

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106>

УДК 622.232.054.54-044.952-047.36:621.83.061.1-026.31 (045)

## Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний

### Часть 2. Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний редуктора с собственной частотой

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>, А. С. Романович<sup>2)</sup>, канд. техн. наук И. А. Конопляник<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

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

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

**Реферат.** Создание системы мобильного мониторинга для диагностики технического состояния объектов горной техники по параметрам механических колебаний является одним из самых наукоемких направлений. В статье приведены результаты изучения возможности выделения возникающих при поломках резцов на режущих дисках двухпоточных приводов исполнительного органа горного комбайна механических колебаний рукоятей с собственной частотой  $\approx 5$  Гц, которая с большей или меньшей амплитудой присутствует практически во всех зарегистрированных спектрах. Поэтому ее можно использовать для оперативного мобильного мониторинга поломок резцов исполнительных органов горных комбайнов. Анализ колебаний подтвердил, что они передаются практически на все невращающиеся части комбайна, где могут быть зарегистрированы, что позволяет использовать их для мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов на режущих дисках. На примере комбайна «Универсал-600» установлено, что наиболее удобным при регистрации этих колебаний с позиции отсутствия необходимости введения в измерительный тракт модуля передачи сигнала с вращающихся частей комбайна можно считать размещение датчика вибрации на корпусе входного редуктора привода исполнительного органа с ориентацией его в направлении движения комбайна, где колебания частотой 5 Гц являются преобладающими и их достаточно просто выделить из низкочастотного диапазона с использованием стандартизированных низкочастотных третьоктавных фильтров. Предложена методика создания системы автоматизированного мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний режущих дисков с собственной частотой.

**Ключевые слова:** горный комбайн, вибрация, мобильный мониторинг, собственные колебания, поломка

**Для цитирования:** Шелег, В. К. Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 2: Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний редуктора с собственной частотой / В. К. Шелег, А. С. Романович, И. А. Конопляник // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 99–106. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106>

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

### Part 2. Methodology for Creating a System for Mobile Monitoring of Cutter Breakages According to the Parameters of Mechanical Vibrations of the Gearbox with Natural Frequency

V. K. Sheleg<sup>1)</sup>, A. S. Romanovich<sup>2)</sup>, I. A. Konoplianiuk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

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

**Abstract.** The development of research in the field of creating a mobile monitoring system for diagnosing the technical condition of mining equipment in terms of mechanical vibration parameters is one of the most science-intensive areas. The paper presents the results of investigations on the possibility of isolating the mechanical vibrations of the handles with a natural

#### 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

frequency of  $\approx 5$  Hz, which occur with a greater or lesser amplitude in almost all registered spectra, arising from breakages of cutters on the cutting discs of double-flow drives of the executive body of a mining machine. Therefore, it can be used for operational mobile monitoring of breakages in the cutters of the executive bodies of mining machines. An analysis of vibrations has confirmed the fact that they are transmitted to almost all non-rotating parts of the combine, where they can be registered, which allows them to be used for mobile automated monitoring of cutter breakages on cutting discs. On the example of the combine "Universal-600" it has been found that the most convenient when registering these vibrations from the standpoint of the absence of the need to introduce a signal transmission module from the rotating parts of the combine into the measuring path can be considered the placement of a vibration sensor on the body of the input gearbox of the executive body drive with its orientation in the direction combine movements, where oscillations with a frequency of 5 Hz are prevalent and it is quite simple to isolate them from the low-frequency range using standardized low-frequency one-third octave filters. The paper proposes a technique for creating a system for automated mobile monitoring of cutter breakages based on the parameters of mechanical vibrations of cutting discs with natural frequency.

