

**Космынин А. В., Щетинин В. С., Марьин С. Б.**  
**A. V. Kosmynin, V. S. Shchetinin, S. B. Maryin**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА  
НА ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОРАХ ПУТЁМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МАГНИТНОЙ СИЛОЙ**

**IMPROVEMENT OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF THE SPINDLE ASSEMBLY  
ON GAS-MAGNETIC SUPPORTS BY ADAPTIVE CONTROL OF THE MAGNETIC FORCE**

**Космынин Александр Витальевич** – доктор технических наук, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

**Alexander V. Kosmynin** – Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Scientific Work, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: as@knastu.ru.

**Sergey B. Maryin** – Doctor of Technical Sciences, Head of Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: as@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние магнитной силы на выходные характеристики высокоскоростного шпиндельного узла металлорежущего станка с передней газомангнитной опорой и задней газостатической. Проанализированы зависимости нагрузки и жёсткости, измеренные на режущем инструменте шпиндельного узла, от изменения магнитной силы в опоре и влияние управления тяговым усилием электромагнита на точность вращения шпинделя и его основные характеристики.

**Summary.** The paper considers the influence of magnetic force on the output characteristics of a high-speed spindle assembly of a metal-cutting machine tool with a front gas-magnetic support and a rear gas-static support. The dependences of load and stiffness measured on the cutting tool of the spindle assembly depending on the change of magnetic force in the support and the influence of electromagnet thrust force control on the spindle rotation accuracy and its main characteristics are analyzed.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, управление, газомангнитная опора шпинделя, несущая способность, жёсткость шпиндельного узла.

**Key words:** spindle assembly, control, gas magnetic spindle support, bearing capacity, rigidity of the spindle assembly.

УДК 62-229.331:621.924

Повышение точности изготовления деталей является важнейшей задачей станкостроения. К современным высокоточным станкам, например расточной и шлифовальных групп, предъявляют требования по точности формы рабочих поверхностей до десятых долей микрометра и чистоте поверхности  $R_a \leq 0,08$  мкм. Достичь таких параметров обработки возможно за счёт малых усилий

резания и высоких скоростей обработки, а также жёсткости системы станок – приспособление – инструмент – заготовка (СПИЗ). Одним из главных узлов в цепи СПИЗ является шпиндельный узел (ШУ) металлообрабатывающего станка, обеспечивающий до 85 % точности, которая, в свою очередь, достигается за счёт точности вращения шпинделя в подшипниковом узле.

В современных конструкциях высокоскоростных ШУ применяют подшипники качения, гидростатические, гидродинамические, газостатические, магнитные и газоманнитные опоры.

В работах [1; 5] выполнен достаточно подробный анализ применения тех или иных типов опор в высокоскоростных шпиндельных узлах в зависимости от технологии и условий обработки. В данных работах показано, что применение комбинированных газоманнитных опор (ГМО) в шпиндельных узлах оправдано для финишной обработки отверстий малых диаметров до 30...40 мм с точностью до 1,0...0,4 мкм.

На рис. 1 представлены нагрузочные и жёсткостные характеристики на режущем инструменте шпиндельного узла с передней газоманнитной опорой и задней газостатической, полученные теоретическим и экспериментальным способом. Методики расчёта характеристик и проведения серии физических наблюдений подробно изложены в работах [2; 3].

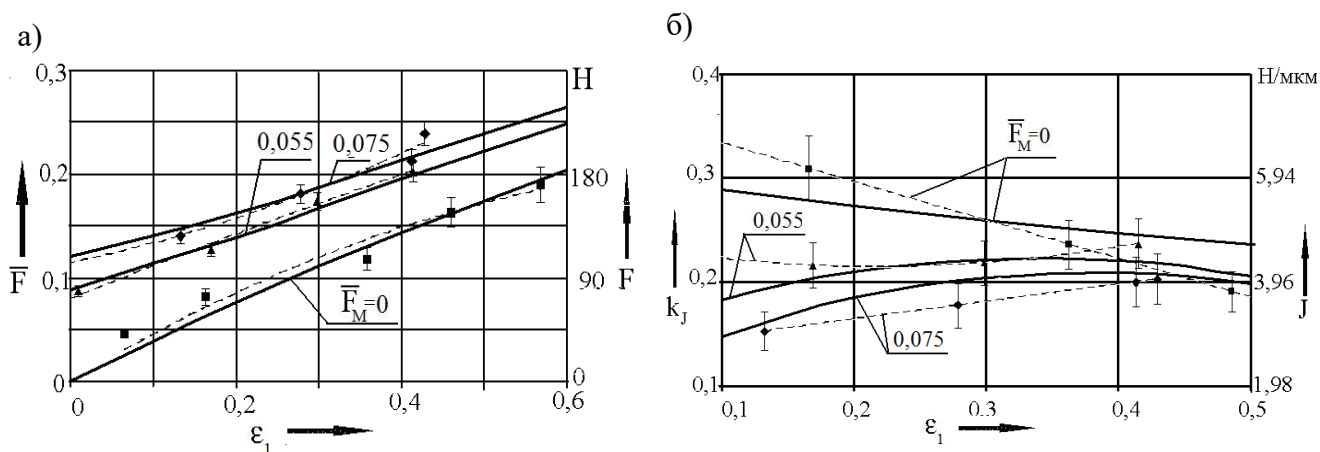


Рис. 1. Зависимость нагрузки  $F$  (относительной нагрузки  $\bar{F}$ ) (а) и жёсткости  $J$  (коэффициента жёсткости  $k_J$ ) (б) от удельной магнитной силы  $\bar{F}_M$  и относительного эксцентриситета передней опоры  $\varepsilon_1$ : — — — теория; — — — эксперимент

