

УДК 621.914:658.562

doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик

Е. С. Янов¹, С. В. Антонычев², А. В. Анцев³, М. С. Воротилин⁴, Е. И. Минаков⁵

^{1,3,4,5}Тульский государственный университет, Тула, Россия

²ООО «Энергопромсервис», Москва, Россия

¹es.yanov@mail.ru, ²25111976@list.ru, ³a.antsev@yandex.ru, ⁵eminakov@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях санкционного давления вновь стал актуальным вопрос интенсификации производства. Повышение эффективности производства за счет внедрения новых технологий – это уже не просто мировой тренд, а одно из условий выживания, при этом цифровизация как один из основных драйверов роста и развития играет здесь важнейшую роль. Цель исследования – обоснование варианта рационального места размещения датчика вибрации диагностического модуля информационно-измерительной системы мониторинга технологических систем. *Результаты.* На примере фрезерного станка BRIDGEPORT (модель Hardinge GX 600) предложен вариант формирования «вибропаспорта» на основе регистрируемых вибродинамических характеристик при работе станка, анализ которого позволил определить место установки датчика вибрации.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, датчик вибрации, вибропаспорт, вибродиагностика, фрезерный станок

Для цитирования: Янов Е. С., Антонычев С. В., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 157–166. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Studying methods for controlling the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics

E.S. Yanov¹, S.V. Antonychev², A.V. Antsev³, M.S. Vorotilin⁴, E.I. Minakov⁵

^{1,3,4,5}Tula State University, Tula, Russia

²“Energopromservis” LLC, Moscow, Russia

¹es.yanov@mail.ru, ²25111976@list.ru, ³a.antsev@yandex.ru, ⁵eminakov@bk.ru

Abstract. *Background.* In the context of sanctions pressure, the issue of production intensification has again become relevant. Increasing production efficiency through the introduction of new technologies is no longer just a global trend, but one of the conditions for survival, while digitalization as one of the main drivers of growth and development plays a crucial role here. The purpose of the study is to substantiate the option of a rational location for the vibration sensor of the diagnostic module of the information and measuring system for monitoring technological systems. *Results.* Using the example of the BRIDGEPORT milling machine (model Hardinge GX 600) an option for forming a "vibration passport" is proposed based on the recorded vibrodynamic characteristics during machine operation, the analysis of which made it possible to determine the location of the vibration sensor.

© Янов Е. С., Антонычев С. В., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Keywords: information and measuring system, vibration sensor, vibration passport, vibration diagnostics, milling machine

For citation: Yanov E.S., Antonychev S.V., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Studying methods for controlling the condition of milling machines based on the analysis of vibration characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(3):157–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

Введение

В условиях санкционного давления и мирового кризиса отечественное машиностроение получило стимул к дополнительному развитию как единственной возможной альтернативе банкротства. Вновь стал актуальным вопрос интенсификации производства, при этом цифровизация как один из основных драйверов роста и развития играет здесь важнейшую роль.

Повышение эффективности производства за счет внедрения новых технологий – это уже не просто мировой тренд, а одно из условий выживания. Но все инновационные системы создают предпосылки для снижения человеко-часов на производстве, поэтому у многих сотрудников, тем более линейных исполнителей, есть опасения, что качественная работа этой системы приведет к массовым сокращениям рабочих.

Материалы и методы

Одним из примеров цифровизации производства является работа [1], в которой рассматривались вопросы разработки информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния режущего инструмента при точении по уровню вибрации в процессе механической обработки и мониторинга состояния оборудования, реализованной в виде аппаратно-программного комплекса (АПК). Именно при обработке исследования природы вибраций представляют наибольший интерес [2]. Подробнее в [3] рассмотрены вопросы выбора оптимального расположения датчиков вибрации на токарных станках. Кроме того, в работе [4] рассматривались вопросы применения АПК для решения производственных задач по оптимизации режимов обработки и контроля технологической дисциплины.