**Keywords:** mining machine, vibration, mobile monitoring, natural vibrations, breakage

**For citation:** Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konoplianiuk I. A. (2022) Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters. Part 2: Methodology for Creating a System for Mobile Monitoring of Cutter Breakages According to the Parameters of Mechanical Vibrations of the Gearbox with Natural Frequency. *Science and Technique*. 21 (2), 99–106. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106> (in Russian)

## Введение

Мониторинг технического состояния объектов по параметрам механических колебаний, в том числе собственных, можно отнести к одному из самых наукоемких направлений диагностики. Достаточно давно и широко он используется во многих сферах, включая такую ответственную, как авиационное [1–11]. Этот метод в полной мере может быть отнесен к неразрушающим способам контроля, эффективность которого обусловлена, прежде всего, высокой информативностью, наличием широкой номенклатуры серийно выпускаемых и постоянно совершенствующихся средств мониторинга, а также весьма развитой методической базой, включая нормативную документацию. Вместе с тем использование методов мониторинга, основанных на компьютеризированной обработке параметров колебаний для оценки технического состояния режущих инструментов в горных комбайнах, очень ограничено. Причина этого – наличие целого комплекса проблем, прежде всего обусловленных:

– наличием в приводных системах режущих органов горного комбайна достаточно сложных, содержащихся в редукторах цепочек паразитных шестерен, колебания которых проблематично выделить из параметров вибрации, регистрируемой на корпусах этих редукторов;

– высоким уровнем агрессивности среды и требований к взрывобезопасности.

Поэтому развитие исследований в области создания системы мобильного мониторинга технического состояния объектов горной техники по параметрам механических колебаний в основном осуществляется в направлении создания собственно средств мониторинга.

Цель исследований – разработка методических подходов к созданию системы мобильного мониторинга поломок резов режущих дисков горного комбайна «Универсал-600» по параметрам возникающих при этом механических колебаний с собственной частотой рукоятей двухпоточного редуктора привода исполнительного органа.

## Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резов

С учетом характера изменения глубины резания изменение квазистатической нагрузки на резец от его входа до выхода из породы может быть описано расчетной зависимостью, в графическом виде имеющей вид, близкий к половине синусоиды (рис. 1а). Учитывая одновременное взаимодействие с породой 30–40 % расположенных на режущем диске резов, создаваемая им расчетная суммарная квазистатическая нагрузка на привод близка к постоянной (рис. 1б, линия 1). Однако при поломке реза возникает относительно небольшое отклонение от постоянной нагруженности (рис. 1б, линия 2) и, более того, близкое к импульсному нагружение на режущий диск и на связанную с ним достаточно упруго податливую рукоять редуктора привода вращения режущих дисков, создаваемое при входе в породу следующего за поломанным реза. В результате этого возникают механические колебания этой рукояти с собственной частотой ( $\sim 5$  Гц), как было показано в первой части статьи, которые передаются на связанные с ней остальные элементы привода исполнительного органа.

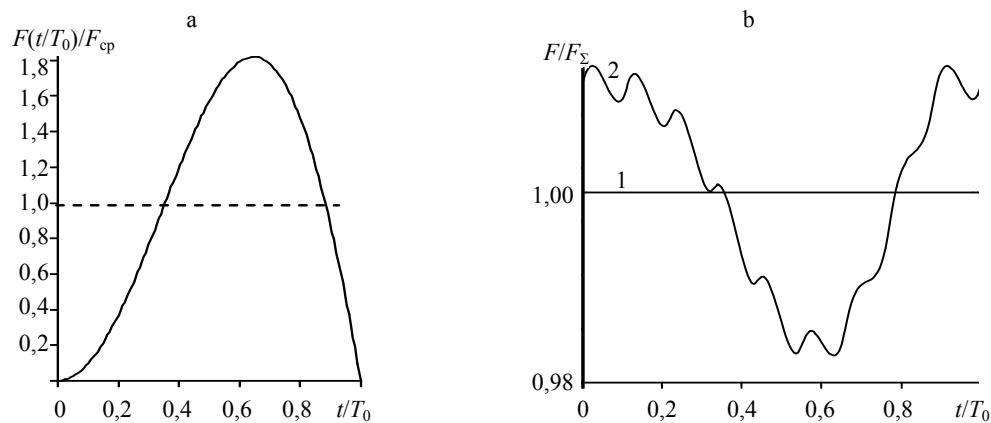


Рис. 1. Графики изменения относительной нагруженности реза от его входа до выхода из породы (а) и относительной суммарной окружной нагруженности режущего диска (б): 1 – при отсутствии поломок резцов; 2 – при поломке одного резца

