

На правах рукописи  
УДК 62-822; 537.622.4

БОРИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЮСТИРОВКИ СВЕРХТОЧНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ  
МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2007

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный консультант: доктор технических наук, доцент  
Михайлов Валерий Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Курбатов Олег Константинович  
ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского»

доктор технических наук, профессор  
Васильев Герман Николаевич  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: ФГУП «ГНЦ ГНИИХТЭОС»

Защита состоится «21» мая 2007 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана

Телефон для справок: (095) 267-09-63

Автореферат разослан «11» апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
доцент



Михайлов Валерий Павлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Во многих областях современной науки и техники требуется использование прецизионных позиционирующих механизмов. Особенно данная проблема актуальна для автоматизированного оборудования электронной промышленности.

Определяющим и наиболее сложным процессом в производстве интегральных схем является литография. Одной из основных операций, отвечающих за качество получаемой структуры, является операция совмещения изображений на шаблоне и подложке. При этом, например, в оборудовании для рентгеновской литографии при изготовлении современных сверхбольших интегральных микросхем для совмещения подложки и шаблона требуется обеспечить шестикоординатное перемещение с точностью не хуже 20 нм, при миллисекундном быстродействии в линейном диапазоне до 300 мм.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из наиболее перспективных средств и методов нанотехнологий, позволяющих контролировать поверхность на атомарном уровне. Для операции сканирования требуется перемещать зонд с точностью до 1 нм с быстродействием на уровне нескольких миллисекунд. Перспективным является возможность осуществлять сканирование в широком диапазоне (до нескольких миллиметров) без существенных потерь в быстродействии, что ставит проблему сочетания нанометровой точности с достаточно большим диапазоном перемещений.

Развитие современной астрофизики неразрывно связано с интенсивным развитием астрономических средств нового поколения. Одним из основных направлений развития является создание сверхбольшого оптического телескопа (диаметр главного зеркала более 20 м). То, что главное зеркало таких телескопов состоит из большого числа отдельных оптических элементов (элементарных зеркал – ЭЗ), приводит к необходимости автоматического поддержания их как общей поверхности. Кроме этого необходима функция коррекции искажения волнового фронта в реальном времени. Для управления элементами составных зеркал требуется обеспечить многокоординатную юстировку с точностью линейных перемещений 50 нм, угловых перемещений 0.02'' и быстродействием не хуже 200 мс в линейном диапазоне до 10 мм и угловом диапазоне до 1°.

Большинство современных технологических и исследовательских комплексов (например, установки анализа поверхностей, системы контроля положения в СЗМ) в качестве каналов связи используют оптоволоконно. Для настройки оптоволоконных систем необходимо юстировать оптоволоконно относительно источника излучения по трем координатам с точностью 20-50 нм в диапазоне до 4 мм. Существующие системы осуществляют данную

задачу за десятки секунд из-за необходимости сочетать разные устройства для предварительного и точного позиционирования.

Работа сверхточного оборудования, в том числе позиционирующих устройств, требует качественной виброизоляции для снижения амплитуд вибрации, действующей со стороны основания, что очень важно, в частности, при производстве изделий электронной техники. Модули сверхточного позиционирования выполняют также функцию элементов активной виброзащиты. При этом традиционные устройства, используемые в электронике, имеют ряд значительных недостатков, таких как малая нагрузочная способность, высокая инерция, проблемы с контролем по положению.

Традиционные механизмы сверхточных перемещений, например электромеханические, не в состоянии обеспечить весь комплекс требований предъявляемых перспективным оборудованием. Так, при достаточно высокой точности перемещений существенно снижается диапазон и быстродействие. Из-за использования сверхточных деталей цена таких механизмов очень высока. Наиболее распространенные в электронике пьезо- и магнитострикционные активаторы имеют недостаточный диапазон перемещений и очень малую нагрузочную способность. Ранее было предложено решить комплекс задач, связанных с обеспечением прецизионного позиционирования, за счет использования новых механизмов, основанных на применении управляемых «смарт» жидкостей, таких, как магнито- и электрореологические суспензии. Были показаны возможности использования и заложены основы создания реологических механизмов сверхточного позиционирования. Однако для обеспечения требований перспективного оборудования требуется улучшение рабочих характеристик механизмов, в частности, за счет оптимизации параметров управления. При этом должны быть повышены динамические характеристики, рабочий диапазон перемещений, статическая жесткость при обеспечении субмикронной точности позиционирования.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью работы является разработка теоретических основ и методов расчета и выбора параметров управления магнито-реологическими (МР) модулями линейных перемещений для повышения точности и быстродействия многокоординатной юстировки.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить комплекс требований к качеству систем юстировки сверхточного оборудования.
- 2) разработать физические модели поведения МР жидкостей для экстремально малых сдвиговых скоростей (до  $10^{-4}$  с $^{-1}$ ).
- 3) разработать динамические модели поведения МР жидкостей и МР модулей для различных режимов работы.