Отметим, что рассмотренные выше аспекты разработки и внедрения АПК касаются токарной обработки, а для применения на других видах оборудования требуется проведение отдельных работ. Так, в случае фрезерования причины вибраций и ее распространение по узлам станка изучены недостаточно. В работе [5] рассматривались вопросы контроля вибрации в процессе обработки на фрезерном станке с помощью датчика вибрации, расположенного на державке режущего инструмента. Однако применение такого типа датчика приводит к возникновению дополнительных технических сложностей:

1. Необходимость постоянной зарядки аккумулятора датчика, так как время автономной работы ограничено емкостью аккумулятора.
2. Отсутствие унификации, так как геометрические размеры корпуса датчика зависят от державки, на которую он устанавливается.
3. Не исключена возможность повреждения датчика в процессе работы станка.

4. Значительные затраты на внедрение, так как каждый инструмент в магазине станка должен оснащаться собственным датчиком, что существенно повышает стоимость такой системы, установленной на станке.

В этой связи определение оптимальных мест для установки датчиков вибрации диагностических модулей АПК и изучение с их помощью вибродинамических характеристик фрезерных станков с целью получения достоверных исходных данных как основы для корректной работы информационно-измерительной системы (ИИС) является актуальной задачей.

Вибрации при фрезеровании вызываются прежде всего прерывистостью самого процесса фрезерования. Наибольшие вибрации, как известно, в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) при фрезеровании претерпевает фреза, закрепленная в коническом отверстии шпинделя станка. В связи с этим ранее проводились опыты по установлению характера и интенсивности вибраций при фрезеровании фрезами различных диаметров, которые показали, что с уменьшением диаметра фрезы, т.е. с уменьшением жесткости системы, интенсивность колебаний возрастает [6]. Вибрации при фрезеровании одновременно с ухудшением чистоты обработанной поверхности ускоряют износ инструмента, снижают точность обработки и вызывают преждевременный износ оборудования.

Для определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля проведены работы по оценке вибродинамических характеристик фрезерного оборудования на примере вертикального фрезерного станка BRIDGEPORT (модель Hardinge GX 600) (рис. 1,а). Измерение вибрации проводилось анализатором вибрации АГАТ-М, производство ООО ДИАМЕХ-2000 (рис. 1,б).

Акселерометр АС-102 (канал А) располагался в ключевых точках станка (рис. 1,в) путем поочередной установки датчика на магните в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях в соответствии с действующей нормативной базой (ГОСТ ИСО 10816-3-1999), а именно: т.1п – двигатель в поперечном направлении; т.2в – задняя опора шпинделя в вертикальном направлении; т.3в – шпиндель в вертикальном направлении; т.3п – шпиндель в продольном направлении; т.4о – суппорт в осевом направлении; т.4в – суппорт в вертикальном направлении; т.4п – суппорт в продольном направлении.

В процессе исследования измерялись следующие представления вибрации:

- спектры виброскорости в диапазоне от 2 до 5000 Гц;
- спектры виброускорения в диапазоне от 2 до 10 000 Гц.

Для определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля использовался вариант вибродиагностики по нескольким уровням:

- 1) диагностика по общему уровню параметров вибрации;
- 2) спектральный анализ.

Собранную информацию о вибрации технических систем с целью хранения истории технического состояния технических систем и их отдельных элементов, а также получения этой информации за необходимый период в ряде работ [7–10] предлагается записывать в информационный объект – вибропаспорт. В данной работе под вибропаспортом системы СПИЗ понимается информационный объект, содержащий информацию об уровне вибрации

системы СПИЗ в процессе обработки за определенный период времени на разных уровнях анализа.