Fig. 1. Graphs of changes in the relative loading of the cutter from its entrance to the exit from the rock (a) and the relative total circumferential loading of the cutting disc (b): 1 – in the absence of cutter breakage; 2 – when one cutter breaks

Для оценки возможности регистрации механических колебаний на невращающихся частях горного комбайна «Универсал-600» устанавливали датчики вибрации М/АС102-1А: на корпусах его редукторов – редуктора привода вращения исполнительного органа, входного редуктора, редукторов приводов бермовых фрез и отбойного устройства. Исследования проводили в условиях предприятия-изготовителя и эксплуатации.

На предприятии-изготовителе импульсное воздействие на резец осуществляли при вращении: только режущих дисков; только исполнительных органов; одновременно режущих дисков и исполнительных органов; поочередно, а затем одновременно всех приводных систем остальных режущих органов комбайна. Виброускорения регистрировали в течение 10–15 с.

В условиях эксплуатации исследования проводили сначала при полнокомплектной установке резцов на внешнем и внутреннем режущих дисках, затем поочередно на внешнем и внутреннем режущих дисках снимали один из резцов. В течение 30–40 с в реальном времени регистрировали параметры виброускорений. После этого определяли спектры виброускорений, строили осциллограммы колебаний, выделяли их амплитуды, осуществляя их анализ и обработку с привязкой к реальному времени.

### Обработка результатов

Результаты исследований в условиях предприятия-изготовителя приведены в табл. 1 и на рис. 2. Их анализ показал следующее:

– механические колебания рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков исполнительного органа с собственной частотой 5 Гц с большей или меньшей амплитудой были зарегистрированы практически на всех корпусах редукторов (привода вращения исполнительного органа, входного, бермовых фрез и отбойного устройства) в режиме работы всех приводов режущих органов горного комбайна, что подтвердило возможность их регистрации с его невращающихся частей при создании системы мониторинга поломок резцов на режущих дисках исполнительного органа;

– к наиболее удобным способам регистрации механических колебаний рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков с собственной частотой 5 Гц с позиций отсутствия необходимости введения в измерительный тракт системы передачи сигнала с вращающихся частей комбайна можно отнести размещение датчика вибрации на упомянутом редукторе, где регистрируемые амплитуды колебаний с этой частотой являются преобладающими (рис. 2с, табл. 1) и существенно выделяются по частоте от ближайших в низкочастотном диапазоне колебаний, что позволяет использовать соответствующие стандартизованные низкочастотные третьоктавные фильтры и относительно недорогие компьютеризированные средства обработки диагностических данных.

