

На правах рукописи

ШАТОХИН

Станислав Николаевич

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ
ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ И АЭРОСТАТИЧЕСКИХ
ШПИНДЕЛЬНЫХ ОПОР И НАПРАВЛЯЮЩИХ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

- Научный консультант: Заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
ЕРЕСКО Сергей Павлович
- Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
КРАЕВ Михаил Васильевич
- доктор технических наук, профессор
БУШУЕВ Владимир Васильевич
- Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
ЕЛИСЕЕВ Сергей Викторович
- Ведущая организация: ОАО «Красноярский машиностроительный
завод», г. Красноярск

Защита состоится «20» февраля 2010 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета: ДМ 212.099.13 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 2-50.

Тел./факс: (391) 249-82-09 e-mail: DM21209913@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан « » января 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Э.А. Петровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Шпиндельные узлы и направляющие с бесконтактными опорами скольжения (гидростатическими, аэростатическими, электромагнитными) находят все большее применение в металлорежущих станках для прецизионной и высокоскоростной обработки, микро-обработки, а также в тяжелых и уникальных станках. Гидростатические опоры позволяют получить точность и чистоту обработки, нагрузочные характеристики, виброустойчивость и высокую стойкость сверхтвердых режущих инструментов, которые не могут обеспечить другие типы опор скольжения и качения. Аэростатические опоры не нуждаются в уплотнениях и замкнутой циркуляции, способны работать при скоростях скольжения до 100 м/с.

Основные перспективы дальнейшего развития исследований и опытно-конструкторских разработок в этой области науки и техники связаны с созданием и комплексным использованием в металлорежущих станках функциональных возможностей шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами, которые имеют регуляторы активного нагнетания смазки. Дальнейшее совершенствование технических решений, развитие теории, разработка методов оптимального проектирования шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами является актуальной научно-технической проблемой машиностроения, решение которой позволяет значительно повысить точность и производительность обработки на металлорежущих станках.

В диссертационной работе представлены результаты исследований, показавшие возможности и перспективы значительного повышения точности и производительности металлорежущих станков различного технологического назначения на основе использования в них шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами нового поколения, которые:

- имеют компактную и технологичную конструкцию с встроенными упругими, эластичными, плавающими или пьезоэлектрическими регуляторами активного нагнетания смазки;
- превосходят аналоги по точности, нагрузочной способности, энергетической эффективности, быстроходности, устойчивости и другим важным эксплуатационным характеристикам;
- обеспечивают значительный адаптивный нагрузочный диапазон с отрицательной податливостью, позволяющий компенсировать влияние упругих деформаций станка, инструмента и заготовки на точность обработки;
- позволяют синхронно получать динамометрическую информацию для диагностики режущего инструмента и адаптивного управления режимами обработки, осуществлять микроперемещения и микро-подачи, динамическое дробление стружки и др.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение точности и производительности металлорежущих станков на основе комплексного использования функциональных возможностей адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих со встроенными регуляторами активного нагнетания смазки для компенсации упругих деформаций, повышения виброустойчивости, диагностики сил резания, управления режимами обработки, дробления стружки и др.

В работе поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Развитие методологии теоретического исследования и расширения функциональных возможностей адаптивных гидростатических и аэростатических опор, основанной на создании адекватных математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов для численного анализа и параметрической оптимизации статических и динамических характеристик по единым показателям качества.

2. Разработка и защита эффективных технических решений для адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих, имеющих встроенные регуляторы активного нагнетания смазки.

3. Теоретическое исследование и оптимизация нагрузочных, энергетических и динамометрических характеристик разработанных адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих с экспериментальной проверкой теоретических результатов.

4. Разработка методов оптимального проектирования шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами, имеющими встроенные регуляторы активного нагнетания смазки.

5. Экспериментальная и опытно-промышленная оценка функциональных возможностей шпиндельных узлов и направляющих с разработанными адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами.

Методы и объекты исследования

При решении поставленных в работе задач использованы: фундаментальные положения гидродинамической теории смазки, теории упругости, теории автоматического управления, теории подобия; адекватные интегрально-дифференциальные математические модели; эффективные методы поисковой оптимизации и вычислительные алгоритмы; методы статистической обработки экспериментальных данных.

Объектами исследования являлись:

1. Расчетные схемы и математические модели адаптивных гидростатических и аэростатических опор, а также шпиндельных узлов и направляющих с такими опорами – при теоретическом исследовании.

2. Физические модели шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами – при экспериментальном исследовании;

3. Опытно-промышленные образцы шпиндельных узлов с гидростатическими и аэростатическими опорами – при производственных испытаниях.

Научная новизна и теоретическое значение

1. Создана методология теоретического исследования и параметрической оптимизации статических и динамических характеристик адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих, основанная на использовании фундаментальных положений и методов гидродинамической теории смазки, теории упругости, теории автоматического управления, теории подобия и поисковой оптимизации при разработке адекватных интегрально-дифференциальных математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов.

2. Показана необходимость и разработаны методы уточненного расчета:

- оптимальных параметров и расходных характеристик дросселирующих сопротивлений с простыми и кольцевыми диафрагмами, капиллярными и щелевыми каналами, используемых в проточном тракте гидростатических и аэростатических опор;

- упругой и расходной характеристики регуляторов активного нагнетания смазки в виде эластичных шайб с дросселирующей диафрагмой;

- податливости эластичных пластин и оболочек, используемых в регуляторах активного нагнетания смазки адаптивных гидростатических и аэростатических опор;

- потерь мощности и появления кавитации смазки в несущих карманах высокоскоростных гидростатических шпиндельных опорах;

- допустимой пульсации давления нагнетаемой смазки и параметров гасителя пульсации, позволяющего на порядок уменьшить биение шпинделя;

- допустимых периодических погрешностей формы рабочих поверхностей осевых и радиальных гидростатических опор, исходя из заданной точности вращения шпинделя.

3. Определены, защищенные охраноспособными документами, имеющими мировой приоритет, новые технические решения на способы, изобретения и полезные модели для адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих, имеющих встроенные регуляторы активного нагнетания смазки и динамометрические преобразователи, которые сочетают простоту и технологичность конструкции с высокими эксплуатационными показателями.

4. На основе разработанных интегрально-дифференциальных математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов:

- теоретически получены и экспериментально подтверждены результаты исследования и оптимизации статических и динамических характеристик адаптивных гидростатических и аэростатических опор, имеющих встроенные упругие, эластичные, плавающие, пьезоэлектрические регуляторы активного нагнетания смазки, а также динамометрические преобразователи;

- показано, что шпиндельные узлы и направляющие с исследованными адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами по нагрузочным, энергетическим, скоростным и динамометрическим характеристикам значительно превосходят аналоги;

- созданы методы проектирования шпиндельных узлов с разработанными адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами.

5. Экспериментально подтверждена возможность значительного повышения точности токарных, фрезерных и шлифовальных станков на основе комплексного использования функциональных возможностей адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор для компенсации упругих деформаций, синхронной диагностики сил резания, адаптивного управления режимами обработки, динамического дробления стружки и др.

Практическая ценность, реализация и внедрение результатов

1. По договорам с предприятиями и организациями созданы:

- руководящие технические материалы и подсистемы САПР для оптимального проектирования разработанных адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих;

- экспериментальные и опытно-промышленные шпиндельные узлы с разработанными адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами для новых и модернизируемых металлорежущих станков.

2. Результаты работы внедрены в учебно-научный процесс СФУ и использованы в лекционных курсах, лабораторных и практических занятиях, курсовых и дипломных проектах студентов, в диссертационных работах аспирантов.

Апробация и публикации:

1. Результаты работы, представлены и апробированы:

- на 7 международных научных конгрессах, съездах, конференциях;
- на 15 всесоюзных, российских и региональных научно-технических съездах, конференциях, семинарах, совещаниях;

- в 15 защищенных кандидатских диссертациях;

- в 20 отчетах по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам, которые выполнены по договорам с предприятиями и организациями под руководством и при непосредственном участии автора, приняты заказчиками и имеют государственную регистрацию.

2. По основным положениям диссертации опубликованы:

- 100 научных статей, в том числе 30 в изданиях из списка ВАК;
- 10 патентов РФ и 44 авторских свидетельства СССР на способы, изобретения и полезные модели, которые согласно п. 11 Положения о порядке присуждения ученых степеней приравниваются к изданиям из списка ВАК;
- 39 докладов и тезисов в материалах 22 научных конференций.

Личный вклад автора в опубликованных работах составил 54,8 п.л.

Под научной редакцией и при непосредственном участии автора по данной тематике изданы 4 коллективные монографии общим объемом 32 п.л.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка обозначений, списка библиографических источников.

Объем работы 390 страниц, в том числе 350 страниц основного текста, 125 рисунков, 14 таблиц; 372 библиографических источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, основные задачи, научная новизна, теоретическое и практическое значение диссертационной работы, а также её результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано современное состояние и перспективы применения бесконтактных гидростатических и аэростатических опор в шпиндельных узлах и направляющих металлорежущих станков. Показано, что применение таких опор является безальтернативным условием достижения особо высокой точности и производительности обработки в прецизионных и высокоскоростных станках, при микрообработке, а также в тяжелых и уникальных станках. Гидростатические опоры позволяют получить высокую точность, нагрузочную способность, виброустойчивость, чистоту обработки и стойкость сверхтвердых режущих инструментов, которые недостижимы для других опор. Аэростатические опоры не нуждаются в уплотнениях и замкнутой циркуляции, способны работать при скоростях скольжения до 100 м/с. Приведены многочисленные примеры исключительных возможностей отечественных и зарубежных металлообрабатывающих станков при использовании бесконтактных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих.

Основные отечественные разработки и исследования в этой области науки и техники выполнены: в НПО ЭНИМС (научные руководители В. П. Жедь, Г. А. Левит, Б. Г. Лурье, Ю. Н. Соколов, С. А. Шейнберг); МГТУ «СТАНКИН» (В. В. Бушуев, В. Э. Пуш, А. В. Пуш,); НИИМАШ (С. В. Пинегин, Ю. Б. Табачников); МГТУ им. Баумана (В. С. Баласаньян, Ю. В. Пешти, В. Н. Прокофьев, Д. Н. Решетов); ЛПИ (Н. Д. Заблоцкий, И. Е. Сипенков); КуАИ (А. И. Белоусов, Д. Е. Чегодаев); ПО «Техника» (В. Б. Шолохов); КнАГТУ (А. В. Космынин, А. М. Шпилев); ДвГТУ (А. И. Самсонов); СФУ (Красноярск); а также на предприятиях «Красный пролетарий» и «Станколиния» (Москва), «Комунарас» (Вильнюс), КЗТС (Коломна), ЛСПО (Ленинград), НЗТС (Новосибирск), в других НИИ, вузах, заводах и конструкторских бюро.

Основные зарубежные разработки и исследования выполнены в США (фирмы *Babcock and Wilcox Co.*, *The Heald Machine Co.*, *Mechanical Tehnology Inc.*, НИИ им. Франклина), Великобритании (фирма *MTIRA*, Кембриджский университет), Германии (Высшая техническая школа г. Аахен, Технический университет г. Лейпциг), Румынии (Институт прикладной механики), Польше (Технический университет г. Лодзь), Голландии (фирма *Philips*); Франция (фирма *Garnet*); Швеции (фирма *SKF*), Японии (фирма *Toyota*) и др.

Рассмотрены конструктивные особенности, технические возможности и перспективы применения гидростатических и аэростатических опор в шпиндельных узлах и направляющих. Обоснован вывод, что наибольшую перспективу имеют адаптивные гидростатические и аэростатические опоры с регуляторами активного нагнетания смазки, которые могут иметь нагрузочную характеристику с большим диапазоном отрицательных эксцентрисите-

тов (график 5 на рисунке 1). Такая характеристика позволяет значительно увеличить нагрузочную способность шпиндельного узла, снизить потери мощности, уменьшить негативное влияние упругих и температурных деформаций на точность и производительность металлорежущих станков.

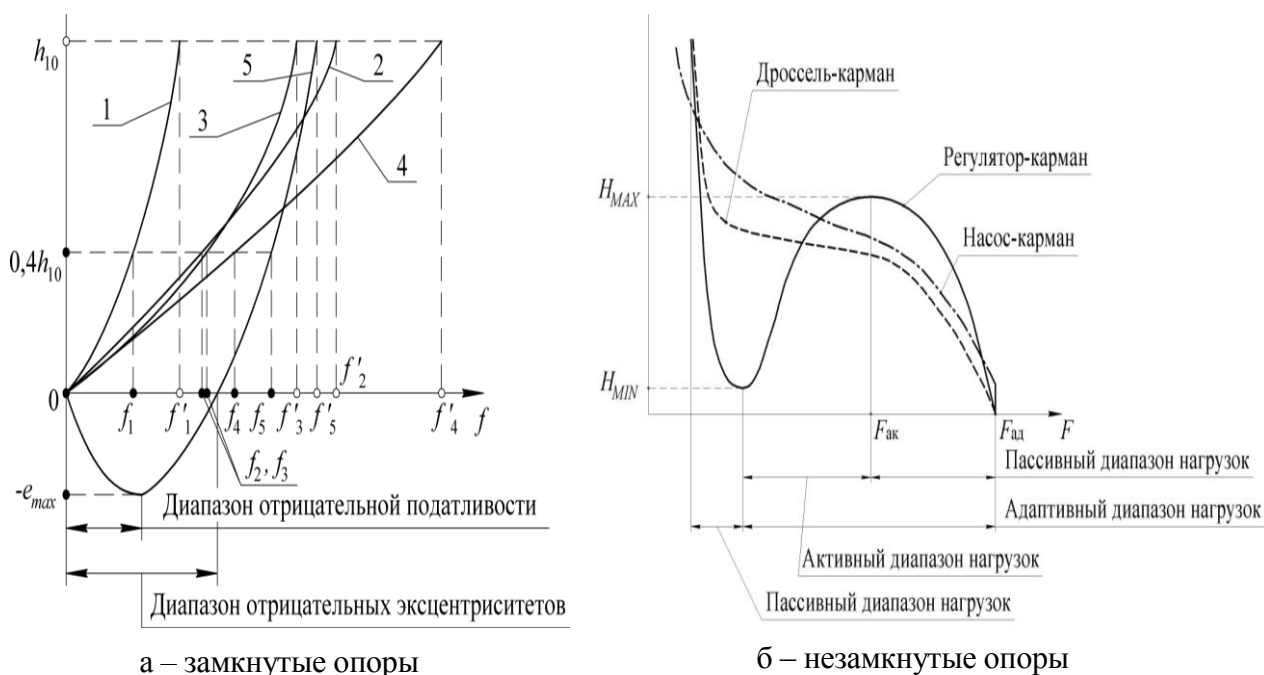


Рис. 1 – Нагрузочные характеристики гидростатических опор с различными системами нагнетания смазки
 1 – самокомпенсация, 2 – дроссель-карман, 3 – обратная самокомпенсация, 4 – насос-карман, 5 – регулятор-карман

Для более широкого и комплексного применения адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих необходимы разработка и исследование новых конструкций, которые отличаются компактностью и технологичностью, имеют высокую надежность, не требуют регулировки в процессе наладки и эксплуатации, могут использоваться как динамометрические преобразователи или приводы микро-перемещений. Особая сложность заключается в том, что гидростатические и аэростатические шпиндельные опоры и направляющие не производятся централизованно и не являются покупными изделиями. Заинтересованные предприятия вынуждены самостоятельно решать весь комплекс проблем их проектирования, изготовления и эксплуатации.

В диссертации представлены результаты научных исследований и разработок, выполненных автором в СФУ (КГТУ, КрПИ) совместно с рядом предприятий и организаций. Их результаты показали возможность и перспективы значительного повышения точности и производительности металлорежущих станков на основе комплексного использования функциональных возможностей шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами, имеющими компактно встроенные регуляторы активного нагнетания смазки. Обобщение и развитие полученных результатов определили цель и задачи данной работы.

Во второй главе представлена разработанная и используемая в работе методология математического моделирования, теоретического исследования и параметрической оптимизации функциональных возможностей адаптивных гидростатических и аэростатических опор, а также шпиндельных узлов и направляющих с такими опорами. Методология основана на использовании фундаментальных положений гидромеханики, термодинамики, теории автоматического управления, теории подобия, гидродинамической теории смазки. Она предусматривает исследование и оптимизацию статических и динамических характеристик адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих по единым показателям качества.

Применительно к движению сплошной среды математическим выражением фундаментальных законов являются уравнения Навье-Стокса. Гидродинамическая теория смазки, как частный случай механики и термодинамики сплошных, сред рассматривает течение вязкой смазки в дросселирующем щелевом зазоре, имеющее преимущественно ламинарный характер, когда силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкого сопротивления. В этом случае уравнения Навье-Стокса значительно упрощаются и после интегрирования по толщине смазочного слоя приводятся к уравнениям распределения давления p и температуры θ в смазочном слое. Чтобы найти функции p и θ эти уравнения необходимо дополнить зависимостями, определяющими термодинамические свойства смазки и граничные условия краевых задач.

При решении краевых задач для гидростатических опор можно считать вязкость смазки постоянной в пределах одного цикла циркуляции и задавать её на основе анализа теплового баланса опоры в целом. Такой подход существенно упрощает решение, так как позволяет рассматривать только уравнение давлений, которое в безразмерной векторной форме, инвариантной к выбору координат, имеет вид:

$$\operatorname{div}(H^3 \cdot \operatorname{grad} P) = \Lambda \cdot \vec{U} \cdot \operatorname{grad} H + \sigma \cdot \partial H / \partial \dot{O}, \quad (2.1)$$

где P – безразмерное давление в слое смазки, H – безразмерная толщина слоя смазки; \vec{U} – вектор безразмерной скорости скольжения смазываемых поверхностей; $\Lambda = 6 \cdot \mu_0 \cdot r_0 \cdot u_0 / (h_0^2 \cdot p_0)$ – скоростной критерий подобия; $\sigma = 12 \cdot \mu_0 \cdot r_0^2 / (h_0^2 \cdot p_0 \cdot t_0)$ – динамический критерий подобия; $T = t/t_0$; t – время; p_0 и μ_0 , r_0 и h_0 , u_0 и t_0 – характерные значения (масштабы) давления и динамической вязкости смазки, радиальных размеров и толщины смазочного слоя, скорости скольжения и времени нестационарных процессов.

Масштаб времени t_0 удобно задавать из условия равенства единице безразмерной массы подвижной части опоры, тогда динамический критерий

$$\sigma = 12 \cdot \mu_0 \cdot r_0^3 / \sqrt{h_0^5 \cdot p_0 \cdot m_0}. \quad (2.2)$$

где m_0 – масса подвижной части опоры, принятая за масштаб массы.