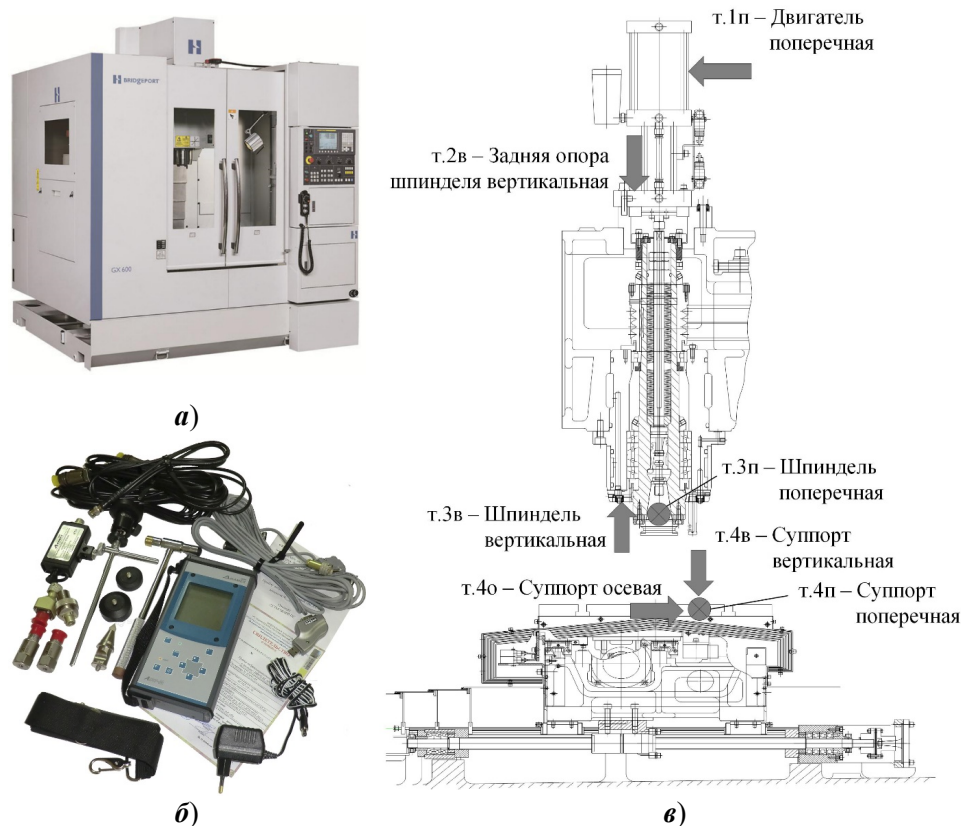


Рис. 1. Станок и оборудование для проведения исследования: *а* – станок BRIDGEPORT – модель Hardinge GX 600; *б* – анализатор вибрации АГАТ-М; *в* – схема размещения акселерометра AC-102

В случае диагностики по общему уровню параметров вибрации критерии работы оборудования полностью ориентированы на нормативные уровни вибрации, соответствующие определенному элементу. При этом превышение принятой нормы уровня вибрации может свидетельствовать о дефекте соответствующего элемента. Результаты измерения виброскорости в полосе 2–5000 Гц в процессе обработки представлены в табл. 1, а результаты измерения виброускорения в полосе 10–10 000 Гц – в табл. 2.

Таблица 1
Результаты измерения виброскорости в полосе 2–5000 Гц

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации
Вертикальное	–	0,2	0,2	0,1	Зона А – до 2,3 мм/с Зона Б – до 4,5 мм/с Зона С – до 7,1 мм/с Зона D – свыше 7,1 мм/с
Поперечное	0,4	–	0,1	0,1	
Осевая	–	–	–	2,7	

Таблица 2

Результаты измерения виброускорения в полосе 10–10000 Гц

Режим работы	Точка замера / направление замера	1	2	3	4	Нормы вибрации, м/с ²	
На холостом ходу	вертикальное	–	1,8	1,1	0,1	10	20
	поперечное	3,1	–	1,5	0,1		
	осевое	–	–	–	0,1		
Под нагрузкой	вертикальное	–	2,0	2,3	0,1		
	поперечное	3,2	–	2,0	0,1		
	осевое	–	–	–	0,2		

Результаты

Анализ измеренных значений виброскорости в выбранных точках замера показывает, что данный параметр не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования, так как обладает низкой чувствительностью и способен зарегистрировать лишь последнюю стадию развития дефектов рассматриваемых узлов и не дает возможности достоверной оценки оптимальности места установки датчика вибрации диагностического модуля.

Анализ измеренных значений виброускорения в выбранных точках замера показывает, что данный параметр информативнее виброскорости и может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака в процессе работы технологического оборудования. Увеличение уровня виброускорения под нагрузкой (в процессе обработки) также позволяет косвенно контролировать силу резания для оценки состояния режущего инструмента.