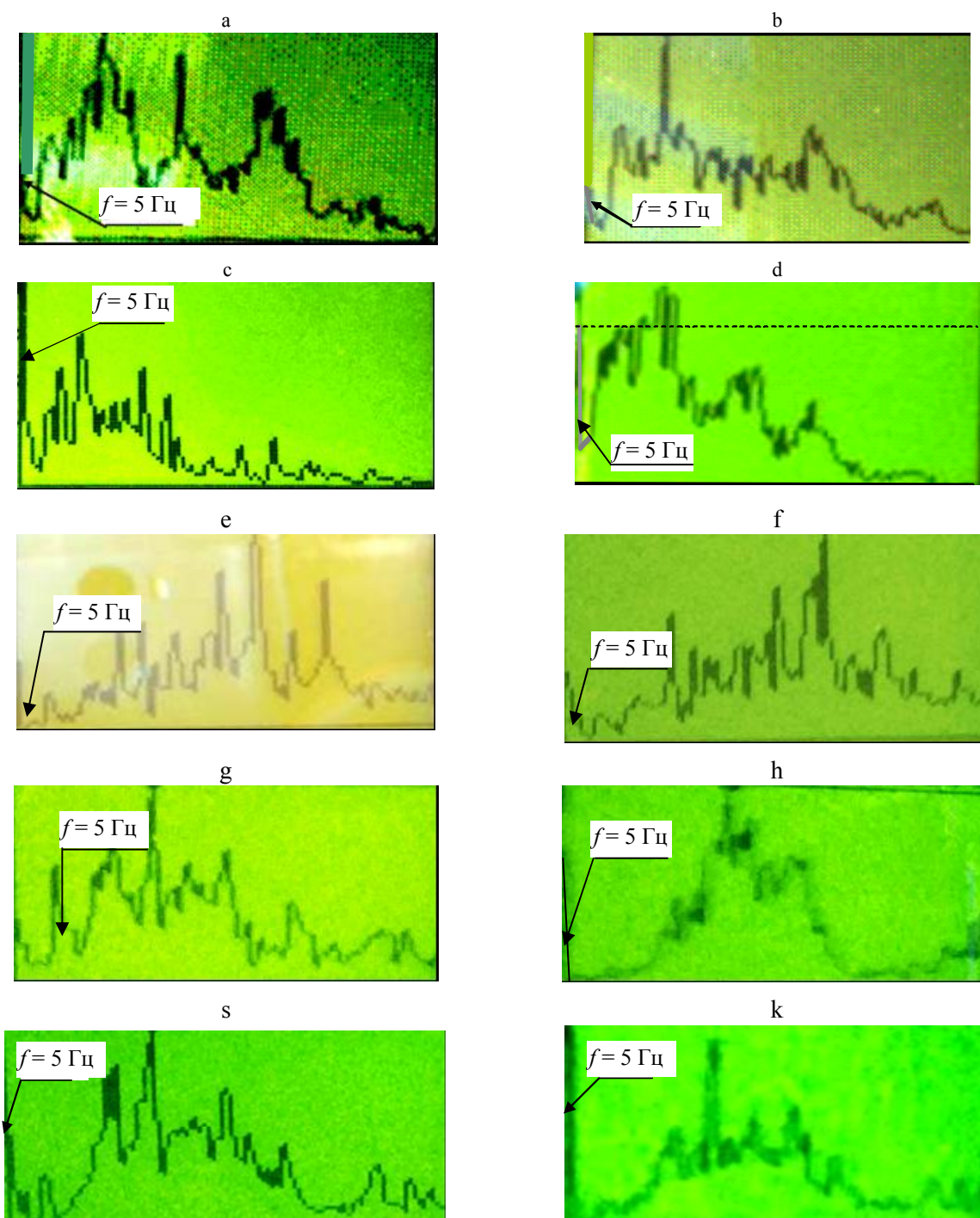


Рис. 2. Спектры вибрации, зарегистрированные: на корпусе редуктора привода вращения режущих дисков при вращении: а – только режущих дисков; б – только исполнительного органа; с – режущих дисков и исполнительного органа; на корпусе редуктора привода вращения исполнительного органа при вращении: d – только режущих дисков; e – только исполнительного органа; f – режущих дисков и исполнительного органа; на редукторе: g – бермовых фрез при его работе; h – отбойного устройства при его работе; на корпусе входного редуктора при работе: s – приводов всех режущих органов; k – только приводов исполнительных органов

