

УДК. 621.9:62-229.331

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

**Космынин А.В., Щетинин В.С., Хвостиков А.С., Иванова Н.А., Космынин А.А.**

*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,  
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: avkosm@knastu.ru*

На основе синергетического подхода рассмотрены пути повышения точности вращения высокоскоростных шпинделей металлорежущих станков. Сделан сравнительный анализ эксплуатационных характеристик работы шпиндельного узла в газомагнитном и газостатическом режиме передней опоры. Определены области технологического использования шпиндельных узлов на газомагнитных опорах.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, газомагнитная опора, шпиндельные подшипники, газостатические подшипники, несущая способность, жесткость шпиндельного узла

## IMPROVE THE ACCURACY OF MACHINE TOOL SPINDLES

**Kosmynin A.V., Scthetinin V.S., Khvostikov A.S., Ivanova N.A., Kosmynin A.A.**

*Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: avkosm@knastu.ru*

On the basis of a synergistic approach discussed ways to improve the accuracy of high-speed spindles of machine tools. A comparative analysis of the performance of the spindle units in the gas-magnetic- and gas mode front bearing. The areas of technology use on spindles gas-magnetic bearings.

**Keywords:** spindle units, gas-magnetic bearing, spindle bearings, gas-static bearings, bearing ability, rigidity spindle units

Экономическое развитие страны ставит перед станкостроением задачу применение новейших технических решений. Одним из таких направлений является создание высокопроизводительного прецизионного оборудования, в том числе и металлообрабатывающих станков. Исследованиями по оценке влияния различных факторов на точность обработки установлено, что ее до 80% определяет шпиндельный узел (ШУ). Выходные характеристики ШУ в основном зависят от типа применяемых в них опор, так как последние обеспечивают быстроходность, траекторную точность вращения шпинделя, нагрузочную способность и долговечность ШУ.

Анализ показал, что многообразие опор шпиндельных узлов, разнообразие их конструкций и противоречивость рабочих характеристик подшипников усложняет задачу выбора лучшего решения и создания безальтернативного варианта опор ШУ для высокоскоростной обработки.

В современных конструкциях высокоскоростных ШУ применяют опоры качения, гидростатические, гидродинамические, газостатические и магнитные подшипники. Следует заметить, что эволюция применения опор в ШУ соответствует динамизации развития техники: один шарнир – много шарниров – гибкое вещество – жидкость – газ – поле.

Одним из возможных путей дальнейшего повышения выходных характеристик шпиндельных узлов состоит во внедрении в их конструкции нового типа подшипников –

газоманитных опор (ГМО). Они лишены недостатков газовых опор, которые имеют сравнительно низкую грузоподъемность. Недостатки магнитных опор по неустойчивости положения шпинделя компенсируются полем газовых сил. Поэтому создание шпиндельных узлов станков на газоманитных опор является актуальной практической задачей современного станкостроения [4, 6].

Приходится констатировать, что научные работы, посвященные исследованию особенностей работы ШУ металлорежущих станков на газоманитных опорах, практически отсутствуют за исключением единичных информационных материалов. Так, известен ШУ разработанный в Японии с магнитогазовыми гибридными опорами, предназначенный для повышения точности обработки материалов. Основную нагрузочную способность несут в данном шпинделе магнитные опоры, управляемые контроллером. При этом газостатические подшипники в нем выполняют в большей степени роль страховочных опор.

Анализируя выходные характеристики ШУ на электромагнитных и газостатических опорах, можно сделать вывод, – одним из способов улучшения характеристик ШУ является использование в их конструкции комбинированных опор, сочетающих в себе преимущества как газовых, так и магнитных подшипников. Следует учитывать, что точность обработки существенно определяется состоянием упругой системы станка (УСС) и важнейшей её подсистемой – си-

стемой резания, через которую замыкаются все подсистемы УСС. Детально рассмотрим шпиндельный узел. На рис. 1. представлена иерархия подсистем в технологической системе, причем отдельно выделен шпиндель-

ный узел как наиболее важная подсистема УСС. Кроме того, в ШУ выделено динамическое звено, которое представляет собой различные среды в виде жидкой или газовой смазки или магнитного поля.

