

Использование МЭМС-акселерометров для вибромониторинга механообрабатывающих центров

Д.П. Алейников^{1a}, А.В. Лукьянов^{2b}, П.Н. Костин^{1c}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

^a aleynikov@istu.edu, ^b loukian@inbox.ru, ^c kostin95pavel@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>

Статья поступила 29.04.2024, принята 17.05.2024

Мониторинг состояния — одна из основных задач, возникающих в настоящее время при эксплуатации механообрабатывающего оборудования. Предупредительное техническое обслуживание приобретает все более важное значение для минимизации риска простоев в промышленном секторе производства. Превышение предельных значений по общему уровню вибрации и неравномерности различных частот указывает на износ инструмента, подшипников, разбаланс или ослабление крепления деталей. В статье рассматриваются результаты разработки и испытаний виброизмерительного датчика на основе МЭМС-акселерометра для контроля параметров вибрации механообрабатывающего центра в различных режимах работы. Выполнен сравнительный анализ характеристик, имеющихся на российском и зарубежных рынках МЭМС-акселерометров, пригодных для использования в системах мониторинга вибрации промышленного оборудования. По сравнению с пьезоэлектрическими датчиками МЭМС-акселерометры имеют более высокое разрешение, отличные характеристики дрейфа и чувствительности и лучшее отношение сигнал/шум. Они также позволяют обнаруживать колебания с низкими частотами, что характерно для тихоходного оборудования. Проведено экспериментальное сравнение показаний разработанного датчика на основе МЭМС-акселерометра с показаниями пьезоэлектрического вибропреобразователя AP2085-100 в процессе механообрабатывающих операций резания. Приведены временные осциллограммы и спектральные составы виброускорений шпиндельного узла во время резания, полученные разными типами датчиков. Отклонения значений СКЗ виброускорений на этапе резания составляют менее 5%. В результате проведенных исследований было выявлено, что разработка датчика измерения вибрации на основе МЭМС-акселерометра ADXL1002 способна эффективно заменить стандартные пьезоэлектрические датчики. Измерение пространственных вибрационных параметров при работе механообрабатывающих центров позволяет повысить качество обработки деталей и предотвратить работу дорогостоящего станочного оборудования при опасных динамических нагрузках, а также обеспечивает возможность перехода от планово-диагностического к обслуживанию по фактическому состоянию.

Ключевые слова: вибрация при фрезеровании; вибродиагностика механообрабатывающего оборудования; адаптивный контроль резания; мониторинг вибрации; коррекция режимов резания; МЭМС-акселерометры.

Application of a MEMS-accelerometer for vibration monitoring of machining centers

D.P. Aleynikov^{1a}, A.V. Lukyanov^{2b}, P.N. Kostin^{1c}

¹ Irkutsk National Research State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

^a aleynikov@istu.edu, ^b loukian@inbox.ru, ^c kostin95pavel@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>

Received 29.04.2024, accepted 17.05.2024

Condition monitoring is one of the main challenges currently encountered in the operation of machining equipment. Preventative maintenance is becoming increasingly important to minimize the risk of downtime in the industrial manufacturing sector. Exceeding the limit values for the overall level of vibration and unevenness of various frequencies indicate the wear of the tool, bearings, imbalance or loosening of parts. The article discusses the results of the development and testing of a vibration measuring sensor based on a MEMS accelerometer for monitoring the vibration parameters of a machining center in various operating modes. A comparative analysis of the characteristics available on the Russian and foreign markets of MEMS accelerometers suitable for use in vibration monitoring systems for industrial equipment has been performed. Compared to piezoelectric sensors, MEMS accelerometers have higher resolution, excellent drift and sensitivity characteristics, and better signal-to-noise ratio. They also allow detection of low-frequency vibrations, which are typical for low-speed equipment. An experimental readings comparison of the developed sensor based on a MEMS accelerometer with the readings of the piezoelectric vibration transducer AR2085-100 during machining cutting operations is carried out. Time oscillograms and spectral compositions of vibration accelerations of the spindle assembly during cutting, obtained by different types of sensors, are presented. Deviations in the RMS values of vibration accelerations at the cutting stage are less than 5%. As a result of the