Fig. 2. Vibration spectra recorded: on the gearbox housing of the rotation drive of the cutting discs during rotation: a – when only cutting discs rotate; b – when only executive body rotates; c – when cutting discs and executive body rotate; on the gearbox housing of the rotation drive of the executive body during rotation: d – when only cutting discs rotate; e – when only executive body rotates; f – when cutting discs and executive body rotate; on the gearbox: g – berm cutters during its operation; h – fender during its operation; on the input gearbox housing during the operation: s – drives of all cutting bodies; k – only drives of executive bodies

Таблица 1

**Пять наиболее значимых по амплитуде частот, зарегистрированных виброметром «Агат-М» при исследовании колебаний основных компонентов горного комбайна «Универсал-600»**  
**Five most significant frequencies in terms of amplitude registered by the “Agat-M” vibrometer in the study of vibrations of the main components of “Universal-600” mining machine**

Амплитуда по значимости	Компонент горного комбайна					
	Зубчатый редуктор привода вращения режущих дисков. Вращение					
	РД* (рис. 2а)		ИО** (рис. 2б)		РД и ИО (рис. 2с)	
	Частота механических колебаний $f$ , Гц	Виброускорение $a$ , $m/c^2$	Частота механических колебаний $f$ , Гц	Виброускорение $a$ , $m/c^2$	Частота механических колебаний $f$ , Гц	Виброускорение $a$ , $m/c^2$
1	200	0,015	200	0,017	<b>5</b>	<b>0,0024</b>
2	195	0,014	195	0,0115	150	0,0017
3	390	0,014	240	0,0021	145	0,0014
4	210	0,0134	235	0,0070	100	0,0014
5	215	0,0133	575	0,0069	200	0,0013
	Редуктор привода вращения исполнительного органа. Вращение					
	РД (рис. 2д)		ИО (рис. 2е)		РД и ИО (рис. 2ф)	
	$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$	$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$	$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$
	1	215	0,0140	605	0,0060	600
2	205	0,0138	355	0,0055	595	0,0263
3	240	0,0135	300	0,0050	575	0,0258
4	245	0,0132	680	0,0050	490	0,0243
5	220	0,0125	705	0,0049	555	0,0236
	Редуктор бермовых фрез (рис. 2г)			Отбойное устройство (рис. 2h)		
	$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$		$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$	
	1	320	0,0174	375	0,0339	
	2	225	0,0148	430	0,0314	
3	490	0,0126	425	0,0294		
4	325	0,0122	405	0,0286		
5	240	0,0122	385	0,0282		
	Редуктор входной. Работа приводов					
	всех режущих органов (рис. 2s)			исполнительных органов (рис. 2k)		
	$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$		$f$ , Гц	$a$ , $m/c^2$	
	1	330	0,0490	<b>5</b>	<b>0,0514</b>	
2	320	0,0320	330	0,0494		
3	245	0,0435	320	0,0410		
4	225	0,0407	330	0,0404		
5	330	0,0389	510	0,0319		

\*РД – режущий диск.  
 \*\*ИО – исполнительный орган.

При обработке данных осциллограмм виброускорений (рис. 3), зарегистрированных в условиях эксплуатации режущих органов горного комбайна, определяли среднее значение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, их среднее квадратическое отклонение  $S$  и коэффициент вариации  $v$ . В осциллограммах колебаний с отсутствующим резцом выделяли и анализировали амплитудные значения, выходящие за диапазон  $\pm 3S$ , т. е. обусловленные

возросшим вдвое импульсным нагружением рукояти.

В процессе проверки однородности дисперсий, которую осуществляли с использованием критерия Кохрена при 5%-й доверительной вероятности, получили значение  $G = 0,4777 < 0,5466$ , что подтвердило их однородность и позволило оценить статистическую значимость различия средних значений амплитуд при доверительной вероятности 0,95.

