

Стенд для исследования процесса точения с высокими частотами вращения шпинделя

Ю. В. Шаповал¹⁾, Д. В. Криворучко²⁾^{1), 2)} Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

Article info:

Paper received:

16 March 2015

The final version of the paper received:

04 June 2015

Paper accepted online:

05 November 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ diyyura@gmail.com²⁾ dmytro.kryvoruchko@gmail.com

В данной статье рассмотрены актуальные направления исследований ученых в области конструирования станков с высокоскоростными шпинделями. Основными направлениями работ являются статические, динамические, тепловые и вибрационные характеристики шпинделей. Множество исследований, направленных на изучение поведения точного, высокоскоростного оборудования, свидетельствует о том, что нельзя увеличить производительность обработки деталей резанием простым увеличением частоты вращения инструмента или детали. Возникают новые явления, не проявившиеся ранее при невысоких скоростях вращения, требующие к себе особого внимания. Поскольку в процессе обработки участвует не только шпиндельный узел, но и все узлы станка, нужны более широкие исследования всей технологической системы. Для более детального изучения процесса точения с высокими частотами вращения детали разработан и изготовлен авторами стенд. Исследованы параметры точности, жесткости, собственных частот колебаний. На основании этого выполнен анализ характеристик стенда. Это дает возможность непосредственно измерять все интересующие параметры процесса с помощью установленных измерительных систем.

Ключевые слова: точение, вибрация, шпиндель, частота вращения, стенд.

1. ВВЕДЕНИЕ

Потенциальными резервами повышения производительности при точении являются способность современных инструментальных материалов резать с высокой скоростью. Однако производители современных токарных станков и обрабатывающих центров редко предлагают оборудование с частотой вращения выше 6 000 об/мин [1–5]. Сегодня производится огромное число современных металлообрабатывающих станков и обрабатывающих центров. Однако существует ряд вопросов, которым производители и ученые уделяют особое внимание. Это динамика приводов осей, точность, надежность и простота изготовления направляющих и ответственных узлов станка, проектирование и исследование технологических параметров шпиндельных узлов. Безопасность и надежность из-за несовершенства динамических характеристик стали основной проблемой при проектировании и эксплуатации шпиндельных узлов. Поэтому сегодня большинство станков оснащено моторизованным шпинделем или шпинделем с прямым приводом. Это обусловлено лучшими статическими и динамическими характеристиками из-за отсутствия дополнительных кинематических цепей [6].

Многие ученые занимаются проблемой исследования шпинделей станков. Это Deping Liu, Hang Zhang, Zheng Tao Yufeng Su [7], Shaojian Zhang [8], Syath Abuthakeer. S, Mohanram P. V, Mohan Kumar G. [9], Emil Udup, Claudiu-Florinel Bisu, Miron Zapciu [10], E. Ozlu, E. Budak [11, 12].

Основными направлениями их исследований являются статические, динамические, тепловые и вибрационные характеристики шпинделей. Результаты исследований [7] показывают, что при максимальной скорости вращения мотор-шпинделя 12 000 об/мин минимальная собственная резонансная область находится выше 1 000 Гц, что не оказывает существенного влияния на колебание технологической системы в целом.

Большой интерес для изучения представляют высокоточные станки, оснащенные высокоскоростными шпинделями. Так, Shaojian Zhang в своей работе [8] детально рассматривает статические и динамические характеристики ультрапрецизионного станка для алмазного точения с аэростатическими опорами шпинделя. Детально рассмотрено влияние сил резания при постоянной частоте вращения шпинделя на вибрации, динамические характеристики шпинделя под действием прерывистой силы резания, а также влияние фазового сдвига вибрации при изменении длины инструмента.

Одно из важных направлений исследований высокоскоростных шпинделей – это динамическое исследование жесткости и гироскопических эффектов. Исследования [9] показывают, что собственные частоты колебаний формируются с учетом жесткости и массы тела. Однако этого не будет достаточно, чтобы найти критическую скорость для высокоскоростного шпинделя, поскольку жесткость вращающегося тела будет различной в зависимости от скорости.

Доказано, что центробежные и гироскопические эффекты значительно изменяют значение собственных частот. В работе также рассмотрено влияние предварительного натяга подшипников шпинделя на величину критической частоты вращения шпинделя и выполнен тепловой анализ осевой и радиальной деформаций шпинделя.

С увеличением вычислительной мощности современных персональных компьютеров многие ученые работают над созданием моделей оборудования и анализом на их основании процесса резания. Так, в работах [10–12] на основе моделей выполнен анализ теплового состояния подшипников шпинделя, стабильности резания с учетом динамики инструмента, устойчивости системы в зависимости от геометрических параметров инструмента.