research, it is revealed that the development of a vibration measurement sensor based on the ADXL1002 MEMS accelerometer can effectively replace standard piezoelectric sensors. Measuring spatial vibration parameters during the operation of machining centers makes it possible to improve the quality of machining parts and prevent the operation of expensive machine equipment under dangerous dynamic loads, and also provides the ability to switch from scheduled diagnostic to maintenance based on actual condition.

Keywords: vibration during milling; vibration diagnostics of machining equipment; adaptive cutting control; vibration monitoring; cutting mode correction; MEMS-accelerometers.

Введение. Обеспечение надежного функционирования механообрабатывающего оборудования является одной из приоритетных задач современного производства. Отсутствие своевременного распознавания зарождающихся дефектов приводит к преждевременному выходу из строя механических узлов и значительным финансовым убыткам по причинам непреднамеренного простоя оборудования. Данные по износу формируют основу для перехода от планово-предупредительного к ориентированному на фактическое состояние технического обслуживанию. Использование систем вибромониторинга позволяет выявлять износ механических компонентов на ранних стадиях на основе измерения параметров механических колебаний [1–10]. Одним из ключевых компонентов систем вибромониторинга является чувствительный элемент. В качестве чувствительного элемента для регистрации механических колебаний в настоящее время все большее внедрение получают акселерометры на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). По сравнению с пьезоэлектрическими датчиками, они имеют низкое электропотребление, более высокое разрешение, отличные характеристики дрейфа и

чувствительности и лучшее отношение сигнал/шум. Концепция «Индустрия 4.0» оказала глубокое влияние на практику современной технической диагностики, и промышленность быстро включила ее принципы в разработку стратегии мониторинга технического состояния. Внедрение таких новшеств, как интеллектуальные беспроводные датчики и автоматический анализ данных в сочетании с вебинтерфейсами, позволяет значительно повысить эффективность работы систем мониторинга технического состояния [11–14]. В связи с этим появляется задача разработки виброизмерительного датчика, который может использоваться в беспроводных системах виброанализа, сохраняя при этом высокие метрологические характеристики.

Разработка датчика на основе МЭМС-акселерометра. На сегодняшний день существует значительное количество МЭМС-акселерометров, все они имеют различные характеристики, достоинства и недостатки [15–19]. Сравнительные характеристики имеющихся на российском и зарубежных рынках МЭМС-акселерометров, пригодных для использования в системах мониторинга вибрации, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики МЭМС-акселерометров

Параметр	МА-10 ООО «ЛМП» (Зеленоград)	АТ1105-50 ПАО «АНПП “Темп- Авиа”» (Арзамас)	ММА-ЭП ГНЦ РФ АО «Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”» (Санкт-Петербург)	ADXL1002 Analog Devices	ADcm XL1021-1 Analog Devices	MS9050 Safran Colibrys SA
Диапазон измерения кажущихся ускорений, g	± 50	± 50	± 15	± 50	± 50	± 50
Нелинейность статической характеристики, %	0,1	$\pm 0,5$	$< 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$< 0,9$
Спектральная плотность «шума» выходного сигнала, $mg/\sqrt{Гц}$	0,3	–	0,01 $g/\sqrt{Гц}$	25 $\mu g/\sqrt{Гц}$	32 $\mu g/\sqrt{Гц}$	24 $\mu g/\sqrt{Гц}$
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}C$	$-40...+85$	$-50...+60$	$-55...+85$	$-40...+125$	$-55...+125$	$-55...+125$
Напряжение питания, V	3,3	$-12...+12$	5	5	$-0,3...+3,6$	2,5...5
Потребляемый ток, mA	2	20	–	1	100	0,4
Габаритные размеры, mm	19,5×14,5×5	29,5×28,5×16	40,0×40,0×8,2	5×5×1,8	23,8×27,1×12,5	8,9×8,9×3,23