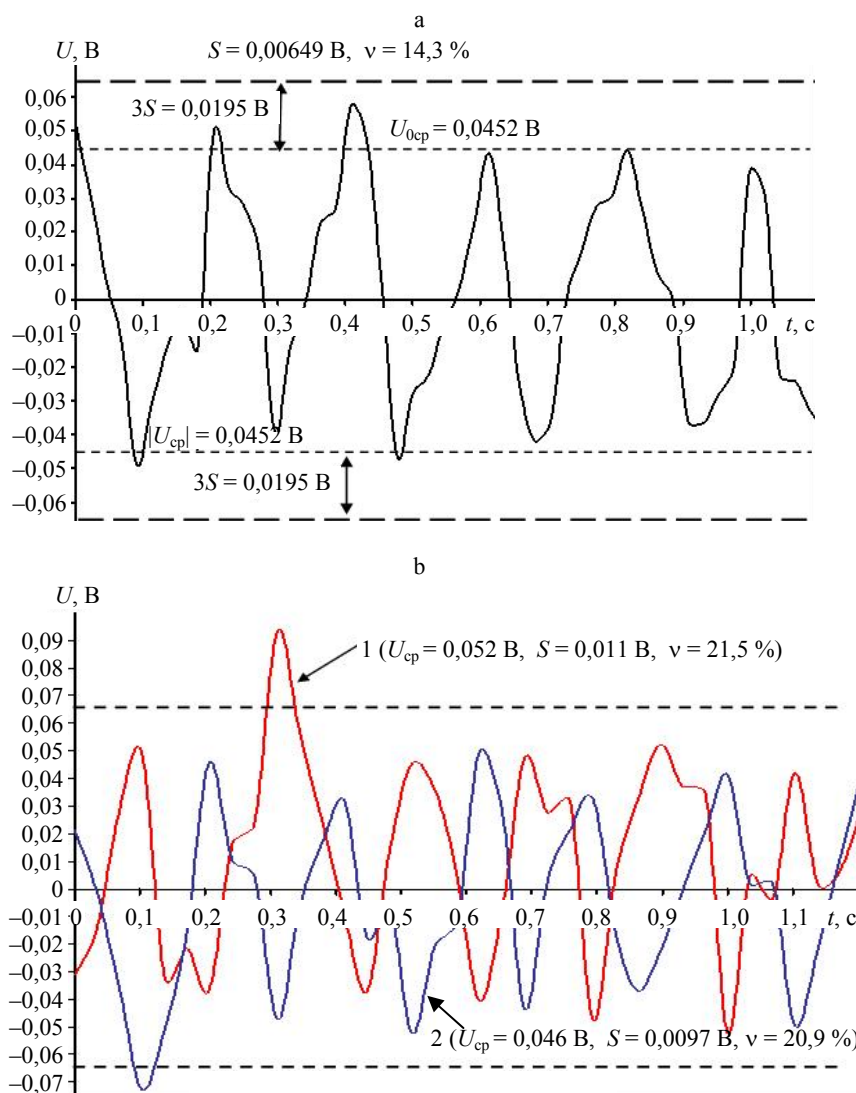


Рис. 3. Типовые участки осциллограмм механических колебаний с частотой 5 Гц при: а – полном комплекте резцов на режущих дисках; б – отсутствии одного резца на наружном 1 и внутреннем 2 режущих дисках

Fig. 3. Typical sections of oscillograms of mechanical vibrations with a frequency of 5 Hz at: a – complete set of cutters on cutting discs; b – absence of one cutter on outer 1 and inner 2 cutting discs

Анализ полученных результатов показал следующее:

– различия между средними значениями амплитуд механических колебаний с частотой 5 Гц рукоятей зубчатого редуктора двухпоточного привода вращения режущих дисков исполнительного органа, зарегистрированных при полном комплекте резцов на режущих дисках и отсутствии одного резца на одном из них, статистически незначимы. Это не позволяет использовать средние значения амплитуд данных колебаний для мониторинга поломок резцов,

что хорошо коррелирует с результатами ранее проведенных теоретических исследований;

– при отсутствии резца одна из амплитуд механических колебаний с частотой 5 Гц, зарегистрированная за оборот режущего диска, превышает утроенное среднее квадратическое отклонение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, что позволяет использовать этот фактор для своевременного выявления поломок резцов и создания системы мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов на режущих дисках горного комбайна.

