

УДК 621.01: 62-883

В. Е. Брешев, канд. техн. наук, доцент
ГОУВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,
Луганская Народная Республика
Тел.: +38 072 159 66 16, E-mail: veb_lug@mail.ru

РАЗРАБОТКА ШПИНДЕЛЕЙ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ КОНИЧЕСКИХ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В статье представлен алгоритм разработки новых конструкций шпинделей на конических регулируемых аэростатических опорах для механической обработки. Такие шпиндели имеют регулируемые характеристики, высокие частоты вращения, достаточные жёсткость и точность позиционирования инструмента для реализации высокоскоростной механообработки. Рассмотрены последовательность и содержание разработки шпинделей: определение структуры, компоновочной и расчётной схем; прикладной или первичный расчёт параметров; разработка конструкции шпинделей на основе количественных и функциональных изменений структурных прототипов; аналитические расчёты характеристик, компьютерный инженерный анализ; итерационное совершенствование разработанных конструкций; лабораторные исследования экспериментальных образцов шпинделей на конических аэростатических опорах.

Ключевые слова: шпиндель, коническая аэростатическая опора, интегральные характеристики.

V. E. Breshev

DEVELOPMENT OF SPINDLES ON ADJUSTABLE TAPERED AEROSTATIC SUPPORTS FOR TECHNOLOGICAL MACHINES

The article presents an algorithm for the development of new designs of spindles on conical adjustable aerostatic supports for machining. Such spindles have adjustable characteristics, high rotational speeds, sufficient rigidity and positioning accuracy of the tool to implement high-speed machining. The sequence and content of the development of spindles are considered: determination of the structure, layout and design schemes; approximate or primary calculation of parameters; development of spindle design based on quantitative and functional changes in structural prototypes; analytical calculations of characteristics, computer engineering analysis; iterative improvement of the developed designs; laboratory studies of experimental samples of spindles on conical aerostatic supports.

Keywords: spindle, conical aerostatic support, integral characteristics.

1. Введение

В значительной степени (на 80...90 %) скоростные характеристики, жёсткость и точность позиционирования, несущая способность и надёжность шпинделей для механообработки определяются техническим уровнем и характеристиками их опор [1]. Применение аэростатических опор позволяет в шпинделях технологических машин полностью исключить твердотельный контакт между неподвижными и движущимися узлами и деталями, разделив их зазором с воздушной смазкой и, таким образом, сделать их в этом смысле бесконтактными. Роторы таких шпинделей удерживаются и вращаются под действием сил и моментов сил, которые имеют газодинамическую или электромагнитную природу происхождения, а их действие в опорах и двигательных устройствах не требует механического контакта между взаимодействующими элементами конструкции.

Отсутствие твердотельного механического контакта при вращении создаёт несколько существенных технико-технологических преимуществ, которые и определяют эффективность применения бесконтактных шпинделей на опорах с газовой смазкой.

Перечислим основные из них. Во-первых, исключается сухое трение, трение ка-

чения и механические удары, что позволяет развивать максимальные высокие скорости и частоты вращения при минимальных потерях энергии. Аэростатические опоры в 7...15 раз имеют меньшие потери на трение в сравнении с опорами качения и практически не нагреваются (поток газовой смазки осуществляет теплоотвод), а потому не испытывают температурных деформаций и сохраняют прецизионную точность положения рабочих органов с инструментом. Во-вторых, газовая смазка позволяет опорам функционировать в наиболее широком диапазоне температур – от криогенных до +500°C и выше, сохраняя химическую инертность и необходимые физические свойства. В-третьих, отсутствие износа рабочих поверхностей, разделённых при функционировании слоем газовой (воздушной) смазки, обеспечивает практически неограниченный технический ресурс аэростатические опоры. В шпинделях станков резки монокристаллов прецизионные высокоскоростные шарикоподшипники имеют технический ресурс на уровне 7...10 тыс. часов работы, а аэростатические опоры не имеет ограниченный по сроку или наработке [1-4]. В-четвёртых, отсутствие люфтов и механического гистерезиса обеспечивает жёсткость и высокую точность позиционирования опор и роторов с чувствительностью в микрометрических диапазонах.

Таким образом, эффективность применения шпинделей на аэростатических опорах для высокоскоростной механической обработки (скорости резания от 25 до 200 м/с) обеспечивается достижением частот вращения от 50 до 150 тыс. об/мин и жёсткости валов с инструментом до 1000 Н/мкм и более, точностью их позиционирования на уровне 0,2...2 мкм, высокой надёжностью.

Применение в шпинделях аэростатических опор с несущими поверхностями конической формы позволяет получить ещё два принципиальных технических преимущества. Первое – создание опорной системы шпинделя только на двух подшипниках вместо четырёх, как в традиционных конструкциях. Второе – возможность регулирования в широких диапазонах характеристик шпинделя (жёсткости, несущей способности, собственных частот колебаний) через изменение величины среднего зазора с газовой (воздушной) смазкой смещением несущих поверхностей в опорах при эксплуатации. Последнее позволяет сделать шпиндели регулируемыми и настраивать их под требования целевого технологического процесса высокоскоростной механической обработки металлов и монокристаллов. Однако, коническая форма опор затрудняет процесс конструирования и расчёта их характеристик ввиду повышения сложности, многофакторности и многомерности процесса течения воздушной смазки в зазоре [2, 5, 6]. Кроме того, при разработке шпинделей на аэростатических опорах необходимо учитывать их относительно невысокую несущую способность и слабую устойчивость к возникновению различного рода колебательных процессов на переходных режимах при функционировании [2, 4, 5, 6].

2. Постановка задачи

Разработка шпинделей для механической и, особенно, высокоскоростной механической обработки ориентирована на достижение необходимого уровня их выходных параметров и интегральных характеристик – жёсткости, несущей способности, диапазона реализуемых частот вращения, точности позиционирования рабочего органа с инструментом. Кроме того, необходимо учитывать: энергопотребление, расход технологического воздуха, собственные частоты колебаний рабочего органа с инструментом, массовые и габаритные параметры, прогнозируемый технический ресурс оборудования.

Принципиальное значение и наибольшую сложность при разработке технологических машин имеет достижение требуемой регулируемости выходных параметров шпинделей в процессе эксплуатации, что позволит их точно настраивать под требова-

ния целевого техпроцесса высокоскоростной механической обработки. Однако, в настоящее время разработчики и производители оборудования на аэростатических опорах сложных конструкций (конических, сферических, комбинированных), ввиду отсутствия надёжного алгоритма расчёта опор, практически используют единственный надёжный метод исследований процессов, параметров и характеристик – производственный или лабораторный эксперимент с приборным измерением. Таким образом, является актуальной задача создания эффективного алгоритма разработки (проектирования) шпинделей на конических аэростатических опорах, которая в себя включает:

- определение структуры шпинделя технологической машины, разработка его компоновочной и расчётной схем;
- упрощённый («прикидочный») расчёт геометрии опор по условиям внешней нагрузки, основных параметров эксплуатации и диапазонов регулирования;
- конструирование опор и опорных систем с требуемыми выходными параметрами и характеристиками на основе количественных и функциональных изменений в выбранных структурных прототипах;
- аналитический расчёт интегральных характеристик и их регулируемости;
- компьютерный инженерный анализ (вычислительный эксперимент), выполняемый в САПР на основе 3D-модели, который наиболее гибок и точен, способен дублировать или заменить как аналитический расчёт, так и натуральный эксперимент;
- экспериментальные исследования образцов разрабатываемых шпинделей с измерением параметров и характеристик, их сравнительный анализ с результатами теоретических исследований;
- итерационное совершенствование конструкций шпинделей на регулируемых аэростатических опорах с последующим исследованием параметров и интегральных характеристик различными методами для анализа эффективности модернизаций.

Целью работы является определение подходов, последовательности исследований, применяемых методов анализа и синтеза при разработке шпинделей на регулируемых конических аэростатических опорах для технологических машин, выполняющих высокоскоростную механическую обработку.

3. Последовательность и содержание процесса разработки шпинделей на конических аэростатических опорах

Создание шпинделей с регулируемыми характеристиками, которые по сути определяются регулируемостью их конических аэростатических опор, потребовала разработки методов аналитического расчёта и вычислительного компьютерного эксперимента, определения новых подходов к исследованию и обеспечению статической и динамической устойчивости, проведению натуральных экспериментов и т.д.

Был определён алгоритм теоретических исследований и проектных процедур для разработки шпинделей на конических регулируемых аэростатических опорах. Новые конструкции шпинделей предназначены для высокоскоростной механической обработки металлов и монокристаллов, отличаются от существующих в следующем:

- регулируемостью в широком диапазоне наиболее важных выходных параметров и характеристик – предельной частоты вращения, жёсткости, несущей способности, точности позиционирования; собственных частот колебаний, расхода технологического воздуха, что позволяет в процессе эксплуатации точно настраивать оборудование под оптимальные параметры и требования реализуемого технологического процесса высокоскоростной механической обработки;
- сложностью конструкции аэростатических опор с коническими несущими поверхностями различных углов наклона и регулируемой величиной среднего зазора с

воздушной смазкой между ними, наличием устройства для такого регулирования, внутренних или внешних лабиринтных сопротивлений протеканию смазки и т.д.

Примерами разрабатываемых шпинделей являются одноопорный шпиндель станка резки монокристаллов (рис. 1а) и высокоскоростной пневмошпиндель (рис. 1б) на регулируемых конических аэростатических опорах различной геометрии.

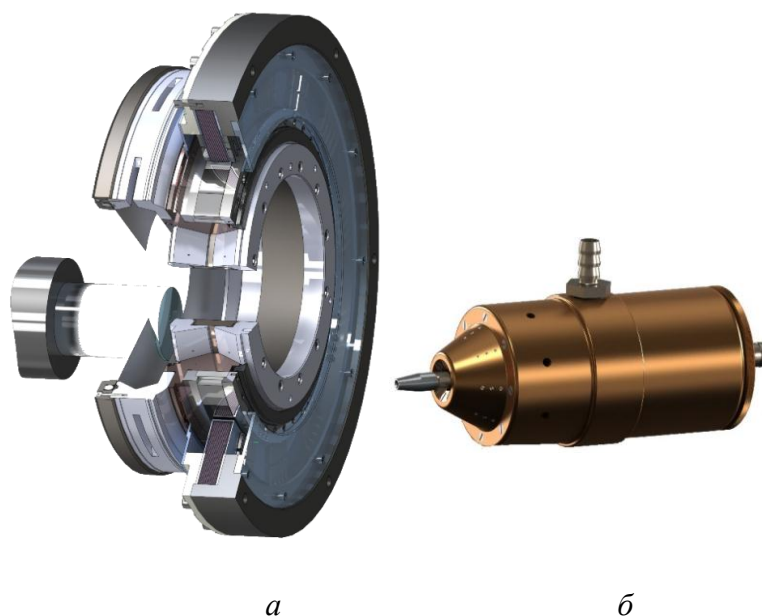


Рисунок 1. Твёрдые модели высокоскоростного одноопорного шпинделя для резки монокристаллов (а) и двухопорного высокоскоростного пневмошпинделя (б) на регулируемых конических аэростатических опорах.

Как известно, основные параметры и характеристики разрабатываемого шпинделя технологической машины первоначально закладываются в техническом задании (ТЗ). Для получения у созданного шпинделя параметров и характеристик, соответствующих ТЗ, выделим основные направления в общем алгоритме его разработки и научных исследований, сочетающем в себе операции анализа и синтеза:

1) Определение структуры шпинделя, разработка его компоновочной и расчётной схем. Алгоритм структурного синтеза и главные принципы компоновки и конструирования бесконтактных приводов изложены в [4, 5, 6]. Основными структурными вариантами для бесконтактных шпинделей предложено использовать одноопорные или многоопорные системы на конических регулируемых аэростатических опорах. Расчётные схемы и варианты конструкций приведены в монографии [5] (одноопорных приводов на рис. 1.15., 2.1., 2.13., 2.14., 2.15., 2.16., а многоопорных приводов – на рис. 1.17., 2.4., 2.5., 2.7., 3.8., 3.12., 3.21.). В [5, 6] было также показано, что одноопорная система имеет массогабаритные, стоимостные и энергетические преимущества. Однако, её применение, в сравнении с многоопорной системой, ограничено по условиям приложения технологических нагрузок, возможностями подвода заготовки к инструменту, а также требованием отсутствия значимого по величине изгибающего момента на роторе.

2) Расчёт привода на статическую устойчивость или устойчивость под действием постоянных по величине технологических нагрузок различных направлений. По заданным в ТЗ средней и максимальной технологическим нагрузкам ориентировочно определяются (в условиях статической неопределимости механической системы) сред-

ние и максимальные нагрузки на опоры шпинделя (равные и противоположно направленные силам реакции опор). Затем известные силы реакций каждой из аэростатических опор позволяют, на основе расчётной схемы, составить и решить систему уравнений статического равновесия относительно средней и максимальной технологической нагрузок на шпинделе, которые должны соответствовать заданным в ТЗ величинам.

На рис. 2. показаны расчётная схема и конструкция высокоскоростного пневмошпинделя (см. рис. 1б) на регулируемых конических аэростатических опорах различной геометрии.

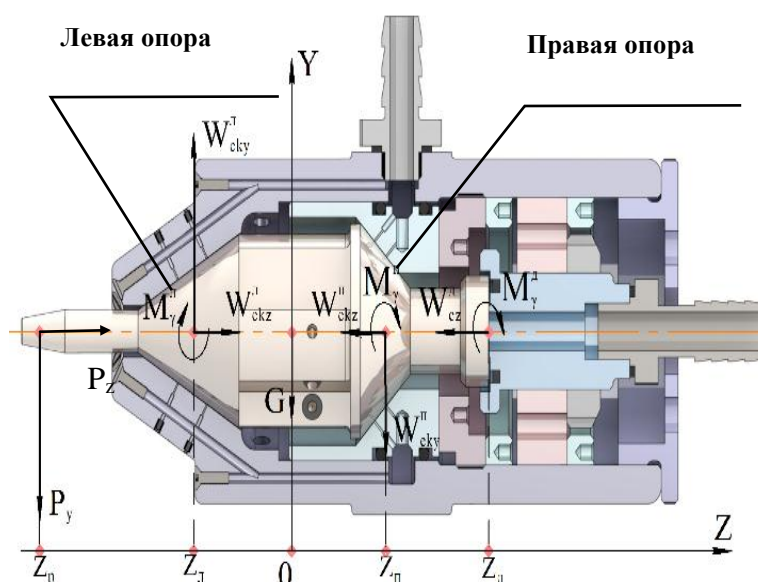


Рисунок 2. Пневмошпиндель в разрезе с действующими на ротор силами и моментами сил.

Ротор шпинделя при функционировании испытывает действие технологических нагрузок (с наибольшей составляющей P_y), силу тяжести G , силы реакций в опорах (радиальные W_{eky}^I , W_{eky}^{II} , и осевые W_{ekz}^I , W_{ekz}^{II} , W_{ekz}^n), реактивные моменты M_γ^I , M_γ^{II} , M_γ^n конических аэростатических опор и дополнительного подпятника.

Учитывая, что проектируются именно регулируемые конические опорные системы, конструктор должен рассчитать параметры и характеристики опор во всём диапазоне регулирования. Последний должен быть шире предполагаемых диапазонов параметров, требуемых для качественной реализации техпроцессов. При механической обработке металлов и монокристаллов это, прежде всего, жёсткость инструмента, частота вращения ротора (она определяет скорость резания), максимальные и номинальные силы резания (с учётом частоты вращения они определяют величину полезной мощности шпинделя). Как правило, при проектировании стремятся не только достичь требуемых диапазонов по параметрам, но обеспечить по ним некоторый запас и максимально точную регулируемость при эксплуатации.

3) Разработка конструкции шпинделей на основе количественных и функциональных изменений выбранных структурных прототипов, первичный расчёт параметров (геометрических, силовых, технологических) и характеристик для структурных элементов шпинделя (вал, аэростатические опоры, движитель, корпус). «Прикидочный» (первичный) расчёт конической опорной системы [5] позволяет достаточно быст-

ро по известным нагрузкам (силам реакции) определить геометрические параметры конических аэростатических опор и приступить к их подробному конструированию. Уточнение конструкций опор и шпинделя требует повторных расчётов и проверки новой конструкции на соответствие по несущей способности каждой из опор и всего шпинделя.

4) Окончательное определение интегральных характеристик конических аэростатических опор аналитическим методом и дублирующим (уточняющим) расчётом на основе метода конечных элементов. В [5, 6] был разработан метод декомпозиции для аналитического определения интегральных характеристик конических опор, показана разработка расчётной схемы и методика исследования характеристик многоопорной аэростатической системы аналитическим методом. Также разработана методика вычислительного компьютерного эксперимента [5, 6] по численному определению параметров и интегральных характеристик аэростатических опор и опорных систем методом конечных элементов средствами САПР. На рис. 3. показаны результаты компьютерного вычислительного эксперимента. Он демонстрирует, как изменяется картина распределения давления воздушной смазки в конических опорах пневмошпинделя под нагрузкой и при её отсутствии. Средний зазор в правой опоре 25 мкм, левой – 35 мкм; давление подачи воздушной смазки $5,5 \cdot 10^5$ Па [5, 6]; эксцентриситет, вызванный нагрузкой – 20 мкм.

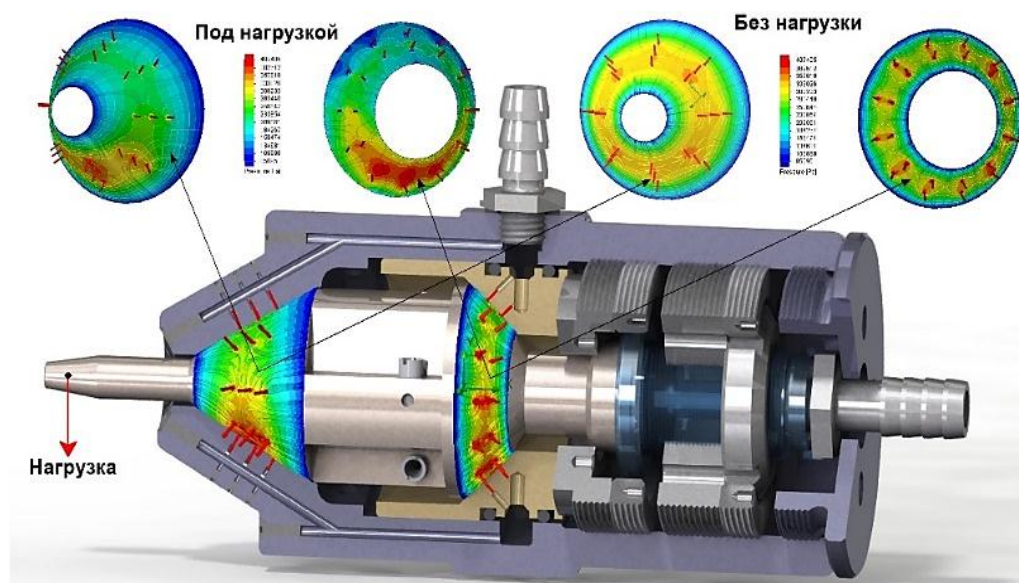


Рисунок 3. Распределения давления воздушной смазки в опорах пневмошпинделя под внешней нагрузкой и без неё.

Разработанная методика вычислительного эксперимента обеспечивает:

- уровень достоверности количественной информации не менее 88 % (погрешность в сравнении с результатами, полученными другими методами не превышает 12 %);
- уровень чувствительности по давлению подачи воздушной смазки не ниже 0,05 атм.;
- уровень чувствительности по изменяемому эксцентриситету e в опорах не ниже 2 мкм;
- повторяемость в серии одинаковых вычислительных экспериментов по величине определяемой интегральной характеристики не менее 98 %.

5) Исследование динамической устойчивости бесконтактного шпинделя. Они выполняются с помощью предложенного критериального подхода к обеспечению его динамической устойчивости, а также полученных уравнений малых колебаний ротора. Для этого нами были получены критерии устойчивости движения при радиальных, осевых и угловых колебаниях ротора одноопорного шпинделя (см. рис. 1., а) [5, 6]:

$$1 \geq \left| \frac{F_{x,y}^0 \sqrt{m}}{b_{x,y} A_0 \sqrt{K_{x,y}^\varepsilon}} \right| ; 1 \geq \left| \frac{F_{x,y}^0 \sqrt{m}}{b_{x,y} A_0 \sqrt{K_{x,y}^\varepsilon + K_{x,y}^{ec}}} \right| ; 1 \geq \left| \frac{F_z^0 \sqrt{m}}{b_z A_0 \sqrt{K_t^\varepsilon}} \right| ; 1 \geq \left| \frac{M_y^0 \sqrt{J_C}}{b_z R_{\text{оп}} \gamma_0 \sqrt{2K_t^\varepsilon R_{\text{оп}}^2}} \right| .$$

Аналогичные критерии для двухопорного пневмошпинделя имеют вид (см. рис. 1б, рис. 2 и рис. 3.):

$$1 \geq \left| \frac{F_y^0 \sqrt{m}}{b_{x,y} B_0 \sqrt{K_{\text{п}}^\varepsilon + K_{\text{л}}^\varepsilon + K_{\text{дв}}^\varepsilon}} \right| ; 1 \geq \left| \frac{F_z^0 \sqrt{m}}{b_z A_0 \sqrt{K_{\text{зл}}^\varepsilon + K_{\text{зп}}^\varepsilon}} \right| ; 1 \geq \left| \frac{M_c^0 \sqrt{J_C}}{b_{x,y} l \gamma_0 \sqrt{K_{\text{п}}^\gamma + K_{\text{л}}^\gamma + 2l^2 K_{\text{л,п}}^\varepsilon}} \right| .$$

Здесь: m – масса и J_C – момент инерции ротора; $F_y^0, F_{xy}^0, F_z^0, M_y^0, M_c^0$ – амплитудные значения внешней силы и внешнего момента относительно центра масс; $K_{x,y}^\varepsilon, K_t^\varepsilon$ – жёсткости опоры в радиальном и осевом направлениях; $K_{x,y}^\varepsilon + K_{x,y}^{ec}$ – суммарная радиальная жёсткость при комбинированном способе достижения устойчивости; $K_{\text{п}}^\varepsilon, K_{\text{л}}^\varepsilon, K_{\text{дв}}^\varepsilon$ – радиальные жёсткости соответственно правой (П), левой (Л) опор ротора и ДУ, создающего главный вектор движущих сил $F_{\text{дв}}$; $K_{\text{п}}^\gamma, K_{\text{л}}^\gamma$ – собственные угловые жёсткости правой и левой опор; $b_z, b_{x,y}$ – коэффициенты сопротивления внешней среды; $R_{\text{оп}}, l$ – расстояние от центра масс ротора до центра опорной поверхности и до одной из опор соответственно; A_0, γ_0 – значения линейной и угловой амплитуд при $t_0 = 0$. Выполнение данных критериев обеспечивает асимптотическую устойчивость вращающихся роторов шпинделей в различных динамических подсистемах (по разновидности возникающих колебаний) даже при возникновении резонанса, что позволяет проходить шпинделям критические области колебаний на переходных режимах [5, 6]. Выполняется исследование собственных и критических частот колебаний с помощью вычислительных компьютерных экспериментов в среде САПР.

6) Применение конструктивных усовершенствований и выбор рациональных параметров шпинделей для повышения их надёжности, улучшения функциональности и технико-экономических характеристик. В [5] выполнена модернизация одноопорной системы шпинделя, позволяющая увеличить его жёсткость при снижении массы и расхода технологического воздуха. Для двухопорного пневмошпинделя предложено использовать конические опоры различной конструкции и размеров – с разными соотношениями осевых и радиальных грузоподъёмностей, показаны способы регулирования величин средних зазоров опор и усиления правой опоры посредством раззенковки питателей и внутреннего лабиринтного сопротивления на правой опоре, что приводит к повышению жёсткости и несущей способности обеих опор и всего пневмошпинделя [5, 6].

На рис. 4. показаны траектории движения центра конуса левой конической аэростатической опоры пневмошпинделя (см. рис. 2. и рис. 3.) при вынужденных колебаниях после (а) и до (б) усиления его правой опоры [4].

Функциональные зависимости получены в ходе компьютерных вычислительных экспериментов в среде САПР.

7) Выбор типа и конструктивная проработка движителя с учётом компоновочной схемы бесконтактного шпинделя. При комбинированном способе обеспечения статической и динамической устойчивости движитель создаёт, наряду с вращающим моментом

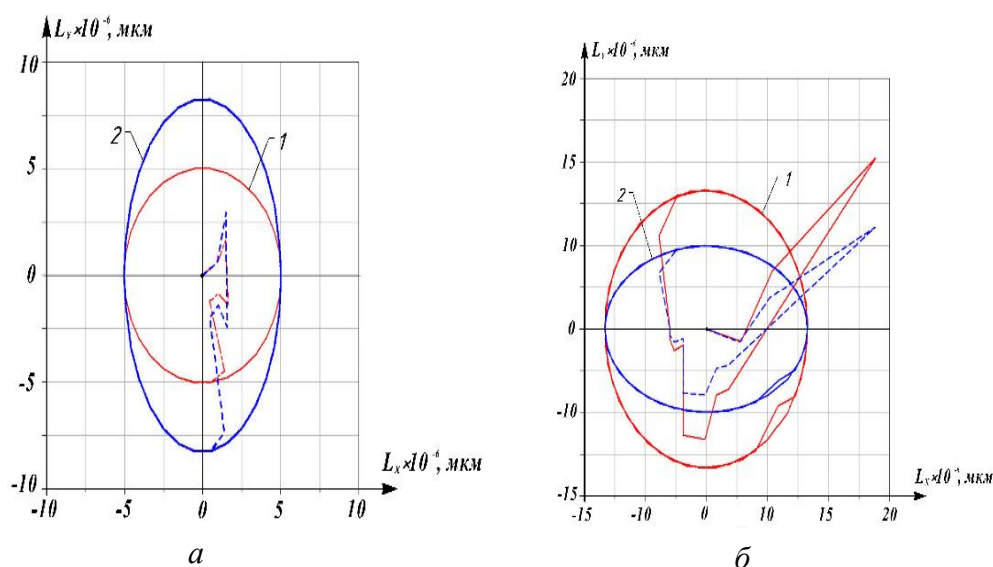


Рисунок 4. Траектории центра масс левой опоры после (а) и до (б) усиления правой опоры шпинделя: 1 – колебания левой опоры без нагрузки ($\varepsilon = 0$); 2 – колебания левой опоры под максимальной нагрузкой с относительным эксцентриситетом в опоре $\varepsilon = 0.8$.

том, и главный вектор движущих сил. Последний играет роль дополнительной опоры для ротора, а потому должен учитываться в расчётах на устойчивость опорной системы [6]. В общем случае для движителя обязательными являются обеспечение требуемой мощности и достижение заданных частот вращения. Дополнительные требования, как правило, связаны с потребляемой мощностью, динамикой разгона, регулируемостью, температурными режимами, показателями надёжности, виброактивностью.

8) Экспериментальные исследования. На рис. 4. показан в разобранном виде экспериментальный образец пневмошпинделя на конических аэростатических опорах.

Для выполнения экспериментальных исследований были разработаны лабораторная установка и методика исследований, которые имеют особенности, связанные с конструкцией, настройкой, измерением параметров и интегральных характеристик регулируемых конических аэростатических опор и всего бесконтактного шпинделя.

В натурных экспериментах шпиндели и их опоры проверялись на статическую и динамическую устойчивость при действии максимально допустимых внешних нагрузок, на достижение заданных жёсткости, несущей способности, скоростных режимов, уровней регулируемости и т.д.

Полученные результаты испытаний высокоскоростного двухопорного пневмошпинделя на подъёмную силу, несущую способность и жёсткость отличаются от теоретических, полученных при компьютерных вычислительных экспериментах, на 5 % – 12 %, а от результатов расчётов аналитическим методом на основе полученного аналитического решения основного уравнения газовой смазки – до 9 %.



Рисунок 5. Экспериментальный образец высокоскоростного пневмошпинделя.

4. Выводы

Предложены и исследованы подходы и последовательность разработки шпинделей на регулируемых конических аэроэстатических опорах, применяемые при этом методы анализа и синтеза. Они позволяют разрабатывать новые конструкции шпинделей с регулируемыми характеристиками для технологических машин, выполняющих высокоскоростную механическую обработку.

Эффективность полученных результатов исследований базируется на охвате ими основных проектных процедур, получении количественной и качественной информации перекрёстно тремя методами – аналитическим, компьютерным экспериментом и натурными измерительными экспериментами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Космынин, А. В. Шпиндели на газовых опорах – перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов / А. В. Космынин, М. Р. Петров // Современные проблемы науки и образования. – 2006. – №6. – С. 47-48.
2. Дроздович, В. Н. Газодинамические подшипники / В. Н. Дроздович. – Л.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
3. Рябичев, В. Д. Основы расчёта энергосберегающих опор с газовой смазкой для оборудования механической обработки / В. Д. Рябичев, В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – № 1(30). – С. 10-19.
4. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. – М.: Наука, 1982. – 265 с.
5. Брешев, В. Е. Приводы машин на регулируемых конических аэроэстатических опорах: Монография / В. Е. Брешев, А. В. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 204 с.
6. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: Монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 208 с.

Поступила в редколлегию 20.04.2021 г.