Сравнительный анализ рассмотренных МЭМС-акселерометров позволяет сделать вывод о том, что наиболее подходящим решением для контроля вибрации механообрабатывающих центров является акселерометр ADXL 1002 (ADXL1002BCPZ). Данный акселерометр имеет небольшие габаритные размеры, высокую точность измерения и низкое

электропотребление, что дает возможность использования его в беспроводных решениях систем мониторинга состояния. Частотная характеристика акселерометра, являющаяся наиболее важной характеристикой системы, показана на рис. 1. На частотах выше примерно 2–3 кГц коэффициент усиления растет. На резонансной частоте (11 кГц)

пиковое усиление достигает значения порядка 12 дБ (4 раза) [20].

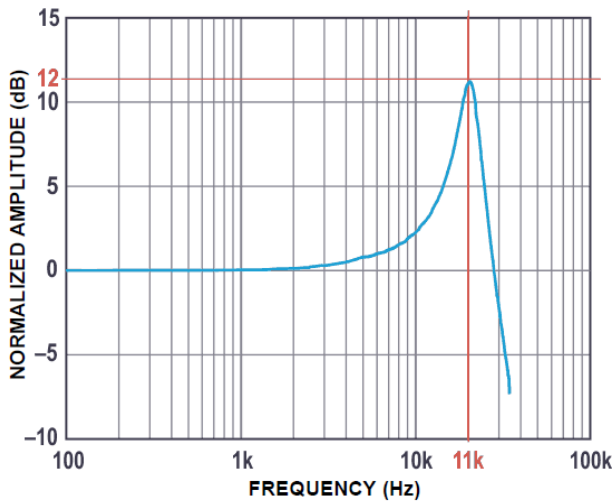


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика акселерометра ADXL1002

В разрабатываемом датчике предполагается использование магнитного закрепления, что ограничит верхний предел частоты использования значением 5 кГц. В качестве ограничителя полосы пропускания нами был использован пассивный низкочастотный фильтр (RC) для частоты среза 4.52 кГц. Значения компонентов фильтра подбираются исходя из уравнения (1):

$$2 \cdot \pi \cdot f_0 = 1 / (R \cdot C), \quad (1)$$

где f_0 частота среза = 4.52 кГц; емкость конденсатора $C = 22 \text{ nF}$; сопротивление $R = 1.6 \text{ k}\Omega$.

Схема электропитания и выходного фильтра нижних частот представлена на рис. 2.

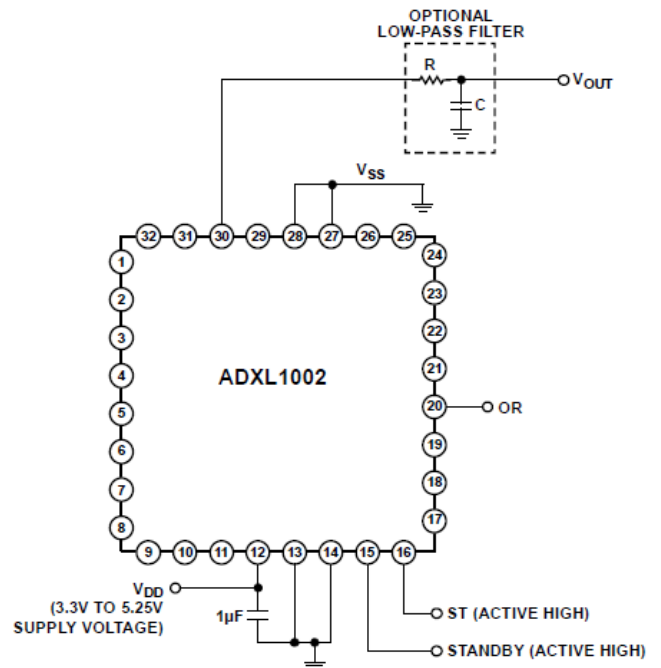
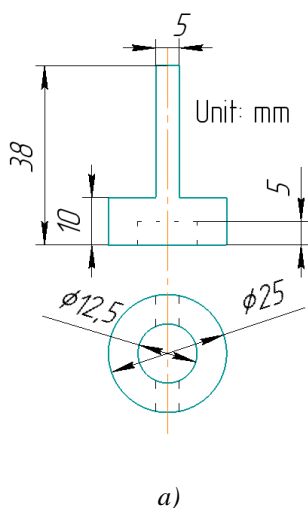


