

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-182.2-133:620.178.53

doi:10.30987/2658-6436-2022-3-16-23

ЕЩЕ РАЗ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОСТОЯНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

Михаил Сергеевич Чепчуров¹, Александр Михайлович Сумской²,
Виктория Евгеньевна Минасова³

^{1,3}БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия

²Политехнический колледж №8 им. И.Ф. Павлова, г. Москва, Россия

¹avtpost@mail.ru

²sumskoiam@yandex.ru

³vika314TM@yandex.ru

Аннотация. Предложен авторский вариант предварительной диагностики состояния поверхностей качения крупногабаритных технологических агрегатов. Исследования построены, опираясь на требования нормативных документов, регламентирующих проведение вибрационной диагностики оборудования, и обработки результатов полученных измерений. Предложен свой, обоснованный в работе, вариант размещения вибродатчиков на элементах оборудования, в том числе, использование беспроводных датчиков, размещаемых на вращающихся элементах оборудования. При этом, выбор предлагаемого протокола передачи данных обеспечивает контроль состояния технологического агрегата в реальном режиме времени, при значительных габаритах самого оборудования. В соответствии с требованиями стандартов, эти решения позволяют обеспечить надёжное функционирование технологических агрегатов и оборудования. Разработанный алгоритм позволяет выполнить сравнительную оценку в диагностируемых узлах и элементах оборудования и определить не только дефектный элемент, но его вид и примерное расположение на поверхности элемента, что необходимо при предремонтной подготовке. Результаты, приведенные в работе, могут быть полезны не только исследователям, выполняющим аналогичные работы, но и инженерам на производстве, занятым автоматизацией процессов контроля и диагностики, а также выполнением обслуживания и ремонта оборудования.

Ключевые слова: технологический агрегат, датчик, вибрация, поверхность, протокол передачи, алгоритм, сравнение, оценка

Финансирование: статья подготовлена в рамках реализации Федеральной программы подготовки университета «Приоритет 2030», с использованием оборудования на базе центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: Чепчуров М.С., Сумской А.М., Минасова В.Е. Еще раз об определении состояния крупногабаритного тела вращения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №3 (17). С. 16-23. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-16-23.

Original article

Open Access Article

ONCE AGAIN ABOUT DETERMINING THE STATE OF A LARGE-SIZED BODY OF ROTATION

Mikhail S. Chepchurov¹, Alexander M. Sumskey², Victoria Evg. Minasova³

^{1,3}Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Polytechnic College No. 8 named after I.F. Pavlov, 7A, Moscow

¹avtpost@mail.ru

²sumskoiam@yandex.ru

³vika314TM@yandex.ru

Abstract. The paper proposes the author's version of preliminary diagnostics of the state of rolling surfaces of large-sized technological units. The authors build their research based on the requirements of regulatory documents governing the conduct of equipment vibration diagnostics, and processing the results of the measurements obtained. The authors propose their own justified option for placing vibration sensors on the equipment elements, including the use of wireless sensors placed on the rotating equipment elements. At the same time, the choice of the proposed data transfer protocol provides realtime monitoring of the technological unit state, with significant dimensions of the equipment itself. In accordance with the standard requirements, these solutions ensure the reliable operation of technological units and equipment.

The developed algorithm allows one to perform a comparative evaluation in the diagnosed units and equipment elements and determine not only the defective element, but its type and approximate location on the element surface, which is necessary during the prerepair preparation.

The results presented in the paper can be useful not only for researchers performing similar work, but also for production engineers involved in automating control and diagnostic processes, as well as performing equipment maintenance and repair.

Key words: technological unit, sensor, vibration, surface, transmission protocol, algorithm, comparison, evaluation

Financing: the article is prepared as part of implementing the Federal University Training Programme «Priority 2030», using the equipment based on the High Technology Centre of BSTU named after V.G. Shukhov.

For citation: Chepchurov M. S., Sumskey A. M., Minasova V. Evg. Once again about determining the state of a large-sized body of rotation. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 3 (17). pp. 16-23. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-16-23

Введение

Множество работ посвящено восстановлению поверхностей качения крупногабаритных тел вращения [1, 2], при этом авторы изначально много внимания уделяют вопросам контроля состояния самих поверхностей качения и восстановлению их без остановки технологических агрегатов [3]. Предлагают различные методы определения геометрии поверхности, например, при помощи группы роликов, располагающихся определенным образом, определяется радиус цилиндрического тела и отклонение его формы от цилиндрической [4]. Известны, также, бесконтактные методы измерения пространственного положения и формы крупногабаритного тела вращения [5], например, как изображено на рис. 1.

