

На правах рукописи



ЛЕГАЕВ ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ

**ГАЗОСТАТИЧЕСКИЕ ОПОРЫ С ПОВЫШЕННОЙ
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ**

**Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и деталей машин**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук**

Владимир 2006

Работа выполнена во Владимирском государственном университете на кафедре приборостроения и информационно-измерительных технологий.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.В. Бушуев
доктор технических наук, профессор
А.А. Кобзев
доктор технических наук, профессор
В.К. Кутузов

Ведущее предприятие: Конструкторское бюро "Арматура" – филиал
ГК НПЦ им. М.В. Хруничева, г. Ковров.

Защита диссертации состоится 20 июня 2006 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.025.05 Владимирского государственного университета по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ауд. 211-1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, учёному секретарю совета.

Автореферат разослан "___" _____ 2006 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



С.И. Малафеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Газостатические опоры, обладая значительными преимуществами перед другими видами опор, получают всё большее распространение в различных отраслях промышленности, к числу которых можно отнести станкостроение, приборостроение, космическую промышленность, энергетику и др. Опоры с газовой смазкой не теряют своих эксплуатационных качеств при работе в условиях с повышенной радиацией в широком диапазоне температур и давлений окружающей среды. Основное преимущество газовой смазки – её малая вязкость – позволяет достичь высоких скоростей вращения, а отсутствие скачков силы трения при относительном перемещении поверхностей, разделённых смазочным слоем, даёт возможность осуществлять перемещение с минимальной скоростью скольжения.

Однако используемые в настоящее время газостатические опоры имеют существенный недостаток – сравнительно низкую несущую способность и жесткость. Возможность повышения несущей способности и жесткости традиционными средствами (увеличение размеров опоры или давления питания, уменьшение толщины воздушного слоя) обычно ограничена конструктивными или технологическими соображениями и не даёт принципиального решения вопроса. Также широкому внедрению газовой смазки препятствуют трудности, возникающие при расчёте конкретных вариантов конструкций.

Использование газостатических опор, управляемых по положению подвижного элемента (вала), позволяет повысить несущую способность, удельную жесткость газостатических опор, а также получить дополнительную функцию, а именно – привод микроперемещений вала. Последний на основе газостатической опоры ввиду малого трения обладает высокой чувствительностью и равномерностью установочных перемещений.

Созданию работоспособных конструкций газостатических опор с повышенной несущей способностью и жесткостью препятствует отсутствие целостных исследований, специфических особенностей их реализации, математических моделей, алгоритмов и программных средств для расчёта конкретных вариантов конструкций, исследований устойчивости для стационарных и переходных режимов, колебаний переходных процессов и др.

Таким образом, актуальность темы настоящего исследования обусловлена практической потребностью в повышении удельной несущей способности и жесткости газостатических опор; необходимостью всё более широкого применения в машиностроении и других отраслях промышленных газостатических опор, обладающих высокой достижимой точностью; отсутствием целостных исследований специфических особенностей реализации в газостатических опорах различного рода перемещений для технологических и иных целей, определяющих в конечном итоге точность обработки или контроля.

Цель и задачи исследования. Цель – исследование и разработка методов повышения несущей способности и жесткости газостатических опор машин и приборов, разработка математических моделей, алгоритмов и программных средств для расчёта газостатических опор с повышенной несущей способностью, исследование их устойчивости в стационарных и переходных режимах и разработка рекомендаций по проектированию. Для достижения указанных целей в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- проведён анализ методов регулирования опор с внешним нагнетанием смазки;
- предложены способы и принципиальные схемы газостатических опор с повышенной несущей способностью;
- теоретически исследованы статические и динамические характеристики разработанных устройств;
- предложен рациональный выбор конструктивных параметров газостатических опор с повышенной несущей способностью;
- проведён анализ влияния конструктивных параметров опоры и регулятора на устойчивость;
- исследованы свойства газостатического шпинделя как объекта регулирования;
- проведен анализ результатов теоретического и экспериментального исследований;
- разработаны рекомендации по проектированию газостатических опор с повышенной несущей способностью;
- предложены модификации газостатических опор.

В целом проведённые исследования ориентированы на создание методов и алгоритмов, эффективных для проектирования узлов машин и приборов, использующих газовую смазку.

Научная новизна. Разработаны методы повышения удельной несущей способности и жесткости газостатических опор. Описана математическая модель управляемой газостатической опоры, позволяющая выявить аналитические зависимости, связывающие конструктивные параметры и характеристики газостатической опоры, на основе которой предложены методики расчёта газостатических опор с повышенной несущей способностью. Статический расчёт позволяет оптимизировать выбор конструктивных параметров опоры с целью получения максимальной жесткости, а динамический – провести оптимизацию конструктивных параметров опоры и регулятора для получения в опоре монотонного переходного процесса при наибольшем быстродействии как в режиме стабилизации вала, так и в режиме микроперемещений. Выявлены закономерности изменения функций, определяющих несущую способность и жесткость опоры при различных возможных сочетаниях режимов истечения на дросселях и в междроссель-

ных камерах при различных давлениях питания и отношениях эффективных площадей. Выведены формулы линеаризации по различным параметрам для расчёта коэффициентов дифференциальных уравнений проточных камер опоры с учётом возможных режимов истечения. Установлены предельные значения конструктивных параметров и их влияние на устойчивость газостатических опор с системой автоматического регулирования (САР) в переходных и стационарных режимах. Для пневматического мембранного преобразователя получена методика расчета, оптимизирующая выбор конструктивных параметров с точки зрения получения наибольшего быстрогодействия. Предложены технические решения, позволяющие существенно повысить несущую способность и жесткость газостатических опор и расширить их функциональные возможности, а также новый способ определения амплитудно-фазочастотных характеристик газостатических опор. Новизна технических решений защищена девятью авторскими свидетельствами и патентами.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов обуславливаются основными положениями механики жидкости и газа, теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического регулирования, математического аппарата теории обыкновенных дифференциальных уравнений, численных методов, методов многокритериальной оптимизации. Полученные результаты подтверждаются результатами натуральных испытаний и практикой эксплуатации шпиндельных узлов с газостатическими опорами, применением поверенных и аттестованных измерительных приборов и оборудования.

Практическая ценность заключается в разработке технических решений повышения несущей способности и жесткости газостатических опор машин и приборов, новых конструкций газостатических опор с повышенной несущей способностью, в создании эффективных методик расчёта при проектировании газостатических опор с заданными характеристиками и качеством переходного процесса, разработке методики проектирования газостатических опор с повышенной несущей способностью, реализации и внедрении в промышленность модификаций газостатических опор с повышенной несущей способностью.

Реализация работы. Разработанные по результатам исследования газостатические опоры используются во Владимирском производственно-конструкторском объединении «Техника», на Ярославском заводе «Машприбор», во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Методика расчёта таких опор проверена в опытно-конструкторских разработках и используется в конструкторском отделе НИПТИ «Микрон».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на XXV НТК Пензенского политехнического института (г. Пенза, 1975 г.); всесоюзных научно-технических конферен-

циях: «Системы и устройства автоматики и телемеханики» (г. Владимир, 1984 г.), «Молодые учёные – производству» (г. Владимир, 1985 г.), «Повышение эффективности электромеханических и полупроводниковых преобразователей энергии в системах управления» (г. Владимир, 1986 г.), «Повышение эффективности испытаний приборных устройств» (г. Москва, 1987 г., 1989 г., 1991 г.), на школе-семинаре «Надёжность роторных систем на газовой смазке» (г. Новороссийск, 1990 г.); международных научно-технических конференциях и семинарах: «Проблемы конверсии, разработка и испытания приборных устройств» (г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993 г.), «Конверсия, приборостроение, рынок» (г. Владимир, 1995 г., 1997 г.), «Конверсия, приборостроение, медицинская техника» (г. Владимир, 1999 г.), «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (г. Гурзуф, «Датчик – 97», «Датчик – 98», «Датчик – 99»), «Ресурсосберегающие технологии машиностроения» (г. Владимир, 1999 г.), «Актуальные проблемы машиностроения» (г. Владимир, 2001 г.).

Публикации. Основные положения и материалы диссертации опубликованы в 56 работах, в числе которых одна монография и девять авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (160 наименований) и приложений. Общий объём – 250 с., основного текста – 200 с., 66 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и задачи исследования, сформулирована цель работы, поставлены задачи и указаны методы их решения.

В первой главе диссертации исследованы возможности существующих методов регулирования опор с внешним нагнетанием смазки.

Для выявления способа улучшений характеристик газостатических опор были рассмотрены применяемые методы регулирования в различных типах опор с внешним нагнетанием смазки. На основе обзора построена классификация выявленных методов регулирования опор и приведены их сравнительные характеристики (рис. 1). Анализ известных методов регулирования опор с внешним нагнетанием смазки показал, что для повышения несущей способности и жесткости опор наиболее эффективны методы, основанные на использовании в качестве ограничителей расхода воздуха регуляторов постоянного расхода и дросселей переменного сопротивления; однако для газостатических опор наиболее приемлем с позиций устойчивости и возможности осуществления микроперемещений метод регулирования расхода с применением регуляторов расхода, включённых в САР по положению подвижного элемента опоры. Из анализа литературы можно сделать выводы, что исследования газостатических опор с ограни-

чителями расхода, включёнными в САР по положению подвижного элемента, и на их основе возможности создания привода микроперемещений не проводились. В связи с этим основное направление дальнейших исследований состояло в разработке технических решений и их математических моделей для газостатических опор с повышенной несущей способностью и возможностью осуществления на их основе привода микроперемещений.

Во второй главе рассматривается применение теории проточных пневматических элементов и метода сопряженных уравнений для описания процессов, происходящих в предложенных технических решениях газостатических опор с повышенной несущей способностью и жесткостью. Обычно исследователи для решения задач газовой смазки используют нелинейное дифференциальное уравнение Рейнольдса. Используя методы линеаризации или численного решения, представляют результаты решения в виде таблиц и графиков, удобных при проектировании, однако не применимых вне исходных значений параметров, а также при отличии геометрии газостатической опоры от расчётной.

Использование теории проточных пневматических элементов совместно с методом сопряженных уравнений позволило получить аналитические выражения для расчёта несущей способности и жесткости газостатических опор с повышенной несущей способностью и разработать методики расчёта их статических и динамических характеристик.