Множество исследований, направленных на изучение поведения точного, высокоскоростного оборудования, свидетельствует о том, что нельзя увеличить производительность обработки деталей резанием простым увеличением частоты вращения инструмента или детали. Возникают новые явления, не проявлявшиеся ранее при невысоких скоростях, требующие к себе особого внимания.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является разработка станда, обеспечивающего возможность токарной обработки с частотой вращения шпинделя до 10 000 об/мин, и оснащение его средствами измерения колебаний его основных узлов.

Необходимость создания данного станда заключалась в исследовании поведения технологической системы в процессе резания при высокой частоте

вращения заготовки и шпинделя, влияния дисбаланса ее частей, влияния самого процесса резания на взаимное перемещение инструмента и детали.

3. ОПИСАНИЕ СТАНКА И ОСНАТКИ

Основой станда послужил токарный станок высокой точности с числовым программным управлением (ЧПУ) модели 1700ВФ30. Для проведения необходимых исследований изменены основные технологические параметры станка. Увеличена мощность привода главного движения с 700 Вт до 1 500 Вт, что связано со значительным увеличением мощности холостого хода с увеличением оборотов. Изменена кинематика привода главного движения из системы клиновых ремней на 1 поликлиновый ремень (рис. 1, поз. 1), позволяющий передавать большую мощность, увеличивать скорость вращения, уменьшать передачу вибраций от двигателя на шпиндель (рис. 1, поз. 2). Изменена кинематика и мощность приводов подачи. Заменен винт продольного перемещения каретки с трапецидальной резьбой на шариково-винтовую пару (рис. 1, поз. 5). Мощность осевых двигателей увеличена в связи с заменой старых двигателей на новые (рис. 1, поз. 3) при сохранении габаритных размеров. Вместо штатного многопозиционного резцедержателя установлен резцовый блок (рис. 1, поз. 4) на 2 резца для внутренней и наружной обработок.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Измерительная система станда позволяет измерять колебания рабочих органов. При токарной обработке наиболее интересны амплитуда и фаза колебаний шпинделя и инструмента. Для синхрониза-



Рис. 1. Общий вид станда

ции колебаний основных органов станда по фазе на шпинделе установлен датчик оборотов D1 (рис. 2). Сохранение данных для обработки осуществляется с помощью аналогового-цифрового преобразователя (АЦП) L-CARD LTR-11.

Измерение колебаний шпинделя происходит с помощью системы бесконтактных датчиков регистрации перемещений D2, D3, D4 и измерительного преобразователя (ИП), измеряющих положение шпинделя по 3 осям в пространстве. Система измерителя расстояния содержит вихретоковый датчик и автогенератор. Обмотка датчика является частью колебательного контура автогенератора, добротность которого изменяется в зависимости от положения металлического предмета, находящегося рядом. В зависимости от величины приближения металла к чувствительному элементу датчика изменяется амплитуда колебаний автогенератора. Амплитуда колебаний усиливается и передается на АЦП LTR-11. Для того чтобы работать с устройством, каждый канал необходимо откалибровать с помощью станка на той поверхности, расстояние до которой будет изме-

встроенным усилителем на базе микросхемы ADXL326. Этот прибор позволяет измерять виброускорение по трем осям в диапазоне $\pm 19 \text{ g}$ с нелинейностью во всем диапазоне не более $\pm 0,3 \%$ с частотой до 1 600 Гц. Проверка датчика на вибродиагностическом оборудовании показала полное соответствие испытываемого датчика типовым характеристикам паспортного технического описания.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ

Для исследования статической жесткости станда разработано и изготовлено специальное приспособление (рис. 4). Основной особенностью исследования есть возможность измерения статической жесткости вдоль любой оси, лежащей в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя.

Корпус приспособления (2) закреплен в трехлачковый патрон шпинделя станка. На корпусе имеется шкала для определения углового положения приспособления. В резцедержатель станка установ-