Прежде всего, значительная часть авторов выделяет вопросы определения базы для выполнения измерений [4]. Для крупногабаритного тела вращения, при определении его радиуса все авторы выделяют некий виртуальный рассчитываемый центр формообразующей тела в поперечном сечении. При том все авторы сходятся в едином мнении, что этот виртуальный центр постоянно меняет свое положение в виду дефектов на поверхности качения, как самого тела вращения, так и опорных элементов конструкции. Немаловажным фактором является форма опорных и технологических элементов конструкции при выверки оси технологического вращающегося агрегата [6].

Метод определения состояния крупногабаритного тела вращения

Решение вопросов, хотя бы косвенного, но достоверного определения центра вращения технологического агрегата, а желательно и формы вращающихся агрегатов, позволит решить задачи продления службы технологического оборудования, сокращения простоев технологических агрегатов, сокращения затрат на ремонт, как это было отмечено в качестве цели исследований во многих работах. Отсюда следует, что своевременная диагностика элементов технологического агрегата с крупногабаритными вращающимися элементами, позволит выполнить предупредительный ремонт оборудования. Что и выполняется, периодически, на предприятиях, например, с использованием трекеров определяющих технологические характеристики элементов вращающейся цементной печи. Но стоимость этого метода высока, по этой причине, используют другие способы определения состояния технологического оборудования, эта диагностика носит предположительный характер.

При этом состояние, идентифицируемое как предаварийное, может возникнуть в любое время, согласно работ [7, 8], т.е. это состояние необходимо идентифицировать немедленно, исключив перерастание его в катастрофу. И здесь стоит обратиться к нормативным документам: ГОСТ 10816-97 предлагает оценивать «вибрационное состояние машин широкого класса» по среднему значению виброскорости. Он то и регистрирует предельные уровни вибрации – «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ» и «ОСТАНОВ», очевидно, что уровень «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ» позволяет эксплуатировать машину некоторое время.



Рис. 1. Проекционный способ измерения искажения формы
Fig. 1. Projection method of measuring shape distortion

В соответствии с ГОСТ 13373-1-2009 [9] вибрационное состояние машин определяется:

- дисбалансом вращающихся частей;
- взаимным расположением вращающихся валов;
- состоянием подшипников скольжения или качения;
- дефектами сопряжений в передачах;
- наличием и состоянием трещин в ответственных элементах машин;
- трением движущихся частей;
- состоянием механических соединений.

При этом тот же ГОСТ предполагает использование информации, полученной по результатам вибрационного контроля, в целях «обнаружения дефектов» на ранней стадии их зарождения в течение срока эксплуатации машин». Что совпадает с целью, поставленной в начале настоящей работы, при этом следует определить допустимые параметры вибрации элементов оборудования. Например, вибрации электрических машин регламентируются ГОСТ Р МЭК 60034-14-2008 [10]. При этом учитываются допустимые амплитуда вибрации, виброскорость, виброускорение, для электрических машин с жёстким креплением и высотой оси вращения $H > 230$ мм допускается виброскорость 2,3 мм/с. Для элементов технологического агрегата или машины эти требования не приводятся в нормативных документах, по этой причине, воспользуемся следующим алгоритмом определения состояния «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ».

1. При первоначальном пуске технологического оборудования, из условия отсутствия причин, вызывающих вибрации, выполним измерение виброскорости в определенных узлах оборудования и сохраним эти значения в памяти системы мониторинга вибраций.

2. При отклонении, в процессе эксплуатации оборудования, значения виброскорости на определенную величину выполняется инструментальная диагностика подозрительного узла или его осмотр.

3. Выполняется восстановление или ремонт дефективного узла.

Алгоритм требует пояснений: в п. 1 в ГОСТ Р МЭК-60034-14-2008 [10] указаны варианты расположения датчиков вибрации, при этом, даже при бесконтактном способе измерений, датчики закрепляются на неподвижных элементах конструкции технологического оборудования, что поможет вызвать искажение данных при измерении виброскорости подвижных элементов оборудования. По этой причине предлагается следующая примерная схема размещения вибродатчиков, показанная на рис. 2.