Рассмотрены различные методы решения стационарных ($\sigma = 0$) задач для уравнения (2.1), применяемые при исследовании гидростатических опор, в

том числе использованные в данной работе. Сделан вывод, что для массовых расчетов, необходимых при параметрической оптимизации адаптивных гидростатических опор с большим числом варьируемых параметров, более эффективны специальные модификации метода конечных элементов (МКЭ). Они при достаточной точности требуют на один-два порядка меньше машинного времени, чем численный метод конечных разностей (метод сеток), который целесообразно использовать в качестве «вычислительного эксперимента».

В несущих карманах и других междроссельных полостях гидростатических опор существенно сказывается сжимаемость жидкой смазки, так как наличие в ней нерастворенного воздуха уменьшает объемный модуль упругости

$$E_{\gamma\delta} \approx [1/E + V \cdot p_a / (\gamma \cdot p^2)]^{-1}, \quad (2.3)$$

где $E \approx 1,4 \cdot 10^3$ МПа – объемный модуль упругости жидкой смазки без нерастворенного воздуха; V – относительный объем нерастворенного воздуха в смазке при атмосферном давлении $p_a = 0,1$ МПа; $\gamma = 1,4$ – показатель политропы для воздуха. При тщательной дегазации смазки и устранении воздушных полостей можно принять $V = 0,01 \div 0,02$. Тогда при $p = 4$ МПа для минеральных масел получим значение $E_{\text{пр}} = (0,8 \div 1) \cdot 10^3$ МПа. При несоблюдении дегазационных мер значения $E_{\text{пр}}$ могут уменьшиться в 2–4 раза и более. Показано, что расчет динамического качества гидростатических опор без учета сжимаемости смазки в активных полостях приводит к качественно неверным выводам.

В аэростатических опорах эффект сжимаемости существенно проявляется даже в тонком смазочном слое, так как плотность воздуха $\rho = p / (\mathfrak{R} \cdot \theta)$ изменяется пропорционально давлению (\mathfrak{R} – газовая постоянная, θ – абсолютная температура воздуха). Динамическая вязкость воздуха на три-четыре порядка меньше вязкости жидкой смазки и практически не меняется при перепадах температур и давлений, характерных для аэростатических опор металлорежущих станков. Поэтому влияние скорости скольжения в аэростатических шпиндельных опорах пренебрежимо мало при $u < 100$ м/с и уравнение (2.1) можно рассматривать в виде

$$\operatorname{div}(H^3 \cdot P \cdot \operatorname{grad} P) = \sigma \cdot \partial(P \cdot H) / \partial \dot{O}. \quad (2.4)$$

Для стационарных задач ($\sigma = 0$) уравнение (2.4) приводится к виду, линейному относительно функции P^2 , для определения которой можно применять методы, используемые при расчете гидростатических опор.

Все аэростатические и адаптивные гидростатические опоры склонны к неустойчивости, что требует исследования и оптимизации их динамических характеристик, то есть решения нестационарных задач для уравнений (2.1) и (2.4). Наиболее простым является решение, основанное на линеаризации нестационарной задачи относительно малых динамических возмущений стационарного состояния. Универсальным математическим аппаратом для такого исследования, является линейная теория автоматического управления.

Для анализа динамических характеристик линеаризованную математическую модель опоры целесообразно представить в виде системы линейных

дифференциальных уравнений первого порядка

$$\sum_{j=1}^m \left[a_{nj} \cdot x_j(t) + b_{nj} \cdot \frac{d}{dt} x_j(t) \right] = y_n(t), \quad (n = \overline{1, m}) \quad (2.5)$$

где $x_j(t)$ и $y_n(t)$ – отклонения от стационарных значений входных воздействий и выходных откликов соответственно. Даже для самых простых опор порядок системы (2.4) достаточно высок ($m > 4$), а для адаптивных опор $m > 8$.

Используя интегральное преобразование Лапласа, представим (2.5) в виде матричной системы алгебраических уравнений

$$A(s) \cdot \vec{X}(s) = \vec{Y}(s); \quad (2.6)$$

где $A(s) = \{a_{nj} + b_{nj} \cdot s\}_{m \times m}$ – комплексная квадратная матрица коэффициентов,

$\vec{X}(s) = \{x_j(s)\}_m$ – вектор-столбец изображений обобщенных координат,

$\vec{Y}(s) = \{y_n(s)\}_m$ – вектор-столбец изображений внешних воздействий,

$x_j(s)$ и $y_n(s)$ – изображения по Лапласу функций $x_j(t)$ и $y_n(t)$,

s – комплексный аргумент преобразования Лапласа.

Система (2.6) позволяет найти различные передаточные функции опоры в виде отношения матриц, которые для удобства дальнейших преобразований целесообразно представить отношением степенных полиномов

$$\Phi_{nj}(s) \equiv \frac{x_j(s)}{y_n(s)} = (-1)^{n+j} \cdot \frac{\det A_{nj}(s)}{\det A(s)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_{m-1} \cdot s^{m-1}}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_m \cdot s^m}, \quad (2.7)$$

где матрица $A_{nj}(s)$ получена из матрицы $A(s)$ вычеркиванием строки с индексом n и столбца с индексом j .

Для вычисления коэффициентов $a_0 \dots a_m$ и $b_0 \dots b_{m-1}$ можно использовать экономичный по затратам машинного времени алгоритм, основанный на методе неопределенных коэффициентов, который не требует трудоемкой и приводящей к погрешностям вычислений процедуры обращения матриц.

При исследовании переходных процессов в гидростатических и аэростатических опорах использованы следующие динамические показатели:

– затухание колебаний ξ (определяет характер переходных процессов)

$$\xi = \left[1 - \exp(2 \cdot \pi \cdot \alpha / |\beta|) \right] \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

где α и β – действительная и мнимая части ближайшей к мнимой оси пары комплексно сопряженных корней s_k характеристического уравнения

$$a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_m \cdot s^m = 0, \quad (2.9)$$

– нормированная степень устойчивости η_0 (характеризует быстродействие опоры с учетом влияния всех корней характеристического уравнения)

$$\eta_0 = -\max \operatorname{Re} \{s_k\} / \sqrt[m]{|a_0/a_m|} \in [0; 1] \quad (k = \overline{1, m}). \quad (2.10)$$

Если $\xi = 100\%$, что имеет место при $\beta = 0$ (все корни действительные), переходные процессы в опоре не колебательные (апериодические или монотонные). При $\xi < 100\%$ имеет место хотя бы один колебательный переходный процесс. Запас устойчивости и быстродействие опоры можно считать достаточным при $\xi > 60\%$ и $\eta_0 = 0,1 \div 0,2$, высоким при $\xi > 80\%$ и $\eta_0 > 0,4$.

Недостаток показателей η_0 и ξ в том, что из всех возможных в опоре переходных процессов они характеризуют наиболее продолжительный и наиболее колебательный. Как правило, это переходный процесс для передаточной функции «нагрузка – перемещение подвижной части опоры». Но они могут не соответствовать передаточным функциям «нагрузка – перемещение регулятора» или «нагрузка – давление смазки в несущем кармане», которые характеризуют опору как привод микроперемещений или динамометрический преобразователь. Еще один недостаток показателей η_0 и ξ заключается в необходимости определения комплексных корней характеристического уравнения (2.9), что значительно усложняет динамическое исследование адаптивных опор, имеющих высокий порядок математической модели.

Поэтому для исследования конкретных передаточных функций необходимо использовать частотные динамические показатели, которые характеризуют установившуюся динамическую реакцию опоры при моногармоническом возмущении. Для определения частотных показателей к линеаризованной математической модели (2.5) вместо интегрального преобразования Лапласа применяют интегральное преобразование Фурье, что сводится к формальной замене в (2.6) переменной s на $i \cdot \omega$. В результате получим:

– амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ)

$$\Phi_{nj}(i \cdot \omega) = \frac{x_j(i \cdot \omega)}{y_n(i \cdot \omega)} = \frac{b_0 + i \cdot \omega \cdot b_1 + (i \cdot \omega)^2 b_2 + \dots + (i \cdot \omega)^{m-1} b_{m-1}}{a_0 + i \cdot \omega \cdot a_1 + (i \cdot \omega)^2 a_2 + \dots + (i \cdot \omega)^m a_m}, \quad (2.11)$$

– амплитудно-частотные характеристики (АЧХ)

$$A_{nj}(\omega) = \sqrt{U_{nj}^2(\omega) + V_{nj}^2(\omega)}, \quad (2.12)$$

– фазовые частотные характеристики (ФЧХ)

$$\varphi_{nj}(\omega) = \arctg[V_{nj}(\omega)/U_{nj}(\omega)], \quad (2.13)$$

где $U(\omega)$ и $V(\omega)$ – действительная и мнимая части функции (2.11).

Для количественной оценки частотных характеристик гидростатических и аэростатических опор в работе использовали:

– показатель колебательности

$$\dot{I} = A_{nj}(\omega_{\delta}) / A_{nj}(0), \quad (2.14)$$

– частоту пропускания ω_i , которая определяется из уравнения

$$A_{nj}(\omega_i) = 0,71 \cdot A_{nj}(0); \quad (2.15)$$

– быстродействие по фазе (фазовый сдвиг на частоте ω_i)

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \left[V_{nj}(\omega_i) / U_{nj}(\omega_i) \right]. \quad (2.16)$$

Достаточными являются значения $M < 2,5$ и $\varphi_{\Pi} < 60^{\circ}$, хорошими $M < 1,5$ и $\varphi_{\Pi} < 30^{\circ}$. При $M > 1$ время затухания колебательного переходного процесса $t_{i1} \approx 30/\omega_i$. При монотонном затухании переходного процесса амплитудно-частотная характеристика не будет иметь резонансного пика, хотя опора может быть неустойчивой. В таком случае (то есть при $\xi = 0$ и $M = 1$) можно использовать критерий устойчивости Рауса-Гурвица, который не требует находить корни характеристического уравнения.

При малой и нулевой статической податливости опоры расчет по формулам (2.14) и (2.15) для амплитудно-частотной характеристики «нагрузка – перемещение шпинделя» дает значения $M \rightarrow \infty$ и $\omega_i \rightarrow \infty$. Первое можно ошибочно истолковать как неустойчивость, а второе как неограниченное быстродействие опоры. При отрицательной статической податливости данная частотная характеристика становится двузначной и показатель колебательности M получится отрицательным. В этом случае для динамической оценки адаптивных гидростатических и аэростатических опор можно использовать другую амплитудно-частотную характеристику, например «нагрузка – давление смазки в несущем кармане», которая не имеет указанных особенностей.

Теоретическое исследование динамических характеристик адаптивных гидростатических и аэростатических опор является достаточно сложным для математического моделирования и компьютерного программирования. Многократно упростить его позволяет «Интегрированная компьютерная среда моделирования, расчета, исследования и проектирования конструкций с газостатическими опорами» (СИГО), разработанная в СФУ В.А. Коднянко, которая имеет специально разработанный язык моделирования и синтаксис. С определенными добавлениями СИГО можно использовать также для исследования гидростатических опор. Идеология СИГО основана на модульном принципе формирования математической модели исследуемой опоры в виде совокупности типовых элементов. Интеллектуальные свойства СИГО позволяют выявить ошибки различного характера – от правильности написания текста до совместности уравнений математической модели.

Математические модели адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих имеют нелинейные уравнения, решение которых зависит от большого числа варьируемых параметров. При определении их оптимального сочетания в работе использована параметрическая оптимизация опор методом эволюционного поиска по усовершенствованному генетическому алгоритму, в который введены принцип элитарности, конкурирующий метод оптимизации, штрафные функции, функционально-зависимая вероятность мутации. Оптимизацию проводили для комплексного критерия эффективности, позволяющего выбрать необходимое соотношение нагрузочных и энергетических характеристик.

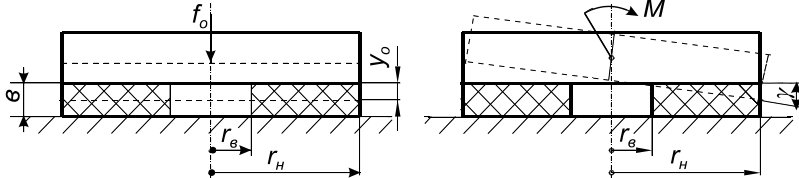
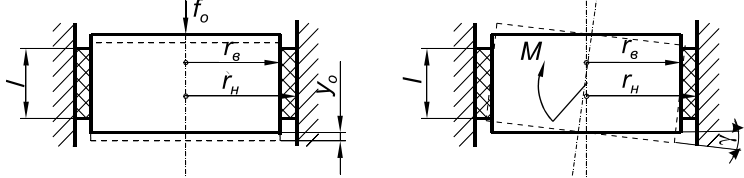
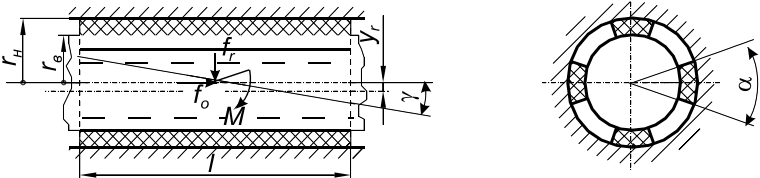
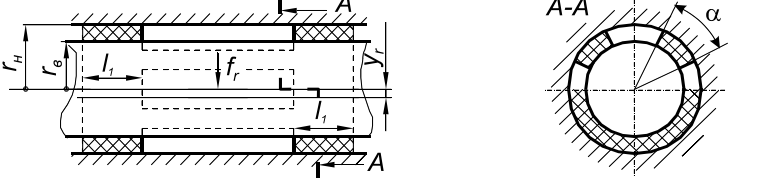
В третьей главе разработаны методы уточненного расчета дросселирующих элементов, применяемых в проточном тракте гидростатических и аэростатических опор, а также упругих, эластичных, и плавающих элементов, используемых в регуляторах активного нагнетания смазки.

Кольцевые и простые диафрагмы, капиллярные каналы и радиальные щелевые каналы, применяемые в качестве внешних дросселей в аэростатических и гидростатических опорах, создают комбинированное сопротивление движению смазки. Приведены уточненные расчетные зависимости для расходных характеристик, учитывающие сопротивление простой диафрагмы на входе у кольцевой диафрагмы и капиллярного канала, а также сопротивление кольцевых диафрагм на входе и выходе у простых диафрагм и у радиальных щелевых дросселирующих каналов с малым внутренним радиусом.

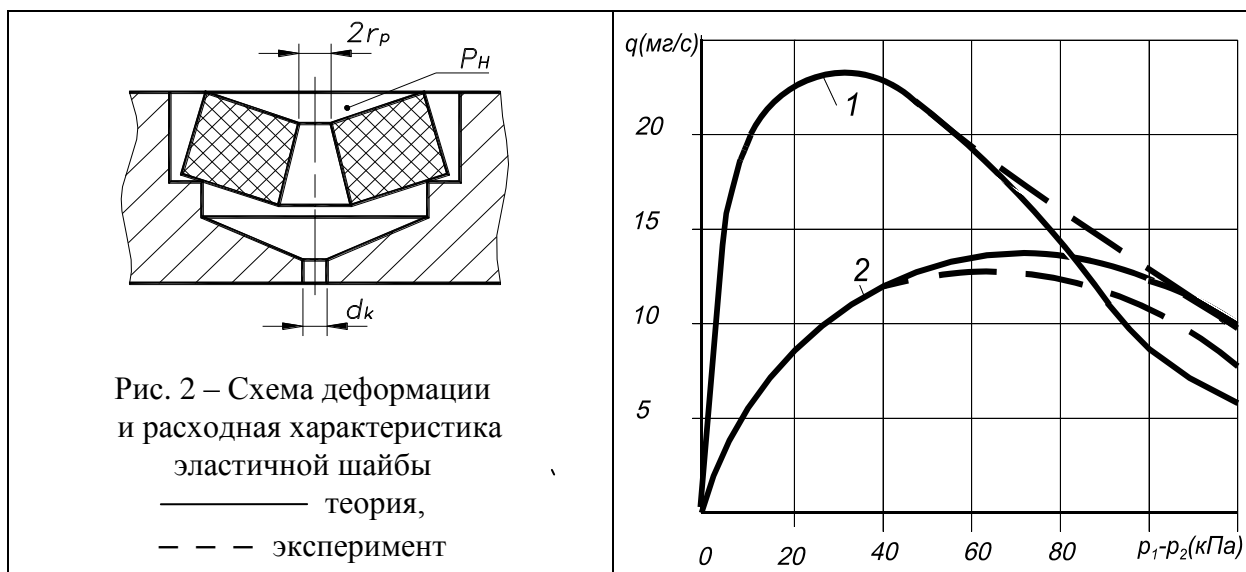
На основании проведенных исследований получены расчетные зависимости для нагрузочных и расходных характеристик радиальных гидростатических подвесов ступенчатого типа, которые находят применение в адаптивных гидростатических и аэростатических опорах для стабилизации плавающих регуляторов активного нагнетания смазки.

Разработана методика расчета и получены формулы для осевой k_o , радиальной k_r и угловой k_γ податливости тонкостенных эластичных пластин, колец и оболочек, используемых в регуляторах активного нагнетания смазки (таблица 1).

Таблица 1 – Податливость тонкостенных эластичных элементов

Расчетная схема эластичного подвеса.	Формулы податливости.
	$k_o = \frac{y_o}{f_o} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\delta}{(1-\mu)\pi E(r_H^2 - r_e^2)}$ $k_o = \frac{\gamma}{M} = \frac{4k_o}{r_H^2 + r_e^2}$
	$k_o = \frac{y_o}{f_o} = \frac{(1+\nu)(r_H - r_e)}{\pi E l r_e}$ $k_r = \frac{y_r}{f_r} = \frac{1-2\nu}{3-4\nu} k_o$ $k_\gamma = \frac{\gamma}{M} = \left[\frac{l^2}{12k_r} + \frac{r_e^2}{k_o} \right]^{-1}$
	$k_o = \frac{y_o}{f_o} = \frac{(1+\nu)(r_H - r_e)}{\alpha E l r_e}$ $k_r = \frac{1-2\nu}{3-4\nu} k_o$ $k_\gamma = \frac{\gamma}{M} = \left[\frac{l^2}{12k_r} + \frac{r_e^2}{k_o} \right]^{-1}$
	$k_r = \frac{y_r}{f_r} = \frac{2(1+\nu)(1-\nu)(r_H - r_e)}{(3-4\nu)E r_e [\pi l, -\alpha(l-2l_i)]}$

Исследованы регуляторы активного нагнетания смазки в виде эластичных шайб с центральной дросселирующей диафрагмой, показанные на рисунке 2. Разработана методика расчета деформаций и расходной характеристики эластичных дросселирующих шайб, которая соответствует экспериментальным данным.