Анализ выходных характеристик ШУ показывает, что при работе передней опоры с включённым электромагнитом ( $\bar{F}_M = 0,055$  и  $0,075$ ) нагрузка на режущем инструменте значительно выше, чем при отключённом электромагните. При этом жёсткость на режущем инструменте при  $\bar{F}_M \neq 0$  заметно снижается. Это позволяет сделать вывод, что такой режим работы передней газоманнитной опоры может быть использован на черновых и предварительных операциях обработки заготовки, когда требуются повышенные силы резания и менее значима точность обработки.

Из зависимостей, представленных на рис. 1, б, также следует, что повысить жёсткость ШУ с передней газоманнитной опорой можно путём управления режимом её работы. Система управления радиальной газоманнитной опорой должна работать по принципу замкнутой системы, т. е. когда расстояние от внутренней поверхности вкладыша опоры до вала непрерывно регистрируется сигналами датчиков, потом сформированный сигнал подаётся на регулятор, который формирует управляющий ток в катушках электромагнитов.

Принцип, положенный в основу системы управления, является отдельным, т. к. радиальная ГМО имеет три отдельных электромагнита, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу [4], общим является блок задания эксцентриситета (см. рис. 2).

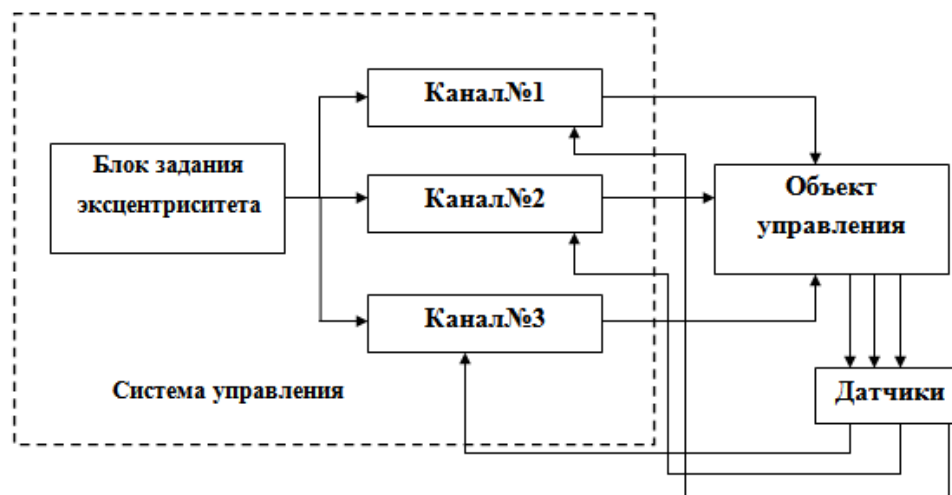


Рис. 2. Структурная схема системы управления радиальной газомангнитной опорой

На рис. 3 представлены зависимости нагрузки  $F$  и жёсткости  $J$  газомангнитной опоры шпиндельного узла, полученные с использованием управления режимом работы электромагнитов, обеспечивающих поддержание заданных эксцентриситетов  $\varepsilon_1$ . В экспериментах частота вращения вала составляла  $21\,000\text{ мин}^{-1}$ .

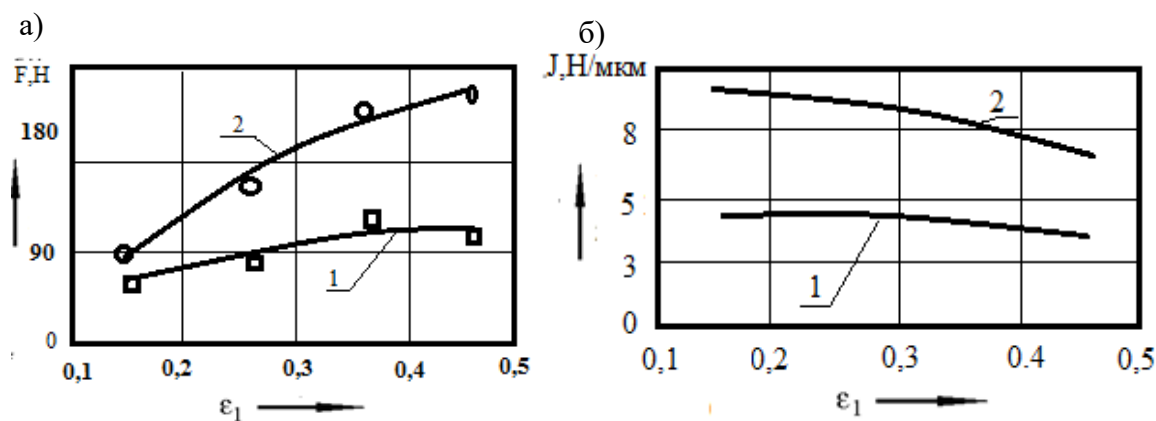


Рис. 3. Зависимость нагрузки  $F$  (а) и жёсткости  $J$  (б) от относительного эксцентриситета: 1 – при отключённом электромагните; 2 – при включённом электромагните в режиме автоматического управления