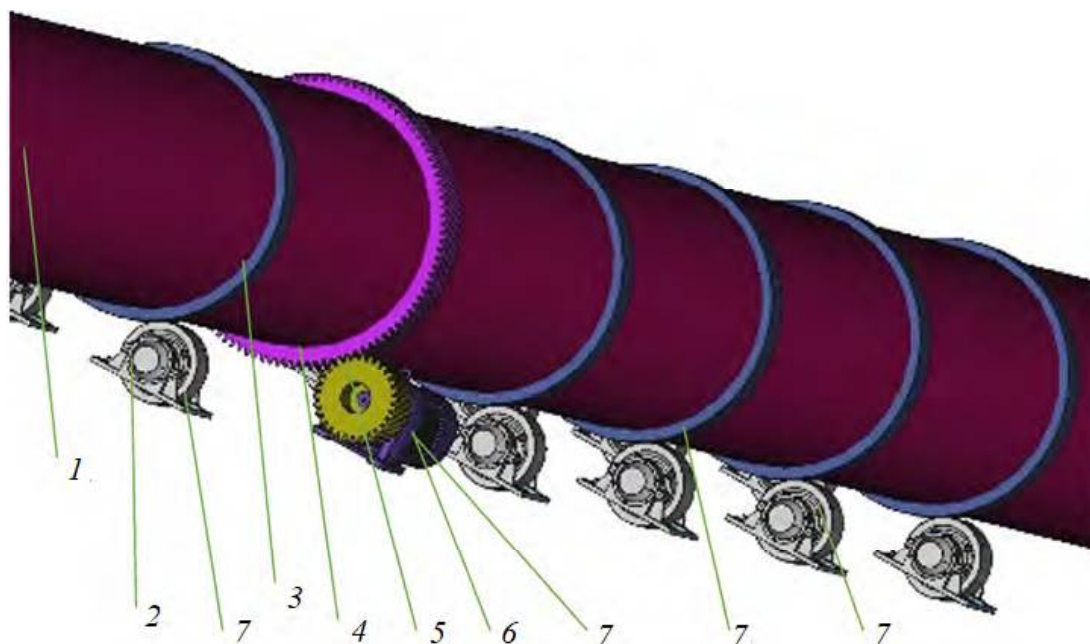


Рис. 1. Схема расположения вибродатчиков на вращающейся печи:

1 – вращающаяся печь; 2 – опорные ролики; 3 – бандаж; 4 – венцовая шестерня;

5 – подвенцовая шестерня; 6 – привод печи; 7 – вибродатчик

Fig. 2. The arrangement of vibration sensors on a rotating furnace:

1 – rotating furnace; 2 – support rollers; 3 – bandage; 4 – crown gear;

5 – crown gear; 6 – furnace drive; 7 – vibration sensor

Согласно представленной схеме только один датчик (7) расположен на неподвижном элементе – корпусе привода (6) печи, все остальные только на подвижных элементах. Уровень современной электронной базы позволяет выполнить подобное расположение датчиков с минимальными затратами по схеме на рис. 3.

Стоит всё же определиться с типом и характеристиками модулей датчика. А – акселерометр регистрирует величину виброускорения, исходя из условий $V=a'$, в g, т.е. по величине ускорения свободного падения.

Для измерения диапазонов виброскоростей, указанных в [11], приемлемыми являются датчики с диапазоном измерения 1g до 2g [12]. Элемент У (усилитель) может отсутствовать при наличии мощного сигнала от акселерометра. А вот передатчик – обязателен, но какого типа? Конечно наиболее приемлемыми являются варианты использования протоколов Bluetooth или Wi-Fi. Но при расстоянии более 30 метров они не обеспечивают надёжной передачи сигнала [13], вариант с ретрансляцией сигнала приводит к повышению стоимости системы мониторинга и снижению её надёжности. Авторы выбрали протокол обмена I²C [14], реализованных на модулях беспроводной связи в диапазоне 433 МГц, модуль приведен на рис. 4.