С учетом результатов исследований в основу методических подходов к созданию системы мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов режущего диска горного комбайна «Универсал-600» по параметрам возникающих при этом механических колебаний с собственной частотой 5 Гц рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков исполнительного органа может быть отмечено следующее:

– средства мониторинга должны обеспечивать регистрацию колебаний в третьоктавном диапазоне со срединной частотой 5 Гц, частотой дискретизации регистрируемого сигнала не менее 50 Гц и объемом регистрируемой в виде файла диагностической информации за 10–12 оборотов режущего диска;

– средства обработки зарегистрированных данных должны обеспечить выделение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, расчет их среднего значения и среднего квадратического отклонения и определение отклонения выделенных амплитуд виброускорений от среднего значения с оповещением оператора о поломках резцов при величине этого отклонения более трех квадратических отклонений.

## ВЫВОД

В результате анализа результатов исследований установлено, что механические колебания рукоятей двухпоточного редуктора привода исполнительного органа с собственной частотой 5 Гц передаются практически на все корпуса невращающихся редукторов привода и могут быть выделены при всех режимах их работы, что подтверждает возможность регистрации этих колебаний при мониторинге поломок резцов на режущих дисках исполнительного органа. Вместе с тем их регистрация наиболее удобна на зубчатом двухпоточном редукторе привода исполнительного органа, где регистрируемые амплитуды колебаний с этой частотой являются преобладающими и существенно выделяются по частоте от ближайших в низкочастотном диапазоне колебаний, что позволяет использовать соответствующие стандартизованные низкочастотные третьоктавные филь-

тры и относительно недорогие компьютеризированные средства обработки диагностических данных. При этом могут быть применены средства мониторинга, обеспечивающие регистрацию колебаний в третьоктавном диапазоне со срединной частотой 5 Гц, частотой дискретизации регистрируемого сигнала не менее 50 Гц и объемом регистрируемой в виде файла диагностической информации за 10–12 оборотов режущего диска, а также средства обработки зарегистрированных данных, позволяющие выделить амплитуды колебаний с частотой 5 Гц, выполнить расчет их среднего значения и среднего квадратического отклонения и определить отклонения выделенных амплитуд виброускорений от их среднего значения с оповещением оператора о поломках резцов при величине этого отклонения более трех квадратических отклонений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методы проектирования композиционных динамически подобных моделей агрегатов самолетов [Электронный ресурс] / А. М. Азаров [и др.] // Учебные записки ЦАГИ. 2006. № 4. С. 42–54.
2. Влияние системы упругого вывешивания на точность результатов модальных испытаний летательных аппаратов / В. А. Бернс [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 1. С. 18–27. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-1-18-27>.
3. Зимин, В. Н. Разработка методов анализа динамики и оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа / В. Н. Зимин. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 309 с.
4. Киселев, Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники [Электронный ресурс] / Ю. В. Киселев, Д. Ю. Киселев, С. Н. Тиц. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королева, 2012. Режим доступа: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Vibracionnaya-dagnostika-sistem-i-konstrukcii-aviacionnoi-tehniki-Elektronnyi-resurs-uchebnik-54417>.
5. Неразрушающий контроль: справочник / А. В. Барков [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика. 829 с.
6. Кобяков, И. Б. Векторная виброметрия – технология XXI века / И. Б. Кобяков, Д. В. Малютин, А. А. Сперанский // Датчики и системы. 2006. № 1. С. 2–7.
7. Косицын, А. В. Метод вибродиагностики дефектов упругих конструкций на основе анализа собственных форм колебаний / А. В. Косицын // Приборы и методы измерений. 2011. Т. 3, № 2. С. 129–135.