Рис. 2. Схема электропитания и выходного фильтра нижних частот акселерометра ADXL1002

Для крепления электронной платы датчика был изготовлен корпус из алюминиевого сплава марки 1933. Габаритные размеры и внешний вид готового образца датчика на базе МЭМС-акселерометра ADXL1002 представлены на рис. 3.



a)



b)

Рис. 3. Габаритные размеры (a); сборка корпуса и МЭМС-акселерометра (b)

Для определения резонансных частот конструкции корпуса было проведено конечноэлементное моделирование собственных частот в САЕ-системе FEMAP 11.1.2. Результаты

конечноэлементного моделирования показали, что частоты первых двух форм колебаний составляют 10 423 Hz — для 1-й формы поперечных колебаний (рис. 4, a), 26 969 Hz — для 2-й формы

продольных колебаний (рис. 4, *b*). Полученные значения собственных частот находятся за пределами измеряемой частотной полосы

пропускания датчика, что говорит об оптимально выбранной геометрии конструкции корпуса.

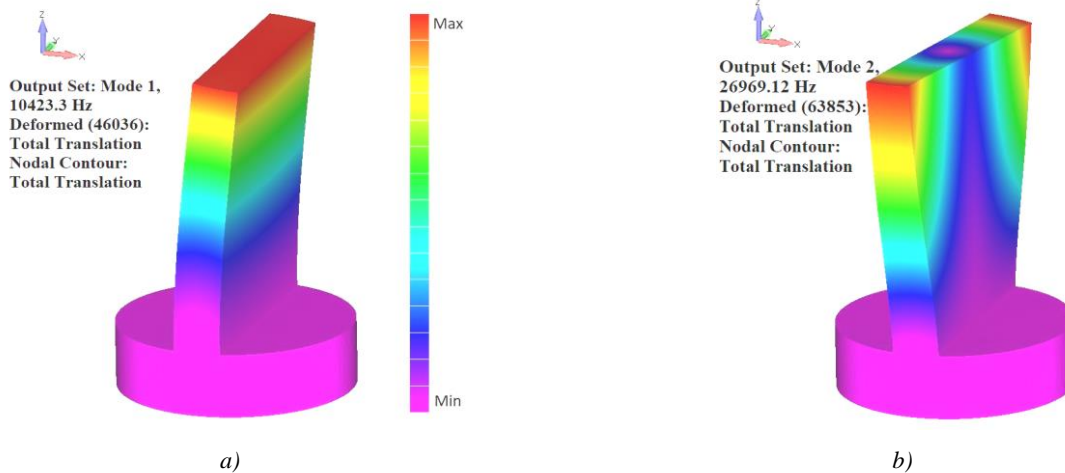


Рис. 4. Первая форма колебаний, собственная частота 10.43 кГц (*a*); вторая форма колебаний, собственная частота 26.96 кГц (*b*)

Исследование амплитудно-частотной характеристики датчика. Определение амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого датчика проводилось на комплексе калибровки вибродатчиков фирмы «Брюль и Кьер» в горизонтальной плоскости. В состав комплекса калибровки входили: генератор сигналов, вольтметр, усилитель мощности, вибростенд, эталонный акселерометр 8305. Испытания проводились методом сравнения показаний разработанного нами датчика и механически соединенного с ним эталонного акселерометра 8305 [21-25]. Созданный таким образом комплект закреплялся на вибростенде, как показано на рис. 5.

