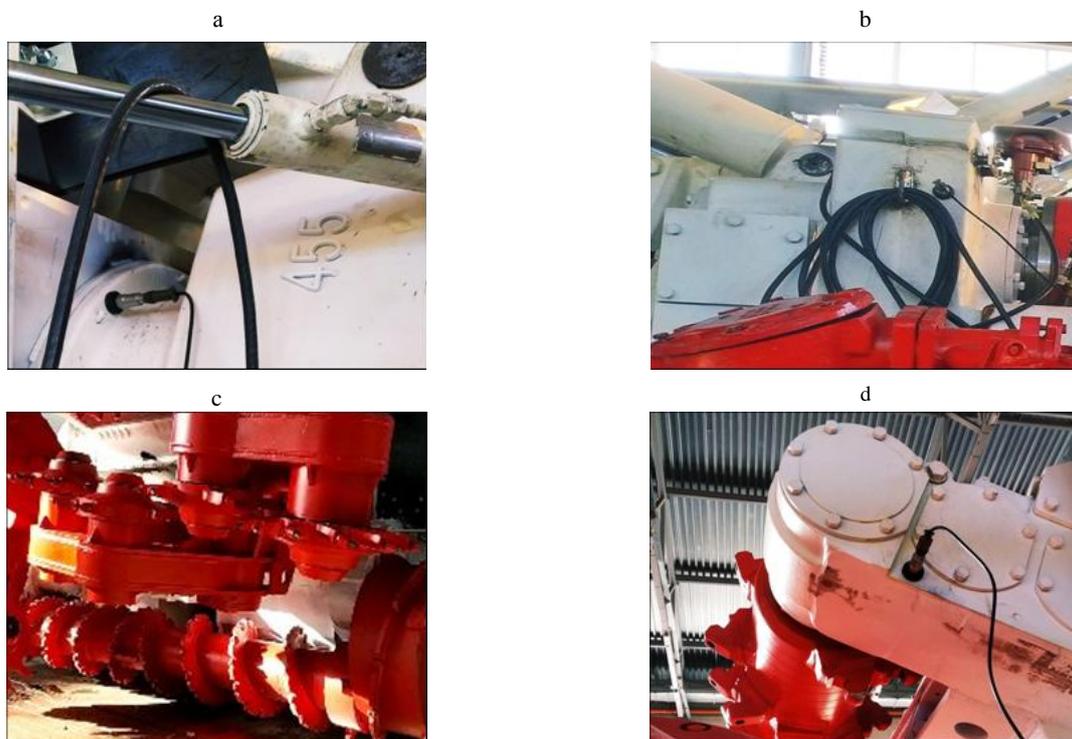


Рис. 4. Места расположения датчиков вибрации М/АС102-1А на корпусах: а – редуктора вращения исполнительного органа; б – входного редуктора; с – редуктора бермовых фрез; д – редуктора отбойного устройства

Fig. 4. Locations of M/AC102-1A vibration sensors on housings: а – gearbox of executive body rotation; б – input gearbox; с – gearbox of berm cutters; д – gearbox of fender

ВЫВОД

На основе анализа результатов исследований определены:

– источник механических колебаний с собственной частотой, возникающих при начальном взаимодействии резца режущего диска с импульсным молотком, в качестве которого определены рукояти исполнительного органа с режущими дисками на выходных валах;

– собственная частота механических колебаний рукоятей исполнительного органа, равная ~ 5 Гц, что позволило обосновать возможность использования в качестве средств дальнейших исследований виброанализатор «АГАТ-М» с датчиками вибрации М/АС102-1А;