Рис. 3. Схема системы мониторинга вибраций:

А – акселерометр; У – усилитель; ПП – передатчик; ИП – автономный источник питания; ППСА – приемопередатчик системы анализа

Fig. 3. Vibration monitoring system diagram:

A – accelerometer; U – amplifier; PP – transmitter; IP – autonomous power supply; PPSA – transceiver of the analysis system

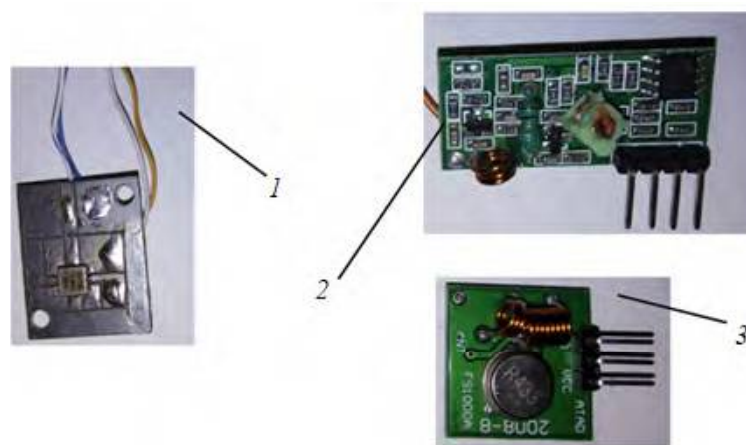


Рис. 4. Комплект для беспроводного датчика вибраций:

1 – акселерометр; 2 – передатчик; 3 – приёмник

Fig. 4. Wireless Vibration Sensor Kit:

1 – accelerometer; 2 – transmitter; 3 – receiver

Рекомендации из [8] требуют дополнительного анализа вибраций по каждому узлу, в котором проводятся измерения. Простое сравнение значений виброскорости в различных узлах оборудования не является методом, позволяющим локализовать дефект, по этой причине рекомендуется сравнивать увеличение величины виброскорости в % в разных узлах, также необходим анализ периодичности появления вибрации, определённый период может быть связан с геометрическими размерами элементов, имеющих поверхность качения, и с их окружной скоростью. Также, интерес представляет изменение периода и амплитуды колебания, так, например, сравнение рис. 5, а и 5, б показывает, что причиной аperiodических затухающих колебаний на рис. 5, б может являться удар.

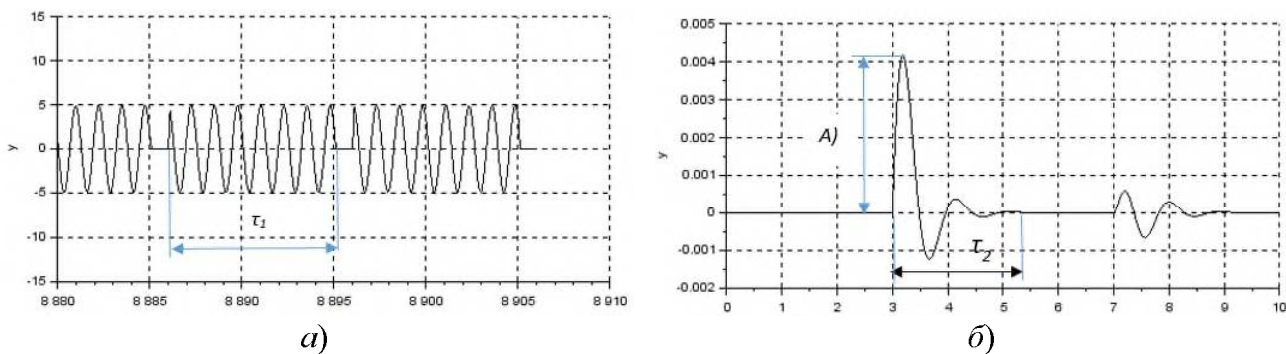


Рис. 5. Характер вибраций:
 а – периодические колебания; б – аperiodические затухающие колебания

Fig. 5. The nature of vibrations:
 a – periodic oscillations; b – aperiodic damped oscillations

Несмотря на то, что τ может быть равно τ_2 , нет возможности сделать вывод о размере дефекта. При этом резкий скачок амплитуды A (см. рис. 5, б) говорит о наличии выбоины на одной из поверхностей качения элементов технологического агрегата.