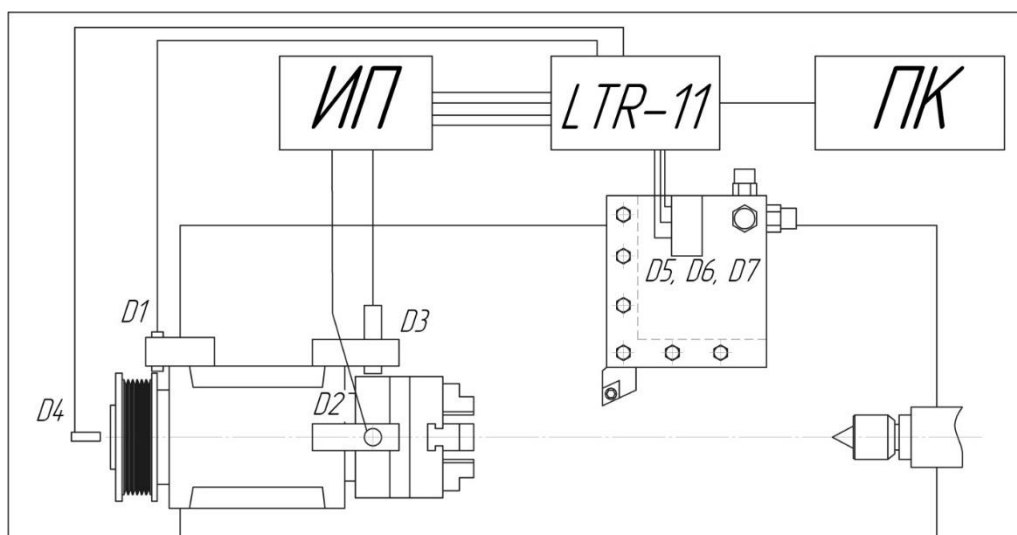


Рис. 2. Схема установки датчиков

ряться (рис. 3). Для уменьшения погрешностей измерения в месте установки датчиков на шпиндель напрессовано кольцо шириной 25 мм, затем проточено и шлифовано в сборе.

Кривые, описывающие зависимость напряжения на выходе от расстояния до датчика, имеют степенную зависимость.

Максимальное измеряемое расстояние находится в пределах 0,05 мм. Исходя из этого, зависимость в очень маленьком диапазоне измерения расстояния можно считать линейной с коэффициентами, указанными на кривых.

Регистрация колебаний инструмента имеет некоторую сложность. Это связано с тем, что при точении инструмент перемещается относительно детали и для измерения его виброперемещения по 3 осям очень сложно выбрать опорную точку. Наиболее подходящим для данной цели датчиком является акселерометр (датчики D5, D6, D7). На станде использован пьезоэлектрический акселерометр со

лена специальная оправка (1). При первой установке приспособления на станок в корпус (2) вместо эксцентрика (3) устанавливается резец для обточки оправки. Таким образом, шпиндель с корпусом станвятся соосны с оправкой, установленной в резцедержателе. На ось устанавливается опорная площадка (4) для опоры тензодатчика (5) и измерительной ножки индикатора (6). Эксцентрик служит для регулировки углового положения опорной площадки относительно корпуса.

Измерения производятся следующим образом. Выбирается угловое положение приспособления относительно узлов станда. С помощью винта (7) создается необходимое усилие нагрузки узлов станда, фиксирующееся тензодатчиком. С помощью индикатора ИРБ (6) фиксируется перемещение оправки приспособления относительно корпуса приспособления. Изменяя угловое положение приспособления, опыт повторяется нужное число раз. На рис. 5 показана диаграмма жесткости станда.