Из табл. 2 видно, что максимальный уровень вибрации наблюдается в точке 1. Но в этой точке происходит наложение вибраций из разных источников (процесс резания, работа электродвигателя), поэтому сложнее выделить составляющую вибрационного сигнала, характеризующую работу оборудования непосредственно в процессе обработки. При этом распространение вибросигнала от инструмента по узлам станка достаточно хорошо локализуется по всей цепке двигателя и шпинделя. Вибросигнал без затухания хорошо регистрируется в точке 2. Уровни вибрации в процессе обработки в точках 2 и 3 находятся на одном уровне, но размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным, так как обеспечивает защиту датчика от воздействий со стороны стружки, смазочно-охлаждающей жидкости или оператора. При прохождении через упругие элементы станка уровень вибрации сильно ослабляется, поэтому расположение датчика в точке 4 нецелесообразно.

Для уточнения состояния узлов оборудования и процесса обработки использован спектральный анализ вибрационных параметров. Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, который позволяет выявить частотный состав сигнала. Спектрограммы виброскорости используются при мониторинге развитых повреждений. Анализ спектрограмм виброускорения позволяет идентифицировать нестабильность работы оборудования на ранней стадии. При спектральном анализе, кроме частоты колебаний, учитывают значение амплитуды на данной частоте. Для анализа вибрационного спектра

выделяют основные составляющие спектрального сигнала: оборотная частота, субгармоники, резонансные частоты, негармонические колебания, зубцовые частоты, боковые полосы, вибрации электрического происхождения и шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах.

На рис. 2 по рассматриваемому фрезерному станку представлены спектры виброскорости, а на рис. 3 – виброускорения.

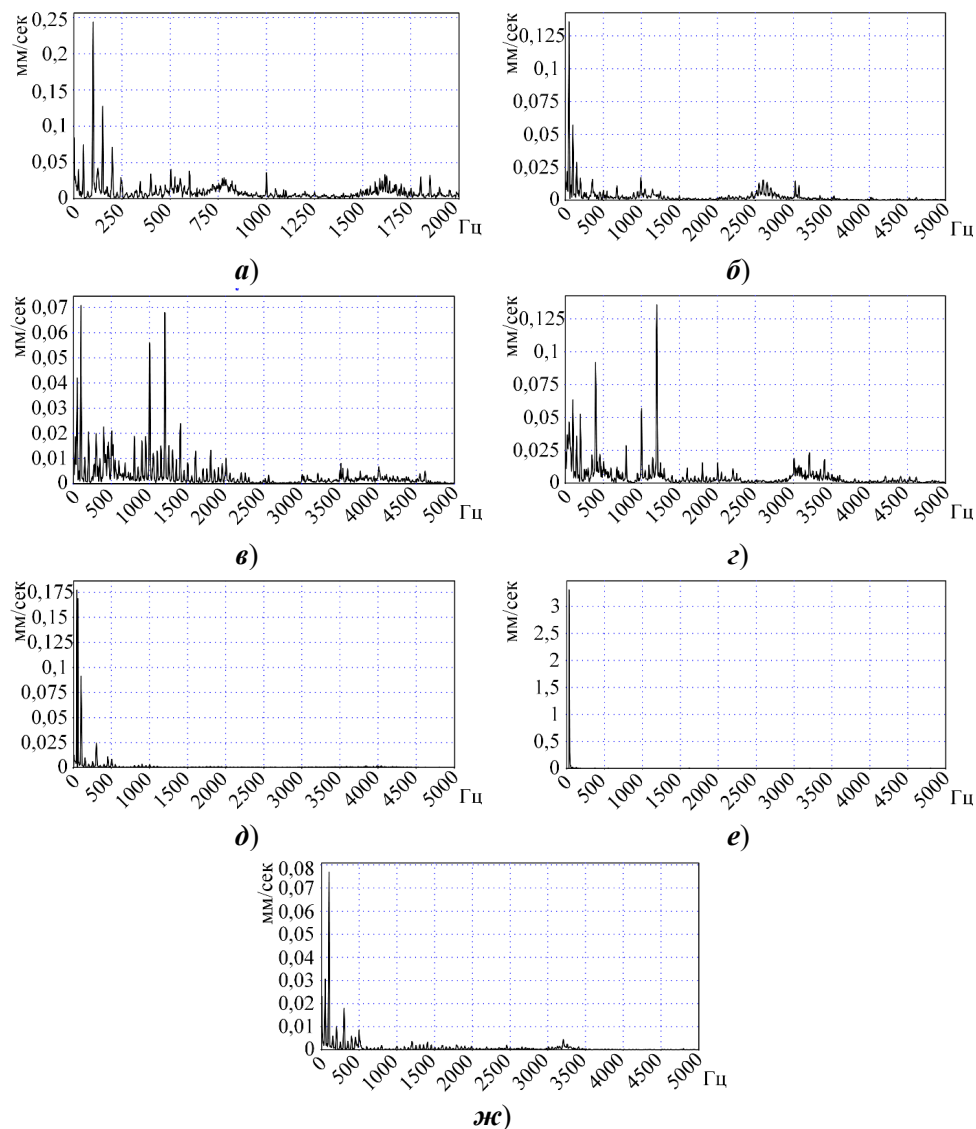


Рис. 2. Спектр виброскорости в ключевых точках станка:

а – 1п; *б* – 2в; *в* – 3п; *г* – 3в; *д* – 4п; *е* – 4о; *ж* – 4в

Общий уровень составляющих спектра виброскорости в полосе частот от 2 до 5000 Гц не превышает принятую норму по параметру виброскорости 4,5 мм/с. На всех спектрах прослеживается оборотная частота вращения шпинделя 43,75 Гц, что соответствовало частоте вращения шпинделя 2625 об/мин в процессе обработки во время проведения исследования.

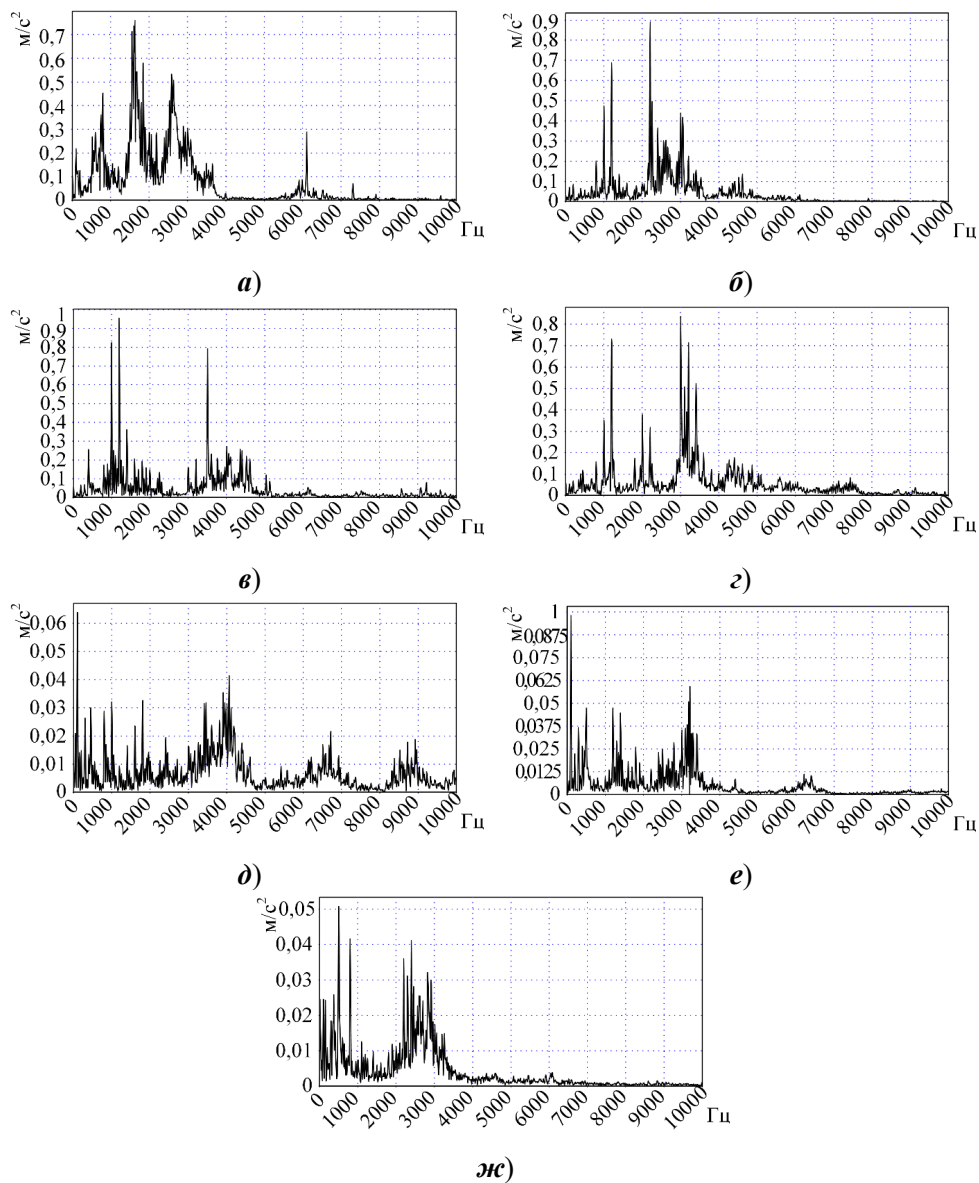


Рис. 3. Спектр виброускорения в ключевых точках станка:
а – 1п; *б* – 2в; *в* – 3п; *г* – 3в; *д* – 4п; *е* – 4о; *жс* – 4в

По спектрам виброускорения в полосе частот от 2 до 20 000 Гц не обнаружены ударные импульсы, превышающие общую принятую норму виброускорения 10 м/с^2 . Соответственно никаких повреждений исследуемый станок не имеет.

Обсуждение

Видно, что диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях данным методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей

картине частотного распределения всей мощности вибросигнала. Анализ спектра виброускорения в ключевых точках станка подтвердил, что размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным.

В АПК [1] для контроля вибрации используются микроэлектромеханические системы (МЭМС) акселерометры, с помощью которых производится контроль вибрации 200 раз в секунду, соответственно есть возможность контролировать сигнал до 100 Гц. Диапазон измерений, в котором работает датчик МЭМС, по умолчанию составляет $\pm 4g$ ($\pm 39,2 \text{ м/с}^2$). Максимально настраиваемый диапазон $\pm 16g$ ($\pm 156,8 \text{ м/с}^2$).

Заявленный частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станов и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте). Датчиками на основе МЭМС акселерометра не получится в полной мере контролировать дефекты подшипников качения (необходимый диапазон 8000–16000 Гц), дефекты подшипников качения приводного двигателя (необходимый диапазон 20–400 Гц) и дефекты электромагнитной системы электродвигателей (необходимый диапазон 800–3000 Гц).

Заключение