Одновременно с определением амплитудно-частотных характеристик определялись собственные частоты крепления датчика методом ударного теста. Вдоль главной оси закрепленных датчиков (рис. 5) задавался ударный импульс небольшой интенсивности. Далее производился спектральный анализ затухающих колебаний возмущенной системы с последующим выделением резонансных пиков. Полученные результаты относительной чувствительности (т. е.

отклонения от эталонной чувствительности) в зависимости от частоты гармонического возбуждения и собственные частоты крепления датчика представлены на рис. 6.



Рис. 5. Общий вид системы определения амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого датчика

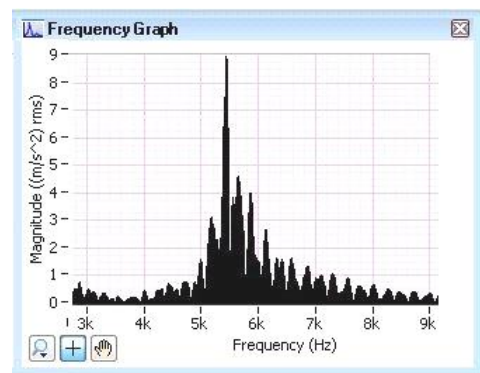
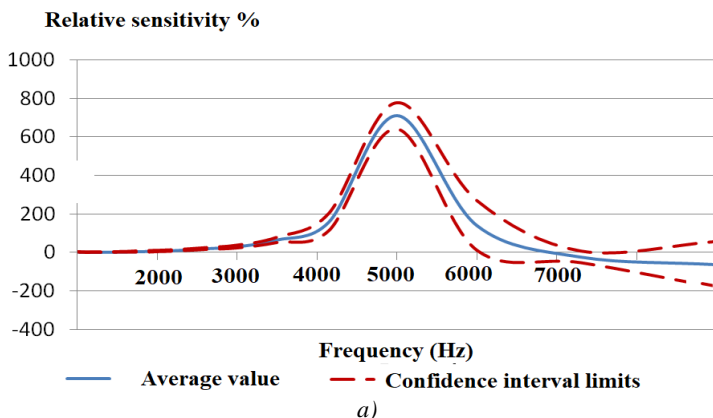
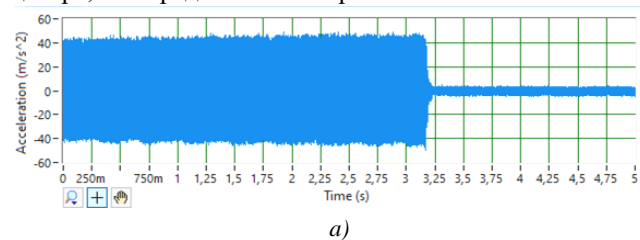


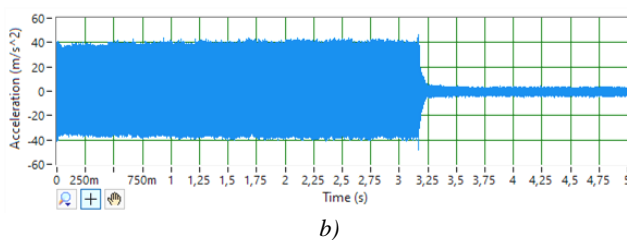
Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика (*a*); спектр собственных колебаний (*b*)

Полученные экспериментально результаты свидетельствуют о возможности использования данной конструкции датчика при измерении механических колебаний в частотном диапазоне до 4,5 кГц.