В четвертой главе рассмотрены технические решения, расчетные схемы, математические модели, вычислительные алгоритмы, результаты исследования и оптимизации нагрузочных, энергетических и динамометрических характеристик адаптивных гидростатических шпиндельных опор, представлены методы их прикладного расчета.

Исследование энергетических характеристик показало, что потери мощности в несущих карманах, рассчитанные с учетом циркуляции смазки по глубине кармана, возрастают в 4 раза. Возникающее при окружной скорости $u > 5 \div 10$ м/с турбулентное течение смазки в карманах дополнительно увеличивает потери мощности, которые при $u > 25 \div 30$ м/с становятся доминирующими. Кроме того в карманах появляется кавитация, снижающая точность вращения шпинделя. Разработана усовершенствованная методика расчета суммарных потерь мощности, которая учитывает нагрев и изменение вязкости смазки, циркуляцию, турбулентность и кавитацию в несущих карманах и совпадает с экспериментальными данными при $u < 60$ м/с.

При $u > 5 \div 10$ м/с для уменьшения значительного роста температуры и снижения динамической вязкости смазки в несущем слое, вызывающих падение давления в несущих карманах и уменьшение нагрузочной способности высокоскоростных гидростатических опор, следует выбирать коэффициент гидравлической настройки (отношение давления в несущем кармане к давлению нагнетания смазки для ненагруженной опоры) $\chi = p_{к0} / p_n = 0,7 \div 0,75$, тогда как обычно принимают $\chi = 0,5$. Кроме того, нужно не уменьшать, а увеличивать ширину дросселирующих перемычек до $(0,1 \div 0,2) \cdot d$ и глубину кармана до $0,1 \cdot d$, где d – диаметр шпинделя, или использовать гидростатические опоры без несущих карманов.

На примере осевых гидростатических опор с мембранными регуляторами активного нагнетания смазки теоретически и экспериментально исследованы различные способы обеспечения устойчивости и улучшения нагрузочных и динамометрических характеристик. Установлено, что для устойчивости адаптивных опор с отрицательной податливостью необходимы дополнительные конструктивные меры, повышающие демпфирование. Показано, что наиболее простым и универсальным способом является комбинированное (активно-пассивное) внешнее дросселирование смазки, при котором после регулятора на входе в несущий карман или несущий смазочный слой предусмотрены дополнительные демпфирующие дроссели, оптимальное сопротивление которых составляет $15 \div 20\%$ от сопротивления регулятора.

Исследование переходных процессов в адаптивных гидростатических шпиндельных опорах показало, что в активном диапазоне работы регулятора при нагружении опоры происходит первичное смещение шпинделя по направлению нагрузки, в результате которого увеличивается (уменьшается) давление смазки в нагруженной (разгруженной) зоне опоры. Возникающая разность давлений вызывает смещение регулятора противоположно направлению нагрузки и увеличивает (уменьшает) нагнетание смазки в нагруженной (разгруженной) зоне опоры. Изменение баланса расходов смазки вызывает вторичное смещение шпинделя, которое противоположно направлению нагрузки. При достаточном усилении регулятора вторичное смещение шпинделя больше первичного, то есть опора имеет отрицательную податливость, пока смещение регулятора не достигает возможного предела. При дальнейшем увеличении нагрузки регулятор остается неподвижным и опора имеет положительную податливость.

Теоретически и экспериментально исследованы возможности использования адаптивных гидростатических шпиндельных опор как динамометрических преобразователей для бесконтактного измерения нагрузки. Показано, что при оптимальном выборе параметров чувствительность опоры как динамометрического преобразователя составляет $(2 \div 2,5) \cdot 10^3$ Н/МПа и быстродействие $30 \div 40$ Гц при фазовом сдвиге 30° .

Теоретически и экспериментально исследовано влияние пульсации давления нагнетаемой смазки и погрешностей формы рабочих поверхностей гидростатических шпиндельных опор на параметрические колебания шпинделя. Разработаны методики расчета допустимых погрешностей формы рабочих поверхностей осевой и радиальной опоры, исходя из заданного биения шпинделя, а также допустимой пульсации давления смазки и гасителя пульсации, который на порядок уменьшает амплитуду параметрических колебаний.

Разработаны и исследованы радиальные и радиально-осевые адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с упругим подвесом встроенного кольцевого регулятора. На рисунке 4 показана радиально-осевая адаптивная гидростатическая шпиндельная опора с кольцевым регулятором 1 на плоских пружинах 2, который активно управляет нагнетанием смазки в приемные карманы, выполненные на опорной втулке. Из приемных карманов смазка по ка-

налам с демпфирующими диафрагмами поступает в радиальные и осевые несущие карманы. На заднем торце опоры имеет камеры 3 и мембраны 4 с тензодатчиками для измерения давления смазки в карманах.

Дросселирование смазки в приемные карманы и из несущих карманов происходит через узкие пояски щелевых зазоров h_p регулятора и h_1 несущего слоя. Поэтому функции распределения давления смазки в этих зазорах определяли аналитическим решением одномерных краевых задач для уравнения (2.4). Характеристики опоры исследованы с учетом гидродинамического эффекта, создаваемого вращением шпинделя.

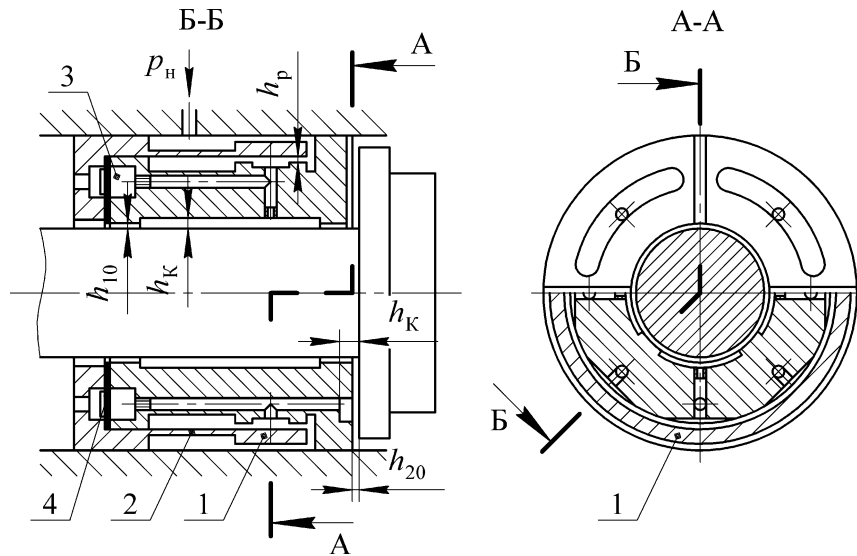


Рис. 4 – Радиально-осевая адаптивная гидростатическая шпиндельная опора с упругим подвесом встроенного кольцевого регулятора и динамометрическим преобразователем

На рисунке 5-а для радиальной адаптивной гидростатической опоры (сплошные линии) и аналогичной пассивной гидростатической опоры (штриховые линии) показана зависимость безразмерного радиального эксцентриситета ε от безразмерной радиальной нагрузки F и скоростного критерия Λ .

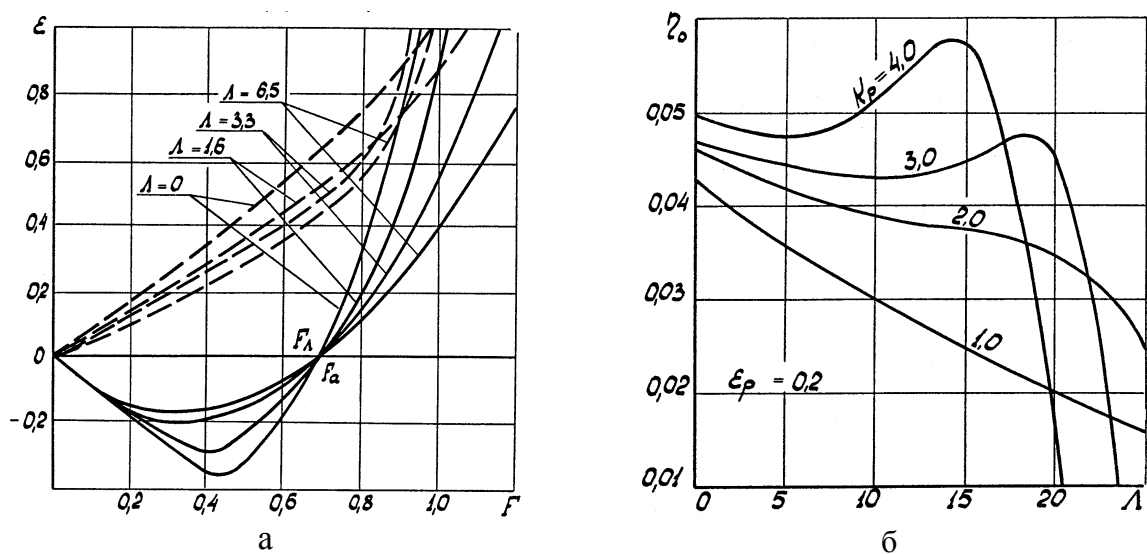


Рис. 5 – Нагрузочные и динамические характеристики радиальной адаптивной гидростатической опоры с упруго податливым кольцевым регулятором

Видно, что нагрузочная характеристика адаптивной опоры имеет диапазон с отрицательным эксцентриситетом, который при $F = 0,45$ и $\Lambda = 0$ достигает значения $\varepsilon_{\min} = -0,35$. С дальнейшим увеличением нагрузки податливость опоры становится положительной, отрицательный эксцентриситет уменьшается по модулю и при $F = F_a \approx 0,7$ для всех значений Λ шпиндель приходит в центральное положение ($\varepsilon = 0$). Из-за перекоса и изгиба консольно нагруженного шпинделя в передней гидростатической опоре допустимы значения радиального эксцентриситета $\varepsilon < 0,4$. В этом диапазоне нагрузочная способность адаптивной опоры в $1,8 \div 2,5$ раза больше чем пассивной.

Динамические характеристики радиальной опоры исследованы во всем диапазоне реальных значений F , Λ и σ . На рисунке 5-б показаны графики зависимости нормированной степени устойчивости η_0 от скоростного критерия Λ для различных значений коэффициента активности K_a регулятора (отношение податливости адаптивной опоры к податливости пассивной опоры при $F = 0$). Видно, что при $\Lambda < 20$ адаптивная опора ($K_a > 2$) имеет более высокие значения η_0 , чем пассивная ($K_a = 1$). В диапазоне отрицательной податливости при значении динамического критерия $\sigma < 20 \div 30$ адаптивная опора неустойчива ($\eta_0 < 0$), при $20 \div 30 < \sigma < 40 \div 50$ она устойчива с колебательным переходным процессом ($\eta_0 > 0$, $\xi < 1$), при $\sigma > 40 \div 50$ устойчива и имеет не колебательный переходный процесс ($\xi = 1$).

На рисунке 6 показаны разработанные и исследованные радиальные и радиально-осевые адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором, не имеющие приемных и несущих карманов. Плавающий регулятор образует дросселирующий щелевой зазор непосредственно с поверхностью шпинделя и при его вращении совершают авторотацию, которая снижает потери мощности на вращение шпинделя и исключает облитерацию дросселирующих зазоров опоры.

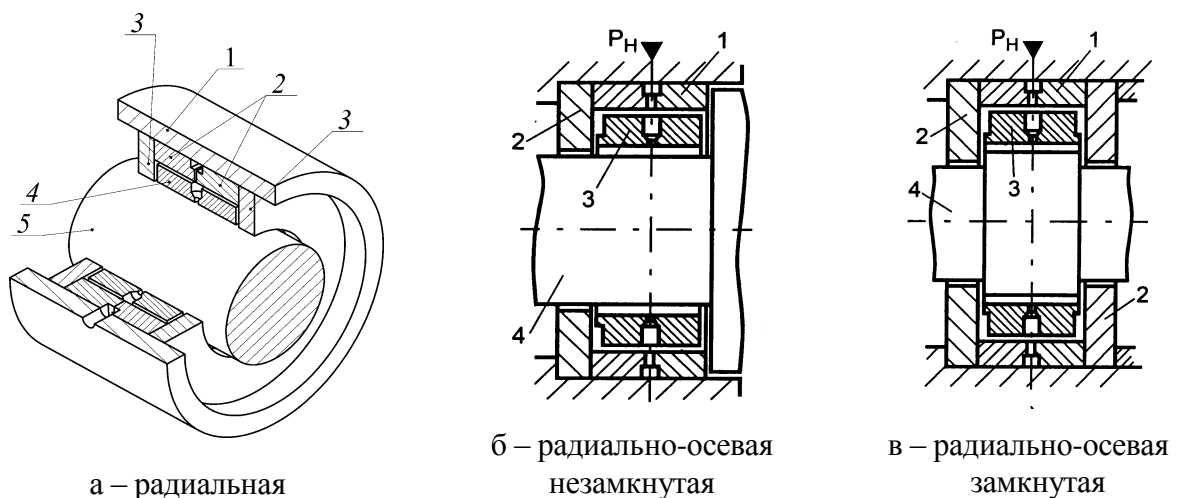


Рис. 6 – Адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором

Радиальная опора (рисунок 6-а) имеет корпус 1, сборную опорную втулку с цилиндрической частью 2 и фланцами 3, плавающий кольцевой регулятор 4 и шпиндель 5. Цилиндрическая часть 2 опорной втулки состоит из двух половин, на стыке которых выполнены радиальные дросселирующие щелевые зазоры. Плавающий регулятор 4 отделен от шпинделя и опорной втулки щелевыми дросселирующими зазорами, взаимодействие которых обеспечивает радиальную и осевую стабилизацию регулятора в активном диапазоне работы. В средней плоскости регулятор имеет радиальные щелевые зазоры или каналы с кольцевыми диафрагмами, которые являются демпфирующими дросселями и обеспечивают устойчивость опоры при отрицательной податливости.

Теоретическое исследование опоры затруднено сложным взаимодействием нескольких дросселирующих щелевых зазоров, имеющих пространственное (осевое и окружное) течение смазки, параметры которого изменяются при нагружении. При предварительном теоретическом исследовании нагрузочных характеристик радиальной опоры с различными вариантами плавающего кольцевого регулятора учитывали только осевое течение смазки в дросселирующих щелевых зазорах. Это позволило использовать аналитические решения краевых задач для уравнения давлений (2.1), что значительно упростило математическую модель и вычислительный алгоритм. Лучший вариант регулятора, имеющий максимальный адаптивный диапазон нагрузочной характеристики $\varepsilon(F)$, определяли по максимуму площади между графиком функции $\varepsilon(F)$ и осью абсцисс в адаптивном диапазоне нагрузок

$$S_{\text{аа}} = \int_0^{F_{\text{аа}}} H_1(F) \cdot dF. \quad (2.17)$$

При уточненном исследовании радиальной опоры с лучшим вариантом регулятора, которая показана на рисунке 6-а, учитывали осевое и окружное течение смазки в дросселирующих щелевых зазорах. Поэтому двумерные функции распределения давлений для уравнения (2.1) определяли конечно-разностным методом сеток. Параметрическую оптимизацию опоры проводили методом эволюционного поиска по улучшенному генетическому алгоритму с использованием комплексного критерия эффективности

$$\dot{Y} = S_{\text{аа}}^\gamma / N_\Sigma^{1-\gamma} \rightarrow \max, \quad (2.18)$$

где N_Σ – безразмерные суммарные потери мощности на нагнетание смазки и вращение шпинделя с учетом авторотации регулятора, $\gamma = 0 \div 1$ – коэффициент рационального сочетания нагрузочной способности потерь мощности.

На рисунке 7-а приведены графики оптимизированных нагрузочных и энергетических характеристик, полученные при предварительном и уточненном исследовании опоры с лучшим вариантом регулятора. Видно, что расчет без учета окружного течения завышает нагрузочную характеристику на 25÷30%. На рисунке 7-б показаны графики изменения суммарных потерь мощности для адаптивной (сплошные линии) и аналогичной пассивной опоры (штриховая линия). Видно, что адаптивная опора имеет меньшие суммарные потери мощности при $\Lambda > 3,5$ (для $\gamma = 1$) и $\Lambda > 1,8$ (для $\gamma = 0,5$).

Результаты исследования показали, что:

- авторотация плавающего кольцевого регулятора на 25÷35% снижает потери мощности на вращение шпинделя;
- гидростатическая опора с встроенным плавающим кольцевым регулятором (рисунок 6-а) имеет адаптивный диапазон нагрузок на 20÷40%, предельную нагрузку на 10÷15%, максимальный отрицательный эксцентриситет на 20÷50%, параметр быстроходности в 2÷2,5 раза больше чем опора с несущими карманами и упругим подвесом кольцевого регулятора (рисунок 4).

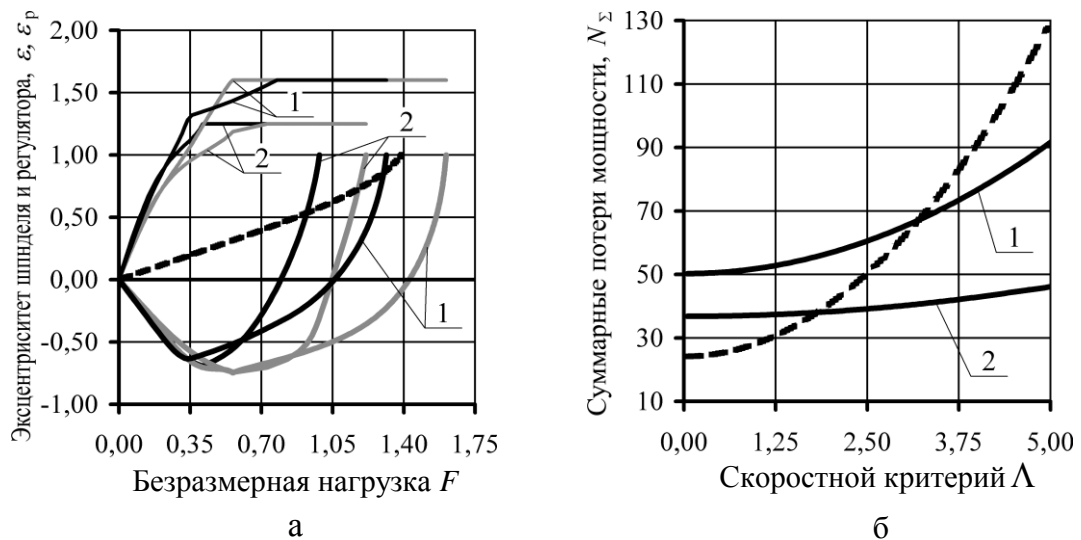


Рис. 7 – Нагрузочные и энергетические характеристики радиальной адаптивной гидростатической опоры без несущих карманов с встроенным плавающим кольцевым регулятором

1 – оптимизация при $\gamma = 1$; 2 – оптимизация при $\gamma = 0,5$

- шпиндель без учета окружного течения смазки,
- шпиндель с учетом окружного течения смазки,
- регулятор без учета окружного течения смазки,
- регулятор с учетом окружного течения смазки,
- — пассивная гидростатическая опора.

Динамическое исследование, выполненное с использованием программы СИГО, показало, что рассматриваемая опора имеет хорошие динамические характеристики. Это объясняется отсутствием несущих карманов, в которых существенно проявляется сжимаемость смазки, а также большой площадью дросселирующих щелевых зазоров, оказывающих демпфирующее действие. При $\sigma = 10 \div 12$ и оптимальном значении остальных безразмерных параметров опора устойчива и имеет не колебательный переходный процесс ($\eta_0 \approx 0,12$ и $\xi = 100\%$), время затухания которого составляет 0,017 с. Снижение нагрузочной способности на 30 % позволяет получить значение $\eta_0 \approx 0,65$.

При теоретическом исследовании нагрузочных характеристик незамкнутой радиально-осевой опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором (рисунок 6-б) установлено, что радиальное нагружение повышает осевую, а осевое – увеличивает радиальную нагрузочную способность, но отрицательную податливость опоры имеет только в радиальном направлении.

В пятой главе приведены технические решения, расчетные схемы, математические модели, вычислительные алгоритмы, а также результаты теоретического и экспериментального исследования статических и динамических характеристик осевых и радиальных адаптивных аэростатических опор с встроенными мембранными, эластичными и плавающими регуляторами активного нагнетания воздуха.

Теоретически и экспериментально исследованы статические и динамические характеристики адаптивных аэростатических опор с мембранными регуляторами активного нагнетания воздуха и комбинированным (активно-пассивным) внешним дросселированием. Установлено, что в адаптивных аэростатических опорах возможен режим отрицательной податливости при частоте изменения нагрузки до $110 \div 160$ Гц, то есть в два раза выше, чем у адаптивных гидростатических опор. Исследованы динамометрические возможности адаптивных аэростатических шпindelных опор, в которых выходным сигналом динамометрического преобразователя является давление воздуха в междроссельных распределительных камерах. Установлено, что чувствительность преобразователя составляет $(2 \div 3) \cdot 10^3$ Н/МПа, частота пропускания $40 \div 60$ Гц при фазовом сдвиге 30° . Это значительно выше, чем у пневматических преобразователей манометрического и струйно-мембранного типа, которые имеют чувствительность $(4 \div 6) \cdot 10^2$ Н/МПа и частоту пропускания $6 \div 15$ Гц.

На рисунке 9-а показана радиальная адаптивная аэростатическая шпindelная опора с регуляторами активного нагнетания воздуха, выполненными в виде эластичных шайб с управляемой дросселирующей диафрагмой. Методика расчета таких шайб разработана в главе 3.3. Опора имеет корпус 1, опорную втулку 2, шпindel 3 и эластичные дросселирующие шайбы 4. При нагружении опоры изменяется давление воздуха на выходе эластичной шайбы, в результате чего изменяется диаметр и расходная характеристика дросселирующей диафрагмы (рисунок 4).

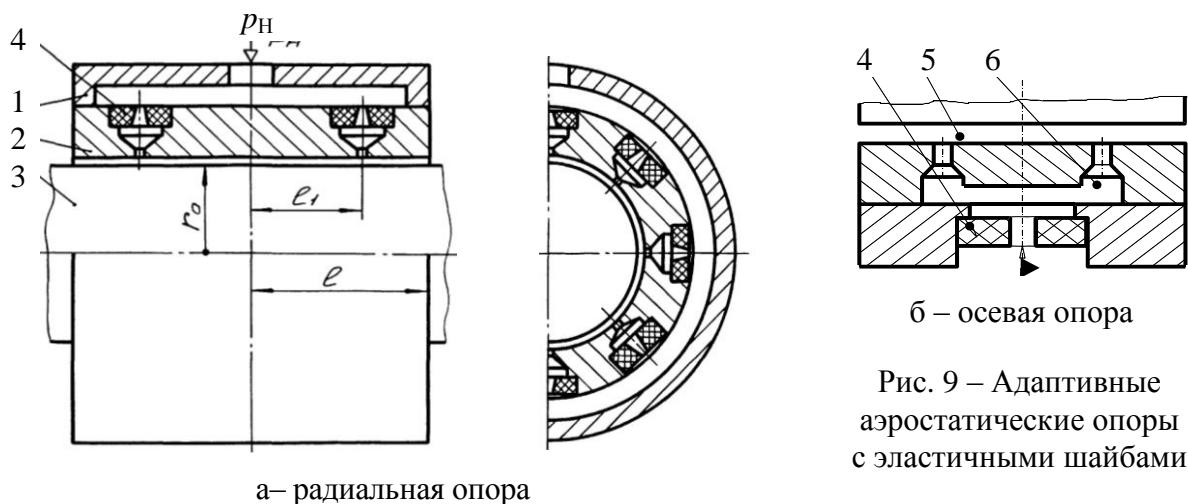


Рис. 9 – Адаптивные аэростатические опоры с эластичными шайбами

В математической модели опоры безразмерную функцию динамического давления воздуха в несущем слое $P(\varphi; Z)$ определяли решением краевых задач для нестационарного нелинейного уравнения (2.1) в цилиндриче-

ских координатах при $\Lambda > 0$ и $\sigma > 0$. При решении использовали подстановку $\Phi = (P \cdot H)^2$, так как функция Φ меньше чем P зависит от φ и ε . Здесь $H = h(\varphi, \dot{a})/h_0 = 1 - \operatorname{Re}[\varepsilon \cdot e^{-i\varphi}]$ – безразмерная комплексная функция толщины h несущего слоя смазки, $\varepsilon = e/h_0$ – безразмерный эксцентриситет e шпинделя, h_0 – радиальный зазор h в несущем слое при $e = 0$. Число дросселирующих и демпфирующих диафрагм в каждом ряду считали достаточным для замены их кольцевой щелью с эквивалентным массовым расходом воздуха.

Ввиду нелинейности уравнения (2.17), а также упругой характеристики эластичной шайбы и расходной характеристики дросселирующих и демпфирующих диафрагм, математическую модель опоры линеаризовали в центральном положении для ненагруженного шпинделя относительно малых динамических возмущений нагрузки f и эксцентриситета ε . Функцию Φ представляли в комплексной форме $\Phi = f(Z) \cdot \varepsilon^{-i\varphi}$ и сводили решение линеаризованной краевой задачи к определению одномерных функций $f(Z)$ для средней и крайней области несущего слоя смазки.

Исследование опоры, выполненное с учетом вращения шпинделя, показало, что для $p_H = 0,4 \div 0,5$ МПа оптимальное сочетание статических и динамических характеристик достигается при: $L = l/r_0 = 0,8 \div 1$; $L_1 = l_1/l = 0,5 \div 0,7$; $\chi = 0,6 \div 0,7$; $\zeta = 0,15 \div 0,2$; $\sigma > 50$ и $V_\Sigma = 5 \div 15$. Установлено, что исследуемая опора имеет устойчивую нагрузочную характеристику с большим диапазоном отрицательной податливости. При $\Lambda < 10$ вращение шпинделя не оказывает существенного влияния на нагрузочную характеристику. Большой суммарный объем V_Σ междроссельных камер позволяет объединить демпфирующие кольцевые диафрагмы в 4–6 секций, как показано на рисунке 9-б. При этом пропорционально уменьшается число эластичных шайб 1 и увеличивается диаметр дросселирующих диафрагм.

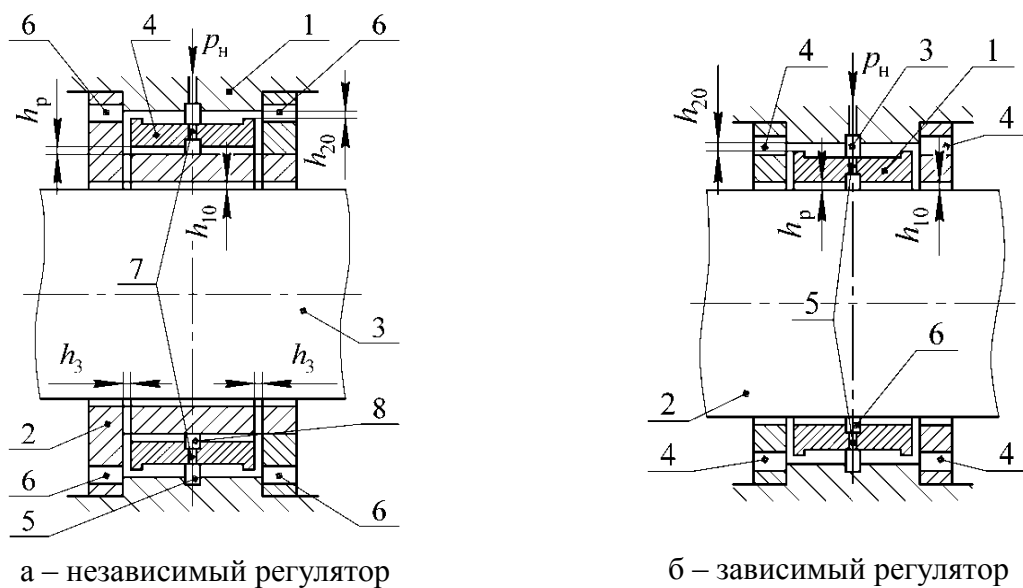


Рис. 10 – Радиальные адаптивные аэростатические опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором

На рисунке 10 показаны радиальные адаптивные аэростатические опоры с независимым и зависимым плавающим кольцевым регулятором. В обеих конструкциях радиальную стабилизацию встроенного кольцевого регулятора обеспечивает автономный аэростатический подвес, образованный ступенчатым профилем дросселирующего зазора h_{20} . Дополнительный поток сжатого воздуха, необходимый для работы автономного аэростатического подвеса, позволяет при ограниченном давлении нагнетания ($p_n < 0,4 \div 0,5$ МПа) получить более высокую нагрузочную способность опоры, так как давление в несущем слое не снижается из-за дросселирования в подвесе регулятора, как это происходит в гидростатической опоре, показанной на рисунке 6.

Чтобы определить рациональный подход к теоретическому исследованию аэростатических опор с плавающими кольцевыми регуляторами, предварительно выполнен сравнительный анализ пяти методов решения стационарных краевых задач для уравнения давлений (2.1):

Метод осевого течения основан на допущении, что окружное течение воздуха в опоре можно не учитывать. Корректность такого допущения зависит от соотношения длины и диаметра опоры – чем оно меньше, тем меньше влияние окружного течения.

Метод гармонической аппроксимации предполагает, что решение краевой задачи для пространственной функции давлений $P^2(\varphi, Z)$ можно представить в виде двух первых членов четного тригонометрического ряда.

Метод узких полос является специальным вариантом метода конечных элементов (МКЭ) и представляет среднюю зону двухрядной радиальной аэростатической опоры, где имеет место наибольшее влияние окружного течения воздуха, в виде совокупности большого числа узких продольных «карманов», разделенных узкими дросселирующими щелями, течение воздуха для которых считается только окружным. Для торцевых дросселирующих перемычек течение воздуха считается только осевым, так как их ширина много меньше длины.

Система уравнений баланса массовых расходов для метода узких полос имеет квадратную трехдиагональную матрицу коэффициентов при переменных давлениях и решается методом прогонки.

Метод узких колец также является специальным вариантом МКЭ и представляет среднюю часть несущего слоя опоры в виде совокупности узких кольцевых дросселирующих щелей, малая ширина которых позволяет пренебречь изменением давления воздуха в осевом направлении.

Метод сеток (конечных разностей) предполагает разделение дросселирующих щелевых зазоров на локальные участки по координатам φ , z и позволяет представить совокупность взаимосвязанных дифференциальных краевых задач системой линейных алгебраических уравнений. Этот известный метод использован как эталонный для оценки точности и экономичности указанных выше приближенных методов.

Каждым из пяти методов выполнен расчет нагрузочных характеристик для модельной радиальной аэростатической опоры с пассивным внешним

дросселированием двумя радиальными кольцевыми щелями. Анализ результатов показал, что при небольшой относительной длине опоры ($L < 0,5$) нагрузочные характеристики для всех методов практически совпадают, кроме метода гармонической аппроксимации, дающего сильно заниженные значения.

На рисунке 11 показаны результаты расчета нагрузочных характеристик модельной опоры при $P_a = 5$; $\chi = 0,6$; $L = 1,0$; $L_1 = 0,5$. Метод осевого течения

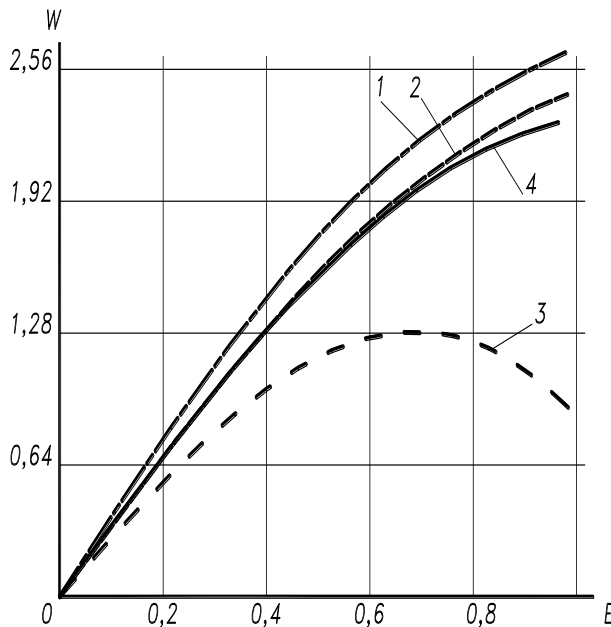


Рис. 11 – Сравнение методов расчета радиальной аэростатической опоры

(линия 1) имеет наименьшую трудоемкость аналитических преобразований и программирования, а также минимальные затраты машинного времени. Однако он дает завышенное значение нагрузочной характеристики, при больших L .

Результаты расчета методом узких колец совпадают с методом осевого течения, но имеют бóльшую трудоемкость и затраты машинного времени.

Плохой результат метода гармонической аппроксимации (линия 3) можно объяснить неудачным выбором аппроксимируемой функции P^2 . Лучший результат может дать функция $\Phi = (P \cdot H)^2$, которая слабее зависит от φ и ε .

Метод сеток (линия 4) наиболее точен, так как практически не имеет упрощающих допущений. Однако расчет нагрузочной характеристики для одного сочетания параметров модельной опоры занимал более одной минуты на *PC Pentium 4*. Для радиальной адаптивной аэростатической опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором продолжительность расчета увеличится в несколько раз. Число вариантов расчета при оптимизации адаптивной опоры по 4-8 параметрам может составлять более десяти тысяч. Поэтому рациональным применением метода сеток являются отдельные эталонные расчеты (вычислительный эксперимент). Точность метода сеток также имеет ограничения. При слишком малом шаге сетки возрастает продолжительность расчета, а его точность может даже снижаться из-за накопления вычислительных ошибок. При увеличении шага сетки продолжительность расчета уменьшается, но снижается его точность из-за погрешностей конечно-разностной аппроксимации.

Метод узких полос (линия 2) признан наиболее рациональным для практических расчётов двухрядных радиальных аэростатических опор. При $L < 1,5$ его результаты практически совпадают с методом сеток. По трудоемкости аналитических преобразований и программирования, а также по затратам машинного времени он на два порядка экономичнее метода сеток, так как не

требует итерационных циклических преобразований наперед неизвестного объема. Расчёт пассивной опоры для одного сочетания параметров занимал около одной секунды, что приемлемо для массовых расчётов.

Исследование нагрузочных характеристик радиальной адаптивной аэро-статической опоры с независимым плавающим регулятором (рисунок 10-а) проводили с использованием метода узких полос. Для опоры с зависимым плавающим регулятором (рисунок 10-б) применить метод узких полос невозможно, так как даже при отсутствии радиальной нагрузки давление воздуха во всех дросселирующих щелевых зазорах изменяется по осевой координате z . Поэтому при теоретическом исследовании опоры применяли метод осевого течения, а для оценки точности результатов расчёта – метод сеток.

Исследование корневых и частотных динамических характеристик обеих опор выполнено с использованием программы СИГО для малых динамических возмущений при отсутствии внешней нагрузки.

Результаты исследования показали возможность получения устойчивой нагрузочной характеристики, имеющей значительный диапазон отрицательных эксцентриситетов для обеих опор.

В шестой главе приведены технические решения, расчетные схемы, математические модели, вычислительные алгоритмы, а также результаты расчета, исследования и оптимизации незамкнутых и замкнутых адаптивных гидростатических направляющих с плавающими регуляторами активного нагнетания смазки, встроенными в несущие карманы.

Незамкнутая адаптивная гидростатическая направляющая с плавающими регуляторами активного нагнетания смазки, встроенными в несущие карманы, показана на рисунке 12.

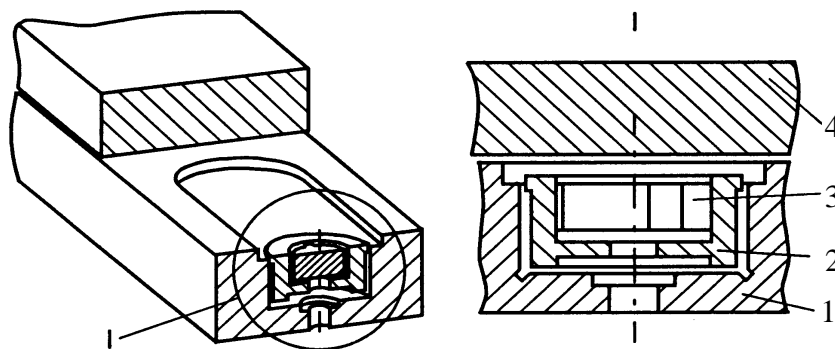


Рис. 12 – Незамкнутая адаптивная гидростатическая направляющая с плавающими регуляторами активного нагнетания смазки, встроенными в несущие карманы

В несущие карманы, выполненные на опорной поверхности неподвижного основания 1, встроены плавающие регуляторы 2 с дроссельной вставкой 3, которые осуществляют активное нагнетание смазки в несущий слой, разделяющий опорные поверхности основания 1 и подвижной части 4.

Статические и динамические характеристики незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающими регуляторами активного на-

гнетания смазки, встроенными в несущие карманы, исследованы на примере незамкнутой имитационной гидростатической опоры, расчетная схема которой показана на рисунке 13, а нагрузочная характеристика – на рисунке 15-а (сплошная линия).

При малой нагрузке f плавающий регулятор 3 неподвижен в верхнем положении, дросселирующий зазор h_1 в несущем смазочном слое больше расчетного значения h_{10} и опора имеет положительную податливость. При увеличении нагрузки зазор h_1 в несущем слое уменьшается, давление в несущем кармане и в дросселирующем зазоре h_2 регулятора повышается и достигает значения, при котором регулятор начинает смещаться вниз, увеличивая нагнетание смазки в несущий карман. Одновременно уменьшается зазор h_3 на нижнем торце регулятора и возрастает реакция ступенчатого гидростатического подвеса, который обеспечивает его осевую стабилизацию.

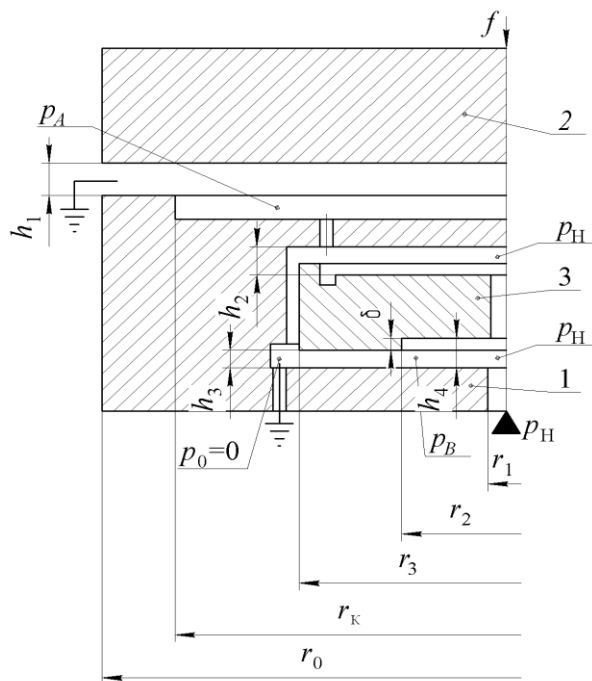


Рис. 13 – Расчетная схема незамкнутой имитационной гидростатической опоры с встроенным плавающим регулятором

Дополнительное нагнетание смазки в несущий карман приводит к вторичному смещению подвижной части 2 опоры навстречу нагрузке и зазор h_1 начинает увеличиваться. При достаточной активности регулятора вторичное изменение зазора h_1 будет больше первичного, то есть податливость опоры становится отрицательной.

После того, как смещающийся регулятор достигнет крайнего нижнего положения ($h_3 = 0$ и $h_2 = h_{\Sigma}$, где $h_{\Sigma} = \text{const}$ – суммарный осевой зазор регулятора) дополнительное нагнетание смазки в несущий карман прекращается и при увеличении нагрузки f зазор h_1 в несущем смазочном слое уменьшается, то есть опора снова имеет положительную податливость.

Теоретическое исследование статических и динамических характеристик имитационной опоры выполнено в безразмерной форме. Основными масштабами для безразмерных параметров и характеристик выбраны давление нагнетания смазки p_H , наружный радиус опоры r_0 и расчетное значение дросселирующего зазора h_{10} в несущем смазочном слое.

В дросселирующих щелевых зазорах имитационной гидростатической опоры течение смазки происходит только в радиальном направлении. Это позволило в математической модели опоры получить аналитические выражения для функций распределения давлений, которые входят в уравнения силового равновесия подвижной части опоры и плавающего регулятора, а

также в уравнения баланса расходов смазки в несущем кармане и на стыке зазоров h_3 и $h_4 = h_3 + \delta$ ступенчатого гидростатического подвеса регулятора.

Из-за нелинейной зависимости безразмерного зазора H_1 от безразмерной нагрузки F расчет нагрузочной характеристики $H_1(F)$ проводили по обратному алгоритму, вычислявшему безразмерную функцию $F(H_1)$. Для этого компьютерная программа при расчете уменьшала с малым шагом безразмерное значение зазора $H_1 = h_1/h_{10}$ от заданного максимального значения и вычисляла соответствующее значение функции $F(H_1)$ из уравнения силового равновесия подвижной части опоры. На каждом шаге программа контролировала невязку уравнения силового равновесия регулятора. Минимум невязки означал конец первого (пассивного) диапазона нагрузочной характеристики, в котором регулятор неподвижен в крайнем верхнем положении, а опора имеет положительную податливость.

Во втором (адаптивном) диапазоне нагрузок регулятор начинает смещаться вниз и зазор $H_2 = h_2/h_{10}$ возрастает, увеличивая нагнетание смазки в несущий карман. В этом диапазоне программа увеличивала с малым шагом значение H_1 от достигнутого минимума и вычисляла из уравнения силового равновесия регулятора возрастающее значение зазора H_2 до выполнения условия $H_2 = H_\Sigma = \text{const}$, соответствующего концу адаптивного диапазона. На каждом шаге программа вычисляла значение функций $F(H_1)$ и $H_2(F)$ для найденного сочетания зазоров H_1 и H_2 .

В третьем (пассивном) диапазоне нагрузок программа уменьшала значения зазора H_1 от достигнутого максимума и рассчитывала функцию $F(H_1)$ при значении дросселирующего зазора регулятора $H_2 = H_\Sigma = \text{const}$ до выполнения условия $H_1 = 0$, соответствующего контакту подвижной и неподвижной части опоры.

Энергетическую эффективность адаптивной гидростатической направляющей оценивали по суммарным потерям мощности на нагнетание смазки n_q и на перемещение направляющей n_u . Последние существенны для круговых направляющих, например для планшайбы токарно-карусельного станка при высокой частоте её вращения. Получены аналитические выражения для n_q и n_u . Из условия $d(n_q + n_u)/d\mu = 0$ получено аналитическое выражение для оптимального значения динамической вязкости смазки, при которой суммарные потери мощности минимальны.

Оптимизацию безразмерных нагрузочных и энергетических характеристик проводили методом эволюционного поиска по генетическому алгоритму с использованием комплексного критерия эффективности (2.17).

Анализ результатов расчета, частично представленных на рисунке 15-а, показал, что адаптивный диапазон нагрузок у незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающими регуляторами адаптивного нагнетания смазки, встроенными в несущие карманы, составляет 35÷40 % от её предельной нагрузочной способности, которая на 25÷30 % больше чем у

аналогичной гидростатической направляющей с пассивным нагнетанием смазки. Параметры незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей рекомендуется выбирать так, чтобы расчетная нагрузка, создаваемая весом подвижной части, соответствовала началу адаптивного диапазона, а максимальная суммарная нагрузка – его концу. Тогда во всем диапазоне изменения нагрузки направляющая будет работать с отрицательной податливостью.

Динамические характеристики незамкнутой имитационной гидростатической опоры с встроенным плавающим регулятором исследовали с использованием компьютерной программы СИГО для малых динамических отклонений нестационарных параметров от стационарного состояния, соответствующего середине адаптивного диапазона нагрузок. Установлено, что опора устойчива при значении динамического критерия $\sigma > 10$. Максимум нормированной степени устойчивости $\eta_0 = 0,66$ и затухания колебаний за период $\xi = 98\%$ получен при $\sigma \approx 13,5$.

Экспериментальное исследование незамкнутой имитационной гидростатической опоры с встроенным плавающим регулятором проведено на стенде, показанном на рисунке 14.

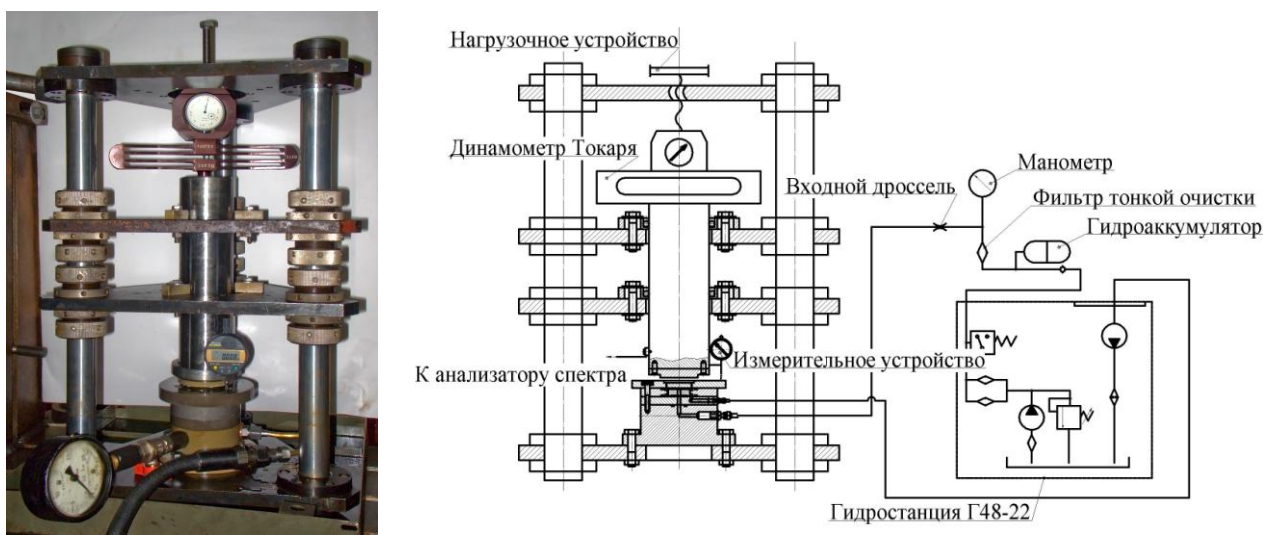


Рис. 14 – Экспериментальная установка и схема экспериментального стенда

На рисунке 15-а приведены теоретический и экспериментальный графики нагрузочной характеристики опоры, сравнение которых показывает хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение. Средне-квадратичное отклонение не превышало 18 % и объясняется разницей фактических и измеренных значений дросселирующих зазоров.

Переходный процесс в опоре исследовали с помощью анализатора спектра СП-1 и программы *ZETLab-Studio* при импульсном изменении нагрузки, которое создавали ударом резинового молотка. Установлено, что переходный процесс в адаптивном нагрузочном диапазоне нагрузочной характеристики (рисунок 15-б) является апериодическим (время затухания 0,02 с), а в пассивном диапазоне – колебательным (время затухания 0,04 с.).

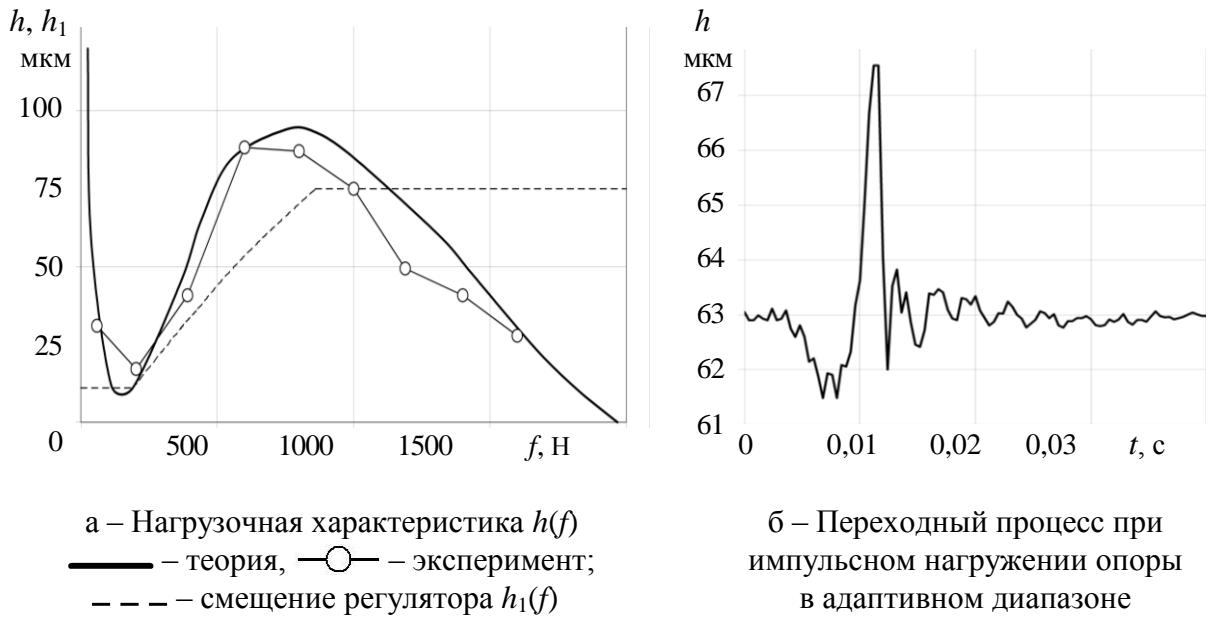


Рис. 15 – Результаты теоретического и экспериментального исследования незамкнутой осевой опоры с встроенным плавающим регулятором

Замкнутые адаптивные гидростатические направляющие с встроенными плавающими регуляторами могут быть образованы оппозитным расположением двух рассмотренных выше незамкнутых направляющих. Однако такое решение является технически сложным и неэкономичным из-за дополнительных потоков смазки в гидростатических подвесах регуляторов.

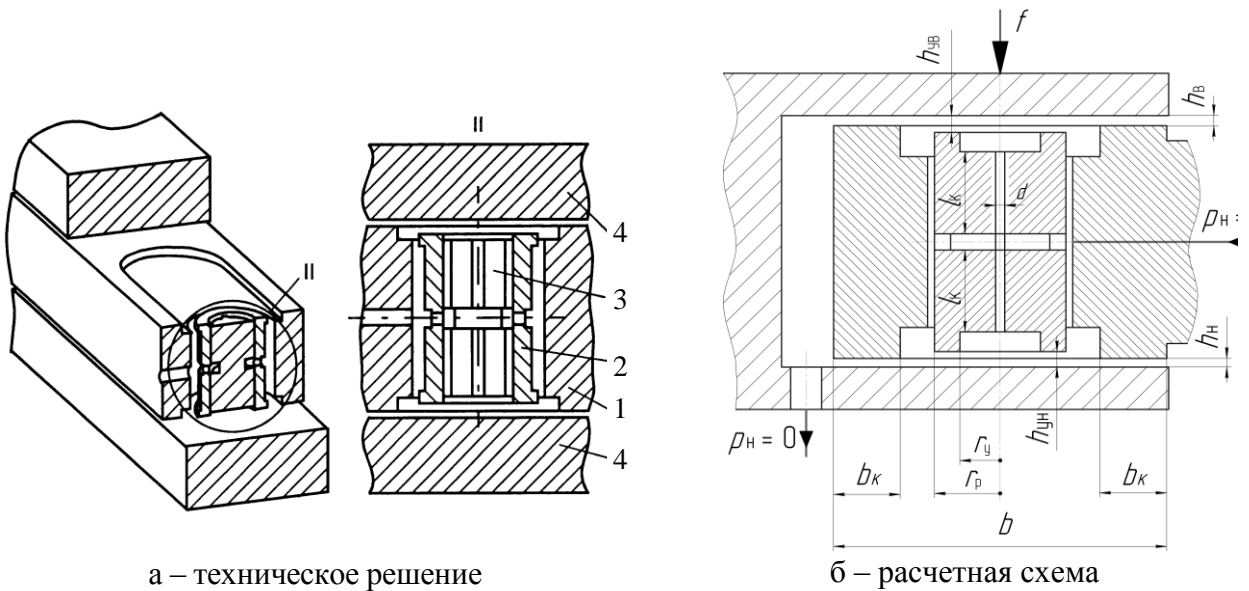


Рис. 16 – Замкнутая адаптивная гидростатическая направляющая с плавающими регуляторами активного нагнетания смазки, встроенными в оппозитные несущие карманы

На рисунке 16-а показано более совершенное техническое решение замкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающими регуляторами, встроенными в оппозитные несущие карманы. Направляющая имеет неподвижный корпус 1 с несущими карманами на опорных поверхно-

стях. Между оппозитными несущими карманами встроены плавающие регуляторы 2 с дроссельной вставкой 3. Торцы регулятора образуют дросселирующие зазоры непосредственно с опорными поверхностями подвижной части 4.

Расчетная схема направляющей приведена на рисунке 16-б. Смазка, нагнетаемая под давлением $p_i = \text{const}$, поступает через дросселирующие капиллярные каналы регулятора диаметром d_k и длиной l_k в верхний и нижний управляющие карманы радиусом r_y . Далее смазка дросселируется в несущие карманы направляющей через щелевые зазоры $h_{\text{ДА}} = h_{\text{ДС}}/2 + \dot{a}_{\text{Д}}$ и $h_{\text{ДИ}} = h_{\text{ДС}}/2 - e_{\text{Д}}$, образованные верхним и нижним торцом регулятора с поверхностями подвижной части направляющей, где $h_{\text{ДС}}$ – суммарный осевой зазор между торцами регулятора и поверхностями подвижной части, $\dot{a}_{\text{Д}}$ – осевое смещение регулятора (эксцентриситет) относительно подвижной части. Из несущих карманов смазка через щелевые зазоры несущего слоя (верхний $h_{\text{А}} = h_{\Sigma}/2 - e$ и нижний $h_{\text{И}} = h_{\Sigma}/2 + e$, где h_{Σ} – суммарный осевой зазор между рабочими поверхностями дросселирующих перемычек несущих карманов и подвижной части направляющей, \dot{a} – эксцентриситет подвижной части относительно неподвижного основания) дросселируется в дренажные каналы. Глубина управляющих и несущих карманов на два порядка больше дросселирующих щелевых зазоров $h_{\text{А}}$, $h_{\text{И}}$, $h_{\text{ДА}}$ и $h_{\text{ДИ}}$, поэтому давление смазки можно считать одинаковым по всей площади каждого кармана.

При отсутствии нагрузки f подвижная часть направляющей и регулятор находятся в центральном положении ($e = 0$ и $e_p = 0$). При нагружении подвижная часть первоначально смещается в направлении нагрузки ($e' > 0$). При этом давление смазки в верхних (нагружаемых) несущем и управляющем карманах увеличивается, а в нижних (разгружаемых) уменьшается. Разность давлений смазки в управляющих карманах смещает регулятор в направлении нагрузки ($e_p > 0$) пока не восстановится равновесие действующих на него сил. В результате смещения регулятора увеличивается нагнетание смазки в верхний (нагружаемый) несущий карман и уменьшается – в нижний (разгружаемый). При этом подвижная часть направляющей вторично смещается противоположно направлению нагрузки ($e'' < 0$). При оптимальном выборе параметров регулятора вторичное смещение больше первичного (по модулю) и при завершении переходного процесса установится отрицательный эксцентриситет подвижной части ($e = e'' + e' < 0$). С увеличением нагрузки f отрицательный эксцентриситет e возрастает (по модулю) пока нижний торец смещающегося регулятора не достигнет рабочей поверхности подвижной части ($e_p \rightarrow h_{\text{ДС}}/2$). При дальнейшем увеличении нагрузки регулятор смещается вместе с подвижной частью, податливость направляющей становится положительной, отрицательный эксцентриситет e подвижной части уменьшается (по модулю) и переходит в область положительных значений.

Расчет, исследование и оптимизацию замкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающими регуляторами, встроенными в оппо-

зитные несущие карманы, проводили по математической модели, которая после аналитического определения функций распределения давлений смазки в дросселирующих щелевых зазорах и преобразования уравнений силового равновесия подвижной части и плавающего регулятора, а также уравнений баланса расходов смазки в несущих и управляющих карманах приводится к замкнутой нелинейной системе семи алгебраических уравнений. Она позволяет определить семь неизвестных функций, зависящих от нагрузки f – эксцентриситетов подвижной части и регулятора \check{a} и \check{a}_D , давлений смазки в верхних и нижних управляющих и несущих карманах $\check{\delta}_{\check{O}\check{A}}$, $\check{\delta}_{\check{O}i}$, $\check{\delta}_{\check{E}\check{A}}$, $\check{\delta}_{\check{E}i}$ и суммарного расхода смазки q . Для большей общности результатов и сокращения числа фундаментальных переменных расчет и оптимизацию характеристик $e(f)$, $e_D(f)$ и $q(f)$ проводили в безразмерной форме, приняв за основные масштабы: давление нагнетания смазки $\check{\delta}_i$, ширину направляющей b и суммарный осевой зазор в несущем слое h_Σ .

По данной математической модели рассчитаны безразмерные функции зависимости эксцентриситетов подвижной части $\check{A}(F)$, регулятора $\check{A}_D(F)$ и расхода смазки $Q(F)$ от нагрузки, а также определена оптимальная совокупность параметров, которая обеспечивает сочетание нагрузочной и расходной характеристики, соответствующее комплексному критерию эффективности

$$\Theta = S_{\check{a}\check{a}}^\gamma / Q^{1-\gamma} \rightarrow \max ,$$

где $S_{\check{a}\check{a}}$ – площадь между осью абсцисс и графиком функции $\check{A}(F)$ в адаптивном диапазоне отрицательных эксцентриситетов; $\gamma = 0 \div 0,5$ – коэффициент сочетания нагрузочной способности и расхода смазки.

Результаты исследования нагрузочных и расходных характеристик замкнутой имитационной опоры с встроенным плавающим регулятором активного нагнетания смазки частично представлены на рисунке 17.

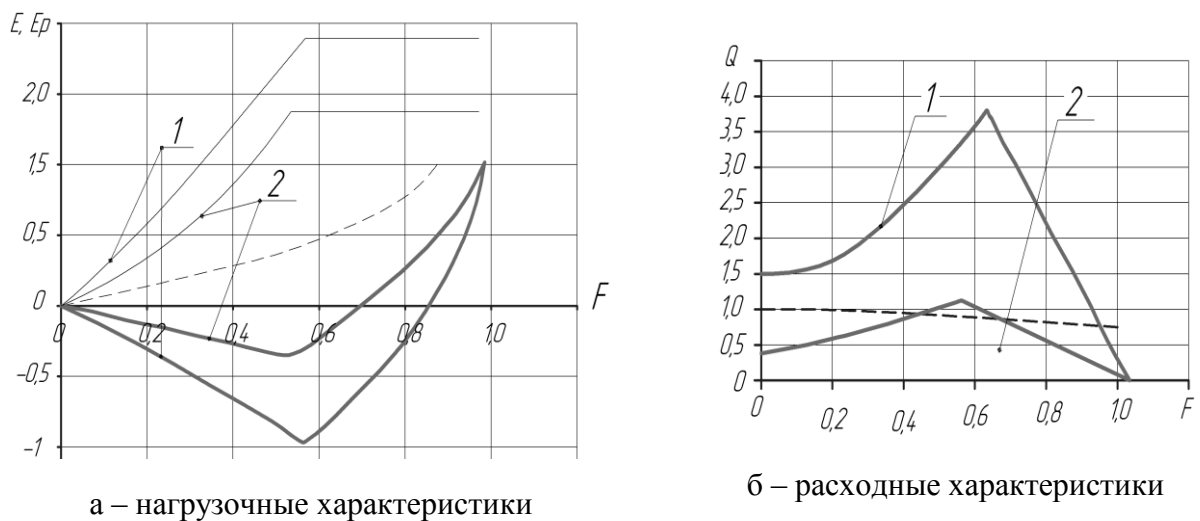


Рис. 17 – Нагрузочные и расходные характеристики замкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающими регуляторами, встроенными в опозитные несущие карманы

Сплошными жирными линиями показаны графики функций $\dot{A}(F)$, сплошными тонкими линиями – графики функции $\dot{A}_D(F)$. Штриховой линией показана нагрузочная характеристика замкнутой гидростатической направляющей с пассивным нагнетанием смазки. Линии 1 соответствуют оптимизации параметров по приоритету нагрузочной способности ($\gamma = 1$). Видно, что в этом случае направляющая может иметь нагрузочную характеристику с большим адаптивным диапазоном, который достигает 80÷85% от теоретической нагрузочной способности. В большей части этого диапазона направляющая имеет значительную и практически постоянную отрицательную податливость, а максимальное (по модулю) значение отрицательного эксцентриситета достигает 0,9. При эксцентриситете подвижной части $\dot{A} = 0,5$ нагрузочная способность направляющей с встроенным плавающим регулятором на 30÷35 % больше, чем у направляющей с пассивным нагнетанием смазки. Однако у последней максимальный расход смазки почти в 4 раза меньше.

Линии 2 на графиках соответствуют оптимизации безразмерных параметров при паритете нагрузочной и расходной характеристики ($\gamma = 0,5$). В этом случае адаптивный диапазон нагрузочной характеристики уменьшается, но все же остается значительно лучше, чем у пассивной направляющей. Расход смазки у адаптивной направляющей при этом значительно снижается и становится меньше, чем у пассивной.

В седьмой главе рассмотрены расчетные схемы, математические модели, вычислительные алгоритмы, результаты теоретического и экспериментального исследования шпиндельных узлов и направляющих с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами, методы их оптимального проектирования, техническое решение разработанных опытно-промышленных шпиндельных узлов, результаты их испытания и практического применения.

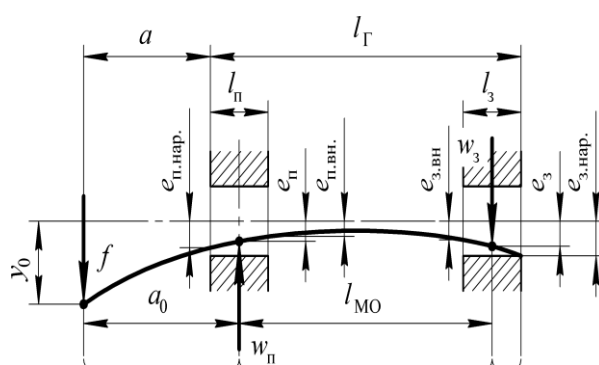


Рис. 18 – Расчетная схема шпиндельного узла с бесконтактными адаптивными опорами при максимальной нагрузке

На рисунке 18 показана расчетная схема шпиндельного узла с адаптивными гидростатическими или аэростатическими опорами. В математической модели узла шпиндель рассматривали как упругую балку на двух нелинейно-податливых опорах, нагруженную на переднем конце радиальной силой f , которая вызывает изгиб шпинделя и его перекося из-за изменения радиальных эксцентриситетов $e_п$ – в передней и $e_з$ – в задней опоре.

Максимально допустимую нагрузку f_{\max} определяли по условию отсутствия кромочного контакта шпинделя в передней и задней опорах. Установлено, что значение f_{\max} экстремально зависит от осевых размеров шпиндельного узла и опор. Оптимальные размеры для адаптивных гидростатических опор

$l_{\bar{a}} = (6 \div 7) \cdot d_{\bar{i}}$, $l_{\bar{i}} = (0,8 \div 0,9) \cdot d_{\bar{i}}$ и $l_{\bar{c}} \leq l_{\bar{i}}$, где d – диаметр опорной шейки шпинделя (меньшие значения соответствуют большему давлению нагнетания смазки). У шпиндельных узлов с адаптивными аэростатическими опорами, которые имеют на порядок меньшую удельную нагрузочную способность из-за малого давления нагнетания смазки, влияние изгиба шпинделя мало и оптимальные размеры имеют значения $l_{\bar{a}} = (7 \div 8) \cdot d_{\bar{i}}$, $l_{\bar{i}} = (0,8 \div 1) \cdot d_{\bar{i}}$, $l_{\bar{c}} \approx l_{\bar{i}}$.

Результаты расчетов показывают, что адаптивные гидростатические шпиндельные опоры позволяют за счет отрицательной податливости в $2 \div 3$ раза увеличить значение f_{\max} по сравнению с аналогичными пассивными опорами. На переднем конце шпинделя отрицательная податливость сохраняется при $f < (0,2 \div 0,3) \cdot f_{\max}$, а отрицательные смещения при $f < (0,4 \div 0,5) \cdot f_{\max}$.

При одинаковом значении f_{\max} применение адаптивных гидростатических опор по сравнению с пассивными позволяет уменьшить: диаметр шпинделя в $1,3 \div 1,5$; рабочий зазор в $1,4 \div 1,6$; динамическую вязкость смазки в $2 \div 2,5$ раза. Это дает снижение потерь мощности в $2,5 \div 3$ раза до значений, сопоставимых с высокоскоростными подшипниками качения.

С учетом полученных данных разработана методика расчета и подсистемы САПР для оптимального проектирования шпиндельных узлов с адаптивными гидростатическими опорами.

Экспериментальную проверку теоретических результатов проводили в лабораторных и производственных условиях. На рисунке 19 показан экспериментальный шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами, имеющими встроенный плавающий кольцевой регулятор (рисунок. 6-а).

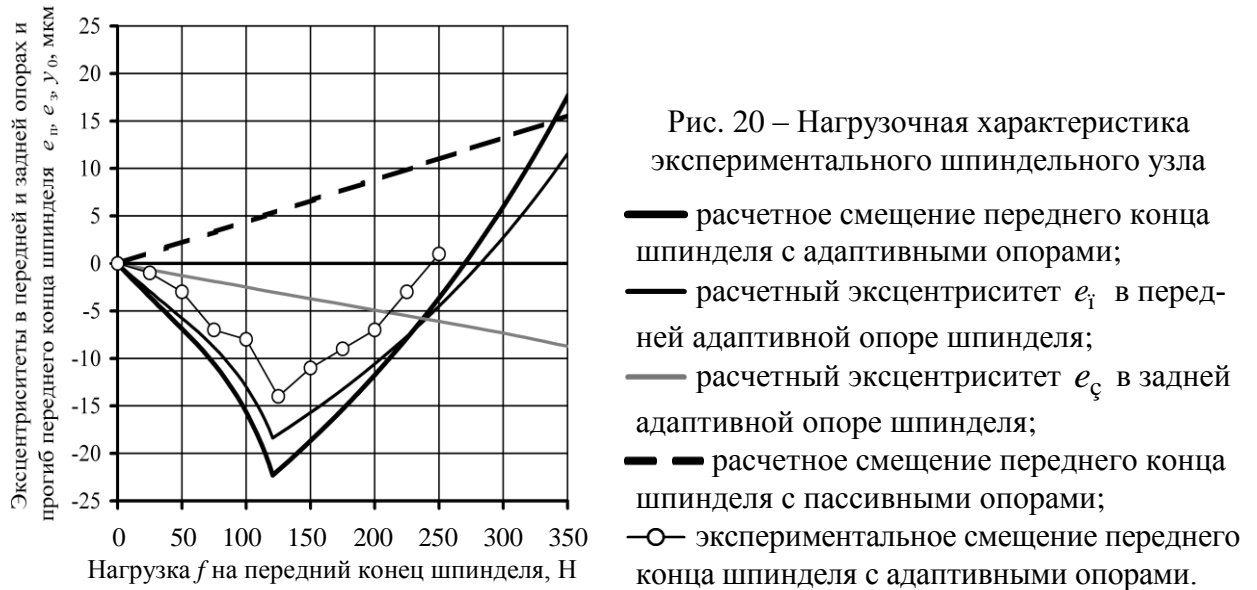


Рис. 19 – Экспериментальный шпиндельный узел и детали адаптивной гидростатической опоры с встроенным плавающим кольцевым регулятором

Графики теоретических и экспериментальных значений смещения y_0 переднего конца шпинделя и расчетных эксцентриситетов $e_{\bar{i}}$ – в передней и $e_{\bar{c}}$ – в задней опорах шпиндельного узла, приведенные на рисунке 20, показывают полное качественное и удовлетворительное количественное совпадение.

Экспериментальные исследования, проведенные на модернизированном вертикально-фрезерном станке мод. 612 и токарных станках мод. ТВ-320 и 16К20, оснащенных шпиндельным узлом с адаптивными гидростатическими опорами, показали возможность повышения точности обработки торцевыми фрезами в $1,5 \div 2$ раза, концевыми фрезами в $2 \div 4$ раза, черногого точе-

ния в 2÷5 раз. На модернизированном токарном станке 16К20 успешно испытана гидромеханическая система динамического дробления сливной стружки за счет осевой осцилляции шпинделя в гидростатических опорах.



Результаты проведенных исследований реализованы в разработанных по договорам с предприятиями и организациями руководящих технических материалах и подсистемах САПР для оптимального проектирования шпиндельных узлов с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами.

По договорам с предприятиями и организациями выполнены следующие опытно-промышленные разработки:

1. Для планшайбы тяжелого токарно-карусельного станка мод. 1А525МФ3 разработана термоустойчивая конструкция замкнутых гидростатических направляющих с встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки (АО «Красяжмаш», г. Красноярск, 2006 г.).

2. Для двухшпиндельного токарного ГПМ мод. МТД-901 с адаптивно-программным управлением разработан и успешно испытан шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами и динамометрическими преобразователями (НИТИ, г. Саратов, 1993 г.). Для этого станка разработан также проект шпиндельного узла с адаптивными гидростатическими опорами, имеющими пьезоэлектрические регуляторы активного нагнетания смазки с обратной связью по давлению в несущих карманах.

3. Разработаны магнитно-аэростатические опоры мотор-шпинделя к станку для изготовления малоразмерных сверл (завод «Арсенал», г. Киев, 1991 г.);

4. Для специального фрезерного станка с ЧПУ разработан и испытан в лабораторных условиях высокоскоростной мотор-шпиндель с аэростатическими опорами (ФГУП «Красмаш», г. Красноярск, 1990 г.).

5. Для тяжелого расточно-фрезерного станка НС421МФ4 разработана ускоряющая шпиндельная головка с адаптивными гидростатическими опорами (ПО «Тяжстанкогидропресс», г. Новосибирск, 1989 г.).

6. Разработаны и использованы в производственных условиях внутришлифовальные шпиндельные головки АШГ 1, АШГ 2 и АШГ 3 с адаптив-

ными аэростатическими опорами и различными приводами вращения шпинделя к станку ЗК229А (НПО «Сибцветметавтоматика», г. Красноярск, 1987 г.).

7. Для кругло-шлифовального станка особо высокой точности ЗУ10А разработана и успешно испытана бабка изделия с гидростатическими опорами шпинделя (СПО «Комунарас», г. Вильнюс, 1986 г.).

8. Для вертикального фрезерно-сверлильно-расточного станка ОЦ-1И разработана шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами – динамометрическими преобразователями (ИНИТИ, г. Ижевск, 1983 г.).

9. Для серийной модернизации токарно-винторезных станков 16К20 разработан и успешно испытан шпиндельный узел с адаптивными гидростатическими опорами (ВФ СКБ «Индикатор», г. Выборг, 1980 г.).

10. Для токарного станка высокой точности ФТ-12 разработан шпиндельный узел и задняя бабка с гидростатическими опорами шпинделя и пиноли (СКТОС завода им. В.И. Ленина, г. Фрунзе, 1980 г.).

11. Разработаны и использованы в производственных условиях фрезерные головки с гидростатическими опорами шпинделя для планетарного фрезерования шпоночных пазов немерными концевыми фрезами на тяжелом токарном станке (ПО «Сибтяжмаш», г. Красноярск, 1974 и 1979 г.).

12. Для модификации зубофрезерного станка 5306П разработаны гидростатические опоры фрезерного шпинделя, шпинделя изделия и червяка делительной червячной передачи. (Станкостроительный завод им. 40 лет Октября, г. Вильнюс, 1977 г.).

13. Для модернизации шлифовального автомата ЛЗ-154 и внутришлифовального полуавтомата ЛЗ-105 разработаны шпиндельные узлы с гидростатическими опорами (ГПЗ № 14, г. Прокопьевск, 1977 г.).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Создана и апробирована методология теоретического исследования и параметрической оптимизации статических и динамических характеристик адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих, основанная на использовании фундаментальных положений гидродинамической теории смазки и теории автоматического управления, адекватных интегрально-дифференциальных математических моделей, эффективных методов поисковой оптимизации и вычислительных алгоритмов.

2. Показана необходимость и разработаны методы уточненного расчета:

– оптимальных параметров и расходных характеристик дросселирующих сопротивлений с простыми и кольцевыми диафрагмами, капиллярными и щелевыми каналами;

– упругой и расходной характеристики эластичных шайб с дросселирующей диафрагмой;

– податливости эластичных пластин и оболочек, используемых в регуляторах активного нагнетания смазки адаптивных гидростатических и аэростатических опор.

- допустимой пульсации давления нагнетаемой смазки и гасителя пульсации, позволяющего на порядок уменьшить биение шпинделя;

- допустимых периодических погрешностей формы рабочих поверхностей в осевых и радиальных гидростатических опорах, исходя из заданной точности вращения шпинделя.

3. Разработан метод расчета потерь мощности и условий появления кавитации в высокоскоростных гидростатических опорах, который совпадает с экспериментальными данными при окружной скорости шпинделя до 60 м/с.

Результаты расчета показывают:

- при окружной скорости шпинделя более 10÷15 м/с значительно увеличивается температура и уменьшается динамическая вязкость смазки, что вызывает падение давления в несущих карманах и снижение нагрузочной способности; для уменьшения этого эффекта необходимо принимать значение коэффициента гидравлической настройки $\chi = 0,7 \div 0,75$ (обычно $\chi = 0,5$);

- учет циркуляции смазки по глубине несущих карманов в 4 раза увеличивает значение фрикционных потерь мощности, которые становятся сравнимыми с потерями на дросселирующих перемычках;

- турбулентное течение смазки в несущих карманах увеличивает фрикционные потери мощности, которые при $u > 25 \div 30$ м/с становятся доминирующими и для их снижения необходимо увеличивать ширину дросселирующих перемычек до $0,2 \cdot d$ и глубину кармана до $0,1 \cdot d$, где d – диаметр шпинделя или использовать опоры, не имеющие несущих карманов;

- кавитация, вызываемая окружным переносом смазки, снижает точность вращения шпинделя и при проектировании высокоскоростных гидростатических шпиндельных опор необходимо использовать полученное условие отсутствия кавитации;

4. Определены и защищены охраноспособными документами, имеющими мировой приоритет, технические решения для адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих, имеющих встроенные регуляторы активного нагнетания смазки и динамометрические преобразователи, а также для шпиндельных узлов и направляющих с такими опорами, которые сочетают простоту и технологичность конструкции с высокими эксплуатационными показателями.

Новизна технических решений подтверждена 11 патентами РФ и 47 авторскими свидетельствами СССР на способы, изобретения и полезные модели.

5. На основе разработанных интегрально-дифференциальных математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов теоретически получены и экспериментально подтверждены следующие основные результаты исследования и параметрической оптимизации нагрузочных, энергетических и динамометрических характеристик адаптивных гидростатических опор с встроенными регуляторами активного нагнетания смазки и динамометрическими преобразователями:

– адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с встроенными регуляторами активного нагнетания смазки превосходят аналоги по нагрузочной способности на $20\div 40\%$, по значению отрицательного эксцентриситета в $1,2\div 1,5$ раза, по быстроходности в $2\div 2,5$ раза и при одинаковой с пассивными опорами нагрузочной способности позволяют уменьшить диаметр шпинделя в $1,3\div 1,5$, рабочий зазор в $1,4\div 1,6$, динамическую вязкость смазки в $2\div 2,5$ раза, что снижает суммарные потери мощности в $2,5\div 3$ раза;

– расчет динамических характеристик гидростатических опор без учёта сжимаемости смазки в несущих карманах и других междроссельных полостях приводит к количественно и качественно неверным результатам;

– устойчивость адаптивных гидростатических опор с отрицательной податливостью обеспечивают значения динамического критерия $\sigma > 40\div 50$ и комбинированное (активно-пассивное) внешнее дросселирование смазки с дополнительными демпфирующими дросселями на входе несущих карманов или смазочного слоя, сопротивление которых составляет $15\div 20\%$ от сопротивления регулятора;

– чувствительность адаптивной гидростатической опоры как динамометрического преобразователя составляет $(2\div 2,5)\cdot 10^3$ Н/МПа и быстродействие $30\div 40$ Гц при фазовом сдвиге 30° .

6. На основе разработанных интегрально-дифференциальных математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов теоретически получены и экспериментально подтверждены следующие основные результаты исследования адаптивных аэростатических опор:

– оптимальный выбор параметров опоры позволяет получить нагрузочную характеристику с 60% адаптивным диапазоном, в котором эксцентриситет шпинделя имеет отрицательное значение;

– устойчивость опоры при отрицательной податливости обеспечивает значение динамического критерия $\sigma > 90$ и двойное внешнее дросселирование с использованием дополнительных демпфирующих дросселей на входе несущего слоя, оптимальное сопротивление которых составляет $25\div 30\%$ от сопротивления активного регулятора нагнетания воздуха;

– чувствительность адаптивной аэростатической опоры как динамометрического преобразователя составляет $(2\div 3)\cdot 10^3$ Н/МПа и быстродействие $40\div 60$ Гц при фазовом сдвиге 30° .

7. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что разработанные адаптивные гидростатические направляющие:

– имеют 70% адаптивный диапазон нагрузочной характеристики с наибольшим (по модулю) отрицательным эксцентриситетом $\varepsilon = 0,8$;

– на $30\div 40\%$ превосходят по нагрузочной способности и экономичности пассивные гидростатические направляющие;

– обеспечивают меньший нагрев смазки и температурные деформации.

8. Апробирована концепция повышения точности и производительности металлорежущих станков различного технологического назначения, на

основе комплексного использования функциональных возможностей адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих для компенсации упругих деформаций, синхронной диагностики сил резания и адаптивного управления режимами обработки, дробления сливной стружки и др.

Экспериментально установлена возможность повышения точности торцевого фрезерования в $1,5 \div 2$ раза, контурного фрезерования до 3 раз, черного и внутреннего шлифования в $2 \div 5$ раз за счет отрицательной податливости адаптивных гидростатических опор.

9. По договорам с предприятиям и организациям разработаны:

– руководящие технические материалы и подсистемы САПР для оптимального проектирования шпиндельных узлов с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами;

– спроектированы и успешно испытаны опытные конструкции шпиндельных узлов с адаптивными гидростатическими и аэростатическими опорами для новых и модернизируемых металлорежущих станков.

10. Результаты исследований и разработок внедрены в учебный процесс СФУ и использованы: в лекционных курсах, лабораторных и практических занятиях, курсовых и дипломных проектах студентов, а также в диссертационных работах аспирантов. С участием автора по данной тематике выполнены и защищены более 100 исследовательских дипломных проектов и 15 кандидатских диссертаций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

В изданиях по списку ВАК

1. Ереско, С. П. Функциональные возможности и проблематика применения адаптивных гидростатических опор в шпиндельных узлах металлорежущих станков / С. П. Ереско, **С. Н. Шатохин** // «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование: научный журнал ИрГУПС», 2009, № 3 (23). – С.148-154.

2. **Шатохин, С. Н.** Замкнутые гидростатические направляющие с встроенными плавающими регуляторами адаптивного нагнетания смазки / С. Н. Шатохин, С. С. Шатохин, Л. В. Шатохина // «Технология машиностроения». 2009, № (в печати).

3. Демин, В.Г. Проектирование адаптивных гидростатических опор для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков / В. Г. Демин, Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // «Технология машиностроения». 2008, № 9. – С. 27-30.

4. **Шатохин, С. Н.** Адаптивные бесконтактные опоры скольжения с плавающими регуляторами нагнетания смазки (гидростатические, аэростатические) для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков / С. Н. Шатохин, Я. Ю. Пикалов, В. Г. Демин // «Технология машиностроения», 2006, № 9. – С. 29-33.

5. **Шатохин, С. Н.** Расчет и минимизация температурных деформаций планшайбы с гидростатическими направляющими / С. Н. Шатохин, Л. П. Шатохина, В. Г. Демин, Я. Ю. Пикалов // «Станки и инструмент», 2006, № 7. – С. 16-19.
6. Пикалов, Я. Ю. Конструкции и характеристики адаптивных гидростатических шпиндельных опор с плавающим регулятором нагнетания смазки / Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // «СТИН», 2006, № 5. – С. 18-22.
7. Титов, А. С. Анализ тепловых деформаций в токарно-карусельных станках с гидростатическими направляющими планшайбы / А. С. Титов, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // «Станки и инструмент», 2004, № 7. – С. 13-16.
8. Курзаков, А. С. Анализ методов теоретического исследования и расчета адаптивных аэростатических шпиндельных опор / А. С. Курзаков, **С. Н. Шатохин** // «Станки и инструмент», 2003, № 5. – С. 7-11.
9. **Шатохин, С. Н.** Проектирование адаптивных гидростатических подшипников / С. Н. Шатохин, В. П. Зайцев, С. А. Ярошенко // «Вестник машиностроения», 1992, № 6-7. – С.25-28.
10. **Шатохин, С. Н.** Влияние высокой частоты вращения на эксплуатационные характеристики адаптивного гидростатического подшипника. / С. Н. Шатохин, С. А. Ярошенко // «Проблемы машиностроения и надежности машин», 1990, № 2. – С. 38-43.
11. **Шатохин, С. Н.** Расчет и минимизация потерь мощности в гидростатических подшипниках / С. Н. Шатохин // «Станки и инструмент», 1989, № 9. – С. 16-19.
12. **Шатохин, С. Н.** Влияние некруглости опорных поверхностей на точность радиальных гидростатических подшипников шпинделя / С. Н. Шатохин, В. С. Секацкий // «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», 1988, № 7, – С. 127-131.
13. **Шатохин, С. Н.** Функциональные возможности радиальной адаптивной гидростатической опоры / С. Н. Шатохин, В. А. Коднянко, В. П. Зайцев // «Машиноведение», 1988, № 4, – С. 85-91.
14. **Шатохин, С. Н.** Расчет и оптимизация нагрузочных характеристик шпиндельных узлов с гидростатическими подшипниками / С. Н. Шатохин // «Станки и инструмент». 1987, № 3. – С. 13-14.
15. **Шатохин, С.Н.** Влияние пульсации давления масла в гидростатических шпиндельных опорах станка на точность обработки / С.Н. Шатохин, В.С. Секацкий // «Станки и инструмент», 1985, № 12. – С. 9.
16. Пикалов, Ю. А. Шпиндельные аэростатические подшипники секционного типа / Ю. А. Пикалов, **С. Н. Шатохин**, В. А. Коднянко // «Станки и инструмент», 1985, № 4. – С. 22-23.
17. **Шатохин, С. Н.** Радиальная газостатическая опора-уплотнение с оппозитной внутренней компенсацией расхода газа / С. Н. Шатохин, В. А. Коднянко // «Трение и износ», 1984, том V, № 6. – С. 1109-1111.
18. **Шатохин С. Н.** Улучшение динамических характеристик газостатических опор / С. Н. Шатохин, В. А. Коднянко // «Машиноведение», 1983, № 6. – С. 100-104.

19. Коднянко, В. А. Расчет и исследование осевой газостатической опоры с эластичными компенсаторами / В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // «Машиноведение», 1983, № 1. – С. 93-98.

20. **Шатохин, С. Н.** Улучшение динамических характеристик газостатических опор / С. Н. Шатохин, В. А. Коднянко // «Машиноведение», 1983, № 6. – С. 100-104.

21. Коднянко, В. А. Расчет и исследование осевой аэроэластической опоры с эластичными компенсаторами / В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // «Машиноведение», 1983, № 1. – С. 107-112.

22. Коднянко, В. А. Радиальный газостатический подшипник с активным регулированием расхода газа эластичными компенсаторами / В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин** // «Машиноведение», 1981, № 5. – С. 107-112.

23. **Шатохин, С. Н.** Нагрузочные и расходные характеристики осевой газостатической опоры с активной компенсацией расхода газа / С. Н. Шатохин, В. А. Коднянко // «Машиноведение». 1980, № 6. – С. 108-112.

24. **Шатохин, С. Н.** Расчет радиальных газостатических опор с наддувом через компенсирующие сопла / С. Н. Шатохин // «Вестник машиностроения». 1979, № 3.

25. Коднянко, В. А. Расчет характеристик радиальных секционных аэроэластических опор с дренажными каналами / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // «Станки и инструмент», 1978, № 5, – С. 22-23.

26. Коднянко, В. А. Исследование динамики газостатической опоры с двойным дросселированием газа в магистрали нагнетания / В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин** // «Машиноведение», 1978, № 6. – С. 90-95.

27. **Шатохин, С. Н.** Новые возможности адаптивного управления / С. Н. Шатохин // «Машиностроитель». 1977, № 4. – С. 18.

28. Петровский, Э. А. Планетарные шпиндельные головки с гидростатическими опорами для фрезерования точных пазов / Э. А. Петровский, **С. Н. Шатохин** // «Станки и инструмент», 1973, № 9. – С. 17-19.

29. Какойло, А. А. Влияние погрешностей угла профиля резьбы на работоспособность гидростатической передачи винт-гайка / А. А. Какойло, Г. В. Фокин, **С. Н. Шатохин** // «Станки и инструмент», 1968, № 8.

30. Пуш, В. Э. Об абсолютной устойчивости гидростатического подпятника / В. Э. Пуш, Ю. П. Мочаев, **С. Н. Шатохин** // «Вестник машиностроения», 1969, № 3.

В других центральных и региональных изданиях

31. Ереско, С. П. Встроенный двухпоточный плавающий регулятор для адаптивного нагнетания смазки в оппозитные несущие карманы замкнутых гидростатических направляющих / С. П. Ереско, **С. Н. Шатохин**, Л. В. Шатохина, С. С. Шатохин // «Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал». № 2. Братск: ГОУ ВПО "БрГУ", 2009. – С. 16-19.

32. **Шатохин, С. Н.** Гидростатический подшипник / С. Н. Шатохин Я. Ю. Пикалов // «Изобретатели машиностроению», 2007, № 1 (40), – С. 4.

33. Пикалов, Я. Ю. Динамические характеристики адаптивной гидростатической шпиндельной опоры с плавающим кольцевым регулятором / Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // «Вестник Ассоциации выпускников КГТУ», Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2007, № 3. – С. 141-148.

34. Демин, В. Г. Повышение термо-устойчивости планшайбы с гидростатическими направляющими / В. Г. Демин, Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // «Вестник Красноярского государственного технического университета», Серия «Машиностроение», Вып. 36. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004, – С. 93-100.

35. Курзаков, А. С. Сравнительный анализ адаптивных газостатических шпиндельных опор / А. С. Курзаков, **С. Н. Шатохин** // «Вестник Ассоциации выпускников КГТУ», Вып. 4. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001.

36. Курзаков, А. С. Выбор метода теоретического исследования и расчета аэростатических шпиндельных опор активного типа с плавающим кольцевым регулятором / А. С. Курзаков, **С. Н. Шатохин** // Конструкторско-технологическая информатика – 2000: Труды IV международного конгресса, М.: Изд-во «Станкин», 2000, Т.1. – С. 318-319.

37. Красикова, Т. Ю. Радиальная гидростатическая опора с плавающим кольцевым регулятором / Т. Ю. Красикова, **С. Н. Шатохин** // «Вестник Красноярского государственного технического университета», Красноярск: ИПЦ КГТУ, 1997. – С. 79-84.

38. Красикова, Т. Ю. Адаптивная гидростатическая шпиндельная опора с плавающим регулятором / Т. Ю. Красикова, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // В кн. «Гидравлические машины различного технологического назначения», Красноярск: ИПЦ КГТУ, 1997.

39. Красикова, Т. Ю. Исследование статических характеристик адаптивной гидростатической опоры с плавающим кольцевым регулятором./ Т. Ю. Красикова, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Перспективные материалы и конструкции», Вып. 4. Красноярск: САА, 1998.

40. **Шатохин, С.Н.** Шпиндельный узел станка со специальным выполнением сопел регуляторов расхода смазки / С. Н. Шатохин, С. А. Ярошенко // Инф. ЦНТИ, № 242-95, Серия Р 55-03.11, Красноярск: ЦНТИ, 1995.

41. **Шатохин, С.Н.** Потери мощности, кавитация и нагрев смазки в высокоскоростных шпиндельных гидростатических подшипниках / С.Н. Шатохин // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления смазки (гидростатические, аэростатические)» Под ред. С.Н. Шатохина. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1989. – С. 63-78.

42. **Зайцев, В. П.** Исследование и расчет радиальных адаптивных гидростатических подшипников-преобразователей / **В. П. Зайцев**, **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления смазки (гидростатические, аэростатические)» Под ред. С. Н. Шатохина // Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1989. – С. 104-120.

43. **Шатохин, С. Н.** Расчет нагрузочных характеристик и оптимизация размеров шпиндельных узлов с аэростатическими подшипниками / С. Н. Шатохин, В. И. Шахворостов // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления смазки (гидростатические, аэростатические)» Под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1989. – С. 134-145.
44. Секацкий, В. С. Точностные характеристики шпиндельных гидростатических подшипников / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Трение и смазка в машинах», Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 100-101.
45. Секацкий, В. С. Гаситель пульсации давления жидкости в гидросистемах / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // Инф. ЦНТИ, № 334-83, Красноярск: ЦНТИ, 1983. – 3 с.
46. Коднянко, В. А. Податливость несущего газового слоя в радиальном газостатическом подшипнике с активной компенсацией расхода газа / В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин** // Рукопись деп. НИИМАШ, М.: НИИМАШ, 1982, № 79, МШ-Д82. – 12 с.
47. Секацкий, В.С. Влияние частоты вращения на осевое биение незамкнутой гидростатической опоры с перекосом несущих поверхностей / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // Рукопись деп. НИИМАШ. 1982, № 79, МШ-Д82. – 8 с.
48. Секацкий, В. С. Исследование точностных характеристик шпиндельных узлов с гидростатическими опорами / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования и автоматизация технологических процессов в машиностроении», М.: Изд-во «Станкин», 1980. – С. 13-18.
49. Секацкий, В. С. Влияние погрешностей несущих поверхностей гидростатической опоры на точность вращения / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Гидростатический принцип смазки – метод повышения качества и долговечности продукции», Хабаровск: ЦНТИ, 1980, – С. 19-22.
50. Секацкий, В.С. Исследование точностных характеристик шпиндельных узлов на гидростатических опорах. / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // В сб. «Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования и автоматизация технологических процессов в машиностроении». М.: Изд-во «Станкин», 1980. – С. 13-18.
51. Пикалов, Ю. А. Газостатическая опора с активной компенсацией расхода / Ю.А. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Научные труды ЧГУ», Челябинск: ЧГУ, 1978, – С. 43-46.
52. Коднянко, В. А. Исследование газостатических опор с двойным дросселированием газа / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления» Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977, – С. 120-130.
53. Коднянко, В. А. Методика расчета и анализ динамики осевой газостатической опоры / В.А. Коднянко, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С. 110-120.

54. Титов, В. А. Фрезерные головки с гидростатическим приводом микро-перемещений для обработки точных пазов / В. А. Титов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С. 61–67.

55. **Шатохин, С.Н.** Аперiodическая устойчивость и статические характеристики гидростатических опор с отрицательной податливостью / С.Н. Шатохин, А.Ф. Коробейников // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Вып. 2 под ред. С.Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С. 57-70.

56. **Шатохин, С. Н.** Универсальная форма записи основных соотношений гидродинамической теории смазки / С. Н. Шатохин // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С. 5-18.

57. Коднянко, В.А. Исследование газостатической опоры с регулятором расхода / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С.130-139.

58. Курешов, В. А. Система адаптивного управления для токарных станков с гидростатическими опорами шпинделей / В. А. Курешов, Э. А. Петровский, С. Н. Шатохин // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления». Вып. 2 под ред. С. Н. Шатохина // Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1977. – С. 147-158.

59. Коднянко, В. А. Сравнительный анализ жесткости радиальных газостатических подшипников / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // Рукопись деп. НИИМАШ, М.: НИИМАШ, 1977, № 2-77. – 10 с.

60. Гузов, В. Ф. Система гидростатической смазки опор нижнего черпакового барабана и подчерпаковых роликов 250-литровой драги / В. Ф. Гузов, А. К. Обеднин, А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // «Колыма», 1976, № 1. – С. 5-7.

61. Тюриков, А. С. Метод расчета радиального гидростатического подшипника ступенчатого типа с учетом влияния гидродинамического эффекта / А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», под ред. С.Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 7-16.

62. **Шатохин, С. Н.** Динамические характеристики упорного ступенчатого гидростатического подшипника / С. Н. Шатохин // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 61-67.

63. **Шатохин, С. Н.** Нелинейный анализ вынужденных колебаний ступенчатого гидростатического подпятника / С. Н. Шатохин, А. С. Тюриков // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 50-61.

64. Тюриков, А. С. Расчет и оптимизация радиального газового подвеса ступенчатого типа / А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 98-110.

65. **Шатохин, С. Н.** Оптимизация параметров радиального газового подвеса с одним и двумя рядами дросселирующих сопел / С.Н. Шатохин, Л.П. Шатохина // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления» Под ред. С.Н. Шатохина // Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 110-120.

66. Гузов, В. Ф. Дифференциальные уравнения давлений в тонком слое вязкопластичной смазки при неоднородных граничных условиях для скоростей течения (плоская задача) / В. Ф. Гузов, **С. Н. Шатохин**, Л. П. Шатохина // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Под ред. С. Н. Шатохина. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 121-127.

67. Гузов, В. Ф. Расходные характеристики капилляра при различных уравнениях реологического состояния вязкопластичной смазки / В. Ф. Гузов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления», Под ред. С. Н. Шатохина. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 136-142.

68. Тюриков, А. С. Упорные подшипники ступенчатого типа с внешним источником давления смазки / А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин**, Ю. А. Пикалов // Инф. ЦНТИ, Красноярск: ЦНТИ, 1974, № 87.

69. Петровский, Э. А. Исследование и расчет гидростатического подшипника, работающего в режиме уплотнения / Э. А. Петровский, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления». Под ред. С.Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 29-45.

70. **Шатохин, С. Н.** Гидростатические опоры в адаптивных системах металлорежущих станков / С. Н. Шатохин, В. Е. Редькин, А. Ф. Коробейников, В. К. Фатькин // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления» Под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 67-80.

71. **Шатохин, С. Н.** Оптимизация параметров радиального газового подвеса с одним и двумя рядами дросселирующих сопел / С. Н. Шатохин, Л. П. Шатохина // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления». Под ред. С. Н. Шатохина, Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 110-121.;

72. Гузов, В. Ф. Дифференциальные уравнения давлений в тонком слое вязкопластичной смазки при неоднородных граничных условиях для скоростей течения (плоская задача) / В. Ф. Гузов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления». Под ред. С. Н. Шатохина // Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1974. – С. 121-127.

73. **Шатохин, С. Н.** Расчет характеристик радиальных газовых подвесов / С. Н. Шатохин // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 60-78.

74. Титов, В.А. Стенд для экспериментального исследования опор скольжения с газовой смазкой / В. А. Титов, А. С. Тюриков, Б. Н. Ходырев, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1973. – С. 102-110.

75. **Шатохин, С. Н.** Использование метода гармонической линеаризации при динамическом анализе гидростатических опор / С. Н. Шатохин //

В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1973. – С. 137-146.

76. Тюриков, А. С. Гидростатические подшипники ступенчатого типа для шпинделей прецизионных станков. / А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 110-115.

77. **Шатохин, С. Н.** Расчет характеристик ступенчатого гидростатического подпятника, оптимального по жесткости. / С. Н. Шатохин, Г. Н. Писарев // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973, – С. 96-102.

78. **Шатохин, С. Н.** Оптимизация параметров радиального газового подвеса с кольцевыми дросселирующими щелями / С. Н. Шатохин, Л. П. Шатохина // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 79-86.

79. Агишев, Г. Г. Метод расчета реостатических опор скольжения / Г. Г. Агишев, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973, – С. 165-175.

80. Петровский, Э. А. Гидростатические опоры шпинделя планетарной головки пазофрезерного станка / Э. А. Петровский, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 121-130.

81. **Шатохин, С. Н.** К расчету гидростатических опор с учетом зависимости вязкости смазки от давления и температуры / С.Н. Шатохин // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В.В. Летуновского, В.Е. Редькина и С.Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973, – С. 130-137.

82. **Шатохин, С. Н.** Расчет характеристик ступенчатого гидростатического подпятника, оптимального по жесткости / С. Н. Шатохин, Г. Н. Писарев // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973 – С. 96-102.

83. Тюриков, А. С. Гидростатические подшипники ступенчатого типа для шпинделей прецизионных станков / А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973, – С. 110-115.

84. Петровский, Э. А. Гидростатические опоры шпинделя планетарной головки пазофрезерного станка / Э. А. Петровский, **С. Н. Шатохин** // В

кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 121-130.

85. **Шатохин, С. Н.** К расчету гидростатических опор с учетом зависимости вязкости смазки от давления и температуры / С. Н. Шатохин // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 130-137.

86. Гузов, В. Ф. Исследование характеристик радиальных реостатических опор / В. Ф. Гузов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 159-165.

87. Гузов, В. Ф. Дифференциальное уравнение давлений в несущем слое реостатической опоры / В. Ф. Гузов, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973. – С. 175-183.

88. **Шатохин, С. Н.** Использование метода гармонической линеаризации при динамическом анализе гидростатических опор / С. Н. Шатохин // В кн. «Повышение точности и производительности обработки на станках», Под ред. В. В. Летуновского, В. Е. Редькина и С. Н. Шатохина. Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1973, – С. 137-146.

89. **Шатохин, С. Н.** Повышение жесткости ступенчатого гидростатического подпятника / С. Н. Шатохин, А. С. Тюриков, М. Е. Царегородцев // В кн. «Новая аппаратура и методика её применения в народном хозяйстве», Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1972, – С. 250-255.

90. **Шатохин, С.Н.** Приближенный расчет характеристик радиальных газостатических опор / С.Н. Шатохин // В кн. «Проблемы развития газовой смазки» Часть I, М.: Изд-во «Наука», 1972 – С. 108-116.

91. **Шатохин, С. Н.** Исследование характеристик радиального ступенчатого гидростатического подшипника / С. Н. Шатохин, А. С. Тюриков, М. Е. Царегородцев // В кн. «Новая аппаратура и методика ее применения в народном хозяйстве», Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1972, – С. 244-249.

92. **Шатохин, С. Н.** Повышение жесткости ступенчатого гидростатического подпятника. / С. Н. Шатохин, А. С. Тюриков // В кн. «Новая аппаратура и методика её применения в народном хозяйстве». Красноярск: КрПИ, 1972. – С. 250-255.

93. **Шатохин, С. Н.** Расчет статических характеристик ступенчатого гидростатического подпятника / С. Н. Шатохин, А. С. Тюриков // В кн. «Качество, надежность и долговечность в машиностроении. Серия Прикладная механика», Красноярск: ЦНТИ, 1970, – С. 11-17.

94. **Шатохин, С. Н.** Динамическое качество гидростатического подпятника с постоянным расходом смазки / С. Н. Шатохин // Сб. научных трудов

механического факультета КрПИ. Красноярск: ИПЦ КрПИ, 1970, – С. 29-34.

95. **Шатохин, С. Н.** Делительная червячная передача с гидростатической смазкой для прецизионных зубообрабатывающих станков / С. Н. Шатохин // В кн. «Качество, надежность и долговечность в машиностроении», Серия «Технология машиностроения». Красноярск: ЦНТИ, 1970, – С.51-54.

96. Агишев, Г. Г. Методы определения давлений в несущем слое радиальной газостатической опоры / Г. Г. Агишев, В. И. Бабицын, А. В. Емельянов, В. Б. Идельсон, **С. Н. Шатохин** // В кн. «Качество, надежность и долговечность в машиностроении. Серия Прикладная механика», Красноярск: ЦНТИ, 1970, – С. 3-8.

97. **Шатохин, С. Н.** Гидростатическая смазка криволинейных поверхностей и возможность её использования в делительных червячных передачах прецизионных станков / С. Н. Шатохин // Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: Мосстанкин, 1969, – 31 с.

98. **Шатохин, С. Н.** Гидростатическая смазка криволинейных поверхностей и возможность её использования в делительных червячных передачах прецизионных станков / С. Н. Шатохин // Дисс. канд. техн. наук, М.: Мосстанкин, 1969,– 207 с. Депонировано ВИНТИ 01.06. 81, № 72 МШ-Д81.

99. **Шатохин, С. Н.** Об одной плоской задаче гидростатической теории смазки / С. Н. Шатохин // В кн. «Исследования металлорежущих станков» Под ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1968, – С. 212-221.

100. **Шатохин, С. Н.** Геометрические и кинематические параметры гидростатической делительной червячной передачи / С. Н. Шатохин, В. Н. Щербаков // В кн. «Исследования металлорежущих станков» Под ред. Н. С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1968, – С. 263-272.

Патенты и авторские свидетельства

101. Пат. 2325565 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06, В 23 Q 1/02 Гидростатическая опора / В. Г. Демин, Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // 2008, Бюл. №15.

102. Пат. 2298117 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, Я. Ю. Пикалов // 2007, Бюл. №12.

103. Пат. 2298116 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / Я. Ю. Пикалов, **С. Н. Шатохин** // 2007, Бюл. №12.

104. Пат. 52618 РФ на полезную модель МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, Я. Ю. Пикалов // 2006, Бюл. №10.

105. Пат. 2280789 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / А.С. Курзаков, Я.Ю. Пикалов, **С.Н. Шатохин**, В.Г. Демин // 2006, Бюл. №21.

106. Пат. 2260722 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 17/18, 32/06 Гидростатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, Я. Ю. Пикалов // 2005, Бюл. №26.

107. Пат. 2259268 РФ МКИ³ на изобретение В 23 Q 1/38, F 16 C 32/06 Регулятор для гидростатических опор / В. Г. Демин, **С. Н. Шатохин**, Я. Ю. Пикалов // 2005, Бюл. №24.

108. Пат. 43488 РФ на полезную модель, МКИ³ В 23 Q 1/00 Стол с круговыми гидростатическими направляющими планшайбы / Я. Ю. Пикалов, В. Г. Демин, **С. Н. Шатохин**, А. С. Титов // 2005, Бюл. №3.
109. Пат. 2262622 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / Т. Ю. Красикова, **С. Н. Шатохин** // 2005, Бюл. №29.
110. Пат. 2244385 РФ на изобретение МКИ³ F 16 C 32/06, 17/18 Гидростатический подшипник / А. С. Курзаков, **С. Н. Шатохин** // 2003, Бюл. №24.
111. А. с. 1816674 СССР, МКИ³ В24 В 55/02 Устройство для охлаждения, очистки и стабилизации абразивно-отрезных кругов / **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко, В. А. Абакумов, В. А. Гривач // 1993 Бюл. № 19.
112. А. с. 1826646 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатическая опора / **С. Н. Шатохин**, В. П. Зайцев, С. А. Ярошенко, В. Н. Тихонов, И. С. Ходош, Д. Н. Тверской // 1992, ДСП.
113. А. с. 1796343 СССР, МКИ³ В 23 В 19/00 Шпиндельный узел станка / **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко, Д. Н. Тверской // 1993, Бюл. №7.
114. А. с. 1705628 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Опора скольжения / **С. Н. Шатохин**, С. С. Шатохин // 1991, ДСП.
115. А. с. 1691609 СССР, МКИ³ 16C32/06 Гидростатическая опора / **С. Н. Шатохин**, В. П. Зайцев, С. А. Ярошенко // 1991, Бюл. №42.
116. А. с. 1668763 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Радиально-упорная гидростатическая опора / **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко // 1991, Бюл. №29.
117. А. с. 1599596 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Опора скольжения / **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко, В. И. Шахворостов, С. С. Шатохин // 1990, Бюл. №38.
118. А.с. 1590727 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Газостатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, В. И. Шахворостов, Ю. А. Пикалов // 1990, Бюл. №33.
119. А. с. 1551860 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Адаптивный подшипник скольжения / **С. Н. Шатохин**, С. А. Ярошенко // 1990, Бюл. №11.
120. А. с. 1530854 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, В. П. Зайцев, С. А. Ярошенко // 1989, Бюл. №47.
121. А. с. 1530853 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / **С. Н. Шатохин**, В. П. Зайцев, С. А. Ярошенко // 1989, Бюл. №47.
122. А. с. 1364785 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатическая опора / **С. Н. Шатохин**, В. П. Зайцев, В. А. Коднянко // 1988, Бюл. №1.
123. А. с. № 1244261 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатический подшипник / В. П. Зайцев, В. А. Коднянко, **С. Н. Шатохин**, С. С. Шатохин // 1986, Бюл. №25.
124. А. с. 1143900 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Гидростатическая опора / **С. Н. Шатохин**, В. А. Коднянко, В. П. Зайцев // 1985, Бюл. №9.
125. А. с. 1042400 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Комбинированный подшипник / А. с. Тюриков, **С. Н. Шатохин**, В. М. Грук //1983, ДСП.
126. А. с. 966330 СССР, МКИ³ F 15 В 15/02 Шпиндельный узел / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // 1982, Бюл. №38.
127. А. с. 956177 СССР, МКИ³ F 15 В 15/02 Шпиндельная головка для обработки пазов / В. А. Титов, В. П. Зайцев, **С. Н. Шатохин** // 1982, Бюл. № 33.

128. А. с. 966336 СССР, МКИ³ F15B 15/02 Шпиндельный узел / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // 1982, Бюл. № 38.
129. А. с. 874263 СССР, МКИ³ В 23 В 25/02 Устройство для динамического дробления стружки / **С. Н. Шатохин**, В. А. Курешов, С. В. Лопатин // 1981, Бюл. №39.
130. А. с. № 848146 СССР, МКИ³ В 23 В 19/00 Шпиндельный узел / **С. Н. Шатохин**, В. С. Секацкий, В. А. Курешов // 1981, Бюл. №27.
131. А. с. 831508 СССР, МКИ³ В 23 Q 5/26, В 23 Q 1/02 Устройство для адаптивной поднастройки системы СПИД / **С. Н. Шатохин**, В. А. Курешов, Ю. А. Пикалов, Г. В. Яскунов // 1981, Бюл. №19.
132. А. с. 778938 СССР, МКИ³ В 23 В 25/02 Устройство для динамического дробления стружки / **С. Н. Шатохин**, В. А. Курешов, А. В. Майоров // 1980, Бюл. №42.
133. А. с. № 770739 СССР, МКИ³ В 23 Q 5/06 Шпиндельный узел / В. С. Секацкий, **С. Н. Шатохин** // 1980, Бюл. №38.
134. А. с. 677878 СССР, МКИ³ В 23 Q 15/00, В 23 В 19/02 Устройство адаптивного управления / А. Ф. Коробейников, **С. Н. Шатохин** // 1979, Бюл. №29.
135. А. с. 677866 СССР, МКИ³ В 23 Q 15/00, В 23 В 19/02 Устройство адаптивного управления подачей исполнительного органа станка / В. Н. Борисов, О. П. Конных, А. Ф. Коробейников, **С. Н. Шатохин** // 1979, Бюл. № 29.
136. А. с. 643236 СССР, МКИ³ В 23 В 25/02 Устройство для динамического дробления стружки / **С. Н. Шатохин**, Э. А. Петровский, В. А. Курешов // 1979, Бюл. №3.
137. А. с. № 636427 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Газостатический подшипник / В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, **С. Н. Шатохин** // 1978, Бюл. №4.
138. А. с. 607069 СССР, МКИ³ F 16 C 32/06 Регулятор для гидростатических опор / **С. Н. Шатохин**, А. Ф. Коробейников, Э. А. Петровский, В. А. Курешов // 1978, Бюл. №18.
139. А. с. 583873 СССР, МКИ³ В 23 С 3/28 Планетарная шпиндельная головка / **С. Н. Шатохин**, В. А. Титов // 1977, Бюл. №46.
140. А. с. 582497 СССР, МКИ³ G 05D 7/03 Регулятор расхода для гидростатических опор / А. Ф. Коробейников, **С. Н. Шатохин** // БИ, 1977, № 44.
141. А. с. 566684 СССР, МКИ³ В 23С 3/28 Планетарная шпиндельная головка / В. А. Титов, **С. Н. Шатохин** // БИ, 1977, № 28.
142. А. с. 543782 СССР, МКИ³ F 15 В 15/021 Привод для микроперемещений / М. А. Шиманович, **С. Н. Шатохин**, В. А. Титов // 1977, Бюл. №3.
143. А. с. 521115 СССР, МКИ³ В 23 Q 15/00, В 23 Q 5/06 Устройство адаптивного управления размером статической настройки станка / А. Ф. Коробейников, **С. Н. Шатохин** // 1976, Бюл. №26.
144. А. с. 480525 СССР, МКИ³ В 23 Q 5/06 Устройство адаптивного управления статической настройкой шпинделя станка / А. Ф. Коробейников, **С. Н. Шатохин** // 1975, Бюл. №30.

145. А. с. 372385 СССР, МКИ³ F 16с 17/16 Опора вала / М. Ф. Агашин, А. В. Емельянов, **С. Н. Шатохин**, М. А. Шиманович // 1973, Бюл. №17.
146. А. с. 281097 СССР, МКИ³ F 15b 21/12 Гидравлический вибратор / В.Э. Пуш, **С. Н. Шатохин**, Ю. В. Мещеряков // 1970, Бюл. №28.
147. А. с. 263344 СССР, МКИ³ F 16h Червячно-реечная передача с гидростатической смазкой / В. Э. Пуш, А. А. Какойло, **С. Н. Шатохин** // 1970, Бюл. №7.
148. А.с. 262551 СССР, МКИ³ F 06с Гидростатическая передача винт-гайка / В. Э. Пуш, Ю. А. Есин, А. А. Какойло, Г. В. Фокин, **С. Н. Шатохин** // 1970, Бюл. №6.
149. А. с. 257245 СССР, МКИ³ F 16h Глобоидная передача с гидростатической смазкой / В. Э. Пуш, **С. Н. Шатохин**, Ю. В. Петров // 1969, Бюл. №35.
150. А. с. 232702 СССР, МКИ³ F 16h Устройство для коррекции кинематических погрешностей делительных цепей прецизионных зубообрабатывающих станков / В. Э. Пуш, **С. Н. Шатохин** // БИ, 1968, № 1.
151. А. с. 221440 СССР, МКИ³ F 06h Делительная червячная передача с гидростатической смазкой / В. Э. Пуш, **С. Н. Шатохин** // 1968, ДСП.
152. А. с. 207620 СССР, МКИ³ F 06h Делительная червячная передача с гидростатической смазкой / В. Э. Пуш, А. А. Какойло, **С. Н. Шатохин**, В. Н. Щербаков // 1967, Бюл. №2.
153. А. с. 194523 СССР, МКИ³ В 23f Способ коррекции погрешностей кинематических цепей прецизионных зубообрабатывающих станков / В. Э. Пуш, **С. Н. Шатохин** // 1967, Бюл. №8.
154. А. с. 194502 СССР, МКИ³ F 06h Делительная червячная передача с гидростатической смазкой / В. Э. Пуш, **С. Н. Шатохин** // 1967, Бюл. №8.