– алгоритм работы комбайна при съеме диагностической информации, позволяющий разделить источники вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mechanical Vibration Analysis Using an Optical Sensor / F. Claveau [et al.] // Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1996. Vol. 2. P. 876–879. <https://doi.org/10.1109/CCECE.1996.548292>.
2. Dalpiaz, G. A. Kineto-Elastodynamic Model of a Gear Testing Machine / G. Dalpiaz, A. Rivola, R. Rubini // Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, MTM'97. China, Beijing, 1997. P. 549–553.
3. Amabili, M. Dynamic Analysis of Spur Gear Pairs: Steady-State Response and Stability of the SDOF Model with Time-Varying Meshing Damping / M. Amabili, A. Rivola // Mechanical Systems and Signal Processing. 1997. Vol. 3, No 11. P. 375–390. <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0072>.
4. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния машин по вибрации корпуса: пат. Рос. Федерации № 2103668 / В. Н. Костюков, С. Н. Бойченко, А. В. Костюков. Опубл. 27.01.1998.
5. Барков, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова // Сб. труд. Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтоп-

- энерго и Института вибрации США (Vibration Institute, USA). СПб., 1999. Вып. 9.
6. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. морск. тех. ун-та, 2000. 169 с.
 7. Fault Diagnostics Using Statistical Change Detection in the Bispectral Domain / Jr. B. E. Parker [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2000. Vol. 14, No 4. P. 561–570. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1299>.
 8. Устройство для виброакустической диагностики передач зацеплением: пат. Респ. Беларусь 632 U / Я. В. Басинюк, Н. Н. Ишин, И. Н. Усс, В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич, Л. М. Антюшеня. Опубл. 30.09.2002.
 9. Басинюк, Я. В. Вибродиагностика зубчатых передач на основе использования информационных технологий / Я. В. Басинюк // *Современные методы конструирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр. / под общ. ред. П. А. Витязя. Минск: Технопринт, 2002. Вып. 1, Т. 2. С. 440–450.*
 10. Dempsey, P. Integrating Oil Debris and Vibration Gear Damage Detection Technologies Using Fuzzy Logic / P. Dempsey, A. Afjeh // *Journal of the American Helicopter Society*. 2004. Vol. 49, No 2. P. 109–116. <https://doi.org/10.4050/JAHS.49.109>.
 11. Ишин, Н. Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н. Н. Ишин. Минск: Беларус. навука, 2013. 432 с.
 12. Технология вибрационного диагностирования подшипников качения колесно-моторных блоков локомотивов [Электронный ресурс] / А. В. Барков [и др.] // Северо-Западный учебный центр. 2014. Режим доступа: <https://vibro-expert.ru/tehnologiya-vibracionnogo-diagnostirovaniya-podshipnikov-kacheniya-kolesno-motornix-blokov-lokomotivov.html>.
 13. Барков, А. В. Возможности стационарных систем вибромониторинга и оперативной вибродиагностики [Электронный ресурс] / А. В. Барков // Северо-Западный учебный центр. 2015. Режим доступа: <https://vibro-expert.ru/vozmojnosti-stacionarnix-sistem-vibromonitoringa-i-operativnoie-vibrodiagnostiki.html>.
 14. Ишин, Н. Н. Теоретические и экспериментальные методы и средства вибрационно-импульсного диагностирования зубчатых передач трансмиссионных узлов мобильных машин / Н. Н. Ишин. Минск, 2015. 52 с.
 15. Диагностика и мониторинг технического состояния на пути к «Индустрии 4.0» / Н. Н. Ишин [и др.] // *Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов*. Минск, 2018. Вып. 7. С. 245–250.
- Поступила 02.11.2021
Подписана в печать 10.01.2022
Опубликована онлайн 28.01.2022
- REFERENCES
1. Claveau F., Fortier P., Lord S., Gingras D. (1996) Mechanical Vibration Analysis Using an Optical Sensor. *Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2, 876–879. <https://doi.org/10.1109/CCECE.1996.548292>.