Результаты и обсуждение эксперимента при определении вибрации шпинделя в процессе механообработки. Для проверки работоспособности использования МЭМС-акселерометров в задачах вибромониторинга станочного оборудования было проведено экспериментальное сравнение показаний разработанного нами датчика с показаниями пьезоэлектрического вибропреобразователя AP2085-100 в процессе механообрабатывающей операции. Для сбора вибрационных сигналов с датчиков использовался многоканальный модуль ввода С-серии NI 9234. Экспериментальное исследование проводилось на универсальном обрабатывающем центре *HSC 75 Linear*. Обрабатываемая заготовка — плита из деформируемого алюминиевого сплава В95. Обработка производилась фрезой с диаметром режущей части $D_c = 16$ мм и числом зубьев $z = 3$. Выполнялась механическая обработка фрезерованием с частотой вращения шпинделя 21 700 об./мин. Размещение датчиков осуществлялось в районе нижнего подшипника шпинделя обрабатывающего центра, как представлено на рис. 7.

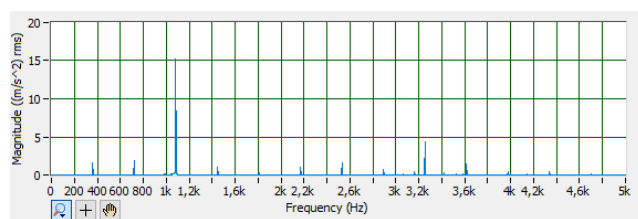


a)

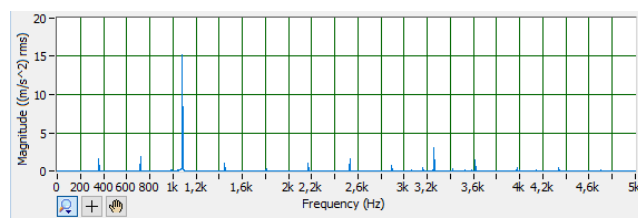


b)

Рис. 8. Временные осциллограммы виброускорения шпинделя: вибропреобразователь AP2085-100 (a); МЭМС-акселерометр (b)



a)



b)

Рис. 9. Спектральный состав виброускорений во время резания: вибропреобразователь AP2085-100 (a); МЭМС-акселерометр (b)

Сравнительный анализ временных и частотных составляющих виброускорений, полученных разными типами датчиков, представлен в табл. 2. Отклонения значений СКЗ виброускорений на этапе резания составляют менее 5%. Данная погрешность может быть вызвана небольшим взаимным отклонением расположения датчиков на шпиндельном узле

Временные осциллограммы виброускорений шпиндельного узла, полученные разными типами датчиков, представлены на рис. 8. На временных осциллограммах отчетливо наблюдаются зоны резания и холостого хода после выхода обрабатываемого инструмента из зоны резания.

Спектральные составы виброускорений шпиндельного узла во время резания, полученные разными типами датчиков, представлены на рис. 9. На спектре отчетливо наблюдаются пики на оборотной $f_n = 361,3$ Гц и зубцовой частотах ($f_n * 3$) $f_z = 1\ 085$ Гц.

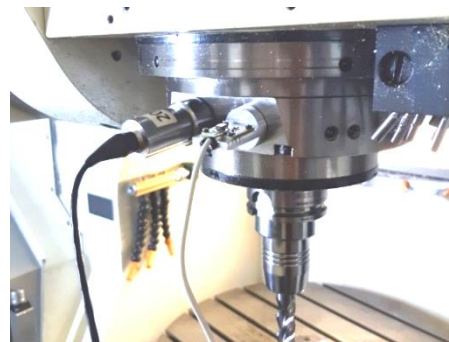


Рис. 7. Общий вид размещения датчиков на шпинделе обрабатывающего центра

обрабатывающего центра. Пиковые значения в частотной области полностью совпадают. Динамический диапазон измерения разрабатываемого датчика составляет ± 50 g, что позволяет регистрировать значения виброускорений в периоды значительных всплесков амплитуд при врезании и выходе из зоны резания инструмента.