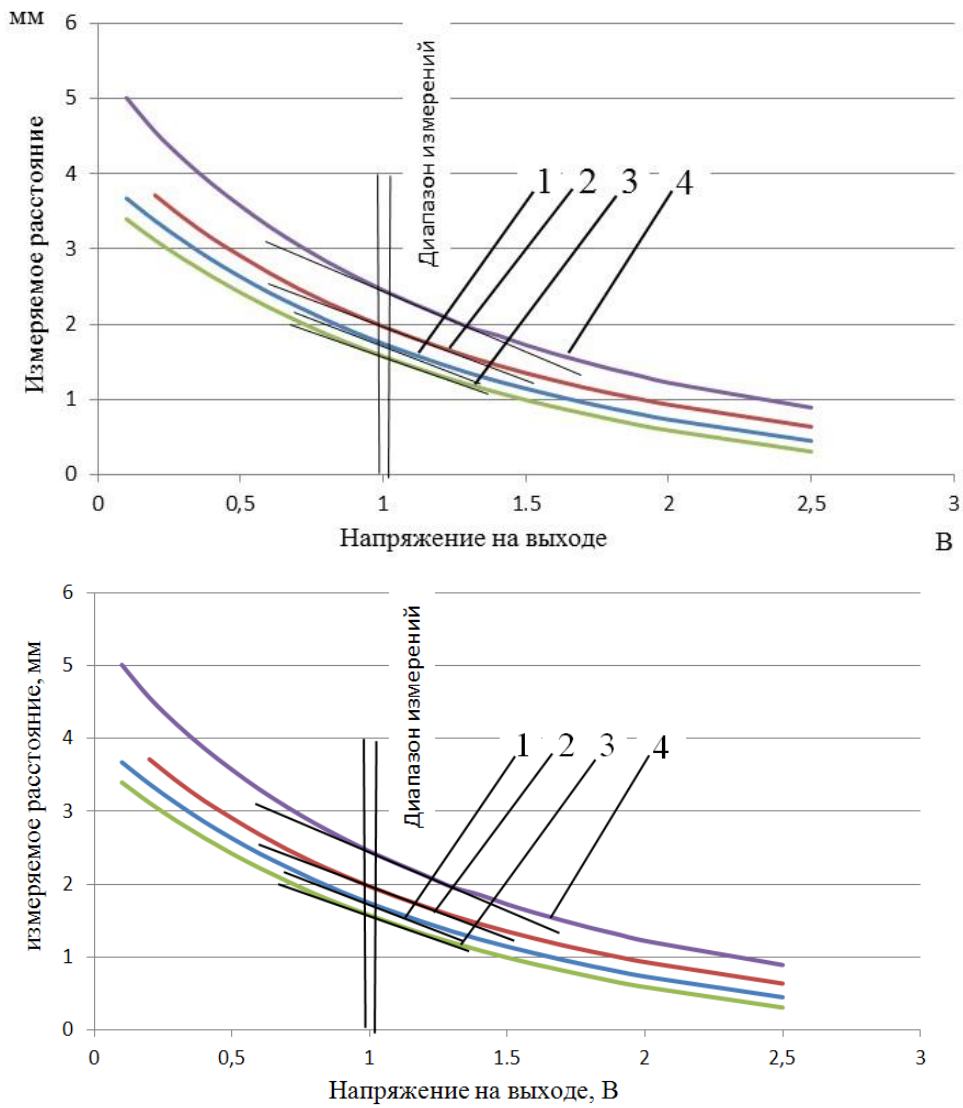


Рис. 3. Характеристика выходных параметров бесконтактного датчика регистрации перемещений

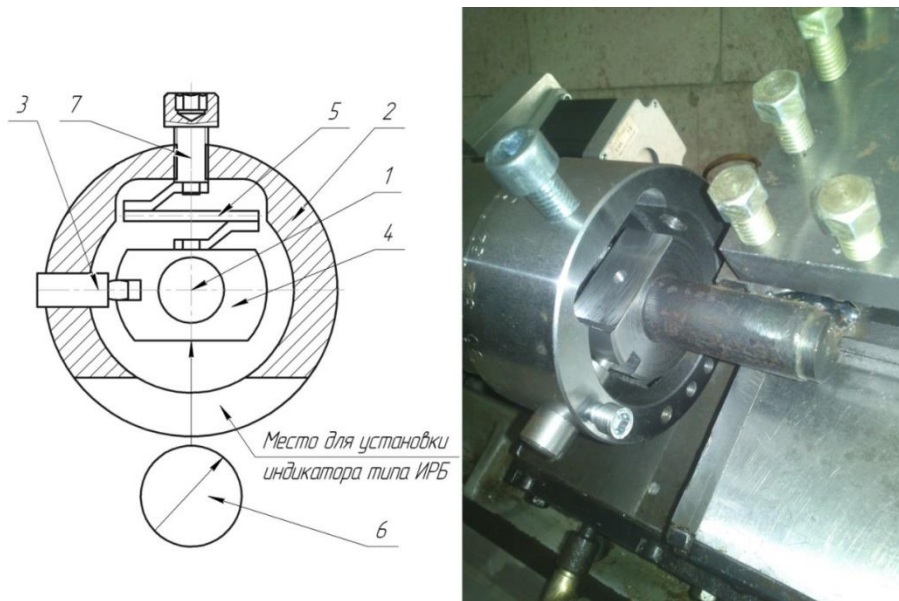


Рис. 4. Приспособление для измерения жесткости станка в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя:
а) схема; б) общий вид

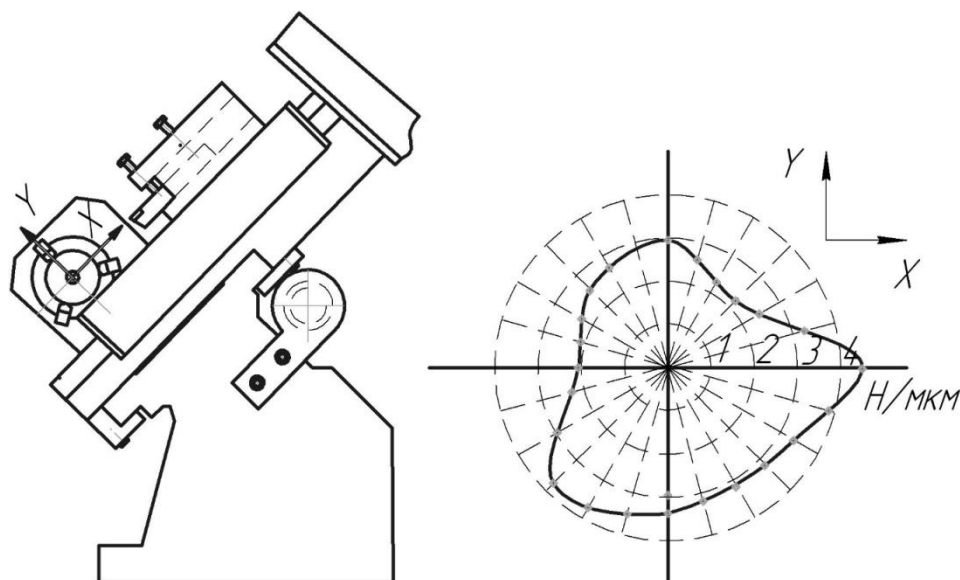


Рис. 5. Измерение жесткости станка: а) установка приспособления и система координат; б) диаграмма жесткости

Диаграмма показывает, что максимальная жесткость станка в направлении приложения нагрузки к станине в сторону направления максимальной силы резания.

6. АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТЕНДА

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) станка снималась с помощью вибродиагностического оборудования с датчиками КД-35, которые были поочередно установлены на различные узлы станка

вдоль различных осей координат. Для получения амплитудно-частотных характеристик, изображенных на рис. 6, обороты шпинделя станка увеличивали в течение 270 секунд до 10 000 об/мин, затем уменьшали с такой же скоростью до 0 об/мин.

Итоговые исследования АЧХ показали наличие нескольких собственных резонансных частот. Первая собственная частота в диапазоне 10–30 Гц, вторая – около 100 Гц, третья – в диапазоне 155–170 Гц.

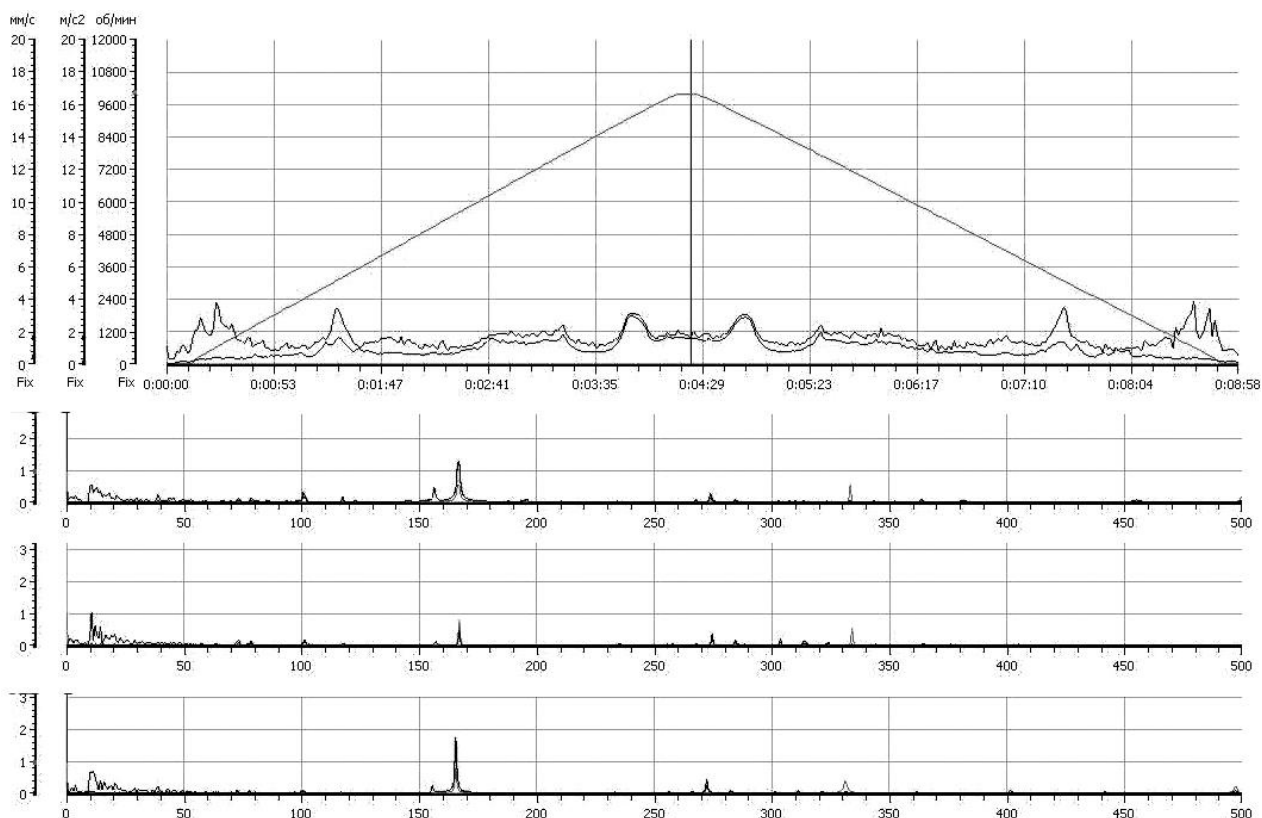


Рис. 6, лист 1. Амплитудно-частотная характеристика станка

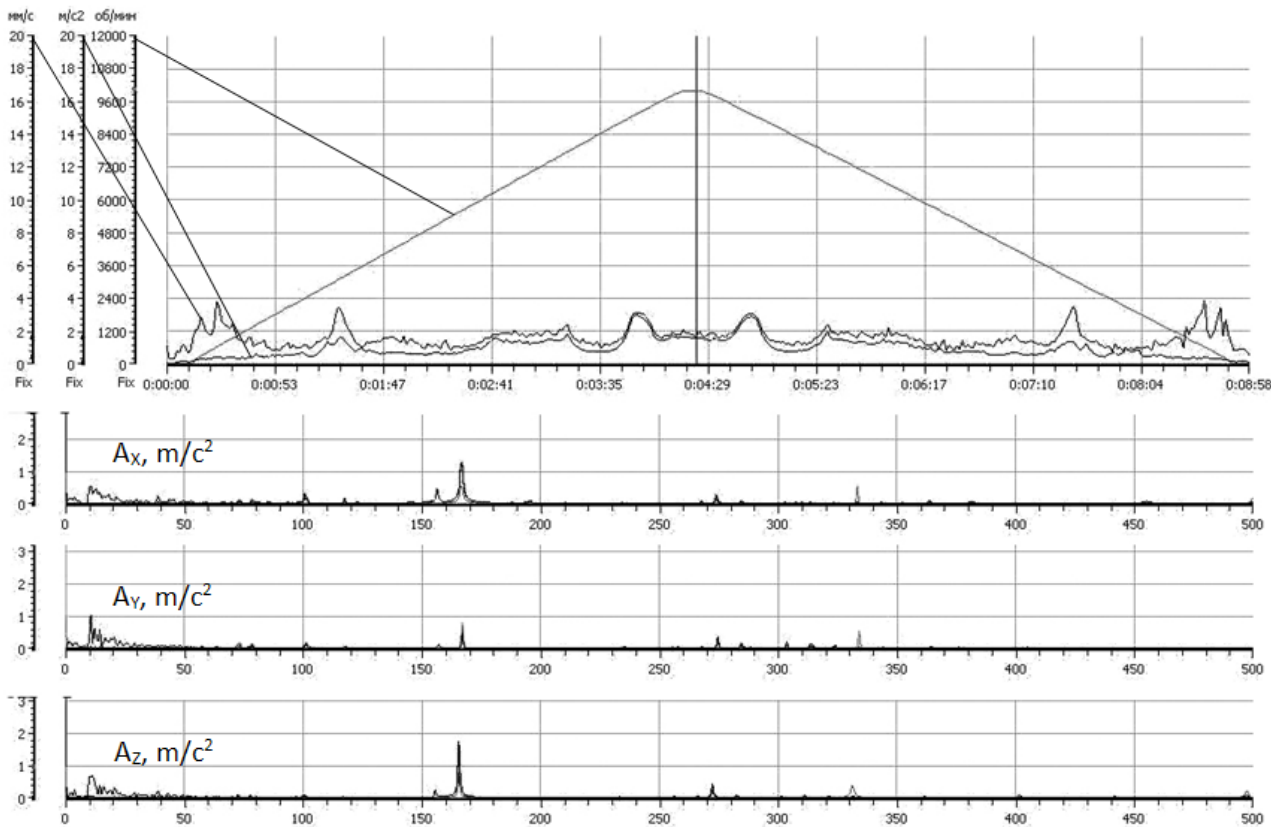


Рис. 6, лист 2. Амплитудно-частотная характеристика стэнда

7. ИССЛЕДОВАНИЕ БИЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

Для исследования биения шпинделя во время вращения во всем диапазоне частот использован бесконтактный измеритель расстояния. Амплитуда колебаний шпинделя измерена с помощью программного осциллографа программы PowerGraph. На рис. 7 изображены траектория перемещения шпинделя за 100 оборотов и результаты эксперимента исследования зависимости амплитуды колебаний от частоты вращения.

Анализируя полученную кривую, можно увидеть взаимосвязь значения колебания шпинделя на определенных частотах со значением собственных частот колебаний стэнда. Так, к примеру, резонансная частота 100 Гц, что соответствует 6 000 об/мин, приводит к уменьшению колебаний более чем на 20 %.

ВЫВОД

Разработан стэнд, позволяющий исследовать поведение технологической системы в процессе резания при высокой частоте вращения заготовки и шпинделя. Исследование статической жесткости и амплитудно-частотной характеристики, а также наличие измерительных средств в виде акселерометров и бесконтактных датчиков перемещения дают возможность исследовать характеристики системы в процессе обработки на нем.

Стэнд обладает следующими параметрами: основные собственные резонансные частоты колебаний находятся на частотах 100, 165 Гц, жесткость в сторону максимального усилия резания – 5 Н/мкм, биение шпинделя на холостом ходу не превышает 7 мкм во всем диапазоне частот вращения.