Для исследования характеристик газостатической опоры повышенной несущей способности были выведены уравнения статики проточных камер системы, содержащей последовательно соединённые дроссели: сопло-заслонку, жиклёр и плоскую щель, в результате решения которых было получено соотношение, связывающее геометрические параметры газостатической опоры с функцией F_1 :

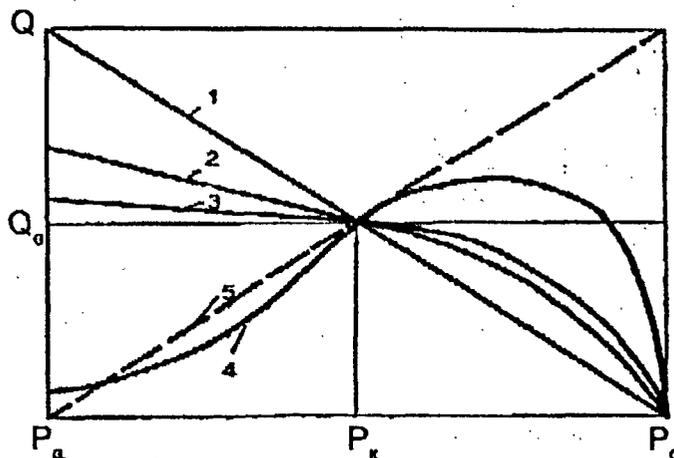


Рис. 1. Сравнительные характеристики методов регулирования опор с внешним нагнетанием смазки: 1 — соответствует опоре с ограничителем расхода в виде капилляра; 2 — опора с жиклёрами; 3 — опора с регулятором постоянного расхода; 4 — опора с регулятором, управляемым по давлению в зазоре; 5 — опора с бесконечной жесткостью

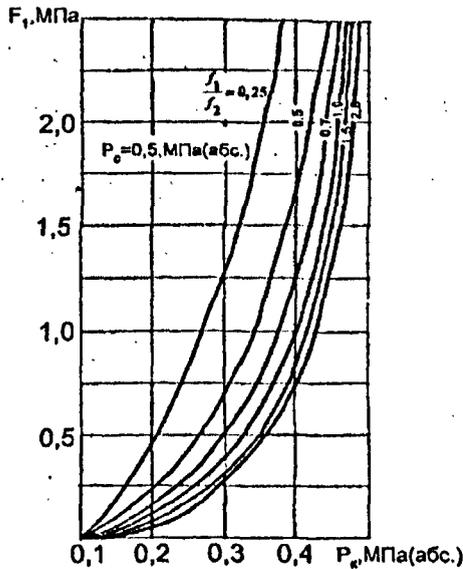


Рис. 2. Зависимость функции F_1 от давления P_k и отношения эффективных площадей f_1/f_2 при давлении питания $P_0 = 0,5$ МПа

$$\frac{f_2 l K_1}{h^3 a} = F_1, \quad (1)$$

где f_2 – эффективная суммарная площадь параллельно включённых жиклёров; l – расстояние от края подшипника до оси жиклёра; $K_1 = 12 \mu_d \sqrt{0,5RT}$ – коэффициент пропорциональности; μ_d – динамическая вязкость воздуха; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; a – приведенная ширина щели; h – радиальный зазор в подшипнике.

Значения функции F_1 для различных отношений давлений P_0/P_k и эффективных площадей определены расчётом на ЭВМ. Для давления питания $P_0 = 0,5$ МПа эта зависимость представлена на рис. 2.

Функция F_1 при различных возможных сочетаниях режимов истечения на турбулентных дросселях определяется выражениями:

– при докритических режимах истечения (Д-Д) на дросселях типа сопло-заслонка и жиклёре

$$F_1 = \frac{0,707 P_0 \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right]}{\frac{P_k}{P_0} \left(1 - \frac{P_k}{P_0} \right)} \left\{ \sqrt{\left[\frac{P_0}{P_k} - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]^2 + 4 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2} - 3 \left(\frac{P_0}{P_k} - 1 \right) - \frac{P_0}{P_k} + \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 + 2 \right\}, \quad (2)$$

где P_0 – давление питания (абс.); P_k – давление в зазоре опоры (абс.); P_a – атмосферное давление;

– при докритическом режиме истечения на дросселе типа сопло-заслонка и надкритическом режиме истечения на жиклере (Д-Н):

$$F_1 = 2 P_0 \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right] \left[1 + 0,25 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right], \quad (3)$$

– при сочетании режимов истечения на турбулентных дросселях Н-Д и Н-Н:

$$F_1 = 2P_0 \frac{f_2}{f_1} \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Приведённые графики функции F_1 позволяют при известных геометрических параметрах опоры определить давление P_k в зазоре, зная величину которого по известным формулам можно рассчитать несущую способность газостатической опоры. Аналитическое исследование таких опор показало, что их жесткость пропорциональна функции F_2 , величина которой для возможных сочетаний режимов истечения на турбулентных дросселях определяется выражениями:

– для сочетания режимов истечения Д-Д:

$$F_2 = \frac{2,66P_0^{1/3} \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right]^{1/3} \left\{ \left[\frac{P_0}{P_k} - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]^2 + 4 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - 3 \left(\frac{P_0}{P_k} - 1 \right) - \frac{P_0}{P_k} + \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 + 2 \right\}^{1/6}}{\frac{1}{P_0} \left\{ 2 \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 \left(1 - \frac{P_k}{P_0} \right) - 0,5 \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right] \left(1 - 2 \frac{P_k}{P_0} \right) \right\}} \frac{\left[\frac{P_k}{P_0} \left(1 - \frac{P_k}{P_0} \right) \right]^{5/6} \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right]}{0,5 \frac{P_0}{P_k^2} \left[\frac{P_k}{P_0} \left(1 - \frac{P_k}{P_0} \right) \right]^{1/6} \left\{ \frac{3 - 2 \left[\frac{P_0}{P_k} - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]}{2 \left\{ \left[\frac{P_0}{P_k} - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]^2 + 4 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - 3 \left(\frac{P_0}{P_k} - 1 \right) \right\}} \right\}} \dots + \frac{\left\{ \left[\frac{P_0}{P_k} - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]^2 + 4 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - 3 \left(\frac{P_0}{P_k} - 1 \right) - \frac{P_0}{P_k} + \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 + 2 \right\}^{1/6}}{\dots}; \quad (5)$$

– для сочетания режимов истечения Д-Н:

$$F_2 = -1,89 \frac{P_0}{P_k} P_0^{4/3} \left[1 + 0,25 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \right]^{1/3} \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^2 \right]^{4/3}; \quad (6)$$

— для сочетания режимов истечения Н-Д и П

$$F_2 = -1,89 \frac{P_0}{P_k} P_0^{4/3} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{1/3} \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^2 - \left(\frac{P_d}{P_0} \right)^2 \right]^{4/3} \quad (7)$$

Функция F_2 рассчитана на ЭВМ для различных давлений P_0 , P_k , отношений эффективных площадей f_1/f_2 и возможных сочетаний режимов истечения и представлена на рис. 3. Анализ построенных графиков функции F_2 показывает, что максимум последней достигается при отношении

$P_k/P_0 = 0,8$. Это условие позволяет выбирать рациональные параметры газостатических опор с целью достижения их наибольшей несущей способности, жесткости и уменьшения габаритных размеров опоры.

В работе приводятся также формулы, учитывающие влияние обратной связи по положению подвижного элемента на формирование давления P_k в зазоре. При этом используется уравнение статической характеристики междроссельной управляющей камеры, которое было получено из условия равенства расходов сжатого воздуха через измерительный и задающий дроссели, и уравнение равновесия сил на чувствительном элементе регулятора.

На основании выведенных зависимостей предложена методика расчета несущей способности и жесткости газостатической опоры с САР по положению подвижного элемента. Методика проиллюстрирована примером расчета.

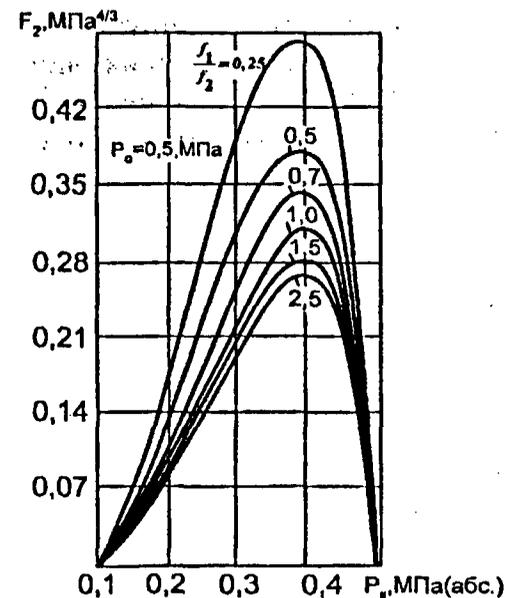


Рис. 3. Зависимость функции F_2 от давления P_k и отношения эффективных площадей f_1/f_2 при давлении питания $P_0 = 0,5$ МПа

Исследование динамических характеристик газостатических опор с САР по положению подвижного элемента проводилось для определения зависимости быстродействия, точности и монотонности переходного процесса от конструктивных параметров опоры и регулятора при работе как в режиме стабилизации положения подвижного элемента, так и в режиме микроперемещений. Были составлены дифференциальные уравнения для силовых и управляющих проточных междроссельных камер регулятора,

междроссельных камер опоры, а также для движущихся частей регулятора и опоры. Дифференциальные уравнения для проточных междроссельных камер регулятора и опоры были получены при дифференцировании во времени уравнения состояния газа в них. Для удобства последующего анализа составленные уравнения линеаризуем разложением их в ряд Тейлора как функции многих переменных. Тогда линеаризованные дифференциальные уравнения вышеперечисленных камер получаем в следующем виде:

$$T_{V1} \dot{\Delta P}_y + \Delta P_y = k_2 \Delta S_3 - k_1 \Delta h; \quad (8)$$

$$T_{V2} \dot{\Delta P}_1 + \Delta P_1 = k_3 \Delta S_1; \quad (9)$$

$$T_{V3} \dot{\Delta P}_k + \Delta P_k = k_5 \Delta P_1 - k_6 \Delta h, \quad (10)$$

где постоянные времени и коэффициенты усиления соответственно равны:

$$T_{V1} = - \frac{V_{y0}}{RT \left[\left(\frac{\partial Q_g}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_u}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_y} \right)_0 \right]}; \quad (11)$$

$$T_{V2} = - \frac{V_1}{RT \left[\left(\frac{\partial Q_1}{\partial P_1} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_1} \right)_0 \right]}, \quad (12) \quad T_{V3} = \frac{V_2}{RT \left[\left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_*} \right)_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_*} \right)_0 \right]}, \quad (13)$$

$$k_1 = \frac{\pi d_* \left(\frac{\partial Q_*}{\partial f_*} \right)_0}{\left(\frac{\partial Q_g}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_u}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_y} \right)_0}, \quad (14) \quad k_2 = \frac{\pi d_3 \left(\frac{\partial Q_3}{\partial f_3} \right)_0}{\left(\frac{\partial Q_g}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_u}{\partial P_y} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_y} \right)_0}; \quad (15)$$

$$k_3 = \frac{\pi d_1 \left(\frac{\partial Q_1}{\partial f_1} \right)_0}{\left(\frac{\partial Q_1}{\partial P_1} \right)_0 - \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_1} \right)_0}; \quad (16) \quad k_5 = \frac{\left(\frac{\partial Q_2}{\partial f_1} \right)_0}{\left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_1} \right)_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_1} \right)_0}, \quad (17)$$

$$k_6 = \frac{\left(\frac{\partial Q_3}{\partial h} \right)_0}{\left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_1} \right)_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_1} \right)_0}; \quad (18)$$

ΔS_3 , ΔP_y , ΔP_1 – изменения зазора задающего дросселя, величины давления в управляющей камере, скорости приращения управляющего

давления; ΔP_1 , ΔP_k , ΔP_1 , ΔP_k – изменения величины давления в силовой камере регулятора, давления в зазоре опоры и скорости их приращения;

$\left(\frac{\partial Q_v}{\partial P_y}\right)_0$, $\left(\frac{\partial Q_u}{\partial P_y}\right)_0$, $\left(\frac{\partial Q_z}{\partial P_y}\right)_0$ и др. – частные производные линеаризации по соответствующему параметру.

С учётом возможных режимов истечения последние частные производные определены и результаты расчётов сведены в таблицу.

Частные производные	Докритический режим истечения	Надкритический режим истечения
$\left(\frac{\partial Q_u}{\partial P_y}\right)_0$	$\frac{\mu_u f_{u0} P_a}{\sqrt{2RT P_a (P_{y0} - P_a)}}$	$\frac{\mu_u f_{u0}}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_z}{\partial P_y}\right)_0$	$\frac{\mu_z f_{z0} P_a}{\sqrt{2RT P_a (P_{y0} - P_a)}}$	$\frac{\mu_z f_{z0}}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_a}{\partial P_y}\right)_0$	$\frac{\mu_a f_{ax} (P_{ax} - 2P_{y0})}{\sqrt{2RT P_{y0} (P_{ax} - P_{y0})}}$	0
$\left(\frac{\partial Q_u}{\partial f_u}\right)_0$	$\mu_u \sqrt{\frac{2}{RT} P_a (P_{y0} - P_a)}$	$\frac{\mu_u P_{y0}}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_z}{\partial f_z}\right)_0$	$\mu_z \sqrt{\frac{2}{RT} P_a (P_{y0} - P_a)}$	$\frac{\mu_z P_{y0}}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_1}{\partial P_1}\right)_0$	$\frac{\mu_1 f_{10} (P_0 - 2P_{10})}{\sqrt{2RT P_{10} (P_0 - P_{10})}}$	0
$\left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_y}\right)_0$	$\frac{\mu_2 f_{20} P_{k0}}{\sqrt{2RT P_{k0} (P_{10} - P_{k0})}}$	$\frac{\mu_2 f_2}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_1}{\partial f_1}\right)_0$	$\mu_1 \sqrt{\frac{2}{RT} P_{10} (P_0 - P_{10})}$	$\frac{\mu_1 P_0}{\sqrt{2RT}}$
$\left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_k}\right)_0$	$\frac{\mu_2 f_{20} (P_{10} - 2P_{k0})}{\sqrt{2RT P_{k0} (P_{10} - P_{k0})}}$	0
$\left(\frac{\partial Q_3}{\partial P_k}\right)_0$	$\frac{a P_{k0} h_0^3}{12 \mu_0 l RT}$	
$\left(\frac{\partial Q_3}{\partial h}\right)_0$	$\frac{a h_0^2 (P_{k0}^2 - P_a^2)}{8 \mu_0 l RT}$	

Дифференциальные уравнения подвижных масс устройства в приращениях получаются в виде:

$$T_2^2 \Delta \ddot{S}_1 + T_1 \Delta \dot{S}_1 + \Delta S_1 = \frac{F-f}{q_1} \Delta P_y, \quad (19) \quad T_4^2 \Delta \ddot{h} + T_3 \Delta \dot{h} + \Delta h = \frac{F_n}{G_0} \Delta P_k, \quad (20)$$

$$\text{где } T_1 = \frac{D_1}{q_1}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{m}{q_1}} = \frac{1}{\omega_0}; \quad T_3 = \frac{D_2}{G_0}; \quad T_4 = \sqrt{\frac{M}{G_0}} = \frac{1}{\omega}$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени; $\Delta S_1, \Delta \dot{S}_1, \Delta \ddot{S}_1$ – перемещение мембранного блока, его скорость и ускорение; F_n, F и f – эффективные площади опоры, большой и малой мембран регулятора; q_1, G_0 – приведенные жесткости мембранного блока и газового слоя опоры; $\Delta h, \Delta \dot{h}, \Delta \ddot{h}$ – перемещение шпинделя, его скорость и ускорение; m и M – приведённые массы движущихся деталей регулятора и опоры; D_1 и D_2 – коэффициенты вязкого трения в регуляторе и опоре.

Общее дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в газостатической опоре с САР по положению подвижного элемента, получим, решая совместно дифференциальные уравнения (8), (9), (10), (19), (20) отдельных звеньев системы. Система уравнений в операторной форме запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{2} T_{v1} S + 1 \right) \Delta P_y &= k_2 \Delta S_3 - k_1 \Delta h, \\ \left(T_2^2 S^2 + T_1 S + 1 \right) \Delta S_1 &= 2 \frac{F-f}{q_1} \Delta P_y, \\ \left(\frac{1}{2} T_{v2} S + 1 \right) \Delta P_1 &= k_3 \Delta S_1, \\ \left(\frac{1}{2} T_{v3} S + 1 \right) \Delta P_k &= k_5 \Delta P_1 - k_6 \Delta h, \\ \left(T_4^2 S^2 + T_3 S + 1 \right) \Delta h &= 2 \frac{F_n}{G_0} \Delta P_k. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Структурная схема газостатической опоры с системой регулирования по положению подвижного элемента представлена на рис. 4.

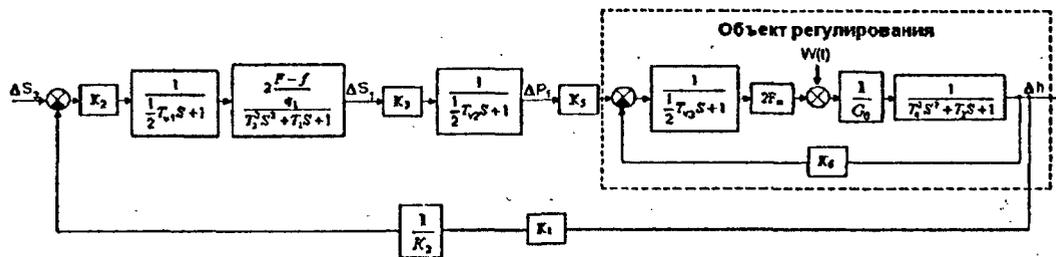


Рис. 4. Структурная схема газостатической опоры с системой регулирования по положению подвижного элемента

Передаточная функция газостатической опоры

$$\Phi(S) = \frac{L(\Delta h)}{L(\Delta S_3)} = \frac{B_0}{a_7 S^7 + a_6 S^6 + a_5 S^5 + a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0}, \quad (22)$$

где $L(\Delta h)$ – операторное изображение выходной величины; $L(\Delta S_3)$ – операторное изображение входной величины;

$$B_0 = \frac{4k_2 k_3 k_5 \frac{F-f}{q_1} \frac{F_n}{G_0}}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}}; \quad a_7 = \frac{\frac{1}{8} T_{V1} T_{V2} T_{V3} T_2^2 T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}};$$

$$a_6 = \frac{\frac{1}{2} T_{V1} T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_2^2 (T_{V1} + T_{V2}) + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_1 \right] + \frac{\frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_2^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left(\frac{1}{2} T_{V3} T_3 + T_4^2 \right);$$

$$a_5 = \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_1 (T_{V1} + T_{V2}) + T_2^2 + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} \right] + \frac{\frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_2^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left(\frac{1}{2} T_{V3} + T_3 \right) +$$

$$+ \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_3 + T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_2^2 (T_{V1} + T_{V2}) + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_1 \right];$$

$$a_4 = \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[T_1 + \frac{1}{2} (T_{V1} + T_{V2}) \right] + \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_3 + T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_1 (T_{V1} + T_{V2}) + T_2^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} \right] + \frac{\frac{1}{2} T_{V3} + T_3}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_2^2 (T_{V1} + T_{V2}) + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_1 \right] + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_2^2;$$

$$a_3 = \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_3 + T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[T_1 + \frac{1}{2} (T_{V1} + T_{V2}) \right] + \frac{\frac{1}{2} T_{V3} T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} + \frac{1}{2} T_2^2 (T_{V1} + T_{V2}) +$$

$$+ \frac{\frac{1}{2} T_{V3} + T_3}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[\frac{1}{2} T_1 (T_{V1} + T_{V2}) + T_2^2 + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} \right] + \frac{1}{4} T_{V1} T_{V2} T_1;$$

$$a_2 = \frac{\frac{1}{2}T_{V3}T_3 + T_4^2}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} + \frac{\frac{1}{2}T_{V3} + T_3}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} \left[T_1 + \frac{1}{2}(T_{V1} + T_{V2}) \right] +$$

$$+ \frac{1}{2}T_1 (T_{V1} + T_{V2}) + T_2^2 + \frac{1}{4}T_{V1}T_{V2};$$

$$a_1 = \frac{\frac{1}{2}T_{V3} + T_3}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}} + T_1 + \frac{1}{2}(T_{V1} + T_{V2});$$

$$a_0 = 1 + \frac{4k_1k_2k_3 \frac{F-f}{q_1} \frac{F_n}{G_0}}{1 + 2k_6 \frac{F_n}{G_0}}.$$

Устойчивость системы определили по критерию Рауса – Гурвица, согласно которому необходимо и достаточно выполнение следующих неравенств при всех положительных коэффициентах характеристического уравнения:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \frac{a_6 a_5 - a_7 a_4}{a_6} > 0, \\ e_1 &= \frac{d_1 a_4 - a_6 d_2}{d_1} > 0, \\ f_1 &= \frac{e_1 d_2 - d_1 e_2}{e_1} > 0, \\ g_1 &= \frac{f_1 e_2 - f_2 e_1}{f_1} > 0, \\ h_1 &= \frac{g_1 f_2 - a_0 f_1}{q_1} > 0, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\text{где } d_2 = \frac{a_6 a_3 - a_7 a_2}{a_6},$$

$$d_3 = \frac{a_6 a_1 - a_7 a_0}{a_6},$$

$$e_2 = \frac{d_1 a_2 - a_6 d_3}{d_1}, \quad f_2 = \frac{d_3 e_1 - a_0 d_1}{e_2}.$$

Влияние на устойчивость системы параметров T_{V2} и k_p при фиксированном значении T_{V1} было определено методом D -разбиения. Результаты представлены на рис. 5.