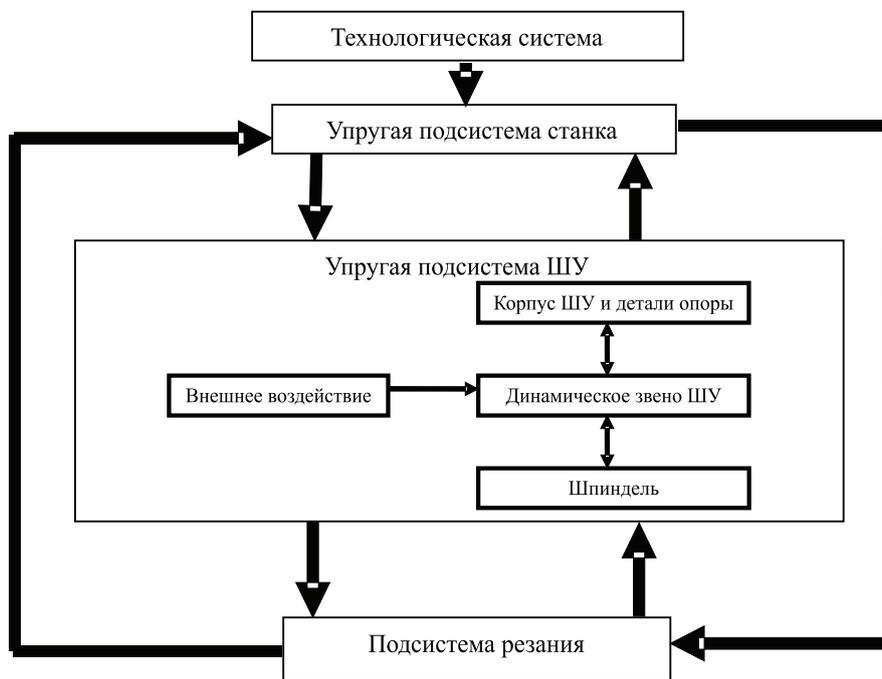


Рис. 1. Схема иерархий подсистем в технологической системе

Замкнутая система иначе реагирует на внешние воздействия, чем не замкнутая, в частности, она оказывается устойчивой при неустойчивости её отдельных подсистем (элементов). Самоорганизующаяся система – это нелинейная замкнутая динамическая система, способная обеспечить устойчивость и оптимальное функционирование в результате согласованного перераспределения энергии и её диссипации в подсистемах в процессе внешнего воздействия как на систему в целом, так и на отдельные подсистемы и звенья. «Замкнутая система» приобретает новый эффект, который можно назвать синергетическим.

На динамическое звено ШУ можно оказывать внешнее воздействие, это управление вязкостью (с помощью температуры) и количеством смазочного материала для подшипников качения, давлением наддува в газостатическом подшипнике и величиной магнитного потока в магнитном подшипнике. При этом само динамическое звено занимает равновесное положение в определенных границах, или можно сказать наступает самоорганизация динамического звена.

Одним из способов управления выходными характеристиками ШУ возможно использование комбинированных газомаг-

нитных опор, в которых на шпиндель действуют самоорганизующиеся силы – магнитные и газовые.

Следует учитывать, что в газостатической опоре ШУ, как правило, используется давление заводской пневмосети, которое является стандартным. В связи с этим обстоятельством управлять давлением наддува в опоры в производственном процессе затруднительно [3]. С применением магнитных сил в бесконтактных опорах появляется хорошая возможность управлять нагрузочной способностью и жесткостью опоры ШУ.

В Комсомольском-на-Амуре ГТУ разработана методика расчета таких опор для ШУ [7, 10] и стенд, конструкция и принцип работы которого подробно изложены в работе [2]. Проведенные исследования [1, 5, 8] показали на увеличение нагрузочных характеристик до двух раз и жесткости до трех раз в режиме управления тяговым усилием электромагнита в зависимости от смещения шпинделя. Выполненный комплекс экспериментов экспериментальных и теоретических характеристик ШУ с газомангнитной опорой показал, что разработанная методика позволяет с достаточной для практики точностью определять выходные характеристики ШУ.