Если появление колебаний на графике рис. 5, а носит периодический характер, то по величине τ_1 или τ_2 и известной угловой скорости можно выполнить локализацию дефекта, например, $\tau_p \ll \tau_b$, где τ_p – идентифицирует ролик; τ_b – идентифицирует бандаж, согласно рис. 6 или

$$\frac{\tau_b}{\tau_p} = \frac{r_b}{r_p}$$

Выполнение восстановления элемента технологического агрегата производится как по комбинированной технологии, так и только механической обработкой. Но в любом случае после восстановления поверхности качения, т.е. после устранения дефектов, уровень вибрации в восстановленном узле должен уменьшиться.

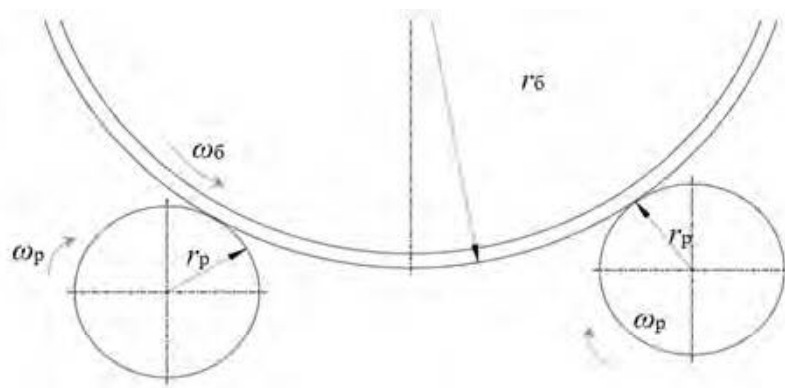


Рис. 6. Схема идентификации дефекта
Fig. 6. Defect identification scheme

Обсуждение

Рассмотрим вариант локализации дефекта по схеме, представленной на рис. 2. Допустим на одном из бандажей имеется выбоина, при этом датчик 7 дефектного бандажа фиксирует значительное повышение уровня вибрации по отношению к уровням вибраций, зафиксированных датчиками на других бандажах, при этом период фиксации вибраций датчиком дефектного бандажа в разы превышает период фиксации вибраций датчиками его опорных роликов. Таким образом, можно сделать вывод о наличии на поверхности конкретного бандажа дефектов на поверхности качения. При этом если будут фиксироваться аperiodические затухания колебания, то можно предположить, что имеется дефект критической глубины, вызывающий удар или искажения формы поверхности. Эти рассуждения можно предоставить схемой на рис. 7.