 2. Dalpiaz G. A., Rivola A., Rubini R. (1997) Kineto-Elastodynamic Model of a Gear Testing Machine. *Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, MTM'97*. China, 549–553.
 3. Amabili M., Rivola A. (1997) Dynamic Analysis of Spur Gear Pairs: Steady-State Response and Stability of the SDOF Model with Time-Varying Meshing Damping. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 3 (11), 375–390. <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0072>.
 4. Kostyukov V. N., Boychenko S. N., Kostyukov A. V. (1998) *Method for Diagnosing and Predicting Technical State of Machines by Body Vibration*. Patent Russian Federation No 2103668 (in Russian).
 5. Barkov A. V., Barkova N. A. (1999) Intelligent Systems for Monitoring and Diagnostics of Machines by Vibration. *Sb. Trud. Peterburgskogo Energeticheskogo Instituta Povysheniya Kvalifikatsii Mintopenergo i Instituta Vibratsii SShA (Vibration Institute, USA)* [Collection of Works of Petersburg Power Engineering Institute for Advanced Studies of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation and the Vibration Institute, USA]. St. Petersburg, Iss. 9 (in Russian).
 6. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. (2000) *Monitoring and Diagnostics of Rotary Machines by Vibration*. Saint-Petersburg, Publishing House of Saint-Petersburg State Marine Technical University. 169 (in Russian).
 7. Parker Jr. B. E., Ware H. A., Wipf D. P., Tompkins W. R., Clark B. R., Larson E. C., Poor H. V. (2000) Fault Diagnostics Using Statistical Change Detection in the Bispectral Domain. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14 (4), 561–570. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1299>.
 8. Basinyuk Ya. V., Ishin N. N., Uss I. N., Basinyuk V. L., Mardosevich E. I., Antyushenya L. M. (2002) *Device for Vibroacoustic Diagnostics of Meshed Gears*: Patent of the Republic of Belarus No 632 U (in Russian).
 9. Basinyuk Ya. V. (2002) Vibration Diagnostics of Gear Transmissions Based on the Use of Information Technologies. *Sovremennye Metody Konstruirovaniya Mashin. Raschet, Konstruirovaniye i Tekhnologiya Izgotovleniya: Sb. Nauch. Tr.* [Modern Methods of Machine Design. Calculation, Design and Manufacturing Technology: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Tekhnoprint Publ., Iss. 1, Vol. 2, 440–450 (in Russian).
 10. Dempsey P., Afjeh A. (2004) Integrating Oil Debris and Vibration Gear Damage Detection Technologies Using Fuzzy Logic. *Journal of the American Helicopter Society*, 49 (2), 109–116. <https://doi.org/10.4050/JAHS.49.109>.
 11. Ishin N. N. *Dynamics and Vibration Monitoring of Gears*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 432 (in Russian).
 12. Barkov A. V., Barkova N. A., Degtarev S. G., Komyakov A. V. (2014) Technology of Vibration Diagnostics of Rolling Bearings of Wheel-Motor Blocks of Locomotives. *Northwestern Training Center*. Available at: <https://vibro-expert.ru/tehnologiya-vibracionnogo-diagnostirovaniya-podshipnikov-kacheniya-kolesno-motornix-blokov-lokomotivov.html>.
 13. Barkov A. V. (2015) Capabilities of Stationary Systems for Vibration Monitoring and Operational Vibration Diagnostics. *Northwestern Training Center*. Available at: <https://vibro-expert.ru/vozmojnosti-stacionarnix-sistem-vibromonitoringa-i-operativnoie-vibrodiagnostiki.html>.
 14. Ishin N. N. (2015) *Theoretical and Experimental Methods and Means of Vibration-Pulse Diagnostics of Gears of Transmission Units of Mobile Machines*. Minsk. 52 (in Russian).
 15. Ishin N. N., Goman A. M., Skorokhodov A. S., Daka-lo Yu. A., Natur'eva M. K. (2018) Diagnostics and Monitoring of Technical Condition on the Way to “Industry 4.0”. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Topical Issues of Mechanical Engineering: a Collection of scientific Papers], Minsk, (7), 245–250 (in Russian).
- Received: 02.11.2021
Accepted: 10.01.2022
Published online: 28.01.2022