Stand for investigation of the process of turning at high speed spindle

Yu. V. Shapoval¹⁾, D. V. Kryvoruchko²⁾

^{1), 2)} Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

This article deals with the current trends of research in design of machine with high-speed spindles. The main areas of the work are static, dynamic, thermal and vibration characteristics of the spindles. A lot of researches aimed at understanding the behavior of accurate, high-speed equipment testify that it is impossible to increase productivity of machining by increasing the tool or workpiece rotation speed. There are some phenomena that aren't present at low speeds and require special attention at high spindle speed. Since the machining involves as spindle and the machine as well as all other elements machine tools more extensive research have to be performed throughout the machining system. For a more detailed study of turning operation at high speed of spindle the authors developed and manufactured the special designed machine tools. Accuracy, stiffness, eigenfrequencies and eigenform of the machine tool were measured and

represented in this article. The machine tool makes possible direct measurement of all the parameters of interest using the established measuring systems.

Key words: turning, vibration, spindle, speed, stand.

Прогнозування ресурсу різального інструменту

Ю. В. Шаповал¹⁾, Д. В. Криворучко²⁾

1), 2) Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

У цій статті розглянуті актуальні напрямки досліджень учених у галузі конструювання верстатів із високошвидкісними шпинделями. Основними напрямками робіт є статичні, динамічні, теплові та вібраційні характеристики шпинделів. Багато досліджень, спрямованих на вивчення поведінки точного, високошвидкісного обладнання свідчать про те, що не можна збільшити продуктивність обробки

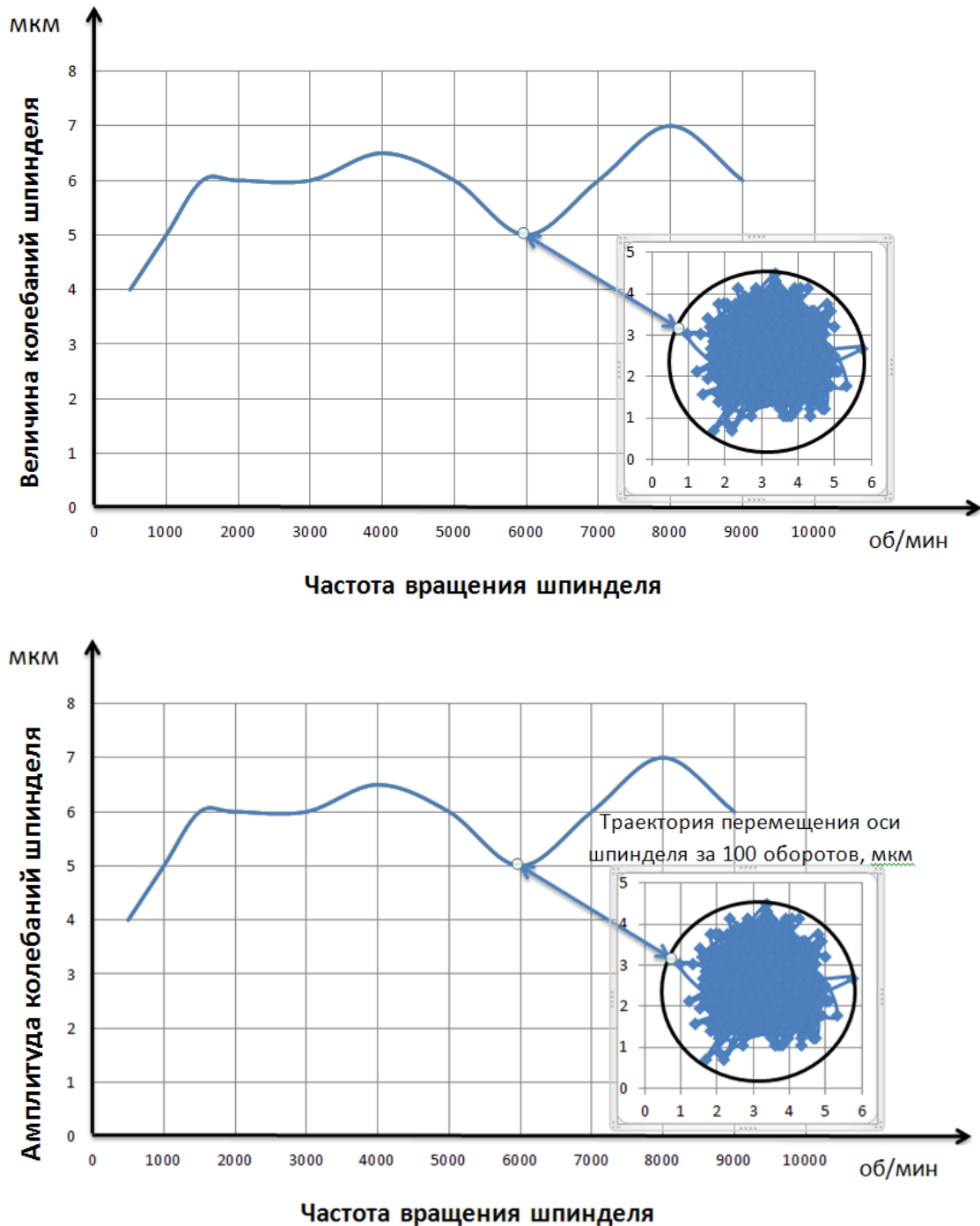


Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний шпинделя от частоты вращения на холостом ходу