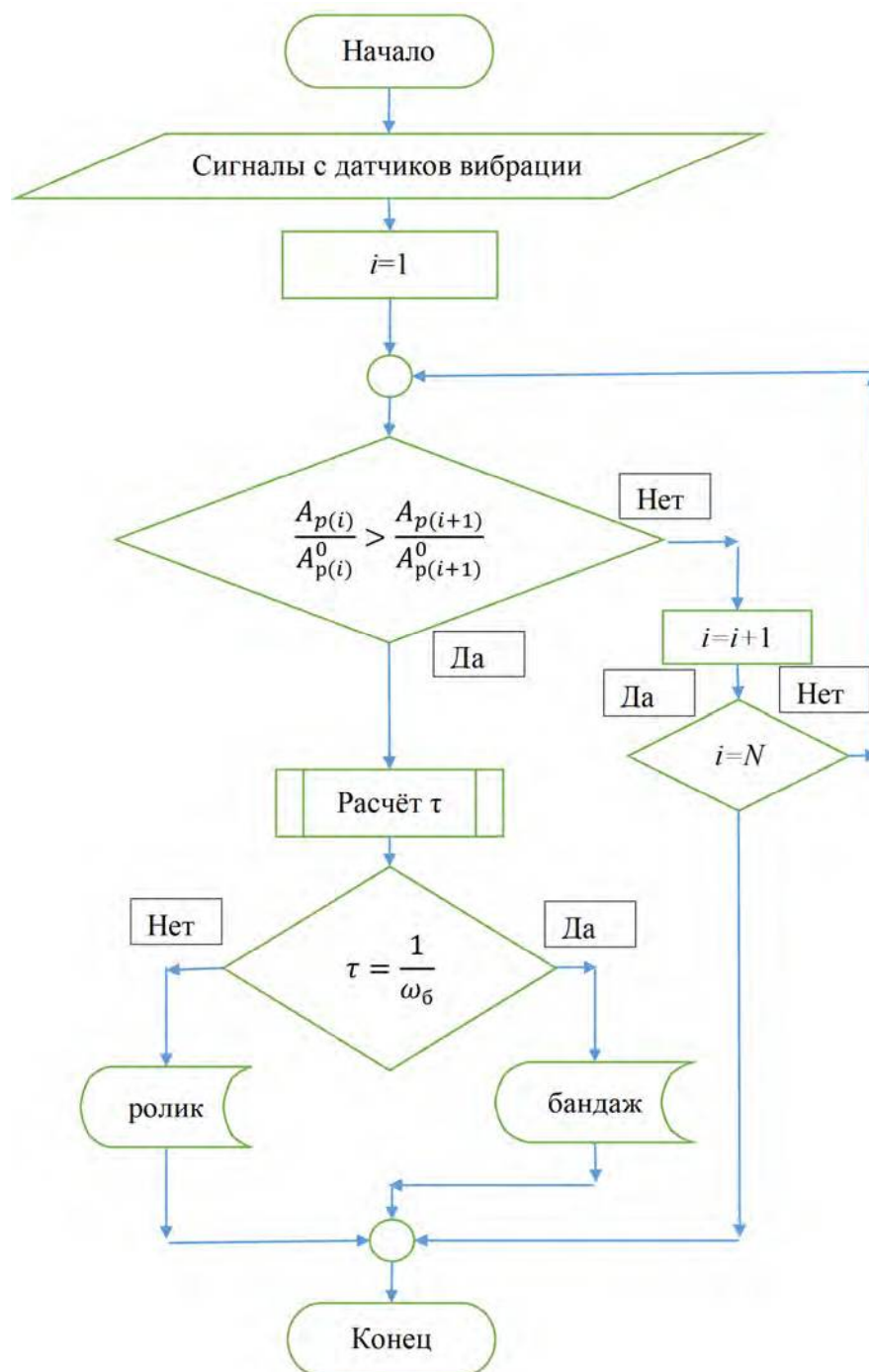


Рис. 7. Схема алгоритма идентификации элемента
Fig. 7. Diagram of the element identification algorithm

В алгоритме приняты обозначения: i – номер диагностируемого узла; $A_{p(i)}$ – амплитуда вибраций в i -м узле; $A_{p(i)}^0$ – опорное значение амплитуды вибраций в i -м узле; ω_6 – угловая скорость бандажа, рад^{-1} ; τ – период появления вибраций, с; N – количество узлов.

Согласно алгоритму, представленному на рис. 7, идентификация дефектного элемента выполняется по принципу нахождения элемента, датчик которого фиксирует наибольшее увеличение амплитуды вибрации.

Заключение

Контроль вибраций в технологическом агрегате, имеющем крупногабаритные вращающиеся элементы, позволяет определить узлы, имеющие дефекты на поверхности качения.

Для локализации определения дефектного узла достаточно использовать алгоритм, позволяющий выявить дефект на основе алгоритма поиска узла, имеющего максимальное значение уровня вибрации по сравнению с базовым, за который принимают уровень вибрации, соответствующий при полностью исправном оборудовании.

Использование беспроводных датчиков вибраций, расположенных на вращающихся элементах конструкции позволяет выполнить сравнительную оценку уровней вибраций и значительно повысить степень достоверности сведений о состоянии узла технологического оборудования.

Список источников:

1. Чепчуров М.С. Контроль и регистрация параметров механической обработки крупногабаритных деталей: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 232 с.
2. Чепчуров М.С., Четвериков Б.С. Позиционирование изделия в процессе автоматизированного бесконтактного контроля формы его поверхности качения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 2. С. 99-103.
3. Пелипенко Н.А., Санин С.Н. Описание поведения центра бандажа с помощью математического моделирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. №1. С. 46-47.
4. Хургасенко А.В., Шрубченко И.В., Тимофеев С.П. Методика определения формы наружной поверхности качения опор технологических барабанов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С. 85-89.
5. Пелипенко Н.А., Санин С.Н., Квашенкова Г.В. Влияние схемы установки режущего инструмента на точность формообразования поверхностей катания бандажей цементных печей // Тяжелое машиностроение. 2013. № 11-12. С. 56-58.
6. Росс Дж. К вопросам о выверке и техническом обслуживании вращающихся печей // Цемент и его применение. 2020. № 5. С. 68-71.
7. Mobile complex for rapid diagnosis of the technological system elements / Gavrilin A., Moyzes B., Cherkasov A., Mel'nov K., Zhang X // MATEC Web of Conferences. 2016. С. 01078.
8. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Метод оперативной диагностики металлорежущего станка для обработки заготовок типа тел вращения // Контроль. Диагностика. 2013. № 9. С. 81-84.
9. ГОСТ 13373-1-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. М.: Стандартинформ, 2010.
10. ГОСТ Р МЭК 60034-14-2008 Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы вибрации. М.: Стандартинформ, 2009.