8. Вибрационный способ диагностики начала процесса разрушения в элементах конструкции объекта: пат. 2284518 Рос. Федерации, МПК G01N29/04, G01M7/00 / М. В. Нариманов, Т. В. Нариманов. Оpubл. 27.09.2006.
9. Способ определения параметров собственных тонов колебаний конструкций в резонансных испытаниях: пат. 2658125 Рос. Федерации, МПК G01M7/00 / В. А. Бернс, Е. П. Жуков, В. В. Маленкова. Оpubл. 19.06.2018.
10. Идентификация дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций в процессе эксплуатации / В. А. Бернс [и др.] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. Т. 27, № 2. С. 24–42. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-2-24-42>.
11. Опыт контроля дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций / В. А. Бернс [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4. С. 86–96.

Поступила 02.11.2021

Подписана в печать 10.01.2022

Опубликована онлайн 31.03.2022

#### REFERENCES

1. Azarov A. M., Zichenkov M. Ch., Ishmuratov F. Z., Chedrik V. V. (2006) Methods for Designing Composite Dynamically Similar Models of Aircraft Units. *Uchenye Zapiski TsAGI* [Study notes of Central Aerohydrodynamic Institute], (4), 42–54 (in Russian).
2. Berns V. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P., Marinin D. A. (2016) Influence of the Elastic Suspension System on the Accuracy of the Results of Modal Tests of Aircraft. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Tekhnika, Tekhnologii i Mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 15 (1), 18–27. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-1-18-27> (in Russian).
3. Zimin V. N. (2008) *Development of Methods for Analyzing Dynamics and Evaluating the Performance of Large-Size Expanding Space Structures of a Truss Type*. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University. 309 (in Russian).
4. Kiselev Yu. V., Kiselev D. Yu., Tits S. N. (2012) *Vibration Diagnostics of Systems and Structures of Aviation Equipment*. Samara: Publishing House of the Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev. Available at: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Vibracionnaya-dagnostika-sistem-i-konstrukcii-aviacionnoi-tehniki-Elektronnyi-resurs-uchebnik-54417>.
5. Barkov A. V., Barkova N. A., Vasil'eva R. V., Gol'din A. S., Zusman A. V., Sokolova A. G., Shirman A. R., Yakubovich V. A. (2005) *Non-Destructive Testing: Reference Book. Vol. 7. Book 2. Vibration Diagnostics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 829 (in Russian).
6. Kobayakov I. B., Malyutin D. V., Speransky A. A. (2006) Vector Vibrometry – Technology of the XXI Century. *Datchiki i Sistemi = Sensors & Systems*, (1), 2–7 (in Russian).
7. Kositsyn A. V. (2011) Method of Vibration Diagnostics of Defects in Elastic Structures Based on the Analysis of Natural Vibration Modes. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 3 (2), 129–135 (in Russian).
8. Narimanov M. V., Narimanov T. V. (2006) *Vibration Method for Diagnostics of the Beginning of the Destruction Process in the Structural Elements of the Object*. Patent of Russian Federation No 2284518 (in Russian).
9. Burns V. A., Zhukov E. P., Malenкова V. V. (2018) *Method for Determining the Parameters of Natural Tones of Structure Vibrations in Resonance Tests*. Patent of Russian Federation No 2658125 (in Russian).
10. Burns V. A., Lysenko E. A., Marinin D. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P. (2015) Aircraft Defect Identification by Vibration Parameters in Operation. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 27 (2), 24–42. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-2-24-42> (in Russian).
11. Burns V. A., Lysenko E. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P. (2016) Experience in Controlling Aircraft Defects by Vibration Parameters. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 18 (4), 86–96 (in Russian).

Received: 02.11.2021

Accepted: 10.01.2022

Published online: 31.03.2022