Расширение функциональных возможностей АПК путем обеспечения его применения на фрезерных станках, эксплуатируемых в составе машиностроительных предприятий Тульского региона, с использованием результатов проведенного анализа вибрационных характеристик и определения оптимального места установки датчика вибрации диагностического модуля обеспечивает эффективную эксплуатацию оборудования с целью повышения качества выпускаемой продукции и своевременного реагирования на нештатные ситуации.

Список литературы

1. Янов Е. С., Анцев А. В., Воротилин М. С., Минаков Е. И. Аппаратно-программный комплекс мониторинга технологических систем и процессов // СТИН. 2024. № 5. С. 32–35.
2. Антонычев С. В., Савин М. В., Аляев А. А., Дубовцев А. В. Приспособление для проверки технического состояния подшипников качения валковой сборки станов холодной прокатки труб на основе экспертной системы «СВК-Ариадна» // Производство проката. 2006. № 1. С. 41–45.
3. Анцев А. В., Данг Ч. Х., Янов Е. С., Полев М. В. Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 2. С. 151–158.
4. Янов Е. С., Анцев А. В., Воротилин М. С. Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении. Тула : Изд-во ТулГУ, 2024. 173 с.
5. Анцев А. В., Данг Х. Ч. Оценка состояния режущего инструмента по уровню вибрации при фрезерной обработке // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий : сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / под ред. В. А. Лебедева. Ростов н/Д. : ДГТУ, 2020. С. 131–138.
6. Сахаров Д. В., Дуюн Т. А. Методика определения жесткости фрезы, установленной в цанговый патрон при обработке нержавеющей сталей // Вестник Белгород-

- ского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2013. № 2. С. 97–99.
7. Голованов В. В., Василенко В. Г., Земсков А. А. [и др.]. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 3-1. С. 213–221.
 8. Позынич Е. К. Исследование процесса деградации крановых металлоконструкций методом неразрушающего контроля // Механики XXI века. 2008. № 7. С. 341–345.
 9. Суриков Д. Г. Разработка методики предупреждения отказов механических трансмиссий мехатронных приводов трубопроводной арматуры // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 5-2 (313). С. 233–241.
 10. Анцев А. В., Пасько Н. И., Янов Е. С., Данг Х. Ч. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296.