деталей різанням простим збільшенням частоти обертання інструмента або деталі. Виникають нові явища, які не виявлялися раніше при невисоких швидкостях обертання, що потребують особливої уваги. Оскільки в процесі обробки бере участь не лише шпіндельний вузол, а й усі елементи верста- та, потрібні більш широкі дослідження всієї технологічної системи. Для більш детального вивчення процесу точіння з високими частотами обертання деталі розроблений і виготовлений авторами стенд. Досліджено параметри точності, жорсткості, власних частот коливань. На підставі цього виконано аналіз характеристик стенда. Це дає можливість безпосередньо вимірювати всі параметри процесу обробки, що цікавлять, за допомогою встановлених вимірювальних систем.

Ключові слова: точіння, вібрація, шпіндель, частота обертання, стенд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Развитие современных станков [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mehanit.ru/novosti/razvitiestankov.php>
2. Каталог станков Mori Seiki [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://ru.dmgmori.com/>
3. Каталог станков Haas [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://int.haascnc.com/home.asp?intLanguageCode=1049>
4. Каталог станков Okuma [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://okuma-russia.ru/tokarnie_centri.htm.
5. Каталог станков DMG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sibsapr.ru/>
6. Abele E. Machine tool spindle units / E. Abele, Y. Altintas, C. Brecher // CIRP Annals – Manuf. Technol. – 2010. – № 59. – P. 781–802.
7. Deping L. Finite Element Analysis of High-Speed Motorized Spindle Based on ANSYS / Deping Liu, Hang Zhang, Zheng Tao, Yufeng Su. // The Open Mechanical Engineering Journal. – 2011. – № 5. – P. 1–10.
8. Shaojian Zhang. Dynamic Modeling of Spindle Vibration and Surface Generation in Ultra-precision Machining / Shaojian Zhang. – The Hong Kong Polytechnic University Department of, 2012. – 254 p.
9. Abuthakeer S. Dynamic and thermal analysis of high speed motorized spindle / Syath Abuthakeer, Mohanram P. V., Mohan Kumar G. // Dynamic – international journal of applied engineering research. – 2011. – № 1.
10. Udup E. Numerical Model for Thermo-Mechanical Spindle Behavior Advances in Production / Emil Udup, Claudiu-Florinel Bisu, Miron Zapciu. // Automation and Transportation Systems. – 2013. – P. 254–264.
11. Ozlu E. Analytical Prediction of Stability Limit in Turning Operations / E. Ozlu, E. Budak // Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences. – 2010.
12. Ozlu E. Analytical Stability Models for Turning and Boring Operations / Emre Ozlu, Erhan Budak // Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences. – 2010.

REFERENCES

1. Razvitie sovremennykh stankov. – URL: <http://mehanit.ru/novosti/razvitie-stankov.php> [in Russian].
2. Catalog of machines Mori Seiki. – URL: <http://ru.dmgmori.com/> [in Russian].
3. Catalog of machines Haas. – URL: <http://int.haascnc.com/home.asp?intLanguageCode=1049>.
4. Catalog of machines Okuma. – URL: http://okuma-russia.ru/tokarnie_centri.htm. [in Russian].
5. Catalog of machines DMG. – URL: <http://sibsapr.ru/>. [in Russian].
6. E. Abele, Y. Altintas, and C. Brecher. (2010). CIRP Annals – Manuf. Technol. Vol. 59. Pp. 781-802.
7. Deping Liu, Hang Zhang, Zheng Tao, Yufeng Su. (2010). The Open Mechanical Engineering Journal. Vol. 5. Pp. 1-10.
8. Shaojian Zhang. (2012). Dynamic Modeling of Spindle Vibration and Surface Generation in Ultra-precision Machining: a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The Hong Kong Polytechnic University Department of Industrial and Systems Engineering. 254 p.
9. Syath Abuthakeer, Mohanram P.V., Mohan Kumar G. (2011). International journal of applied engineering research, dindigul, Vol. 1, Issue 4.
10. Emil Udup, Claudiu-Florinel Bisu, Miron Zapciu. (2013). Automation and Transportation Systems. P.p 254-264.
11. E. Ozlu, E. Budak. (2010). Analytical Stability Models for Turning and Boring Operations. Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences.
12. Emre Ozlu, Erhan Budak. (2010). Analytical Stability Models for Turning and Boring Operations – Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences.