

На правах рукописи

ДЁМИН
Вадим Геннадьевич

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ
НАПРАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАВАЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ
АКТИВНОГО НАГНЕТАНИЯ СМАЗКИ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2008

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Шатохин Станислав Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Филиппов Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор
Трифанов Иван Васильевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «КрасМаш», г. Красноярск

Защита состоится «12» декабря 2008 г. в 15.00 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) 249-82-55 e-mail: DM21209913@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института Сибирского федерального университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу диссертационного совета.

Автореферат разослан «11» ноября 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Э.А. Петровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Повышение точности и производительности обработки на металлорежущих станках является постоянной научно-технической проблемой машиностроения и станкостроения. Одним из перспективных путей её решения для прецизионных и тяжелых металлорежущих станков можно считать использование гидростатических шпиндельных опор и направляющих, которые обладают высокой нагрузочной способностью, виброустойчивостью, точностью.

В Сибирском федеральном университете (СФУ, г. Красноярск) разработаны, исследованы и защищены патентами РФ гидростатические шпиндельные опоры нового поколения, особенностью которых является компактная и технологичная модульная конструкция, отсутствие несущих карманов, использование встроенных плавающих регуляторов активного нагнетания смазки, имеющих возможность авторотации при вращении шпинделя. Проведенные исследования показали, что такие опоры обеспечивают в 1,5÷2 раза лучшие показатели по нагрузочной способности, потребляемой мощности, точности вращения, быстродействию и другим важнейшим характеристикам в сравнении с обычно применяемыми гидростатическими шпиндельными опорами.

Положительные результаты проведенных НИОКР позволили приступить к решению актуальной для станкостроения научно-технической проблемы – разработке и исследованию адаптивных гидростатических направляющих нового поколения, имеющих модульную компоновку со встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки.

Цель работы:

– совершенствование конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик гидростатических направляющих, применяемых в прецизионных и тяжелых металлорежущих станках.

Основная идея:

– создание адаптивных гидростатических направляющих нового поколения на основе использования встроенных плавающих регуляторов активного нагнетания смазки.

Научная проблематика:

– поиск рациональных конструктивных вариантов незамкнутых, замкнутых и комбинированных адаптивных гидростатических направляющих, имеющих технологичную модульную компоновку, встроенные плавающие регуляторы активного нагнетания смазки и высокие эксплуатационные характеристики;

– создание математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ для расчета, теоретического исследования и многопараметрической оптимизации нагрузочных, энергетических и динамических характеристик адаптивных гидростатических направляющих нового поколения;

– экспериментальное подтверждение работоспособности и высоких эксплуатационных характеристик адаптивных гидростатических направляющих с встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки.

Методология исследования:

- использование фундаментальных положений гидродинамической теории смазки и теории автоматического регулирования при математическом моделировании;
- применение для теоретического исследования и многопараметрической оптимизации аналитических и численных методов математического анализа, алгоритмов и компьютерных программ вычислительной математики;
- экспериментальная проверка достоверности полученных теоретических результатов.

Основные задачи:

- разработка и патентная защита работоспособных конструкций незамкнутых, замкнутых и комбинированных адаптивных гидростатических направляющих нового типа с встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки;
- создание математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ для расчета и многопараметрической оптимизации их нагрузочных, энергетических и динамических характеристик;
- исследование влияния и оптимизация геометрических и режимных параметров гидростатических направляющих нового поколения;
- экспериментальная проверка работоспособности направляющих нового поколения и достоверности результатов их теоретического исследования.

Научная новизна:

- предложен новый подход к совершенствованию адаптивных гидростатических направляющих для прецизионных и тяжелых металлорежущих станков, основанный на использовании встроенных плавающих регуляторов активного нагнетания смазки;
- разработаны математические модели и вычислительные алгоритмы, для исследования и оптимизации нагрузочных, энергетических и динамических характеристик адаптивных гидростатических направляющих нового типа;
- теоретически исследовано влияние конструктивных и режимных параметров направляющих нового типа на их нагрузочные, энергетические и динамические характеристики; определены оптимальные значения параметров; доказана возможность получения адаптивного диапазона нагрузочной характеристики при достаточных показателях динамического качества.
- экспериментально подтверждена работоспособность незамкнутой гидростатической направляющей со встроенным плавающим регулятором активного нагнетания смазки, в том числе возможность получения адаптивного диапазона нагрузок при устойчивом переходном процессе.

Достоверность полученных результатов:

- обоснована адекватностью математических моделей, в которых приняты корректные допущения, соответствующие условиям работы гидростатических направляющих, и применением для расчетов апробированных вычислительных алгоритмов и компьютерных программ;
- подтверждена полным качественным и удовлетворительным количественным совпадением данных теории и эксперимента, а также их соответствием известным результатам исследования гидростатических направляющих.

Практическое значение:

- разработаны и защищены патентами РФ технологичные модульные конструкции адаптивных гидростатических направляющих, которые в 1,5 раза и более превосходят известные гидростатические направляющие по нагрузочным и энергетическим характеристикам;
- результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Политехнического института СФУ при чтении лекций и курсовом проектировании по дисциплинам «Металлорежущие станки», «Расчет и конструирование металлорежущих станков», а также в исследовательских дипломных проектах по специальности 151002 – «Металлорежущие станки и комплексы»;
- материалы переданы для использования в ФГУП «КРАСМАШ», ООО «СИБИН», ООО «Сибинстрем» (г. Красноярск), НПО ПМ (г. Железногорск).

Апробация.

Основные положения работы апробированы:

- на всероссийской научно-технической конференции «Осень 2005. Молодежь и наука: начало XXI века» (Красноярск, 2005 г.);
- на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых СФУ в 2004, 2005, 2006, 2007 и 2008 гг.

В полном объеме работа доложена на заседании кафедры «Технология машиностроения» Политехнического института СФУ в 2008 г.

Публикации.

По материалам работы опубликованы 4 научные статьи, 3 из которых рекомендованы перечнем ВАК, получены 3 патента РФ на изобретения и полезные модели, одно положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

Рекомендации по использованию результатов.

Результаты работы могут быть использованы:

- при создании или модернизации прецизионных и тяжелых металлорежущих станков с гидростатическими направляющими;
- в учебном процессе соответствующих специальностей технических вузов.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Объем работы – 123 страницы, 40 рисунков и 13 таблиц; 102 наименований библиографических источников на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы; сформулированы цель, основная идея, научная проблематика, методология и основные задачи работы; определены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе дан анализ применения гидростатических шпиндельных опор и направляющих в отечественном и зарубежном станкостроении; проанализированы достоинства и недостатки известных конструкций гидростатических направляющих; рассмотрена современная методология теоретического исследования нагрузочных, энергетических и динамических характеристик гидростатических опор; сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Основные отечественные разработки и исследования гидростатических опор выполнены в ЭНИМС г. Москва (Г.А. Левит, Ю.Н. Соколов и др.), МГТУ, «СТАНКИН» г. Москва (В.Э. Пуш и др.), КЗТС г. Коломна (В.В. Бушуев и др.), КуАИ г. Самара (А.И. Белоусов и др.), СФУ г. Красноярск (С.Н. Шатохин и др.), а также в вузах и на предприятиях гг. Комсомольска на Амуре, Хабаровска и др.

Наиболее значимые зарубежные разработки и исследования в разные годы выполнены в Великобритании, Германии, США, Швеции.

В практике станкостроения наибольшее применение получили конструкции гидростатических направляющих с постоянным давлением нагнетания смазки и компенсацией расхода по схеме «постоянный дроссель – несущий карман». В гидростатических направляющих тяжелых станков применяют более сложную и дорогостоящую схему нагнетания «нерегулируемый насос – несущий карман», которая обеспечивает высокую жесткость несущего слоя смазки.

Адаптивные гидростатические направляющие, у которых в системе нагнетания используют управляемые регуляторы расхода смазки, практически не применяют, хотя именно они могут иметь нагрузочную характеристику со значительным диапазоном отрицательной податливости, что позволяет в $1,5 \div 2$ раза увеличить внешнюю нагрузку и уменьшить потери мощности, а также значительно повысить точность обработки за счет компенсации положительной податливости несущей системы станка. Причиной этого являются конструктивные недостатки известных типов регуляторов. Большинство из них имеют металлические или эластомерные упругие элементы, которые не обеспечивают стабильности характеристик, требуют высокой точности изготовления и сложной настройки дросселирующих зазоров. Известные регуляторы с плавающими кольцевыми элементами имеют сложную

конструкцию с большим количеством точных деталей, являются выносными и связаны с несущими карманами с помощью трубопроводов, что снижает надежность работы из-за возможного засорения дросселирующих зазоров и ухудшает динамические показатели направляющих.

В СФУ выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в результате которых созданы шпиндельные узлы с радиальными и радиально-осевыми адаптивными гидростатическими опорами нового поколения (без несущих карманов и со встроенным кольцевым плавающим регулятором, который имеет возможность авторотации)^{1,2}. Положительные результаты этих НИОКР позволили приступить к разработке адаптивных гидростатических направляющих (незамкнутых, замкнутых, комбинированных) с встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки.

В данном разделе рассмотрена также современная методология теоретического исследования нагрузочных, энергетических и динамических характеристик адаптивных гидростатических опор, разработанная в СФУ. Она основана на фундаментальных положениях гидродинамической теории смазки и теории автоматического регулирования, использовании при расчетах методов многопараметрической оптимизации, аналитических и численных методов математического анализа, алгоритмов и компьютерных программ вычислительной математики. Её особенностью является специфика построения многосвязных математических моделей и алгоритмов их численной реализации, которая связана с особенностями режима нулевой и отрицательной податливости.

Во втором разделе рассмотрены различные конструктивные варианты незамкнутых, замкнутых и комбинированных адаптивных гидростатических направляющих нового поколения, имеющих модульную компоновку с встроенными плавающими регуляторами активного нагнетания смазки; разработаны математические модели, алгоритмы и компьютерные программы для имитационных осевых гидростатических опор, на примере которых теоретически исследовано влияние геометрических и режимных параметров на нагрузочные характеристики и показано, что адаптивные гидростатические направляющие нового поколения превосходят другие типы гидростатических направляющих по адаптивному диапазону нагрузок на 20÷40%, по максимальному рабочему диапазону нагрузки на 10÷15%, по достигаемому значению отрицательного эксцентриситета в 1,2÷1,5 раза.

¹ Курзаков, А.С. Разработка радиальных аэростатических опор с плавающими регуляторами: Дис...канд. техн. наук / А.С. Курзаков. Красноярск, 2002. 201 с.

² Пикалов, Я.Ю. Адаптивные гидростатические шпиндельные опоры с авторотацией плавающего кольцевого регулятора: конструкции, методы расчета и оптимизация: Дис...канд. техн. наук / Я.Ю. Пикалов. Красноярск, 2007. 147 с

Незамкнутые направляющие. На рисунке 1 показана компоновка круговых и прямолинейных незамкнутых гидростатических направляющих нового поколения, которая состоит из совокупности модулей «встроенный плавающий регулятор – несущий карман».

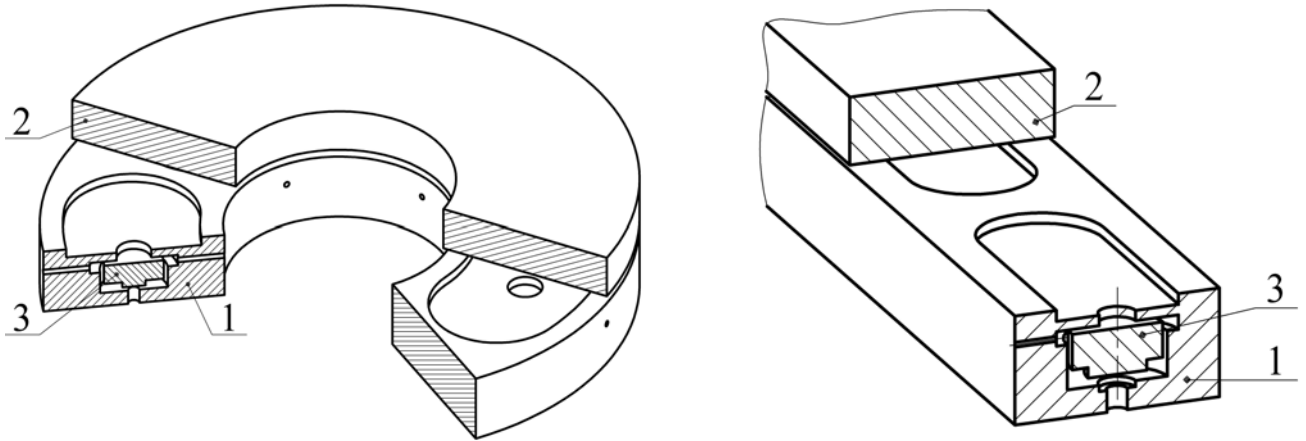


Рис. 1 – Незамкнутые адаптивные гидростатические направляющие
1 – неподвижное основание, 2 – подвижная часть, 3 – плавающий регулятор

На рисунке 2 приведена расчетная схема имитационной осевой гидростатической опоры, которая является аналогом незамкнутой гидростатической направляющей нового поколения. Подвижная часть 2 отделена от основания 1 несущим слоем смазки, воспринимающим внешнюю нагрузку f . Плавающий регулятор 3 расположен во внутренней полости основания, в которую смазка нагнетается от гидростанции (на схеме не показана) под давлением $p_H = \text{const}$. Один поток смазки через осевой канал и дросселирующей щелевой зазор h_2 регулятора поступает в несущий карман под давлением $p_A < p_H$. Из кармана через дросселирующую щель h_1 несущего слоя поток смазки поступает обратно в гидростанцию. Одновременно другой поток смазки нагнетается через дросселирующие щели h_4 и h_3 которые образуют ступенчатый гидростатический подвес регулятора. Последний выполняет роль «гидравлической пружины», необходимой для стабилизации смещения регулятора в пределах суммарного осевого зазора ($h_2 + h_3$), что обеспечивает активную компенсацию расхода смазки в несущем кармане при изменении внешней нагрузки. Наличие дополнительного потока смазки в регуляторе является недостатком, однако пока не удалось разработать конструкции незамкнутых направляющих с плавающими регуляторами без паразитного потока смазки.

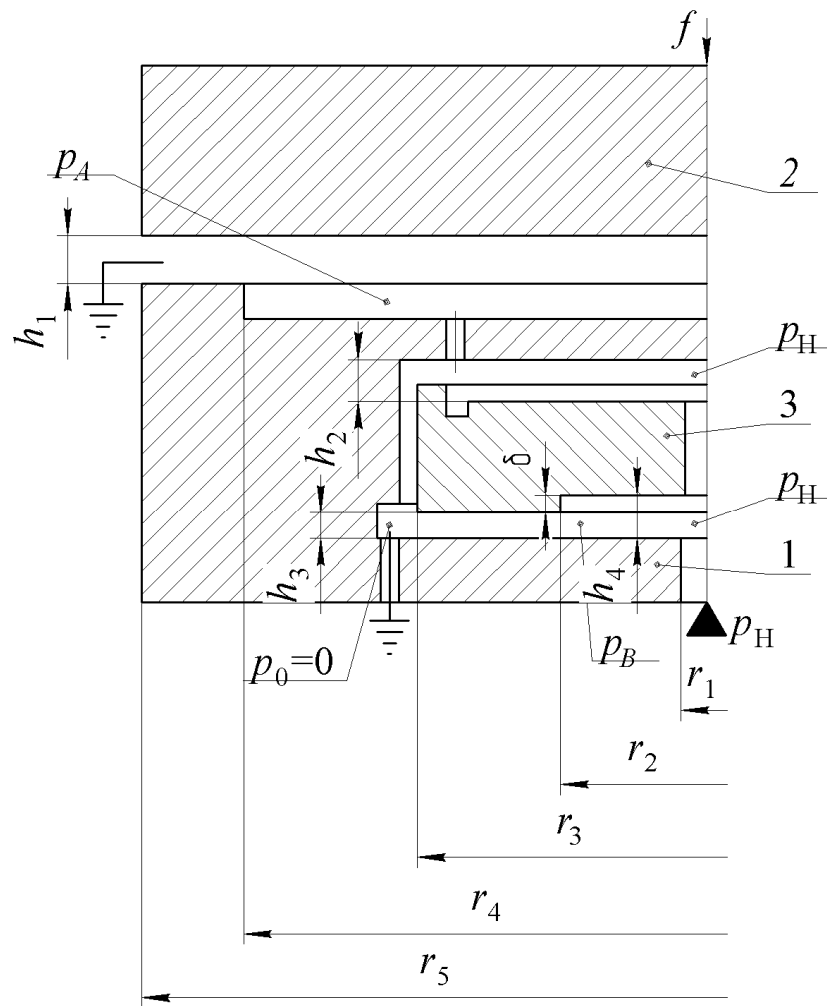


Рис. 2 – Расчетная схема имитационной опоры для незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающим регулятором нагнетания смазки

В диссертационной работе приведены расчетные схемы и математические модели для четырех вариантов незамкнутой имитационной гидростатической опоры, которые отличаются конструкцией плавающего регулятора.

В таблице 1 приведена безразмерная математическая модель незамкнутой имитационной гидростатической опоры, расчетная схема которой показана на рисунке 2. Функции распределения давлений смазки в дросселирующих щелевых зазорах получены решением краевых задач для уравнения Рейнольдса в полярной системе координат при следующих допущениях: плотность ρ и динамическая вязкость μ смазки постоянны; функции распределения давлений смазки в дросселирующих щелевых зазорах не зависят от угловой координаты φ , т.к. рассматривается только осевое смещение подвижной части опоры и регулятора; дросселирующие щели образованы цилиндрическими или плоскими поверхностями идеальной формы; внешняя нагрузка f не зависит от времени.

Таблица 1 – Математическая модель имитационной опоры для незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей

№ пп	Уравнения математической модели	Физический смысл зависимостей
1	$F = 2 \cdot \int_{R_4}^1 P_1(R) \cdot R \cdot dR + 2 \cdot \int_0^{R_4} P_A(R) \cdot R \cdot dR,$	Условие равновесия подвижной части
2	$\int_{R_1}^{R_3} P_2(R) \cdot R \cdot dR - \int_{R_1}^{R_2} P_4(R) \cdot R \cdot dR - \int_{R_2}^{R_3} P_3(R) \cdot R \cdot dR = 0$	Условие силового равновесия регулятора в адаптивном диапазоне нагрузок
3	$P_1 = P_A - P_A \cdot \frac{\ln(R/R_4)}{\ln(1/R_4)}, \quad P_2 = (P_A - 1) \cdot \frac{\ln(R/R_1)}{\ln(R_3/R_1)} + 1$ $P_3 = P_B - P_B \cdot \frac{\ln(R/R_2)}{\ln(R_3/R_2)}, \quad P_4 = (P_B - 1) \cdot \frac{\ln(R/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} + 1$	Распределение давлений смазки в дресселирующих щелевых зазорах
4	$-\frac{H_1^3 \cdot P_A}{\ln \frac{1}{R_4}} = \frac{H_2^3 \cdot (P_A - 1)}{\ln \frac{R_3}{R_1}}, \quad -\frac{H_3^3 \cdot P_B}{\ln \frac{R_3}{R_2}} = \frac{H_4^3 \cdot (P_B - 1)}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$	Условия неразрывности течения смазки
5	$H_3 = H_\Sigma - H_2, \quad H_4 = H_3 + \Delta$	Значения щелевых дресселирующих зазоров

Алгоритм расчета безразмерной нагрузочной характеристики $H(F)$ при малых нагрузках F предусматривал уменьшение с малым шагом зазора H_1 от начального максимального значения и вычисление соответствующей ему нагрузки F при минимальном зазоре H_2 в неподвижном регуляторе. При этом на каждом шаге программа расчета контролировала выполнение условия силового равновесия регулятора. Выполнение этого условия соответствовало концу первого диапазона нагрузочной характеристики, в котором регулятор занимает крайнее верхнее положение и опора имеет положительную податливость, ко началу второго (адаптивного) диапазону, в котором регулятор смещается вниз и опора имеет отрицательную податливость. В этом диапазоне вычислялись значения F при изменяющихся зазорах H_2 и H_3 в регуляторе до тех пор, пока не выполнялось условие $H_3 = 0$, которое означало конец второго (адаптивного) диапазона и начало третьего диапазона нагрузочной характеристики, в котором регулятор занимает крайнее нижнее положение и податливость опоры вновь становится положительной. В третьем диапазоне

расчет нагрузочной характеристики продолжался при постоянном значении $H_2 = 0$ до выполнения условия $H_1 = 0$.

Алгоритм вычислений имел также блок многопараметрической оптимизации, позволяющий выбрать сочетание варьируемых параметров, которое дает наилучшие значения нагрузочной характеристики. При оптимизации постоянными (не варьируемыми) параметрами считали наружный радиус r_5 несущего слоя смазки, давление нагнетания p_H и динамическую вязкость смазки μ . Варьировали значения суммарного щелевого зазора H_Σ , высоту ступени регулятора Δ и радиусов R_1, R_2, R_3, R_4 .

Алгоритм оптимизации учитывал следующие ограничения:

– значения геометрических параметров должны быть адекватны условиям физической реализуемости опоры ($1 > R_4, R_2 > R_1, R_3 > R_2, R_4 > R_3, H_{psum} > 0, \Delta > 0, H_1 > 0$);

– безразмерная податливость опоры $K = \frac{d}{dF} H_1(F) \in [-4; 1]$.

Компьютерная программа в реальном времени выводила оптимальные результаты расчетов в формате электронных таблиц *MS Excel*.

Полученные графики безразмерных нагрузочных характеристик показаны на рисунке 3. Для сравнения приведена нагрузочная характеристика $H_1(F)$ для аналогичной гидростатической опоры с нагнетанием смазки по схеме «постоянный дроссель – несущий карман» (штриховая линия).

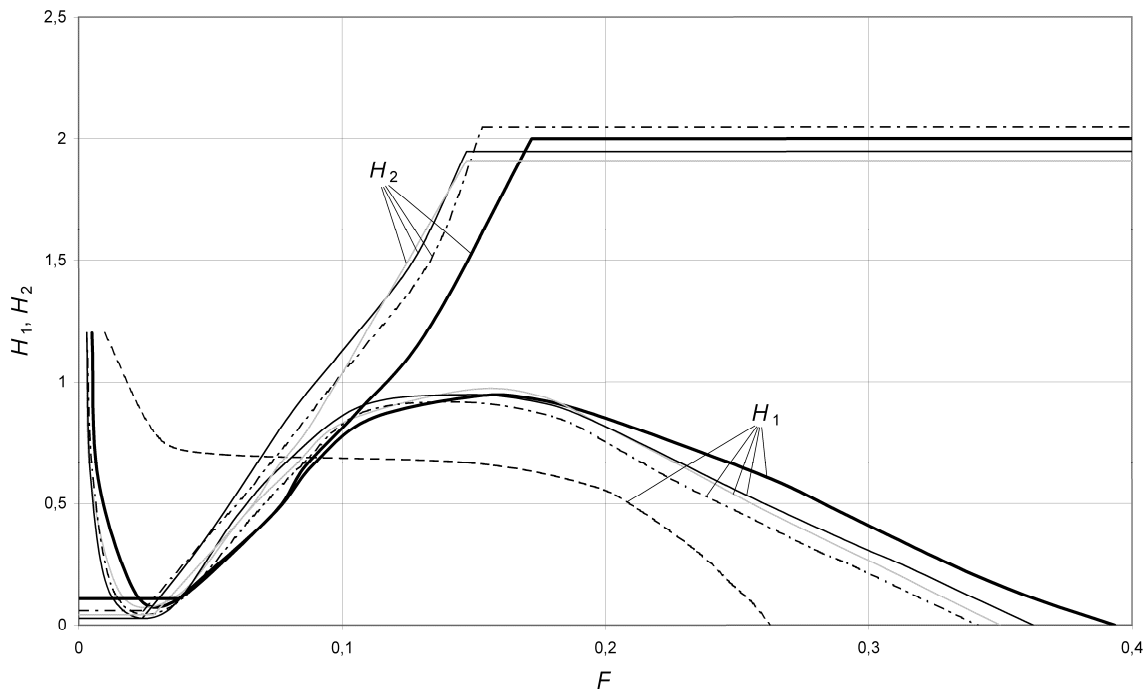


Рис. 3 – Сравнение нагрузочных характеристик для различных вариантов незамкнутой имитационной опоры
 вариант 1; - - - вариант 2; — вариант 3; — вариант 4

Видно, что нагрузочные характеристики, полученные для различных вариантов регулятора различаются незначительно, но наилучшие значения имеет вариант 4, расчетная схема которого показана на рисунке 2. График наглядно показывает последовательность процессов, которые происходят в опоре при нагружении. При малых значениях нагрузки регулятор неподвижен и находится в крайнем верхнем положении, а опора работает в пассивном режиме и зазор H_1 в несущем слое уменьшается до минимального значения. При увеличении дальнейшем увеличении нагрузки регулятор начинает смещаться вниз, увеличивая поступление смазки в несущий слой, и зазор H_1 возрастает до максимального значения. Этот диапазон нагрузок назван адаптивным, так как смещение подвижной части опоры происходит навстречу нагрузке. После того как регулятор достигает крайнего нижнего положения рабочий зазор H_1 с увеличением нагрузки снова уменьшается. При проектировании опоры необходимо выбрать параметры r_5 и p_H так, чтобы минимальное расчетное значение нагрузки соответствовало началу адаптивного диапазона.

Замкнутые направляющие. Замкнутые гидростатические направляющие нового поколения могут быть образованы оппозитным расположением двух незамкнутых направляющих, показанных на рисунке 1. Однако такая компоновка имеет существенные недостатки.

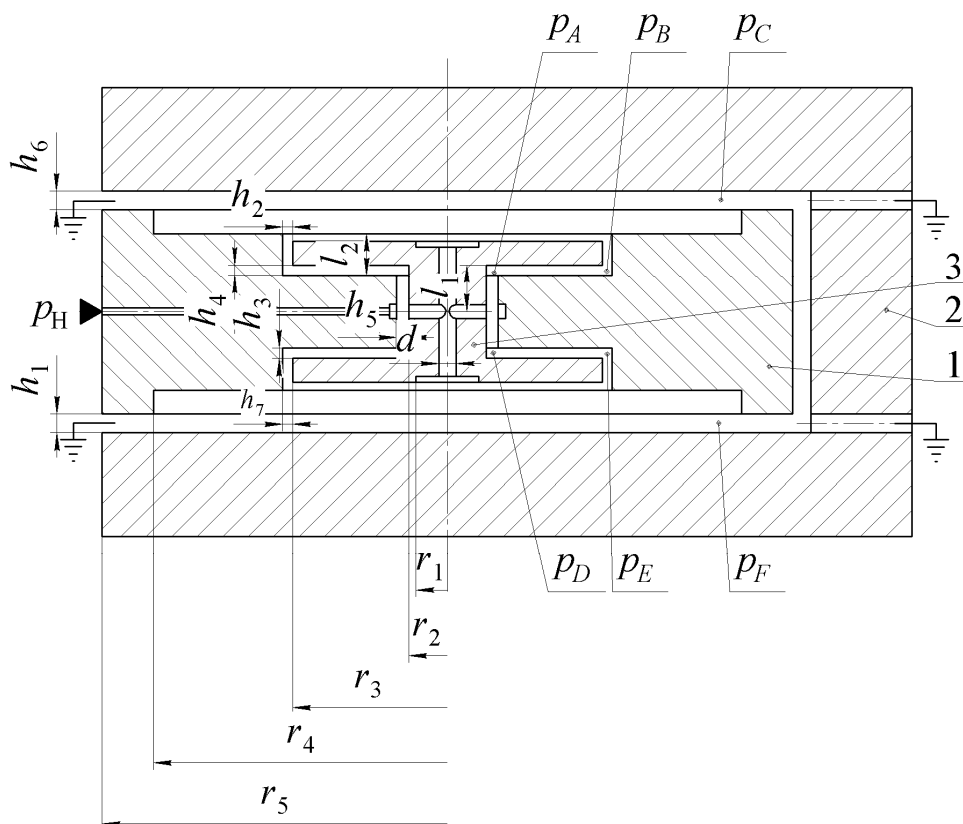


Рис. 4 – Расчетная схема имитационной опоры для замкнутой гидростатической направляющей с общим плавающим регулятором

Более совершенной является компоновка замкнутой направляющей с общим плавающим регулятором для каждой оппозитной пары несущих карманов. Расчетная схема имитационной опоры для замкнутой гидростатической направляющей с оппозитными плавающими регуляторами показана на рисунке 4. Важным достоинством такой компоновки является отсутствие паразитных потоков смазки в регуляторе.

В работе приведена безразмерная математическая модель замкнутой имитационной гидростатической опоры с оппозитным плавающим регулятором и рассчитана её нагрузочная характеристика при оптимальном сочетании варьируемых параметров, которая показана на рисунке 5. Для сравнения штриховой линией показана нагрузочная характеристика для аналогичной замкнутой гидростатической опоры с нагнетанием смазки по схеме «дроссель – несущий карман». Видно, что адаптивная опора имеет значительный нагрузочный диапазон, в котором её подвижная часть смещается противоположно направлению внешней нагрузки.

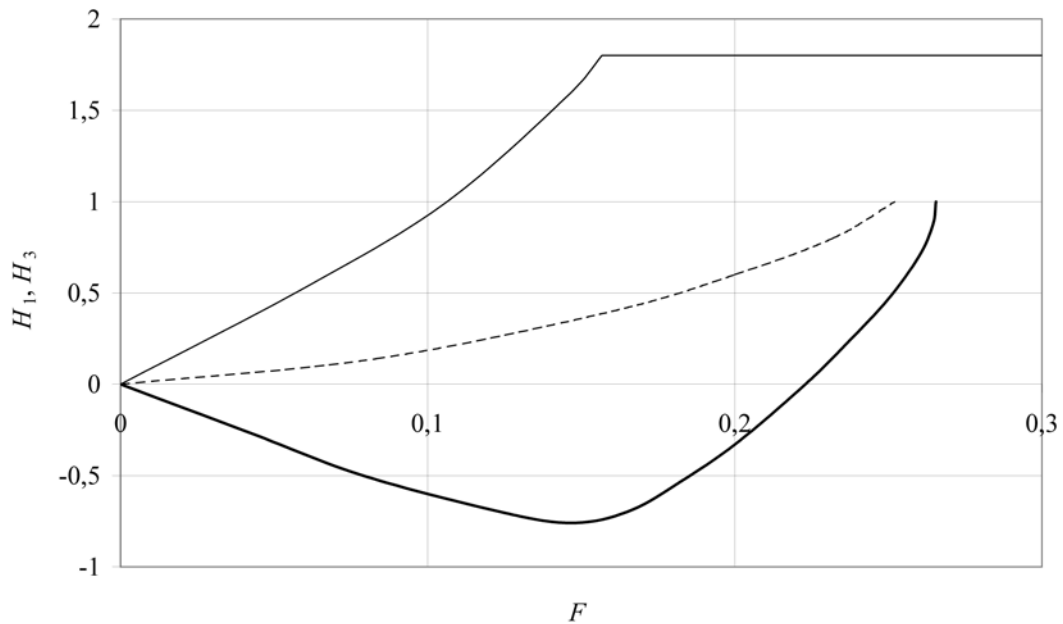


Рис. 5 – Нагрузочная характеристика замкнутой имитационной опоры с оппозитным плавающим регулятором
 — смещение подвижной части, — смещение регулятора

Комбинированные направляющие. На рисунке 6 показана упрощенная расчетная схема комбинированной адаптивной гидростатической направляющей, которая предназначена для кругового движения. Она может воспринимать разнонаправленные осевые и радиальные нагрузки, а также опрокидывающие моменты. Направляющая состоит из неподвижного корпуса 1, вращающейся планшайбы 2 и плавающего кольцевого регулятора 3. Регулятор образует радиальные дросселирующие щелевые зазоры h_4 и h_8 с цилиндрическими поверхностями планшайбы и корпуса, а также осевые

дросселирующие щелевые зазоры h_2, h_3, h_5, h_6 с торцевыми поверхностями корпуса. Планшайба образует дросселирующие щелевые зазоры h_1 и h_7 с торцевыми поверхностями корпуса. Особенностью конструкции является отсутствие несущих карманов и паразитного потока смазки в регуляторе, а также возможность авторотации регулятора при вращении планшайбы, что позволяет уменьшить насосные и фрикционные потери мощности.

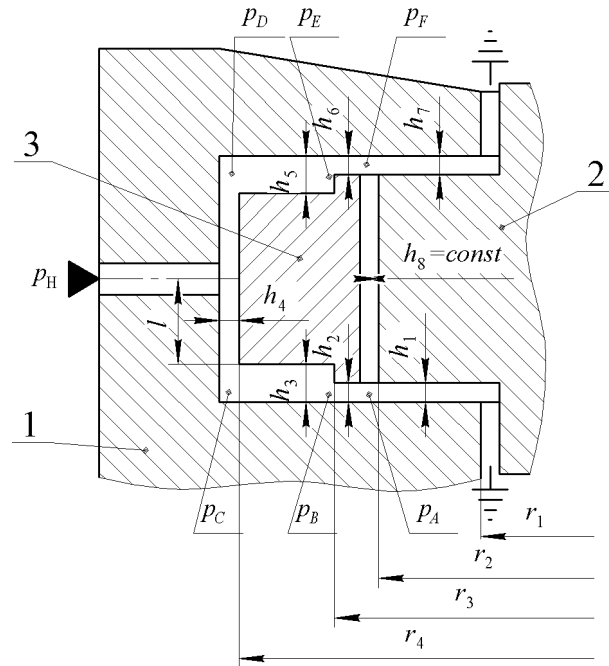


Рис. 6 – Расчетная схема комбинированной адаптивной гидростатической направляющей кругового движения

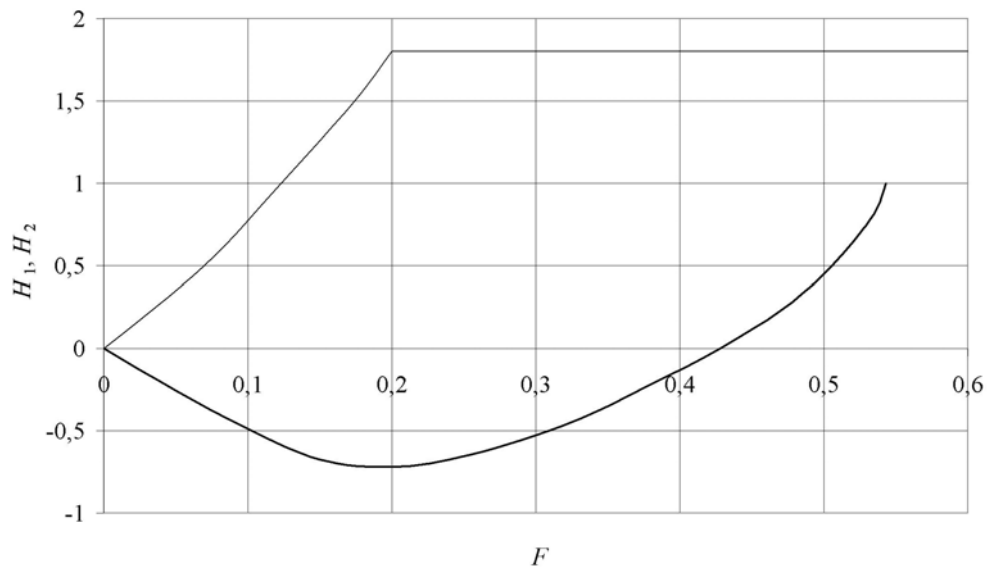


Рис. 7 – Нагрузочная характеристика комбинированной адаптивной гидростатической направляющей
 — сдвигение опоры; — сдвигение регулятора

Расчеты, выполненные по приведенной в работе математической модели, показали, что рассмотренная конструкция комбинированной гидростатической направляющей также имеет достаточно большой адаптивный диапазон осевой нагрузочной характеристики (рисунок 7).

В третьем разделе теоретически исследованы энергетические и динамические характеристики незамкнутой имитационной адаптивной гидростатической опоры с встроенным плавающим регулятором активного нагнетания смазки; проведена оптимизация параметров опоры по комплексному критерию качества, обеспечивающему оптимальное сочетание нагрузочной способности и потерь мощности; показано, что динамические характеристики опоры соответствуют устойчивому режиму работы и имеют допустимые значения.

Потери мощности исследовали для незамкнутой имитационной опоры. При этом рассчитывали суммарные потери мощности $n_{\Sigma} = n_q + n_v$, потери мощности n_q на нагнетание смазки (насосные потери)

$$n_q = \frac{\pi \cdot p_H \cdot h_1^3 \cdot (p_H - p_A)}{6 \cdot \mu \cdot \ln(r_5 / r_4)},$$

и потери мощности n_v на вязкое трение в несущем слое смазки (фрикционные потери), которые могут быть существенными для направляющих кругового движения (например, при высокой частоте вращения планшайбы токарно-карусельного станка)

$$n_v = 0,25 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot (r_5^4 - r_4^4) / h_1,$$

где ω – угловая скорость вращения планшайбы.

На рисунке 8 приведен безразмерный график влияния нагрузки на потери мощности для рассматриваемой незамкнутой имитационной гидростатической опоры. Для сравнения приведен также график суммарных потерь мощности в аналогичной осевой гидростатической опоре с дроссельной компенсацией.

При расчете фрикционных потерь учитывали только вязкое трение в дросселирующем щелевом зазоре h_1 , так как в глубоком несущем кармане вязкое трение при ламинарном течении пренебрежимо мало.

График показывает, что в адаптивном нагрузочном диапазоне ($0,05 < F < 0,2$) основную долю суммарных потерь составляют насосные потери в зазоре H_3 , создаваемые паразитным потоком смазки в регуляторе. Это является существенным недостатком рассмотренной конструкции незамкнутой адаптивной гидростатической направляющей с плавающим регулятором нагнетания смазки.

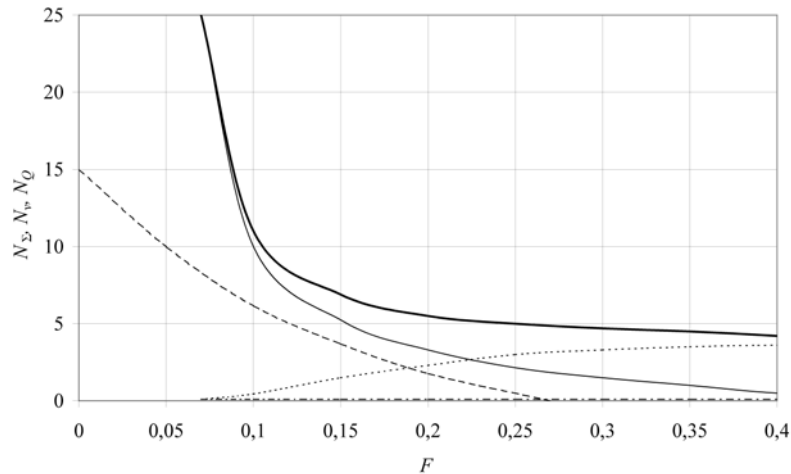


Рис. 8 – Зависимость потерь мощности от нагрузки для незамкнутой имитационной гидростатической опоры
 — суммарные потери N_{Σ} ; ····· насосные потери N_{Q1} в зазоре H_1 ;
 — насосные потери N_{Q3} в зазоре H_3 ; - · - · фрикционные потери N_V ;
 ····· суммарные потери для пассивной опоры

Динамические характеристики исследовали для незамкнутой имитационной гидростатической опоры с плавающим регулятором, расчетная схема которой показана на рисунке 2. Исследование проводили с помощью специализированной компьютерной программы СИГО, разработанной в СФУ В.А. Коднянко, которая апробирована в ряде диссертационных работ. Она формализует и многократно упрощает процедуру расчета корневых и частотных показателей динамического качества, принятых в теории автоматического регулирования: нормированной степени устойчивости η_0 , затухания за период колебаний ξ , показателя колебательности Δ .

На рисунке 9 приведены характерные графики зависимостей η_0 и ξ от динамического критерия $\sigma = 12 \cdot r_5^3 \cdot \mu / \sqrt{h_1^5 \cdot p_H \cdot m}$, (число сдвливания), где m – масса подвижной части опоры. Видно, что для рассматриваемой гидростатической опоры максимум нормированной степени устойчивости $\eta_0 = 0,66$ и затухания колебаний за период $\xi = 0,98$ достигается при $\sigma \approx 13,5$.

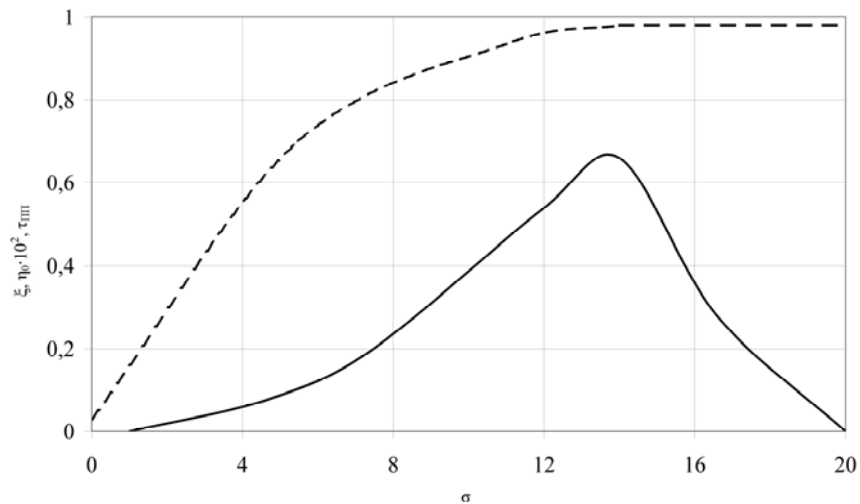


Рис. 9 – Зависимость корневых показателей динамического качества η_0 и ξ от σ для незамкнутой имитационной гидростатической опоры

Установлено, что по рациональный выбор параметров H_4 , H_K , R_1 , R_2 , R_3 и R_4 позволяет обеспечить допустимые значения показателей η_0 , Δ и τ_{min} не в ущерб статическим характеристикам.

Многопараметрическую оптимизацию статических характеристик опоры проводили с использованием генетического алгоритма. Для оптимизации использовали комплексный критерий качества:

$$X = S_{\text{ад}}^{\gamma} / N_{\Sigma}^{1-\gamma},$$

где $S_{\text{ад}}$ – площадь, ограниченная безразмерной нагрузочной характеристикой в адаптивном диапазоне, N_{Σ} – безразмерные суммарные потери мощности, $\gamma \in [0; 1]$ – коэффициент баланса нагрузочной способности и потерь мощности.

Результаты оптимизации показывают, что при выборе параметров опоры по приоритету наибольшей нагрузочной способности ($\gamma=1$) последняя может быть увеличена на 15÷20% , однако потребляемая мощность при этом возрастает в 2÷2,5 раза. При выборе оптимизируемых параметров по минимуму потерь мощности ($\gamma=0$) нагрузочная способность уменьшается на 25÷35 %.

В дальнейшем предполагается провести комплексную оптимизацию параметров опоры с учетом её динамических характеристик.

В четвертом разделе описаны конструкция экспериментального стенда (рисунок 10) и методика проведения экспериментального исследования; проверена работоспособность незамкнутой имитационной гидростатической опоры и подтверждена достоверность основных результатов её теоретического исследования.

Стенд состоит из гидростанции экспериментальной установки с имитационной незамкнутой гидростатической опорой, нагрузочной и измерительной системами, источника нагнетания смазки.

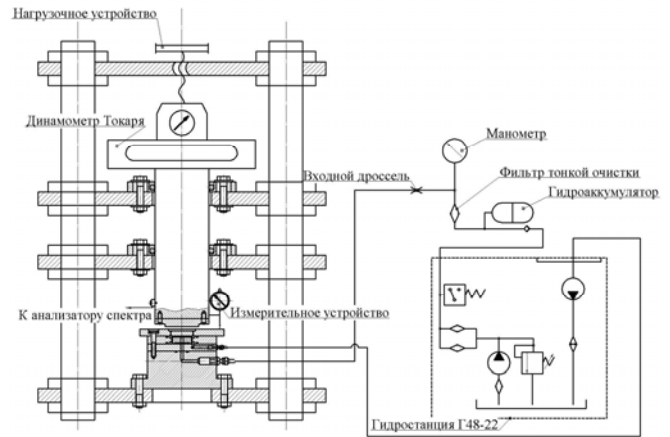


Рис. 10 – Общий вид и схема экспериментального стенда

Детали имитационной опоры изготавливали на ФУГП «Красмаш». Контроль качества деталей проводили в лаборатории технических измерений кафедры «Стандартизация и управление качеством» СФУ. Фактические размеры деталей лежали в пределах допустимых отклонений.

Испытание экспериментальной гидростатической опоры проводили в лабораториях кафедры «Технологии машиностроения» СФУ.

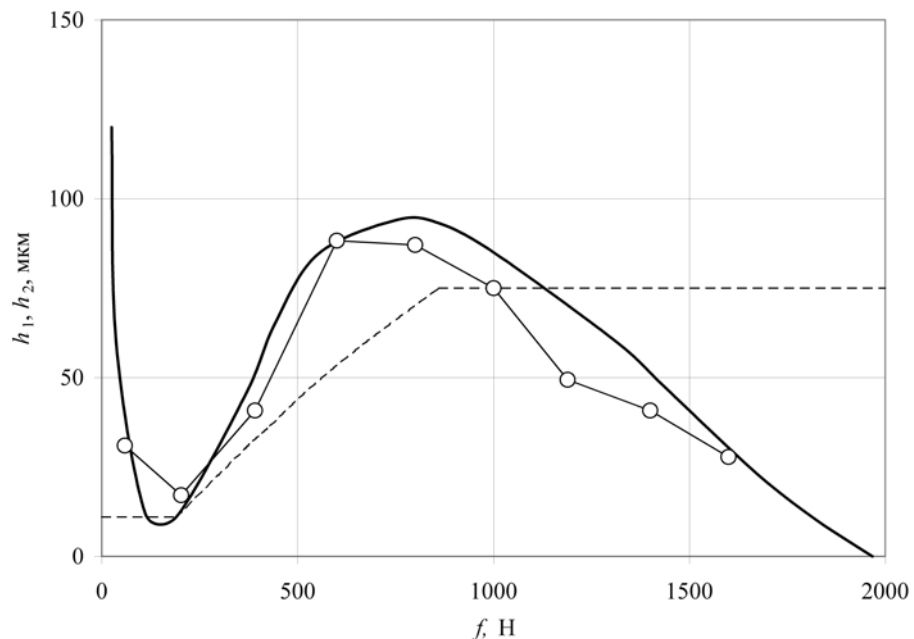


Рис. 11 – Теоретическая и экспериментальная нагрузочные характеристики имитационной адаптивной гидростатической опоры
 — — — — — теоретическое смещение подвижной части;
 —○— — — — — экспериментальное смещение подвижной части;
 - - - - - теоретическое смещение регулятора

По данным расчета и измерений построены теоретический и экспериментальный графики нагрузочной характеристики, которые приведены

на рисунке 11. Проведенный эксперимент подтвердил работоспособность исследуемой опоры. Сравнение теоретических и экспериментальных нагрузочных кривых показало их полное качественное и удовлетворительное количественное совпадение (среднеквадратичное отклонение не превышает 18%).

Для оценки динамического качества исследуемой незамкнутой имитационной опоры экспериментально изучали переходный процесс при импульсном нагружении подвижной части. Для регистрации переходного процесса использовали анализатор спектр СП1.

