

УДК 621.9.08

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-6-23-29

Э.С. Гаспаров, Л.Б. Гаспарова, Г.А. Маркосян

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЕЙ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Исследованы возможности определения природы возникновения составляющих вибрационной активности шпиндельного узла шлифовального станка путем линейного увеличения частоты вращения электрошпинделя и анализа сигнала виброускорения. Выявлено большое количество гармоник кратных 50 Гц, что говорит о связи с частотой сети питания. Для повышения динамического каче-

ства необходимо обеспечить несовпадение коммутационных частот преобразователя частоты и гармоник кратных сетевой частоте с собственными резонансными частотами шпиндельного узла.

**Ключевые слова:** подшипники, виброускорение, предварительный натяг, спектральные характеристики, частота, ротор.

E.S. Gasparov, L.B. Gasparova, G.A. Markosyan

## VIBRATORY ACTIVITY INVESTIGATION OF GRINDING MACHINE ELECTRIC SPINDLES

The purpose of this work is to support dynamic properties of spindle units in grinding machines. For this there are problems under solution for the definition of the origin of the constituents in the spindle unit vibratory activity by means of the linear increase of electric spindle rotation frequency, obtaining and analyzing a vibratory acceleration signal for the possibility to determine a preload. The vibratory acceleration signal was investigated through a spectrum analysis method.

A scientific novelty of investigation consists in the substantiation of possibility to determine a preload by means of the spectrum analysis of a vibration acceleration signal at the linear increase of spindle rotation frequency that is at starting. It gives, in its turn, a possibility for the automated estimate of the spindle unit state before cutting beginning.

In the experimental way there are obtained temporal realizations of the vibratory acceleration signal at different efforts of the preload. A high-speed grinding motor-spindle is as a basic element of the bench, which was investigated through the methods of testing diagnostics in the opera-

tion. In the bench design there were made some alterations. The bench was supplemented with the systems essential to support motor-spindle full operation, in particular: with systems of lubrication, cooling and drive control. There was revealed a large number of harmonics multiple to 50 Hz, which tells of the connection with the frequency of power supply circuit. Their coincidence with the own frequencies of the spindle unit results in the considerable increase of their amplitudes.

To increase dynamic quality one should avoid the cases of the coincidence of switching frequencies and circuit harmonics with own frequencies of the electric spindle. It is also necessary to bring a form of power voltage to a pure harmonic oscillation to decrease the impact of a drive electromagnetic field upon dynamic characteristics of the spindle unit.

**Key words:** bearings, vibratory acceleration, preload, spectral properties, frequency, rotor.

### Введение

В металлорежущих станках широко используются шпиндельные узлы (ШУ) на опорах качения, как наиболее экономичные, надежные и простые в эксплуатации. Шпиндельные узлы современных станков являются наиболее ответственным элементом в общей цепочке обеспечения качества обрабатываемых поверхностей. Высокие скорости вращения шпинделей ведут к тому, что сравнительно небольшие дефекты в его подшипниковых узлах через короткое время приводят к деградации подшипника и потере точности станка в целом. На

ранней стадии развития дефекты подшипника еще не сказываются на точности обработки, но они уже позволяют прогнозировать будущий отказ [1, 2].

Реализация высоких требований, предъявляемых к долговечности, быстроходности и точности таких ШУ зависит от многих факторов, в том числе и от возможностей использования результатов компьютерного анализа при их проектировании. Методы виброакустической диагностики – наиболее эффективный инструмент для выявления зарождающихся

дефектов подшипниковых узлов. Эти методы целесообразно применять и на стадии создания технологического оборудования, и на стадии эксплуатации для принятия своевременных мер по техническому обслуживанию или ремонту шпиндельного узла [3].

Влияние вибрации на качество обрабатываемой поверхности неоднозначно. Если высокочастотная вибрация может оказывать положительное действие на процесс резания, то наличие низкочастотной вибрации вызывает волнистость обрабатываемой поверхности, увеличивает ше-

роховатость и ухудшает качество обрабатываемой поверхности. В связи с этим исследование возможности определения природы возникновения составляющих вибрационной активности шпиндельного узла путем линейного увеличения частоты вращения электрошпинделя и анализа сигнала виброускорения можно считать актуальным.

Значительное влияние в виброактивность шпиндельного узла оказывают электромагнитные силы привода. Их вклад в вибрацию шпиндельного узла превышает 90 % [4-9].

### Устройство экспериментального оборудования

Устройство экспериментального оборудования (рис. 1) для исследования составляющих вибрационной активности электрошпинделя шлифовального станка подробно рассмотрено в работах [4-6]. Электрошпиндель состоит из вала, смонтированного на двух радиально-упорных шариковых подшипниках. Конструкция

экспериментального оборудования была дополнена системами смазки, охлаждения и управления приводом.

Для исследования электрошпинделя применялись методы тестового диагностирования, которые также подробно рассмотрены в работах [5, 6].

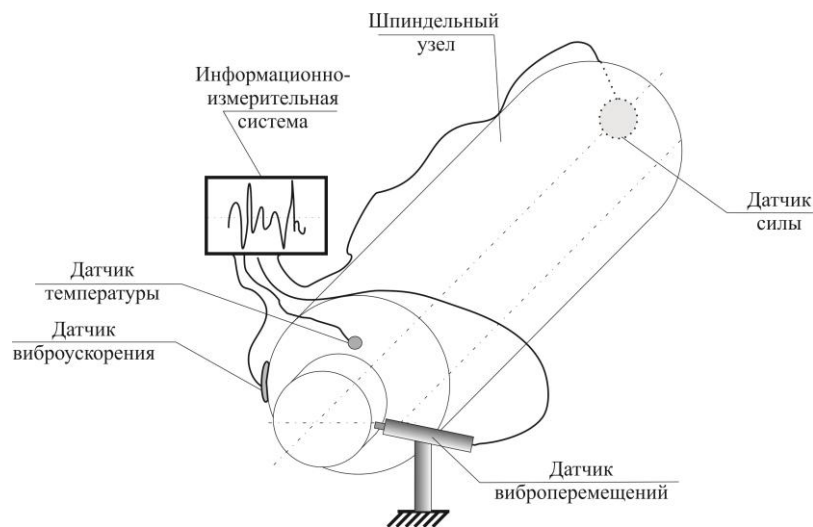


Рис. 1. Устройство экспериментального оборудования

Акселерометр был закреплен на корпусе электрошпинделя у передней подшипниковой опоры (рис.1). Датчик температуры и система охлаждения обеспечивали необходимый температурный режим работы высокоточных подшипниковых опор (рис. 2).

Датчик AP2100 компании «Globaltest» на основе вихретокового преобразователя контролировал частоту вращения электрошпинделя.

Для получения, сохранения и обработки информации в виде временных реализаций виброускорения, была использована система, состоящая из акселерометра, тензометрического датчика, контроллера (шасси) NI cDAQ 9172, модулей сбора NI 9219 и NI 9234 и программного обеспечения фирмы NI Sound and Vibration Assistant. Был применен акселерометр AP 98 с встроенным усилителем стандарта ICP [10].

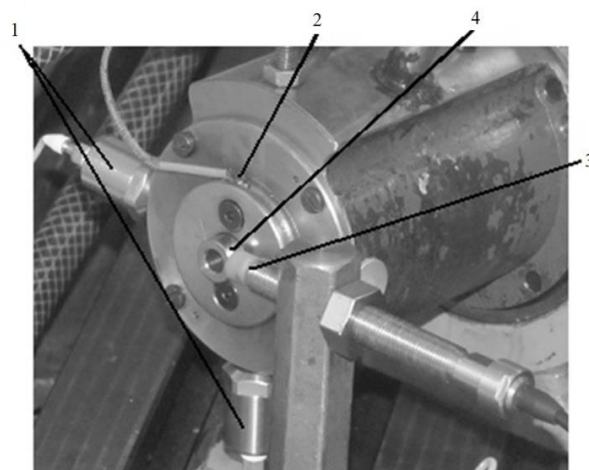


Рис. 2. Расстановка датчиков на шпинделе  
1 – акселерометры, 2 – датчик температуры,  
3 – вихретоковая датчиковая система, 4 – лыска

Для преобразования аналогового сигнала в цифру использовался дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь

(АЦП) разрядностью в 24 бита. На рис.3 приведена схема предварительного каскада модуля сбора NI 9234.

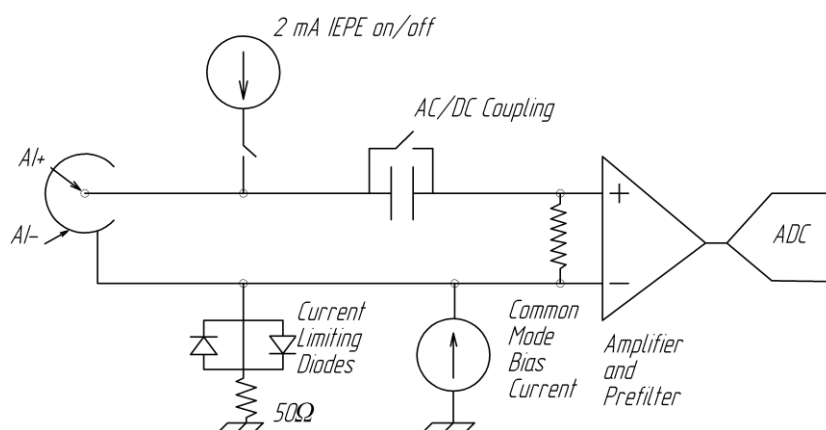


Рис. 3. Предварительный каскад NI 9234 для одного канала

Вращение электрошпинделя обеспечивалось использованием частотного преобразователя с широтно импульсной модуляцией. Частотный преобразователь имел большой запас по мощности для того, чтобы обеспечить заданную частоту вращения с минимальной девиацией, порядка 0,01–0,02 % от необходимой частоты вращения. Такая точность частоты вращения обеспечивалась на всем диапазоне используемых

значений усилия предварительного натяга. Точность частоты вращения дополнительно контролировалась за счет данных получаемых с вихретокового датчика, которые сопоставлялись с выходными данными спектрального анализа сигналов виброускорения. Преобразователь частоты имел линейную зависимость выходного напряжения от установленной частоты вращения.

### Проведение эксперимента и анализ спектра сигнала виброускорения

Эксперимент проводился следующим образом. ПЧ был настроен так, чтобы скорость вращения шпинделя увеличивалась линейно и с ускорением 10 Гц в секунду или 600 об/с. Небольшое ускорение позво-

лило получить большие значения спектральной плотности мощности за счет анализа более длительных временных промежутков и тем самым улучшить соотношение сигнал/шум (помеха).

Экспериментальным путем были получены временные реализации сигнала виброускорения при различных усилиях предварительного натяга. Данные реализации были разбиты на несколько последовательных участков длительностью 10 се-

кунд и получены их спектральные преобразования. Ниже, на рис. 4, приведены спектральные преобразования для значения предварительного натяга 2 Н. Частотная шкала приведена в диапазоне от 0 до 1600 Гц.

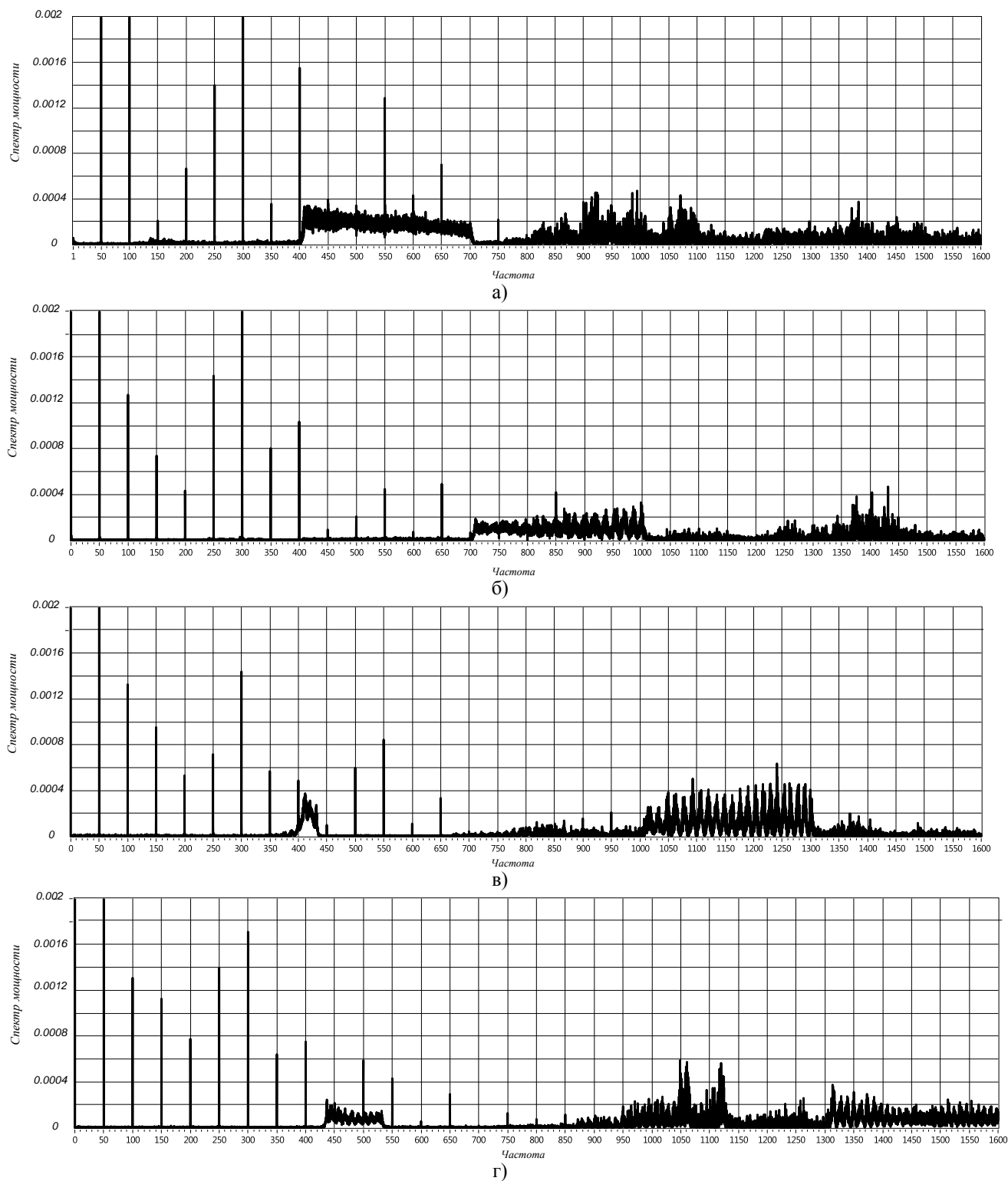


Рис. 4. Спектральная характеристика мощности сигнала виброускорения для диапазонов вращений: а – 6-12 тыс. об/мин; б – 12-18 тыс. об/мин; в – 18-24 тыс. об/мин; г – 24-30 тыс. об/мин

Из анализа спектров рис. 4 хорошо видно, что с увеличением частоты вращения шпинделя часть частотных диапазонов спектра перетекает в область более высоких частот. На основе такого анализа можно сделать вывод о взаимосвязи этих частотных диапазонов с частотой вращения шпинделя. Там, где частоты вращения шпинделя и привязанные к ним вынужденные частоты совпадают с собственными частотами электрошпинделя, наблюдается увеличение амплитуды (рис. 4в, г). Это также хорошо видно и на рисунке 4 а, б. На рис. 4а в диапазоне частот от 400 до 700 Гц видно, что, несмотря на увеличение частоты вращения шпинделя, «полка» АЧХ имеет спадающий фронт с увеличением частоты. Это связано с тем, что в области 400 Гц находится собственная резонансная частота шпиндельного узла. А на рисунке 4б в диапазоне от 700 до 1000 Гц «полка» АЧХ имеет нарастающий фронт с увеличением частоты, что большей степени связано с наличием резонансных частот в районе 1000 Гц, чем с увеличением частоты вращения шпинделя.

При этом, как видно, из рис.4 а-г, неизменными по частоте остается линейчатый (дискретный) спектр в области низ-

### Выводы

Разгон можно использовать для определения диапазонов собственных частот, а, значит, и для определения усилия предварительного натяга [4, 11]. Выявлено большое количество гармоник кратных 50 Гц, что позволяет сделать вывод о связи с частотой сети питания. Совпадение их с собственными частотами шпиндельного узла приводит к значительному увеличению их амплитуд.

В случае, когда для управления приводом используется частотный преобразователь, чтобы обеспечить параметрическую надежность и динамическое каче-

ских частот от 0 до 950 Гц. Их величина во много раз превышает значение вынужденных частот спектра и сосредоточена в очень узкой полосе частот с последовательностью в 50 Гц. На основе этого можно сделать вывод, что данные частоты не привязаны к частоте вращения шпинделя и являются результатом влияния электромагнитных сил привода.

Схожие результаты были получены для других значений предварительного натяга. Для спектрального анализа их временные реализации разгонов также были разделены на последовательные временные отрезки длительностью 10 секунд. Исследование их спектральных характеристик показало, что на их спектральных диаграммах также присутствуют гармоники кратные сетевой частоте с амплитудами значительно превышающие амплитуды на вынужденных частотах. Также их анализ показал наличие участков собственных частот шпиндельного узла, имеющих смещение в область более высоких частот с увеличением значения предварительного натяга. Это также подтверждает возможность автоматизации получения данных о значении предварительного натяга опор при запуске шпиндельного узла.

ство, нужно учесть коммутационные частоты преобразователя, а также частоты кратные сетевой частоте.

Чтобы повысить динамическое качество необходимо избегать случаев совпадения частот коммутации и сетевых гармоник с собственными частотами электрошпинделя. Также нужно привести форму напряжения питания к чистому гармоническому колебанию для того, чтобы уменьшить воздействие электромагнитного поля привода на динамические характеристики ШУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хомяков, В. С.** Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов / В. С. Хомяков, Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабиров // Станки и инструмент. – 2009. – № 3. – С. 5 - 9.

2. **Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов** : монография / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова [и др.] – Москва : Ин-т машиноведения им. А. А. Благоврава, 1984. – 118 с.

3. **Козочкин, М. П.** Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т. 13. – №1(34). – С. 133 - 138.
4. **Гаспаров, Э. С.** Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Гаспаров Эрик Сергеевич; УлГТУ. – Ульяновск, 2016. – 174 с. – Библиогр.: с. 148-162.
5. **Гаспаров, Э. С.** Экспериментальная оценка зависимости вибродиагностических параметров шпиндельного узла от величины предварительного натяга его опор / Э. С. Гаспаров, А. Ф. Денисенко, Л. Б. Гаспарова // Вестник Самарского государственного технического университета. - 2015. – №2(46). – С. 152-158.
6. **Гаспаров, Э. С.** Определение усилия предварительного натяга подшипниковых опор шлифовального шпинделя. / Э. С. Гаспаров, А. Ф. Денисенко, Л. Б. Гаспарова // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2015. - №9. – С. 126-129.
7. **Сабиров, Ф. С.** Повышение эффективности станков на основе их диагностирования и определения виброустойчивости в рабочем пространстве: специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки»: дис. на соискание ученой степени док. техн. наук / Сабиров Фан Сагирович; Моск. гос. технол. ун-т «Станкин». – Москва, 2009. - 269 с. – Библиогр.: с. 238-269.
8. **Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки** / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, Д. Н. Суслов, А. П. Абрамов // Станки и инструмент. – 2010. – № 6. – С. 17-21.
9. **Головатенко, В. Г.** Способ повышения точности вращения вала ротора электрошпинделя / В. Г. Головатенко, Ю. В. Скорынин, Н. Т. Минченя // Станки и инструмент. – 1983. -№6. – С.15 -16.
10. **Гаспаров, Э. С.** Определение рациональных частот вращения роторов с целью минимизации их радиальных биений / Э. С. Гаспаров, В. И. Петрунин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2018. - №1(57). – С. 61-67.
11. **Gasparov, E. S.** Mathematical model of spindle unit bearing assembly / E. S. Gasparov, L. B. Gasparova // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – Vol.1- P. 725–731.
1. **Khomyakov, V.S.** Experimental and computation investigation of spindle unit dynamic characteristics / V.S. Khomyakov, N.A. Kochinev, F.S. Sabirov // *Machines and Tool*. – 2009. – No.3. – pp. 5-9.
2. **Vibratory Acoustic Diagnostics of Rising Defects:** monograph / F.Ya. Balitsky, M.A. Ivanova, A.G. Sokolova [et al.] – Moscow: *Blagonravov Institute of Machine Science*, 1984. – pp. 118.
3. **Kozochkin, M.P.** Defect detection in spindle units by vibratory acoustic methods / M.P. Kozochkin, F.S. Sabirov // *Bulletin of Ufa State Aircraft Engineering University*. – 2009. – Vol. 13. – No.1(34). – pp. 133-138.
4. **Gasparov, E.S.** Dynamic quality support in high-speed spindle units based modeling and general estimate of bearing state: specialty 05.02.07 “Technology and Equipment of Machining and Physical Technical Processing”: thesis for competition of academic degree of Can. sc. Tech. / Gasparov Erik Sergeevich; UISTU. - Ulyanovsk, 2016. – pp. 174. – References: pp. 148-162.
5. **Gasparov, E.S.** Experimental estimate of spindle unit vibratory diagnostic parameter depending on value of preload of its bearings / E.S. Gasparov, A.F. Denisenko, L.B. Gasparova // *Bulletin of Samara State Technical University*. – 2015. – No.2(46). – pp. 152-158.
6. **Gasparov, E.S.** Definition of bearing preload effort in grinding spindle. / E.S. Gasparov, A.F. Denisenko, L.B. Gasparova // *Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument Engineering*. – 2015. – No.9. – pp. 126-129.
7. **Sabirov, F.S.** Machine effectiveness increase based on machine diagnosing and definition of vibratory stability in operation space: specialty 05.03.01. “Technology and Equipment of Machining and Physical and Technical Processing”: thesis for competition of academic degree of Dr. Sc. Tech. / Sabirov Fan Sagirovich; Moscow State Technological University “Stankin”. – Moscow, 2009. – pp. 269. – References: pp. 238-269.
8. **Vibratory acoustic diagnostics of machine spindle bearings for high-speed machining** / M.P. Kozochkin, F.S. Sabirov, D.N. Suslov, A.P. Abramov // *Machines and Tool*. – 2010. – No.6. – pp. 17-21.
9. **Golovatenko, V.G.** Method for accuracy increase in rotor shaft rotation of electric spindle / V.G. Golovatenko, Yu.V. Skorynin, N.T. Minchenya // *Machines and Tool*. – 1983. – No.6. – pp. 15-16.
10. **Gasparov, E.S.** Definition of efficient frequencies in rotor rotation for minimization of rotor radial runout / E.S. Gasparov, V.I. Petrunin // *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Engineering Sciences*. – 2018. – No.1(57). – pp. 61-67.
11. **Gasparov, E. S.** Mathematical model of spindle unit bearing assembly / E. S. Gasparov, L. B. Gasparova // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol.1- P. 725–731.

Ссылка для цитирования:

Гаспаров, Э.С. Исследование виброактивности электрошпинделей шлифовальных станков / Э.С. Гаспаров, Л.Б. Гаспарова, Г.А. Маркосян // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 6. – С. 23 - 29. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-6-23-29.

Статья поступила в редакцию 15.02.21.

Рецензент: д.т.н., профессор, зав. отделом ИМАШ РАН

Албагачиев А.Ю.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 25.05.21.

#### Сведения об авторах:

**Гаспаров Эрик Сергеевич**, к.т.н., доцент кафедры «Электронные системы информационной безопасности» Самарский государственный технический университет, тел.: +7-927-263-17-31, e-mail: ericgasparov@rambler.ru.

**Гаспарова Лана Багратовна**, к. пед. н, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и

инструменты» Самарский государственный технический университет, тел: +7-927-260-68-05, e-mail: gasparova@mail.ru.

**Маркосян Геворг Арменович**, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника» Самарский государственный технический университет, тел: +7-967-720-84-40, e-mail: [emgemge@mail.ru](mailto:emgemge@mail.ru).

**Gasparov Erik Sergeevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Information Safety Electronic Systems”, Samara State Technical University, phone: +7-927-263-17-31, e-mail: ericgasparov@rambler.ru.

**Gasparova Lana Bagratovna**, Can. Sc. Pedagog., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Technique, Machines and Tools, Samara State Technical Universi-

ty, phone: +7-927-260-68-05, e-mail: gasparova@mail.ru.

**Markosyan Gevorg Armenovich**, Post graduate student of the Dep. “Information and Measuring Engineering”, Samara State Technical University, phone: +7-967-720-84-40, e-mail: [emgemge@mail.ru](mailto:emgemge@mail.ru).