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов измерений виброускорений двумя типами датчиков

Тип датчика	AP2085-100		МЭМС тип		Ошибка	
	Холостой ход	Резание	Холостой ход	Резание	Холостой ход, %	Резание, %
Интервал измерений						
RMS временных реализаций, m/c^2	1,61	17,83	1,59	17,07	1,2	4,2
Частота первых четырех пиков, Hz	361,3 (fn)		361,3 (fn)		0	0
	723,3 (fn*2)		723,3 (fn*2)		0	0
	1 085 (fn*3)		1 085 (fn*3)		0	0
	1 446,6 (fn*4)		1 446,6 (fn*4)		0	0

Заключение. В результате проведенных исследований было выявлено, что разработка датчика измерения вибрации на основе МЭМС-акселерометра ADXL1002 способна эффективно заменить стандартные пьезоэлектрические датчики. Использование в датчике вибрации МЭМС-акселерометра делает его значительно дешевле, примерно в 10 раз по сравнению с пьезоэлектрическими типами датчиков. Низкое энергопотребление и миниатюрные габаритные размеры позволяют создавать на основе МЭМС-акселерометров автономные беспроводные устройства с несколькими каналами измерения вибрации. Современный уровень развития информационных технологий способствует значительному переоснащению машиностроительного

производства, имеется тенденция к внедрению концепции «Индустрия 4.0», основанной на объединении станков, систем хранения и оборудования в единую телекоммуникационную сеть. Это позволит сформировать «умное производство», в котором интеллектуальные станки самостоятельно обмениваются информацией и постоянно адаптируются к изменяющимся требованиям производства. Внедрение и использование автономных приборов для измерения вибрации на основе МЭМС-акселерометров может позволить сформировать производство, которое удовлетворяет современным требованиям к реализации концепции «Индустрия 4.0».

Литература

- Колобов А.Б. Вибродиагностика. Теория и практика: учебное пособие. Москва: Инфра-Инженерия, 2019. 252 с.
- Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Костин П.Н. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 3 (75). С. 38-49.
- Алейников Д.П., Лукьянов А.В., Костин П.Н. Влияние параметров резания на вибрационное состояние станка и шероховатость обработанных поверхностей при механообработке // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 14-19.
- Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39-47.
- Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30-38.
- Петрухин, В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. 176 с.
- Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск, Издат. ИрГТУ, 2000. 230 с.
- Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. 268 с.
- Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 96-101.
- Хруцкий О.В. Техническая диагностика: учебник. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018. 262 с.
- Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учебное пособие. СПб: Изд. Центр СПбГМТУ, 2000. 159 с.
- Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 8. 789 с.
- Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск. Издат. ИрГТУ. 1999. 230 с.
- Краковский Ю.М., Лукьянов А.В., Эльхотов С.Н. Программный комплекс диагностики роторных машин // Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 32-36.
- Краковский Ю.М., Симонов С.В. Программный комплекс гибкого мониторинга роторных машин по виброданным // Контроль. Диагностика. 2002. № 12. С. 51-55.
- Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery. Maintenance management international. № 5. 1985. P. 297-204.
- Cempel C. Limit value in practice of vibration diagnostics of machines. 9-th EFNMS Congress, Helsinki. 1988. P. 154-173.
- Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
- Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. Conference on High Performance Cutting 2012. P. 563-568.
- Analog Devices. ADXL1001/ADXL1002. Data Sheet; Analog Devices Inc.: Norwood, MA, USA, (2017).
- ISO 16063-21, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers-Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer.
- Albarbar A., Mekid S., Starr A., Pietruszkiewicz R. "Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study". Sensors, vol. 8, 2008. P. 784-799.
- Son J.D., Ahn B.H., Ha J.M., Choi B.K. "An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis". Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, vol. 94. 2016. P. 680-691.
- Aydemir A., Terzioglu Y., Akin T. "A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer". Sensors and Actuators. A: Physical, vol. 244. P. 2016. 324-333.