К числу главных характеристик ШУ относят динамические характеристики и точность вращения шпинделя [9].

На рис. 2 показана схема установки датчиков и используемая аппаратура при исследовании точности вращения шпинделя.

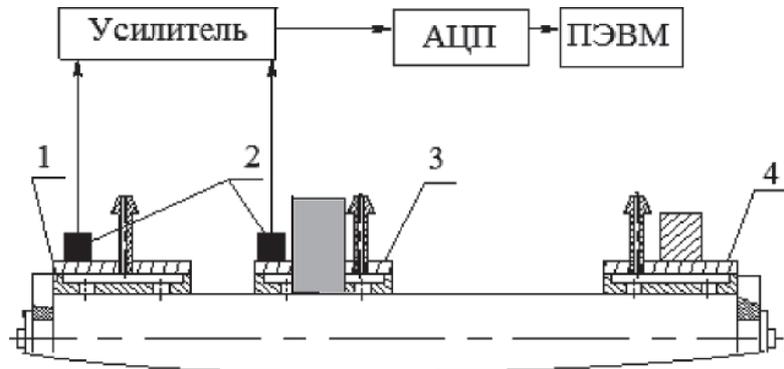


Рис. 2. Схема установки датчиков и аппаратуры для исследования точности вращения шпинделя:  
 1 – нагрузочный подшипник; 2 – пьезопреобразователи;  
 3 – передняя газомангнитная опора; 4 – задняя газостатическая опора

Результаты экспериментальной оценки точности вращения шпинделя с включенным и выключенным электромагнитом ГМО при частоте вращения 24500 мин<sup>-1</sup> представлены на рис. 3.

Видно, что при включенном электромагните уровень вибрации, измеренный, например, в точке 2, заметно ниже по сравнению с включенным магнитным подвесом (точка 1). Реконструированные траектории движения оси шпинделя с выключенным и включенным магнитным подвесом (в точках 1 и 2) изображены на рис. 2, б и в соответственно.

На рис. 3, а показан уровень колебаний корпуса ШУ в месте установки ГМО. Видно, что при включенном электромаг-