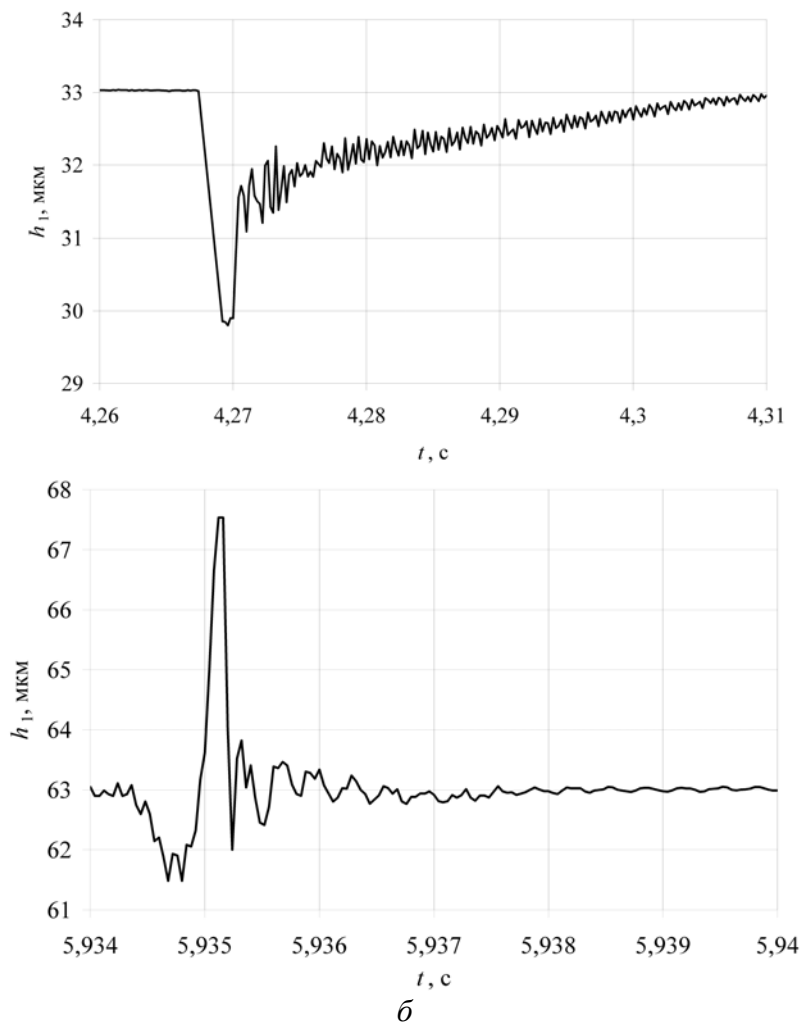


Рис. 12 – График переходного процесса в исследуемой опоре при импульсном возмущении нагрузки

Установлено, что переходный процесс $h_1(t)$ в диапазонах положительной податливости нагрузочной характеристики является монотонным (рисунок 12, а), а в адаптивном диапазоне имеет апериодический характер (рисунок 12, б), что указывает на высокое демпфирование и достаточный запас устойчивости опоры. Время затухания переходного процесса составляет 0,03-0,04 с. Следовательно, быстродействие опоры составляет 25-30 Гц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработаны достаточно простые и технологичные модульные конструкции незамкнутых, замкнутых и комбинированных адаптивных гидростатических направляющих нового поколения, существенной новизной которых является использование встроенных плавающих регуляторов активного нагнетания смазки.

2. Для незамкнутых, замкнутых и комбинированных имитационных гидростатических опор, которые являются упрощенными аналогами разработанных направляющих, созданы математические модели, алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие проводить расчет и исследование нагрузочных характеристик.

3. Результаты исследований показали, что нагрузочные характеристики имитационных опор имеют адаптивный диапазон нагрузок с отрицательными эксцентриситетами, в котором смещение подвижной части опоры происходит навстречу нагрузке. Такая характеристика позволяет увеличить нагрузочную способность в $1,5 \div 1,7$ раза по сравнению с гидростатическими опорами, которые имеют нагнетания смазки по схеме дроссель–карман.

4. Проведен сравнительный анализ конструктивных вариантов имитационных гидростатических опор с плавающими регуляторами, которые являются аналогами незамкнутых направляющих нового поколения, определен вариант с лучшей нагрузочной характеристикой. Для данного варианта с использованием генетического алгоритма выполнена многопараметрическая оптимизация статических характеристик по комплексному критерию качества, который позволяет выбрать рациональное сочетание нагрузочной способности и суммарных потерь мощности.

5. Для незамкнутой имитационной гидростатической опоры с плавающими регуляторами выполнено теоретическое исследование динамических характеристик и показана возможность устойчивой работы опоры в адаптивном диапазоне нагрузок.

6. Проведено экспериментальное исследование незамкнутой имитационной гидростатической опоры, в результате которого:

- подтверждена работоспособность опоры;
- показано полное качественное и удовлетворительное количественное совпадение теоретической и экспериментальной нагрузочной характеристики;
- установлено, что переходный процесс в пассивном диапазоне нагрузок является монотонным, а в адаптивном диапазоне нагрузок аperiodическим и имеет время затухания $0,03 \div 0,04$ с.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Демин В.Г. Повышение термоустойчивости планшайбы с гидростатическими направляющими / В.Г. Демин, Я.Ю. Пикалов, С.Н. Шатохин, Л.П. Шатохина // Вестник Красноярского государственного технического университета. Вып. 36. Машиностроение. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. с. 93-100.

2. Шатохин С.Н. Минимизация температурных деформаций планшайбы с гидростатическими направляющими / С.Н. Шатохин, Л.П. Шатохина, В.Г. Демин, Я.Ю. Пикалов // Журнал СТН. 2006, № 7. с. 16–19.

3. 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 // Журнал «Технология машиностроения». 2006, №9. с. 29–33.

4. Демин В.Г. Проектирование адаптивных гидростатических опор с плавающими регуляторами нагнетания смазки для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков / В.Г. Демин, Я.Ю. Пикалов, С.Н. Шатохин // Журнал «Технология машиностроения». 2008, №9. с. 27–30.

5. Патент №2259268 РФ на изобретение, кл. В 23 Q 1/38, F 16 C 32/06. Регулятор для гидростатических опор / В.Г. Демин, С.Н. Шатохин, Я.Ю. Пикалов. №2004126826/11; Заявлено 06.09.2004; Оpubл. 27.08.2005, Бюл. №24.

6. Патент № 43488 на полезную модель РФ, кл. В 23 Q 1/02 Стол с круговыми гидростатическими направляющими планшайбы / В.Г. Демин, С.Н. Шатохин, Я.Ю. Пикалов. № 2004126551/22; Заявлено 06.09.2004; Оpubл. 27.01.2005, Бюл. №3.

7. Патент № 2325565 РФ на изобретение, кл. F 16 C 32/06, В 23 Q 1/38. Гидростатическая опора / В.Г. Демин, Я.Ю. Пикалов, С.Н. Шатохин. № 2006132937/11; Заявлено 13.09.2006; Оpubл 27.05.2008, Бюл. №15.

Соискатель



Демин В.Г.

Подписано в печать 9.11.2008
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в ИПЦ Политехнического института СФУ.
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28