Из представленных зависимостей видно, что управление тяговым усилием в электромагнитах ГМО ведёт не только к увеличению нагрузки, но и способно заметно повысить жёсткость. Значение жёсткости во многом зависит от чувствительности и быстродействия системы управления.

Наличие системы управления тяговым усилием ГМО также благоприятно сказывается на точности вращения вала. По сигналам с датчиков обратной связи реконструирована траектория движения оси шпинделя без активного управления и с активным управлением магнитными силами, представленная на рис. 4. Эксперименты выполнены при частоте вращения вала  $25\,000\text{ мин}^{-1}$  и относительном эксцентриситете передней опоры 0,45.

Реконструированные траектории показывают, что при вращении шпинделя с включённым магнитным подвесом с активным управлением уменьшается амплитуда размаха эллипса оси шпинделя до 55 %. Это позволяет примерно на 45 % повысить точность вращения шпинделя и, соответственно, повысить точность обработки детали на финишных операциях.

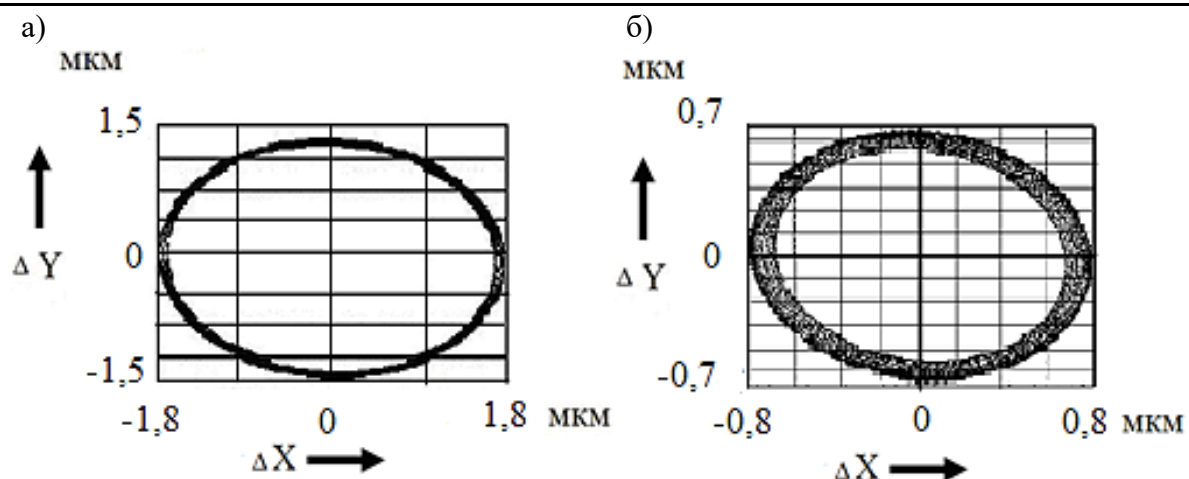


Рис. 4. Экспериментальный годограф оси вала в опоре: а – ГМО без активного управления, б – ГМО с активным управлением

Совокупный анализ комплекса выполненных исследований позволяет сделать вывод, что установка шпинделя на газомангнитную опору (передний подшипник ШУ) и газостатическую опору (задний подшипник ШУ) позволяет заметно увеличить нагрузку на режущий инструмент, но при этом на нём заметно снижается жёсткость. Эксплуатация ШУ при таком режиме работы опор целесообразна на черновых и предварительных операциях обработки заготовки. Наличие системы управления тяговым усилием электромагнитов ГМО является мощным средством повышения не только жёсткости на режущем инструменте ШУ, но и точности вращения шпинделя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 372 с.
2. Космынин, А. В. Расчёт несущей способности газомангнитных опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, В. С. Щетинин // СТИН. – 2010. – № 9. – С. 6-8.
3. Стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла на газомангнитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова [и др.] // СТИН. – 2010. – № 5. – С. 8-11.
4. Управление работой газомангнитной опоры / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Ульянов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – 128 с.
5. Щетинин, В. С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомангнитных опорах металлорежущих станков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Щетинин Владимир Сергеевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2011. – 160 с.
6. Эволюция отечественных исследований математического моделирования процессов подачи жидкого металла в кристаллизатор и его перемешивание / Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко, В. И. Одинокоев, А. И. Евстигнеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 59-67.