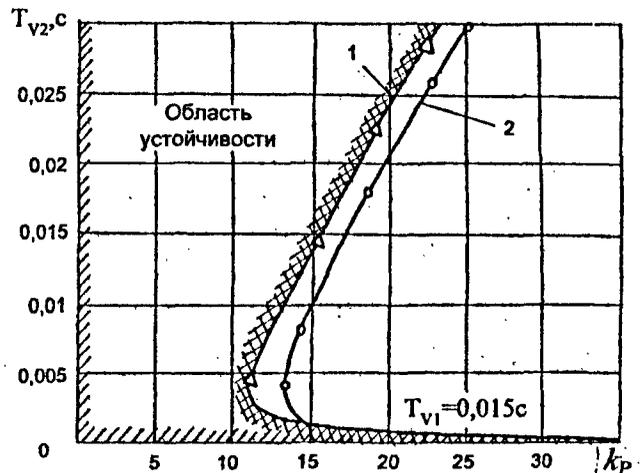


Рис. 5. Влияние параметров T_{V2} и k_p на устойчивость

Для повышения динамических качеств газостатических опор с повышенной несущей способностью была предложена опора, у которой в качестве ограничителей расхода используется дроссель переменного сопротивления с электрическим управлением, встраиваемый в место жиклёра постоянного сечения. В соответствии с вышеприведённым методом расчёта для газостатической опоры со встроенными регулируемыми соплами была получена система уравнений, с учётом преобразований Лапласа она запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} (T_2^2 S^2 + T_1 S + 1) \Delta h &= 2 \frac{F_n}{G_0} \Delta P_k, \\ \left(\frac{1}{2} T_V S + 1 \right) \Delta P_k &= k_1 \Delta S_1 - k_2 \Delta h, \\ \left(\frac{1}{2} T_3 S + 1 \right) \Delta S_1 &= k_4 \Delta U + \Delta U_0, \\ \Delta U &= 2 k_3 \Delta h. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Структурная схема газостатической опоры со встроенными соплами, описываемая системой уравнений (24), представлена на рис. 6.

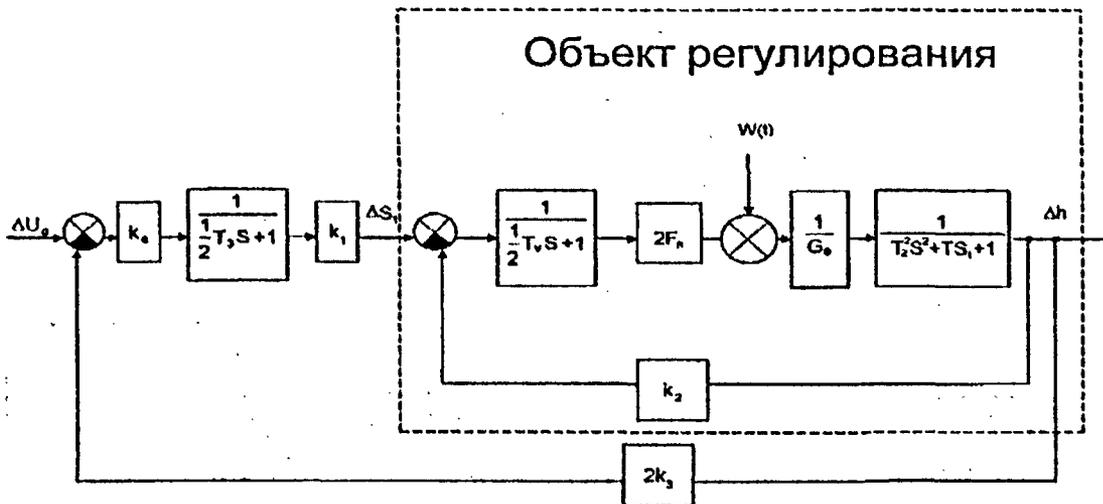


Рис. 6. Структурная схема газостатической опоры со встроенными регулируемыми соплами

Передаточная функция газостатической опоры со встроенными соплами

$$\Phi(S) = \frac{L(\Delta h)}{L(\Delta U_0)} = \frac{B_0}{a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0}, \quad (25)$$

$$\text{где } B_0 = \frac{2k_1 \frac{F_n}{G_0}}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}}; \quad a_4 = \frac{\frac{1}{4} T_V T_3 T_2^2}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}}; \quad a_3 = \frac{\frac{1}{2} T_3 \left(\frac{1}{2} T_V T_1 + T_2^2 \right) + \frac{1}{2} T_V T_2^2}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}};$$

$$a_2 = \frac{\frac{1}{2} T_3 \left(\frac{1}{2} T_V + T_1 \right) + \frac{1}{2} T_V T_1 + T_2^2}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}}; \quad a_1 = \frac{\frac{1}{2} T_V + T_1 + \frac{1}{2} T_3 \left(1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0} \right)}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}};$$

$$a_0 = \frac{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0} + 4k_1 k_3 k_4 \frac{F_n}{G_0}}{1 + 2k_2 \frac{F_n}{G_0}}.$$

Проведённый анализ устойчивости газостатической опоры со встроенными соплами показал, что возможно создание такой газостатической опоры, устойчивой в переходных и стационарных режимах, а проведённое D -разбиение в плоскости параметров T_{v2} и k_p при фиксированном T_3 выявило предельные значения конструктивных параметров опоры с САР и область устойчивости (рис. 7).

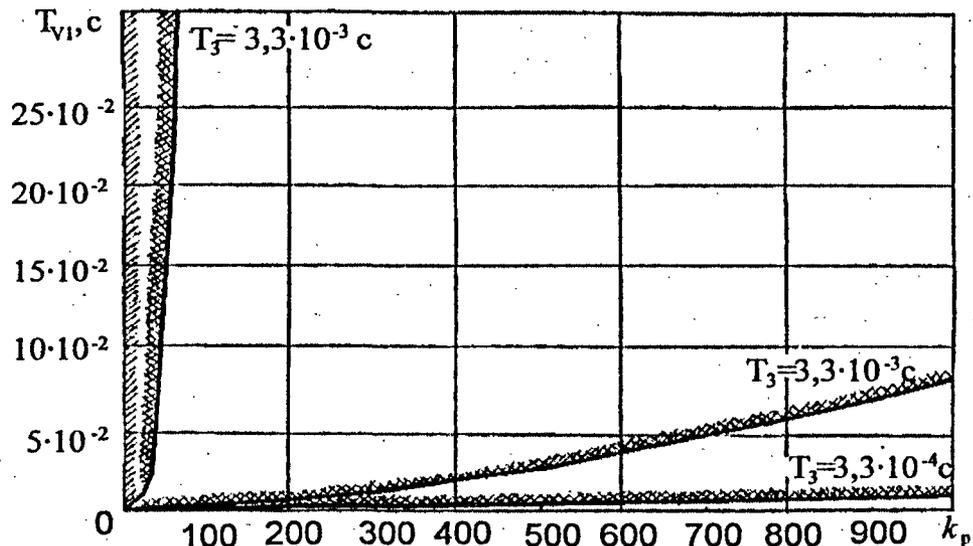


Рис. 7. Влияние параметров T_v , T_3 и k_p на устойчивость.

Анализ постоянных времени и коэффициентов передач для конкретных технических решений газостатических опор с повышенной несущей способностью показал, что постоянные времена T_3 , T_4 , T_{v3} самой опоры (объекта регулирования) малы по сравнению с остальными коэффициен-

тами, входящими в систему уравнений, и оказывают несущественное влияние, и то только на начальный участок кривой переходного процесса. Тогда для получения аналитических зависимостей переходного процесса понизим порядок исходного дифференциального уравнения до 4-го порядка.

$$b_4 \Delta h^{(4)} + b_3 \Delta h^{(3)} + b_2 \Delta h^{(2)} + b_1 \Delta h^{(1)} + b_0 \Delta h = k_p \frac{k_2}{k_1} \Delta S_3, \quad (26)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{1}{2}(T_{V1} + T_{V2}) + T_1, \quad b_2 = \frac{1}{2}(T_{V1} + T_{V2}) + \frac{1}{4}T_{V1}T_{V2} + T_2^2,$$

$$b_3 = \frac{1}{2}T_2^2(T_{V1} + T_{V2}) + \frac{1}{4}T_1T_{V1}T_{V2}, \quad b_4 = \frac{1}{4}T_2^2T_{V1}T_{V2}.$$

С целью уточнения влияния пренебрегаемых постоянных времени T_3 , T_4 и T_{V3} на устойчивость системы найдены области устойчивости в плоскости параметров T_{V2} и k_p для систем, описываемых дифференциальными уравнениями 4-го и 7-го порядков. Результаты, представленные на рис. 5 (кривые 1 и 2), показывают, что пренебрежение малыми постоянными времени T_3 , T_4 и T_{V3} не приводит к ошибке при оценке устойчивости и, следовательно, возможно понижение порядка исходного дифференциального уравнения системы. Для дальнейшего понижения порядка дифференциального уравнения используем метод А.В. Каляева, позволяющий получить в упрощенной модели те же показатели качества переходного процесса, что и в исходной. В результате аппроксимации дифференциального уравнения (22) получено следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{b_2(b_2b_3 - b_1b_4) - b_0b_3b_4}{b_0(b_2b_4 - b_1b_4)} x_n'' + \frac{b_1}{b_0} x_n' + x_n = 0, \quad (27)$$

где $x_n = \Delta h_n$ — переходная составляющая исходной функции при начальном условии $\Delta h_{n0} = B_0/a_0$; b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 — коэффициенты уравнения (27).