References:

1. Chepchurov M.S. Control and Registration of Parameters of Mechanical Processing of Large-Sized Parts. Belgorod: Publishing House BSTU; 2008.
2. Chepchurov M.S. Chetverikov B.S. Positioning of Parts in the Automated Non-Contact Control of the Form of Its Rolling Surface. Bull BSTU Named V.G. Shukhov. 2016;2: 99-103.
3. Pelipenko N.A., Sanin S.N. Describing the Behaviour of the Centre Mass of a Tire with Mathematical Modelling. Repair. Reconditioning. Modernization. 2013;1:46-47.
4. Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Timofeev S.P. Method for Determining the Shape of the Outer Rolling Surface of the Technological Drum Supports. Bull BSTU Named V.G. Shukhov. 2015;3:85-89.
5. Pelipenko N.A., Sanin S.N., Kvashenkova G.V. Influence of the Cutting Tool Installation Scheme on the Accuracy of Shaping Rolling Surfaces of Cement Kiln Tires. Russian Journal of Heavy Machinery. 2013;11-12:56-58.
6. Ross J. On the Issues of Alignment and Maintenance of Rotary Kilns. Cement and Its Application. 2020;5:68-71.
7. Gavrilin A., Moyzes B., Cherkasov A., Mel'nov K., Zhang X. Mobile Complex for Rapid Diagnosis of the Technological System elements. MATEC Web of Conferences. 2016: 01078.
8. Gavrilin A.N., Moizes B.B. Method of Operational Diagnostics of a Metal-Cutting Machine for Processing Workpieces of the Type of Bodies of Revolution. Control. Diagnostics. 2013;9:81-84.
9. GOST 13373-1-2009 Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Vibration Condition Monitoring. Moscow: Standartinform; 2010.
10. GOST R IEC 60034-14-2008 Rotating Electric Machines. Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mms or Higher. Measurements, Evaluation and Limits of Vibration. Moscow: Standartinform; 2009.

11. ГОСТ 10816-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений на не вращающихся частях. М.: Издательство стандартов, 1998.
12. ГОСТ ИСО 5348-2002 Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. М.: Стандартинформ, 2007.
13. Нусс М.В., Трубаев П.А., Классен В.К. Управление работой цементной вращающейся печи // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 1. С. 61-65.
14. Последовательная асимметричная ширина для связи между интегральными схемами внутри электронных приборов (I2C). Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/I2C>

Информация об авторах:

Чепчуров Михаил Сергеевич

доктор технических наук, профессор, профессор «БГТУ им. В. Г. Шухова»

Сумской Александр Михайлович

заместитель директора «Политехнический колледж №8 им. И.Ф. Павлова»

Минасова Виктория Евгеньевна

аспирант «БГТУ им. В. Г. Шухова»

11. GOST 10816-97 Vibration. Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Moscow: Standards Publishing House; 1998.
12. GOST ISO 5348-2002 Vibration and Shock. Mechanical Mounting of Accelerometers. Moscow: Standartinform; 2007.
13. Nuss M.V., Trubaev P.A., Klassen V.K. Controlling the Cement Rotary Kiln Operation. Bull BSTU Named V.G. Shukhov. 2013;1:61-65.
14. Serial Asymmetric Width for Communication between Integrated Circuits inside Electronic Devices (I2C) [Internet]. Available from: <https://ru.wikipedia.org/wiki/I2C>

Information about authors:

Chepchurov Mikhail Sergeevich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Sumskoy Alexander Mikhailovich

Deputy Director of Polytechnic College №8

Minasova Victoria Evgenievna

post-graduate student Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 26.04.2022.

The article was submitted 04.04.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 26.04.2022.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, профессор, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University.