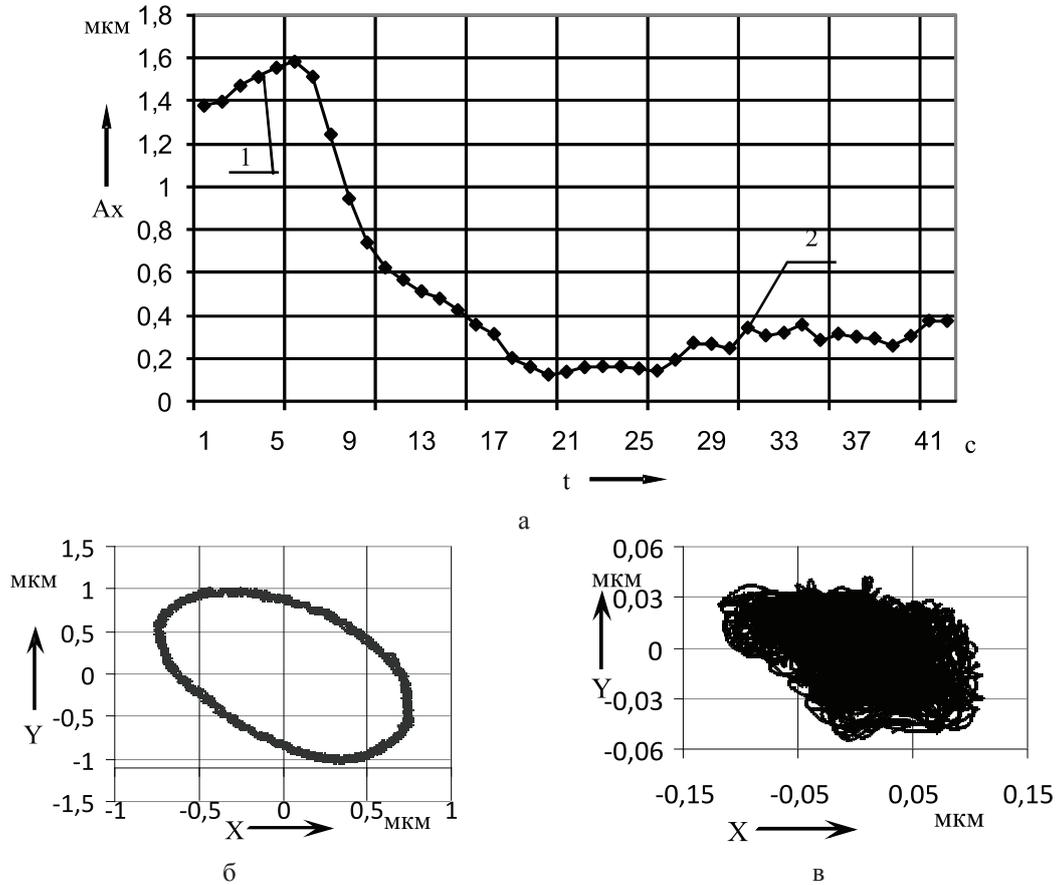


Рис. 3. Уровень вибрации корпуса шпинделя (а), траектории движения оси шпинделя с выключенным (б) и включенным электромагнитом (в)

Реконструированные траектории показывают, что при вращении шпинделя с включенным магнитным подвесом амплитуда кривой подвижного равновесия заметно уменьшается. Это позволяет повысить точность вращения по сравнению с установкой шпинделя на газостатические опоры.

Следует отметить, что увеличение магнитной составляющей несущей способности опоры, а также нагрузки на консоли шпинделя, снижают эллипсность траектории оси шпинделя, что позволяет добиться более точной степени обработки изделий. Результаты испытаний шпинделя с передней газомангнитной опорой точность обработки показали, что отклонение от круглости составляет не более 0,2 мкм (5, 6 квалитеты точности) при шероховатости  $Ra$  не более 0,03 мкм.

В заключении отметим, что в перспективе одним из ресурсов дальнейшего совершенствования эксплуатационных характеристик ШУ является активное внешнее регулирование самоорганизующегося динамического звена газомангнитной опоры.

#### Список литературы

1. Космынин А.В. Влияние размера магнитопровода на характеристики шпиндельного узла с газомангнитной опорой / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, А.С. Хвостиков, А.В. Смирнов, С.С. Блинков // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 12–1. – С. 129–132.
2. Космынин А.В. Стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла на газомангнитных опорах / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, Н.А. Иванова, А.С. Хвостиков, С.С. Блинков // *СТИН*. – 2010. – №5. – С. 8–10.
3. Космынин А.В., Шаломов В.И. Аэростатические шпиндельные опоры с частично пористой стенкой вкладыша // *Современные проблемы науки и образования*. – 2006. – № 2. – С. 69–70.
4. Космынин А.В., Щетинин В.С., Виноградов С.В. Комбинированная опора шпиндельного узла // *Фундаментальные исследования*. – 2007. – №12–1 – С. 83–84.
5. Космынин А.В., Щетинин В.С. Влияние магнитной силы в газомангнитных подшипниках на эксплуатационные показатели высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования // *Вестник машиностроения*. – 2010. – №5. – С. 24–25.
6. Космынин А.В., Щетинин В.С., Иванова Н.А. Шпиндельные узлы на газомангнитных опорах // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – №10. – С. 76.
7. Космынин А.В., Щетинин В.С. Расчет несущей способности газомангнитных опор высокоскоростных шпиндельных узлов // *СТИН*. – 2010. – №9. – С. 6–8.
8. Космынин А.В., Щетинин В.С. Эксплуатационные показатели высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования с газомангнитными опорами // *Успехи современного естествознания*. – 2009. – №11. – С. 69–70.
9. Хомяков В.С., Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов // *СТИН*. – 2009. – № 3. – С. 5–9.
10. Щетинин В.С., Космынин А.В. Математическая модель расчета несущей способности высокоскоростного шпиндельного узла на газомангнитной опоре // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2010. – № 8. – С. 31–35.