Уравнение (28) позволяет определить аналитические условия для выбора параметров системы, обеспечивающих апериодический переходный процесс при наибольшем быстродействии.

$$b_1^2(b_2b_3 - b_1b_4) = 4b_0[b_2(b_2b_3 - b_1b_4) - b_0b_3b_4]. \quad (28)$$

С целью упрощения выбора конструктивных параметров управляемой газостатической опоры при заданном характере переходного процесса в плоскости параметров T_{V2} и k_p построена область устойчивости, в которой выделена область апериодических переходных процессов (рис. 8).

Для проверки принятых допущений численно-графическим методом Д.А. Башкирова были построены переходные процессы исследуемой управляемой аэростатической опоры. Для этого исходное уравнение (22) и аппроксимирующие (26) и (27) записывались в виде систем уравнений, процесс численного решения которых состоял в последовательном вычис-

ления переменных на ЭВМ для каждого шага интегрирования. Анализ графиков переходных процессов, построенных по исходному и аппроксимирующим уравнениям, показал обоснованность принятой аппроксимации (рис. 9).

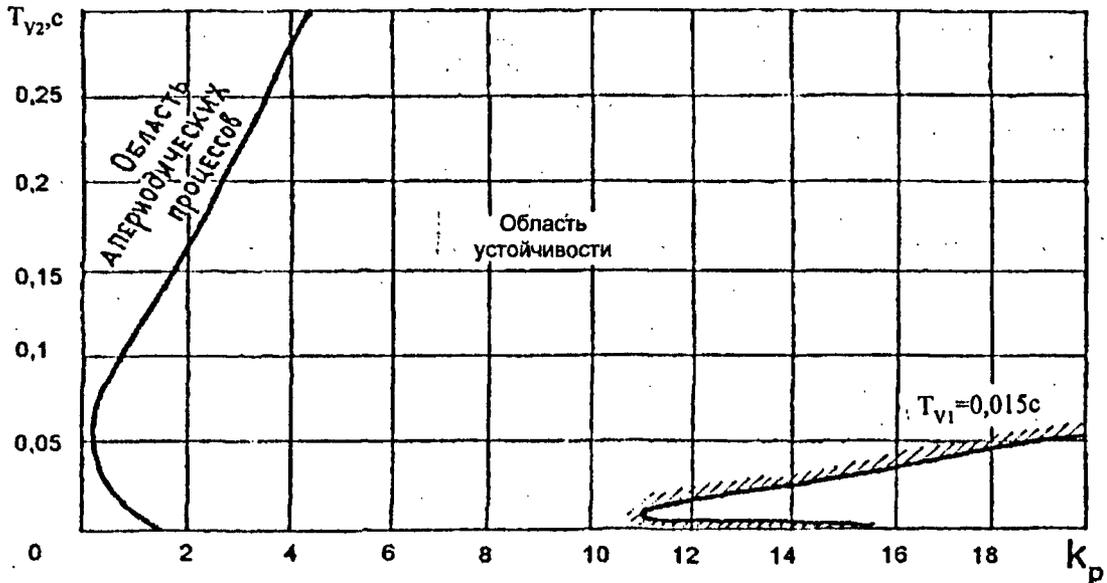


Рис. 8. Выделение области апериодических переходных процессов исследуемой системы

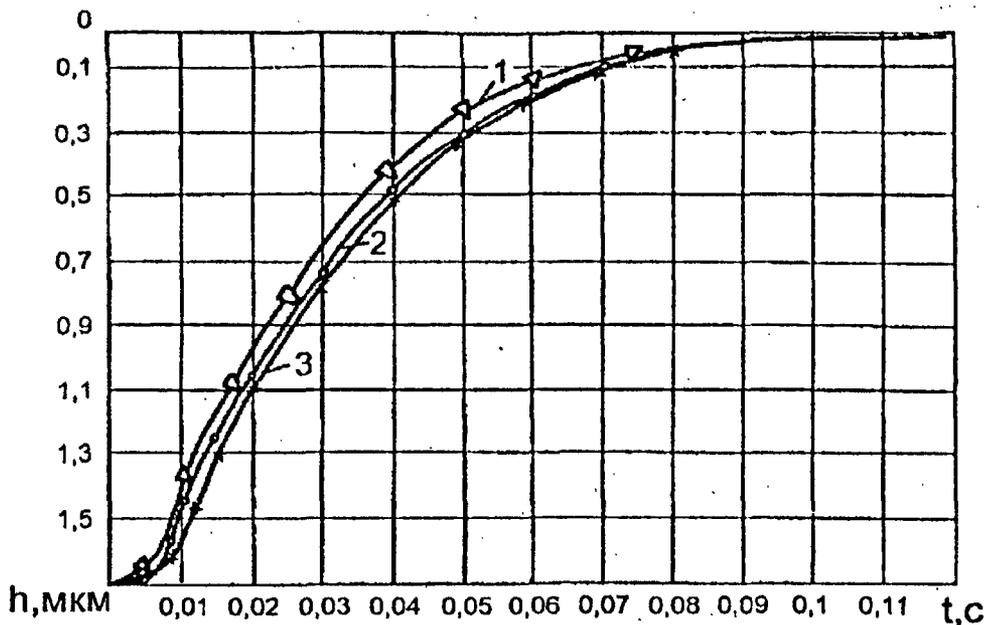


Рис. 9. Кривые переходного процесса газостатического шпинделя, описываемого дифференциальными уравнениями седьмого (кривая 2), четвертого (кривая 1) и второго (кривая 3) порядков

В третьей главе исследованы статические и динамические характеристики газостатической опоры секционного типа, используемой в двойной центрифуге и повышающей точность воспроизведения в ней гармонических линейных ускорений. Для этого предложено техническое решение газостатической опоры с пневматическим мембранным преобразователем и пневматическим управляющим устройством. Для пневматического мембранного преобразователя получена статическая характеристика и предложена методика его расчёта с оптимальными конструктивными параметрами и наибольшим быстродействием. Математическая модель ПМП описывается линейным дифференциальным уравнением четвёртого порядка:

$$A_4 \Delta l^{(4)} + A_3 \Delta l^{(3)} + A_2 \Delta l^{(2)} + A_1 \Delta l^{(1)} + \Delta l = I_0 (T_{V_4} \Delta \dot{S}_{23} + \Delta S_{23}), \quad (29)$$

$$\text{где } A_4 = \frac{T_{V_2} T_{V_4} T_M^2}{1 + (k_{01} + k_{02}) k_{4\text{э}}}; \quad A_3 = \frac{T_{V_2} (T_{\sigma} T_{V_4} + T_M^2) + T_{V_2} T_M^2}{1 + (k_{01} + k_{02}) k_{4\text{э}}};$$

$$A_2 = \frac{T_{V_4} (T_{V_2} + T_{l_2} + T_{\sigma}) + T_{V_2} (T_{l_4} + T_{\sigma}) + T_M^2}{1 + (k_{01} + k_{02}) k_{4\text{э}}};$$

$$A_1 = \frac{T_{V_2} (1 + k_{02} k_{4\text{э}}) + T_{V_4} (1 + k_{01} k_{4\text{э}}) + T_{l_2} + T_{l_4} + T_{\sigma}}{1 + (k_{01} + k_{02}) k_{4\text{э}}}; \quad I_0 = \frac{k_{23} k_{4\text{э}}}{1 + (k_{01} + k_{02}) k_{4\text{э}}};$$

постоянные времени и коэффициенты усиления имеют вид:

$$T_{V_2} = \frac{a_1}{a_2}; \quad T_{V_4} = \frac{b_1}{b_2}; \quad T_M = \sqrt{\frac{M}{k}}; \quad T_{\sigma} = \frac{\sigma}{k}; \quad k_{23} = \frac{a_3}{a_2};$$

$$k_{l_1} = \frac{a_4}{a_2}; \quad k_{l_2} = \frac{b_3}{b_2}; \quad k_{01} = \frac{a_5}{a_2}; \quad k_{02} = \frac{b_4}{b_2}; \quad k_{4\text{э}} = \frac{F_{24}}{k},$$

а коэффициенты линеаризации определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{V_{02}}{\mu_{23} \pi d_{23} \sqrt{2RT P_3 (P_{02} - P_3)}};$$

$$a_2 = \frac{\mu_{12} y \left(d - \frac{y}{2} \sin \alpha \right) \sin \frac{\alpha}{2} (P_{02} - P_3) (2P_{02} - P_1) + P_{02} (P_1 - P_{02})}{2 \mu_{23} d_{23} \sqrt{P_{02} (P_1 - P_{02}) P_3 (P_{02} - P_3) (P_{02} - P_3)}};$$

$$a_3 = -1; \quad a_4 = \frac{P_{02} F_{24}}{\mu_{23} \pi d_{23} \sqrt{2RT P_3 (P_{02} - P_3)}};$$

$$a_5 = \frac{\mu_{12}}{\mu_{23}} \sqrt{\frac{P_{02} (P_1 - P_{02})}{P_3 (P_{02} - P_3)}} \frac{d - y \sin \alpha}{d_{23}} \sin \frac{\alpha}{2}; \quad b_1 = \frac{V_{04}}{\pi \sqrt{2RT}};$$

$$b_2 = \frac{\mu_{14} y \left(d - \frac{y}{2} \sin \alpha \right) (2P_{04} - P_1) \sin \frac{\alpha}{2}}{2\sqrt{P_{04}(P_1 - P_{04})}} + \frac{\mu_{43} d_{43} S_{43} P_3}{2\sqrt{P_3(P_{04} - P_3)}};$$

$$b_3 = \frac{P_{04} F_{24}}{\pi \sqrt{2RT}}; \quad b_4 = \mu_{14} (d - y \sin \alpha) \sqrt{P_{04}(P_1 - P_{04})} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Условие устойчивости ПМП:

$$\left\{ \frac{T_{V_4}(T_{V_2} + T_{l_2} + T_{\sigma}) + T_{V_2}(T_{l_4} + T_{\sigma}) + T_M^2 + T_{V_2}[T_{V_4}(T_{V_2} + T_{l_2} + T_{\sigma}) + T_{V_2}(T_{l_4} + T_{\sigma}) + T_M^2]}{2T_{V_4}T_M^2} \right. \\ \left. - \frac{4T_{V_2}T_{V_4}T_M^2[1 + (k_{01} + k_{02})k_{43}]}{2T_{V_4}T_M^2} \right\}^{\frac{1}{2}} > \left[\frac{T_{V_2}(1 + k_{02}k_{43}) + T_{V_4}(1 + k_{01}k_{43}) + T_{l_2} + T_{l_4} + T_{\sigma}}{T_{V_4}(T_{\sigma}T_{V_2} + T_M^2) + T_{V_2}T_M^2} \right]^{\frac{1}{2}} > \\ > \left\{ \frac{T_{V_4}(T_{V_2} + T_{l_2} + T_{\sigma}) + T_{V_2}(T_{l_4} + T_{\sigma}) + T_M^2}{2T_{V_2}T_{V_4}T_M^2} \right. \\ \left. \sqrt{\frac{[T_{V_4}(T_{V_2} + T_{l_2} + T_{\sigma}) + T_{V_2}(T_{l_4} + T_{\sigma}) + T_M^2]^2 - 4T_{V_2}T_{V_4}T_M^2[1 + (k_{01} + k_{02})k_{43}]}{2T_{V_2}T_{V_4}T_M^2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

Проведены теоретические исследования статических и динамических характеристик газостатической опоры с пневматическим управляющим устройством, в конструкцию которого входил вышерассмотренный ПМП. Для этого была получена математическая модель устройства

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} T_{V_0} \Delta \dot{P}_y + \Delta P_y &= k_2 \Delta S_3 - k_1 \Delta h - k_0 \Delta S_1, \\ T_2^2 \Delta \ddot{S}_1 + T_1 \Delta \dot{S}_1 + \Delta S_1 &= 2 \frac{F}{q} \Delta P_y, \\ \frac{1}{2} T_{V_1} \Delta \dot{P}_1 + \Delta P_1 &= k_3 \Delta S_1, \\ \frac{1}{2} T_{V_2} \Delta \dot{P}_k + \Delta P_k &= k_5 \Delta P_1 - k_6 \Delta h, \\ T_4^2 \Delta \ddot{h} + T_3 \Delta \dot{h} + \Delta h &= 2 \frac{F_{II}}{G_0} \Delta P_k. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Структурная схема устройства представлена на рис. 10.

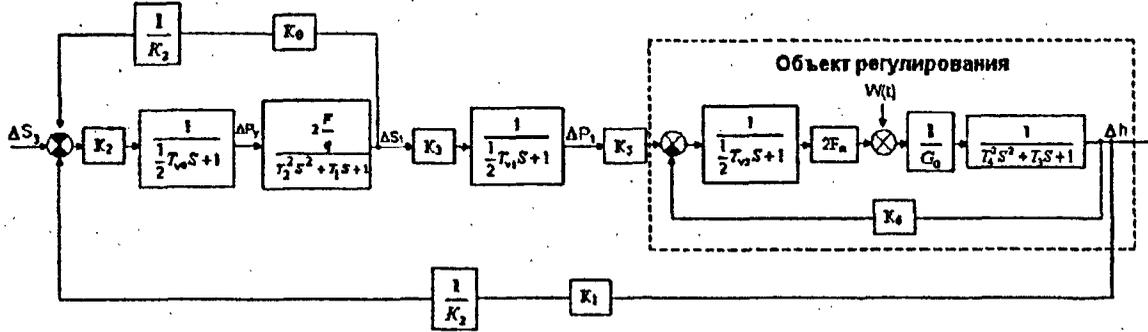


Рис. 10. Структурная схема газостатической опоры с малогабаритным пневматическим управляющим устройством

Передаточная функция газостатической опоры с пневматическим управляющим устройством

$$\Phi(S) = \frac{B_0}{a_7 S^7 + a_6 S^6 + a_5 S^5 + a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S^1 + a_0}, \quad (32)$$

$$\text{где } B_0 = \frac{4k_2 k_3 k_5 \frac{FF\Pi}{qG_0}}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)}; \quad a_7 = \frac{\frac{1}{8} T_{V_0} T_{V_1} T_2^2 T_4^2}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)}$$

$$a_6 = \frac{\frac{1}{4} T_{V_0} T_{V_1} T_2^2 \left(\frac{1}{2} T_{V_2} T_3 + T_4^2\right) + \frac{1}{4} T_{V_2} T_4^2 \left[\left(\frac{1}{2} T_{V_0} T_1 + T_2^2\right) T_{V_1} + T_{V_0} T_2^2\right]}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)}$$

$$a_5 = \frac{\frac{1}{4} T_{V_0} T_1 T_2^2 \left(\frac{1}{2} T_{V_2} + T_3\right) + \left(\frac{1}{2} T_{V_2} T_3 + T_4^2\right) \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} T_{V_0} T_1 + T_2^2\right) T_{V_1} + T_{V_0} T_2^2\right]}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)} +$$

$$+ \frac{\frac{1}{2} T_{V_2} T_4^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} T_{V_0} + T_1\right) T_{V_1} + \left(\frac{1}{2} T_{V_0} T_1 + T_2^2\right)\right]}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)}$$

$$a_4 = \frac{\frac{1}{4} T_{V_0} T_{V_1} T_2^2 \left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) + \left(\frac{1}{2} T_{V_2} + T_3\right) \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} T_{V_0} T_1 + T_2^2\right) T_{V_1} + T_{V_0} T_2^2\right]}{\left(1 + 2k_6 \frac{F\Pi}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\left(\frac{1}{2}T_{V_2}T_3 + T_4^2\right)\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0}T_1 + T_2^2\right)\right]}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)} + \\
& + \frac{\frac{1}{2}T_{V_2}T_4^2\left[\frac{1}{2}\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)\right]}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)}; \\
\alpha_3 = & \frac{\frac{1}{4}T_{V_2}T_4^2\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right) + \left(\frac{1}{2}T_{V_2}T_3 + T_4^2\right)\left[\frac{1}{2}\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)\right]}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)} + \\
& + \frac{\left(\frac{1}{2}T_{V_2} + T_3\right)\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0}T_1 + T_2^2\right)\right]}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)} + \\
& + \frac{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{2}T_{V_0}T_1 + T_2^2\right)T_{V_1} + T_{V_0}T_2^2\right]\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)}; \\
\alpha_2 = & \frac{\left(\frac{1}{2}T_{V_2}T_3 + T_4^2\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right) + \left(\frac{1}{2}T_{V_2} + T_3\right)\left[\frac{1}{2}\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)\right]}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)} + \\
& + \frac{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}T_{V_2}T_3 + T_4^2\right)T_{V_1} + \left(\frac{1}{2}T_{V_0}T_1 + T_2^2\right)\right]\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)}; \\
\alpha_1 = & \frac{\left(\frac{1}{2}T_{V_2} + T_3\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right) + \left(\frac{1}{2}T_{V_0} + T_1\right)\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)}{\left(1 + 2k_6\frac{F_{\Pi}}{G_0}\right)\left(1 + 2k_0\frac{F}{q}\right)};
\end{aligned}$$

$$a_0 = \frac{\left(1 + 2k_6 \frac{F_{II}}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right) + 4k_1 k_3 k_5 \frac{FF_{II}}{qG_0}}{\left(1 + 2k_6 \frac{F_{II}}{G_0}\right) \left(1 + 2k_0 \frac{F}{q}\right)}$$

Анализ исходной системы дифференциальных уравнений показал, что возможно создание газостатической опоры с предложенной конструкцией пневматического управляющего устройства, устойчивой в переходных и стационарных режимах. D -разбиение (рис. 11) в плоскости параметров T_{V2} и k_p позволяет выявить предельные значения конструктивных параметров газостатической опоры с САР и её область устойчивости.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментального исследования газостатических опор с повышенной несущей способностью и жесткостью. Экспериментальное исследование проводилось с целью проверки результатов теоретических исследований, изучения свойств газостатической опоры как объекта регулирования, снятия нагрузочных, регулировочных и переходных характеристик газостатической опоры с САР, а также возможности использования газостатического шпинделя в качестве привода микроперемещений.

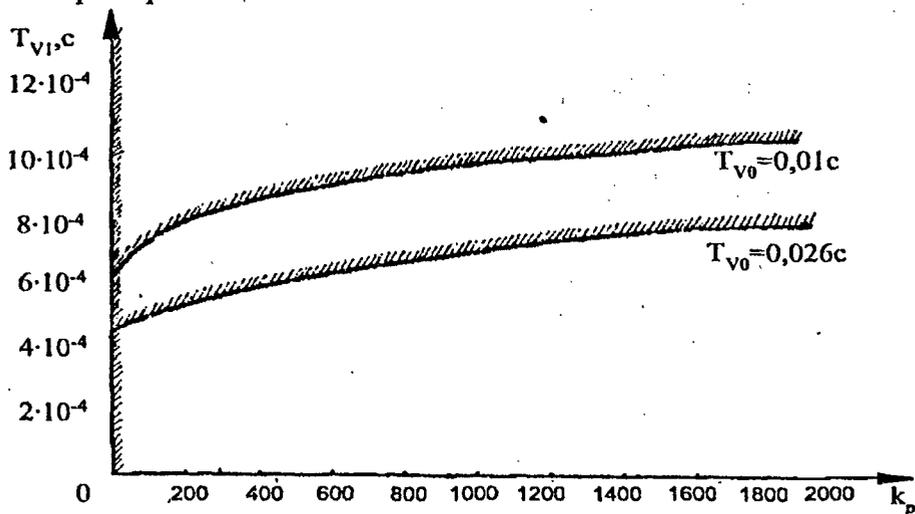


Рис. 11. Влияние параметров T_{V1} , T_{V2} и k_p на устойчивость

Для исследования был разработан и изготовлен специальный стенд, который позволял снимать как статические характеристики (нагрузочные и регулировочные), так и динамические (частотные и переходные). Конструкция стенда подробно описана в диссертации автора.

Экспериментально исследованы свойства газостатического шпинделя как объекта регулирования. В результате этих испытаний получены амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ) шпинделя в устойчивой

область его работы, собственная частота колебаний шпинделя (600 Гц), величина сил демпфирования газовой смазки и проанализировано влияние на величину сил демпфирования давления питания. В процессе этих исследований разработан оригинальный способ снятия АФЧХ при естественном торможении вращающегося шпинделя, новизна которого защищена авторским свидетельством.

Разработаны методика экспериментальных исследований статических и динамических характеристик ПМП и метод определения его оптимальных конструктивных параметров для обеспечения максимального быстродействия. Экспериментально исследованы статические, переходные и амплитудные характеристики ПМП, в результате которых удалось получить время его срабатывания 0,01 с. Экспериментально получены статические характеристики пневматического управляющего устройства. Статические характеристики показали, что устройство способно изменять давление на выходе в широких пределах при малых изменениях измерительного зазора.

Экспериментально исследованы нагрузочные характеристики газостатической опоры с САР. Показано, что крутизна нагрузочных характеристик шпинделя возрастает с уменьшением диаметра измерительного сопла, а линейность характеристик соблюдается до относительных эксцентриситетов $\varepsilon = 0,4$. В то же время экспериментальные характеристики газостатической опоры с САР в 2 – 3 раза превышают аналогичные характеристики опоры без САР, что полностью согласуется с расчётом.

В результате экспериментальных исследований регулировочных характеристик управляемого газостатического шпинделя выявлено, что в подтверждение теоретических положений коэффициент передачи системы увеличивается с уменьшением диаметров задающего и измерительных сопл. Испытания также показали, что статическая нагрузка уменьшает коэффициент передачи и сокращает линейный участок регулировочной характеристики, а повышение давления питания управляющей цепи увеличивает их крутизну. Линейность регулировочной характеристики соблюдается до относительного эксцентриситета $\varepsilon = 0,45$.

Экспериментально полученные динамические характеристики управляемой азростатической опоры подтвердили высокое быстродействие системы. Наименьшее время переходного процесса системы составило 0,12 с. Показано влияние на длительность переходного процесса объёмов управляющей и силовой камеры регулятора, диаметров входного и задающего сопл, статической нагрузки и амплитуды перемещения шпинделя. Сокращение длительности переходного процесса достигается уменьшением объёмов управляющей и силовой камер регулятора, а монотонность процесса – увеличением соотношения этих объёмов между собой и уменьшением общего коэффициента усиления системы.

В целом экспериментальные характеристики достаточно хорошо согласуются с теоретическими (погрешность не более 10 %) во всём диапазоне значений относительных эксцентриситетов (0...0,4), практически реализуемых в шпиндельных группах прецизионных станков, машин и приборов, что подтверждает возможность применения линейных методов при исследовании и проектировании газостатических опор с САР.

В пятой главе разработаны модификации схем управляемой газостатической опоры и даны рекомендации для конкретных условий применения, позволяющие повысить быстродействие всей системы по сравнению с исходной схемой. Оригинальные технические решения защищены девятью авторскими свидетельствами и патентами. Показано, что привод микроперемещений на основе газостатической шпиндельной опоры реализуется при минимальных изменениях станка и не является в то же время дополнительным звеном СПИД в кинематической цепи станка.

Предложена конструкция образцовой центрифуги на газостатических опорах, обеспечивающая высокую точность вращения ротора, защищенная авторским свидетельством. Рассмотрено применение газостатических опор в измерительных устройствах и приборах.

Результаты проведённых разработок внедрены в серию станков на предприятиях ВПКО «Техника», г. Владимир (методика расчёта управляемого газостатического шпиндельного узла, а также газостатический шпиндельный узел по авт. св. № 552140), «Машприбор», г. Ярославль (аэростатический шпиндельный узел с САР по авт. св. № 552140), во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (шпиндельный узел эталонной центрифуги на аэростатических опорах управляемого типа). Методика расчёта таких опор использована в конструкторском отделе НИПТИ «Микрон» и проверена в опытно-конструкторских разработках.

В приложениях к диссертации приведены программы для расчёта ряда математических зависимостей на ЭВМ, акты испытания и внедрения проведённых разработок управляемого аэростатического шпиндельного узла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны технические решения, позволяющие повысить несущую способность и жёсткость газостатических опор и расширить их функциональные возможности.

2. В результате анализа существующих методов регулирования опор с внешним нагнетанием смазки установлено, что одно из наиболее перспективных направлений их совершенствования состоит в создании управляемых газостатических опор с системой автоматического регулирования по положению вала.

При теоретическом исследовании управляемых газостатических опор:

- а) разработаны функциональные и принципиальные схемы газостатических опор с системой автоматического регулирования по положению вала;

- б) разработаны и обоснованы математические модели управляемых газостатических опор и получены аналитические зависимости, связывающие конструктивные параметры и характеристики опоры;

- в) проанализированы возможности аппроксимации исходного дифференциального уравнения замкнутой системы и показано, что возможно понижение порядка аппроксимирующего дифференциального уравнения до второго с достаточной для практики точностью; на основе полученной аппроксимации сформулированы аналитические условия апериодического переходного процесса в системе при наибольшем быстродействии.

- г) исследованы статические и динамические характеристики предложенных конструкций управляющих устройств с газостатической опорой секционного типа, разработаны их математические модели; исследованы на устойчивость и установлены предельные значения конструктивных параметров опоры и управляющих устройств.

4. Разработаны методика статического расчета, позволяющая оптимизировать выбор конструктивных параметров управляемой газостатической опоры с целью получения максимальной жёсткости, и методика динамического расчёта для реализации монотонного переходного процесса при наибольшем быстродействии как в режиме стабилизации вала, так и в режиме микроперемещений.

5. Предложена методика расчета пневматических мембранных преобразователей с оптимальными конструктивными параметрами для газостатических опор секционного типа образцовой центрифуги.

6. В процессе экспериментальных исследований управляемой газостатической опоры:

- а) подтверждены основные теоретические выводы и найдены эмпирические коэффициенты в расчетных соотношениях; доказаны обоснованность допущений, сделанных при теоретическом исследовании, возможность применения линейных методов при исследовании и проектировании управляемых аэро-статических опор;

- б) разработан оригинальный способ получения амплитудно-фазочастотных характеристик опоры при естественном торможении вращающегося шпинделя, новизна которого защищена авторским свидетельством;

- в) показано достаточно хорошее (погрешность не более 10 %) совпадение полученных экспериментально нагрузочных и регулировочных ха-

ра характеристик опоры с теоретическими во всем диапазоне значений относительных эксцентриситетов (0...0,4), практически реализуемых в шпиндельных группах прецизионных станков, машин и приборов;

г) установлено, что нагрузочная способность и жесткость газостатической опоры с системой автоматического регулирования повышается в 2 — 3 раза, что полностью согласуется с расчетом;

д) подтверждена возможность использования управляемого газостатического шпиндельного узла в качестве привода микроперемещений вала в пределах 1/3 величины радиального зазора.

7. По результатам теоретического и экспериментального исследований сформулированы следующие рекомендации по выбору основных параметров управляемой газостатической опоры:

а) отношение давления в зазорах опоры к давлению питания при концентричном положении шпинделя должно быть около 0,8 (при этом достигается максимальная жесткость опоры);

б) объемы управляющей и силовой камер управляемой опоры следует выбирать минимальными (при этом отношение объемов должно быть равно 5...8);

в) для обеспечения аperiodического переходного процесса при наибольшем быстродействии необходимо соблюдать приведенные аналитические условия выбора конструктивных параметров системы (28).

8. Разработаны модификации схем управляемых газостатических опор и даны рекомендации для конкретных условий их применения. Реализация предложенных схем возможна как на стандартных элементах (например элементах УСЭППА), выпускаемых промышленностью, так и на оригинальных управляющих устройствах, защищенных девятью авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

9. Основные результаты работы внедрены во Владимирском производственно-конструкторском объединении "Техника", Ярославском специальном конструкторском бюро завода "Машприбор", во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, г. Санкт-Петербург, научно-исследовательском проектно-технологическом институте «Микрон», г. Владимир.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Легаев, В.П. Анализ влияния конструктивных параметров аэростатической опоры управляемого типа на устойчивость / В.П. Легаев // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 3. – С. 16 – 28.
2. Легаев, В.П. Выбор параметров аэростатической опоры управляемого типа с целью обеспечения заданного качества переходного процесса / В.П. Легаев // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 13 – 24.
3. Легаев, В.П. Математическая модель газостатической опоры со встроенными регулируемыми соплами / В.П. Легаев // Вестник машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 8 – 12.
4. Легаев, В.П. Применение газостатических опор в эталонных центрифугах / В.П. Легаев // Вестник машиностроения. – 2005. – № 8. – С. 8 – 11.
5. Легаев, В.П. Исследование динамики газостатической опоры с пневматическим управляющим устройством / В.П. Легаев // Вестник машиностроения. – 2005. – № 9. – С. 51 – 59. – ISSN 0042-4633.
6. Легаев, В.П. Экспериментальные исследования свойств газостатической опоры как объекта регулирования / В.П. Легаев // Вестник машиностроения. – 2005. – №10. – С. 19 – 21. – ISSN 0042-4633.
7. А.С. 532483 СССР, М. Кл.² В 23 В 19/02. Способ снятия амплитудно-фазо-частотной характеристики газо(гидро)статического шпинделя / В.П. Легаев, В.С. Погорелый, А.В. Власенков (СССР). – № 2172152 / 08 ; заявл. 30.09.75 ; опубл. 25.10.76, Бюл. №39. – 2 с.
8. А.С. 552140 СССР, М. Кл.² В 23 В 17/00. Двухопорный аэростатический шпиндельный узел / В.П. Легаев, В.С. Погорелый, Н.И. Дмитриев (СССР). – № 2172151 / 08 ; заявл. 30.09.75 ; опубл. 30.03.77, Бюл. №12. – 3 с.
9. А.С. 606710 СССР, М. Кл.² В 23 Q 1/02, F 16 C 29/12. Регулятор для гидростатических опор / В.П. Легаев, А.В. Власенков (СССР). – № 2422527 / 25-08 ; заявл. 25.11.76 ; опубл. 15.05.78, Бюл. №18. – 2 с.
10. А.С. 608032 СССР, М. Кл.² F 16 K 31/02, F 15 C 3/02. Управляемый гидравлический дроссель / В.П. Легаев, В.С. Погорелый (СССР). – № 2351743 / 25-24 ; заявл. 14.04.76 ; опубл. 25.05.78, Бюл. №19. – 2 с.
11. А.С. 774807 СССР, М. Кл.² В 23 В 17/00. Аэростатическая опора шпинделя / В.П. Легаев, А.И. Минаев, О.С. Алексеева (СССР). – № 2678438 / 25-08 ; заявл. 03.11.78, опубл. 30.10.80, Бюл. №40. – 3 с.

12. А.С. 1007027 СССР, Кл. G 01 P 21/00. Двойная центрифуга / В.П. Легаев, В.С. Погорелый, В.Б. Боков (СССР). – № 3353038 / 18-21 ; заявл. 10.11.81 ; опубл. 23.03.83, Бюл. №11. – 4 с.
13. А.С. 1033786 СССР, Кл. F 16 C 32/06. Аэростатическая шпиндельная опора / В.П. Легаев, В.С. Погорелый, В.Б. Боков (СССР). – № 3425297 / 25-08 ; заявл. 20.04.82 ; опубл. 07.08.83, Бюл. №29. – 3 с.
14. А.С. 1303947 СССР, Кл.⁴ G 01 P 21/00. Двойная центрифуга / В.П. Легаев, В.Б. Боков, В.В. Лысов (СССР). – № 3976449 / 24-10 ; заявл. 18.11.85 ; опубл. 15.04.87, Бюл. №14. – 3 с.
15. Пат. 2127377 Российская Федерация, F 16 C 32/06. Аэростатическая шпиндельная опора / В.П. Легаев, А.В. Воробьев, Д.А. Михайлов ; заявитель и патентообладатель Владим. гос. ун-т. – № 97108269 / 28 ; заявл. 20.05.97 ; опубл. 10.03.99, Бюл. №7. – 3 с.
16. Легаев, В.П. Газовые опоры станков и приборов : монография / В.П. Легаев, В.В. Гавшин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1996. – 224 с. – ISBN 5-230-04849-2.
17. Легаев, В.П. Обзор и анализ методов ограничения расхода смазки в аэростатических опорах / В.П. Легаев ; Владим. политехн. ин-т. – М., 1980. – 110 с. – Деп. в ГОСИНТИ, № 73-80.
18. Легаев, В.П. Анализ влияния конструктивных параметров аэростатической опоры управляемого типа на устойчивость / В.П. Легаев ; Владим. политехн. ин-т. – М., 1982. – 118 с. – Деп. в НИИМАШ, № 213-81.
19. Легаев, В.П. Выбор параметров аэростатической опоры управляемого типа с целью обеспечения заданного качества переходного процесса / В.П. Легаев ; Владим. политехн. ин-т. – М., 1982. – 118 с. – Деп. в НИИМАШ, № 214-81.
20. Легаев, В.П. Опоры с внешним нагнетанием смазки прецизионных шпинделей ротационных установок / В.П. Легаев // Методы и оборудование для проведения динамических испытаний приборных устройств : сб. науч. тр. – М., 1982. – С. 17 – 21.
21. Легаев, В.П. Пьезострикционный блок микроперемещений / В.П. Легаев ; Владим. политехн. ин-т. – М., 1984. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ, № 2415пр-Д84.
22. Легаев, В.П. Анализ аэростатических шпиндельных опор как систем регулирования / В.П. Легаев // Молодые ученые производству : сб. науч. тр. – Владимир, 1985. – С. 13 – 18.

23. Легаев, В.П. Аэростатическая опора со встроенными регулируемыми соплами / В.П. Легаев ; Владим. политехн. ин-т. – М., 1986. – 112 с. – Деп. во ВНИИТЕМР, № 206 мш-86 Деп.
24. Легаев, В.П. Установка для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений / В.П. Легаев // Повышение эффективности испытаний приборных устройств : сб. науч. тр. – Владимир, 1987. – С. 4 – 5.
25. Легаев, В.П. Разработка и исследование аэростатической опоры эталонной центрифуги / В.П. Легаев // Повышение эффективности испытаний приборных устройств : материалы семинара. – М., 1989. – С. 38 – 42.
26. Легаев, В.П. Определение параметров аэростатической опоры с заданным качеством переходного процесса / В.П. Легаев // Повышение эффективности испытаний приборных устройств : материалы семинара. – М., 1989. – С. 95 – 97.
27. Легаев, В.П. Аэростатическая опора с дросселями переменного сопротивления / В.П. Легаев // Надёжность роторных систем с опорами на газовой смазке : материалы всесоюз. шк.-семинара по газовой смазке. – М., 1990. – С. 51.
28. Легаев, В.П. Анализ влияния конструктивных параметров аэростатической опоры на устойчивость в переходных режимах / В.П. Легаев // Гидравлические системы металлорежущих станков и промышленных роботов : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. проф. О.Н. Трифонова. – М., 1990. – Вып. 10. – С. 133 – 150.
29. Легаев, В.П. Математическая модель аэростатической опоры со встроенными регулируемыми соплами / В.П. Легаев // Повышение эффективности испытаний приборных устройств. – М., 1991. – С. 42 – 44.
30. Легаев, В.П. Устройство управления аэростатической опоры с регулируемым сечением жиклёров / В.П. Легаев // Проблемы конверсии, разработка и испытание приборных устройств : материалы междунар. науч.-техн. конф. – М., 1993. – С. 80 – 83.
31. Легаев, В.П. Управляемый аэростатический шпиндельный узел / Информ. листок ЦНТИ № 316-75. – Владимир. – 5 с.
32. Легаев, В.П. Регулятор для гидростатических опор / Информ. листок № 268-87 Владим. межотраслевой тер. центр НТИ и П, 1987. – 4 с.
33. Легаев, В.П. Аэростатическая шпиндельная опора / Информ. листок № 267-87 Владим. межотраслевой тер. центр НТИ и П, 1987. – 5 с.

34. Легаев, В.П. Двойная центрифуга с оптическим измерителем поворотного стола / Информ. листок № 265-87 Владим. межотраслевой тер. центр НТИ и П, 1987. – 6 с.
35. Легаев, В.П. Пьезодатчик давления в системах управления аэростатической шпиндельной опорой / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». – Гурзуф, 1998. – С. 204 – 205. – ISBN 5-230-222 14-Х.
36. Легаев, В.П. Аэростатическая шпиндельная опора повышенной жесткости / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы НТК «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении». – Владимир, 1999. – С. 121 – 122. – ISBN 5-89368-140-1.
37. Легаев, В.П. Аэростатическая опора с датчиком нагрузки и положения / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». – Гурзуф, 1999. – С. 42 – 43. – ISBN 5-230-22347-6.
38. Легаев, В.П. Устройство управления поворотной втулкой аэростатической опоры с пьезодатчиком давления / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». – Гурзуф, 1999. – С. 43 – 44. – ISBN 5-230-22347-6.
39. Легаев, В.П. Быстродействующая система автоматического управления аэростатической шпиндельной опорой / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы МНТК «Конверсия, приборостроение, медицинская техника». – Владимир, 1999. – С. 119 – 122. – ISBN 5-89368-147-9.
40. Легаев, В.П. Аэростатическая шпиндельная опора, совмещающая два метода улучшения рабочих характеристик / В.П. Легаев, Д.А. Михайлов // Материалы МНТК «Конверсия, приборостроение, медицинская техника». – Владимир, 1999. – С. 122 – 125. – ISBN 5-89368-147-9.
41. Легаев, В.П. Некоторые вопросы создания аэростатической опоры с системой автоматического регулирования / В.П. Легаев, С.И. Вдовин // Материалы I МНТК «Актуальные проблемы машиностроения». – Владимир, 2001. – С. 48 – 51. – ISBN 5-89368-240-8.
42. Легаев, В.П. Аэростатическая опора / В.П. Легаев, С.И. Вдовин, А.А. Богомоллов // Материалы I МНТК «Актуальные проблемы машиностроения». – Владимир, 2001. – С. 51 – 52. – ISBN 5-89368-240-8.

43. Легаев, В.П. Малогабаритное пневматическое управляющее устройство для системы стабилизации секционной аэростатической опоры / В.П. Легаев, В.Б. Боков // Системы и устройства автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – Владимир, 1984. – С. 13 – 14.
44. Легаев, В.П. Аэростатическая опора эталонной центрифуги с системой стабилизации положения ротора / В.П. Легаев, В.В. Лысов // Системы и устройства автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – Владимир, 1984. – С. 39 – 40.
45. Разработка узлов аэростатической опоры эталонной установки для воспроизведения гармонических линейных ускорений : отчёт о НИР (4.1) / Владим. политехн. ин-т ; исполн. : Легаев В.П. [и др.]. – Владимир, 1981. – 46 с. – № 08102127. – Инв. № 02840079972.
46. Разработка узлов управляемой аэростатической опоры эталонной установки для воспроизведения гармонических линейных ускорений : отчёт о НИР (4.2) / Владим. политехн. ин-т ; исполн. : Легаев В.П. [и др.]. – Владимир, 1982. – 76 с. – № 08102127. – Инв. № 02840079972.
47. Разработка узлов управляемой аэростатической опоры эталонной установки для воспроизведения гармонических линейных ускорений : отчёт о НИР (4.3) / Владим. политехн. ин-т ; исполн. : Легаев В.П. [и др.]. – Владимир, 1983. – 82 с. – № 08102127. – Инв. № 02840079972.
48. Разработка узлов управляемой аэростатической опоры эталонной установки для воспроизведения гармонических линейных ускорений : отчёт о НИР (4.4) / Владим. политехн. ин-т ; исполн. : Легаев В.П. [и др.]. – Владимир, 1984. – 25 с. – № 08102127. – Инв. № 02840079972.
49. Легаев, В.П. Применение пьезоэлектрических регуляторов для улучшения характеристик аэростатических опор / В.П. Легаев, В.В. Лысов // Повышение эффективности электромеханических и полупроводниковых преобразователей энергии в системах управления : сб. науч. тр. – Владимир, 1986. – С. 27 – 29.
50. Легаев, В.П. Аэростатический шпиндельный узел повышенной жесткости для прецизионных ротационных установок / В.П. Легаев, В.В. Лысов, Н.В. Сидорова // Повышение эффективности испытаний приборных устройств : сб. науч. тр. – Владимир, 1987. – С. 18 – 21.

51. Легаев, В.П. Теоретическое исследование статических характеристик аэростатической опоры с дросселями переменного сопротивления / В.П. Легаев, В.С. Погорелый // Новые методы проектирования, контроля и испытания приборных устройств : сб. науч. тр. – Рязань, 1977. – С. 73 – 78.
52. Легаев В.П., Сидорова Н.В. Анализ аэростатической опоры со встроенными регулируемыми соплами на устойчивость / В.П. Легаев, Н.В. Сидорова // Повышение эффективности испытаний приборных устройств : сб. науч. тр. – М., 1991. – С. 44 – 45.

ЛР № 020275. Подписано в печать 14.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,95. Тираж 120 экз.

Заказ 49-2006г

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.