25. Mohammed Z., Dushaq G., Chatterjee A., Rasras M. "An optimization technique for performance improvement of gap-changeable MEMS accelerometers". *Mechatronics*, vol. 54, 2018. P. 203-216.

References

1. Kolobov A.B. *Vibration diagnostics. Theory and practice: uchebnoe posobie*. Moskva: Infra-Inzheneriya, 2019. 25 p.
2. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P., Kostin P.N. Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2022. № 3 (75). P. 38-49.
3. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V., Kostin P.N. Cutting data effect on machine tool vibrational state and surface roughness when machining // *Systems. Methods. Technologies*. 2021. № 3 (51). P. 14-19.
4. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V. Modeling of the cutting forces and determination vibrodiagnostics symptoms of defects of end mills // *Systems. Methods. Technologies*. 2017. № 1 (33). P. 39-47.
5. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P., Portnoj A.Yu. System of control of emergency situations of machining center by vibration and stress // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. V. 21. № 4 (123). P. 30-38.
6. Petruhin, V.V. *Fundamentals of vibration diagnostics and vibration measurement tools: uchebnoe posobie*. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2010. 176 p.
7. Luk'yanov A.V. Management of the technical condition of rotary machines (system of scheduled diagnostic repair). Irkutsk, Izdat. IrGTU, 2000. 230 p.
8. Krakovskij Yu.M. Mathematical and software tools for assessing the technical condition of equipment. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2003. 268 p.
9. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P. Research of vibration machining center in milling // *Systems. Methods. Technologies*. 2014. № 1 (21). P. 96-101.
10. Hruckij O.V. *Technical diagnostics: uchebnik*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2018. 262 p.
11. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovcev A.Yu. *Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration: Uchebnoe posobie*. SPb: Izd. Centr SPbGMTU, 2000. 159 p.
12. *Non-destructive testing / pod obshch. red. V.V. Klyueva*. M.: Mashinostroenie, 2005. V. 8. 789 p.
13. Luk'yanov A.V. Qualifier vibrodiagnostic signs rotary machines defects. Irkutsk. Izdat. IrGTU. 1999. 230 p.
14. Krakovskij Yu.M., Luk'yanov A.V., El'hutov S.N. Software complex for diagnostics of rotary machines // *Kontrol. Diagnostika (Testing. Diagnostics)*. 2001. № 6. P. 32-36.
15. Krakovskij Yu.M., Simonov S.V. The program complex of flexible monitoring of rotary machines on vibrodated // *Kontrol. Diagnostika (Testing. Diagnostics)*. 2002. № 12. P. 51-55.
16. Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery. *Maintenance management international*. № 5. 1985. P. 297-204.
17. Cempel C. Limit value in practice of vibration diagnostics of machines. 9-th EFNMS Congress, Helsinki. 1988. P. 154-173.
18. Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design*. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
19. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. *Conference on High Performance Cutting 2012*. P. 563-568.
20. *Analog Devices. ADXL1001/ADXL1002. Data Sheet*; Analog Devices Inc.: Norwood, MA, USA, (2017).
21. ISO 16063-21, *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers-Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer*.
22. Albarbar A., Mekid S., Starr A., Pietruszkiewicz R. "Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study." *Sensors*, vol. 8, 2008. P. 784-799.
23. Son J.D., Ahn B.H., Ha J.M., Choi B.K. "An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 94. 2016. P. 680-691.
24. Aydemir A., Terzioglu Y., Akin T. "A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer." *Sensors and Actuators. A: Physical*, vol. 244. P. 2016. 324-333.
25. Mohammed Z., Dushaq G., Chatterjee A., Rasras M. "An optimization technique for performance improvement of gap-changeable MEMS accelerometers." *Mechatronics*, vol. 54, 2018. P. 203-216.