References

1. Yanov E.S., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Hardware and software complex for monitoring technological systems and processes. *STIN*. 2024;(5):32–35. (In Russ.)
2. Antonychev S.V., Savin M.V., Alyaev A.A., Dubovtsev A.V. Device for checking the technical condition of rolling bearings of the roll assembly of cold rolling mills for pipes based on an expert system “SVK-Ariadna”. *Proizvodstvo prokata* = Rolled products production. 2006;(1):41–45. (In Russ.)
3. Antsev A.V., Dang Ch.Kh., Yanov E.S., Polev M.V. Experimental setup for vibration control during CNC machining. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(2):151–158. (In Russ.)
4. Yanov E.S., Antsev A.V., Vorotilin M.S. *Issledovanie vliyaniya iznosa rezhushchego instrumenta na vibratsiyu tonkostennykh zagotovok pri tochenii* = *Studying the influence of cutting tool wear on the vibration of thin-walled workpieces during turning*. Tula: Izd-vo TulGU, 2024:173. (In Russ.)
5. Antsev A.V., Dang Kh.Ch. Evaluation of the condition of the cutting tool by the vibration level during milling. *Fundamental'nye osnovy fiziki, khimii i mekhaniki naukoemkikh tekhnologicheskikh sistem formoobrazovaniya i sborki izdeliy: sb. tr. nauch. simpoziuma tekhnologov-mashinostroiteley* = *Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of scientific technological systems of product formation and assembly: collection of scientific papers on mechanical engineering*. Rostov-on-Don: DGTU, 2020:131–138. (In Russ.)
6. Sakharov D.V., Duyun T.A. Method for determining the rigidity of a cutter installed in a collet chuck when processing stainless steels. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* = *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013;(2):97–99. (In Russ.)
7. Golovanov V.V., Vasilenko V.G., Zemskov A.A. et al. Methods and means of diagnostics of aircraft drives during their operation according to their technical condition. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Samara State Aerospace University*. 2015;14(3-1):213–221. (In Russ.)
8. Pozynich E.K. Study of the process of degradation of crane metal structures by non-destructive testing. *Mekhaniki XXI veka* = *Mechanics of the 21st century*. 2008;(7):341–345. (In Russ.)
9. Surikov D.G. Development of a methodology for preventing failures of mechanical transmissions of mechatronic drives of pipeline valves. *Fundamental'nye i prikladnye*

problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015;(5-2):233–241. (In Russ.)

10. Antsev A.V., Pas'ko N.I., Yanov E.S., Dang Kh.Ch. Methodology of vibration signal processing for assessing the condition of a cutting tool. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Engineering sciences*. 2020;(4):291–296. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Сергеевич Янов

кандидат технических наук, заместитель
директора Тульской инженерной школы
«Интеллектуальные оборонные
системы» имени академика
А. Г. Шипунова, Тульский государствен-
ный университет (Россия, г. Тула,
пр-кт Ленина, 92)

E-mail: es.yanov@mail.ru

Evgeny S. Yanov

Candidate of engineering sciences,
deputy director, Tula Engineering School
“Intelligent Defense Systems” named
after Academician A.G. Shipunov,
Tula State University (92 Lenina
avenue, Tula, Russia)

Станислав Владимирович Антонычев

Генеральный директор
ООО «Энергопромсервис»
(г. Москва, ул. Изюмская, д. 46, кв. 168)

E-mail: 25111976@list.ru

Stanislav V. Antonychev

Director general “Energopromservis” LLC
(app. 168, 46 Izyumskaya street,
Moscow, Russia)

Александр Витальевич Анцев

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой машиностроения
и материаловедения, Тульский
государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

E-mail: a.antsev@yandex.ru

Aleksandr V. Antsev

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of mechanical engineering and materials
science, Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Михаил Сергеевич Воротилин

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе, Тульский
государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

Mikhail S. Vorotilin

Doctor of engineering sciences, professor,
vice-rector for research, Tula State
University (92 Lenina
avenue, Tula, Russia)

Евгений Иванович Минаков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектроники,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)

E-mail: eminakov@bk.ru

Evgeny I. Minakov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
electronics, Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 05.07.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.08.2024

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024