- 4) определить влияние свойств МР жидкостей на параметры МР модуля.
- 5) исследовать поведение МР жидкостей в исполнительных элементах МР модулей и определить влияние управляющих сигналов на свойства МР жидкости, характеризующие параметры модуля.
- 6) разработать инженерную методику расчета и выбора параметров управления МР дросселями и МР модулями.

**Методы исследований.** Теоретические исследования основаны на теории магнитной гидродинамики, теории реологических процессов, теории вероятности, теории точности, теории систем автоматического регулирования. Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленных стендах в лаборатории кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры «Динамика магнитных жидкостей» Дрезденского Технического Университета (Дрезден, Германия). Обработка результатов экспериментов, оценка их точности и достоверности выполнялись на ЭВМ с применением теории вероятности, математической статистики, регрессионного анализа.

#### **Научная новизна.**

1. Разработанная физическая модель МР дросселя, учитывающая поведение магнито-реологической (МР) жидкости при экстремально малых сдвиговых скоростях и ее магнитные характеристики, позволяет регулировать точность, динамические параметры и жесткость МР модуля за счет выбора уровней управляющих сигналов и полей постоянного магнита.

2. Разработанные динамические модели поведения МР жидкости и МР модуля, позволяют управлять временем переходных процессов в реологической среде (временем структурирования и релаксации) и элементах МР модуля за счет регулирования полями постоянного магнита и управляющими сигналами реологических свойств МР жидкости.

3. Разработанная инженерная методика расчета и выбора параметров управления МР модулем позволяет провести анализ и синтез САУ МР-модуля для юстировки, работающего в режиме точной регулировки положения, при котором происходит реверсивное перемещение. Методика также позволяет регулировать постоянные времени и коэффициенты передачи элементов модуля для обеспечения заданных характеристик.

**Практическая ценность.** Полученные результаты могут быть использованы для проектирования устройств сверхточного позиционирования с магнито-реологическим управлением и для разработки их систем автоматического управления (САУ).

#### **На защиту выносятся.**

1. Физическая модель МР дросселя, являющегося основным исполнительным элементом МР модулей линейных перемещений. Модель учитывает нелинейное поведение реологической жидкости, находящейся в рабочем зазоре дросселя.

2. Динамическая модель МР модуля линейных перемещений, основанная на динамических моделях поведения МР среды, в том числе под действием экстремально малых сдвиговых скоростей (до  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ).

3. Инженерная методика расчета и выбора параметров управления МР модулем линейных перемещений.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на научных семинарах кафедры «Динамика магнитных жидкостей» Дрезденского Технического Университета, 2-м Международном Трибологическом Конгрессе (Вена, Австрия, 2001), 7-м Европейском Вакуумном Конгрессе (Мадрид, Испания, 2001), 4-м Международном симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, Украина, 2001), 8,10 и 11-й научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», (Судак, Украина, 2001, 2003, 2004), Российско-японском семинаре "Future Trends In Tribology" (Москва, Россия, 2002), «Федеральной научно-технической конференции творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам» (Зеленоград, Россия, 2003), Всероссийской Астрономической Конференции "Горизонты Вселенной" (Москва, Россия, 2004), XVI-й Международной Интернет-конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (Москва, Россия, 2004), 470-м коллоквиуме Европейского Общества Механики «Recent Development in Magnetic Fluid Research» (Дрезден, Германия, 2006), 7-м немецком коллоквиуме по магнитным жидкостям «Kolloidale magnetische Flüssigkeiten: Grundlagen, Entwicklung und Anwendung neuartiger Ferrofluide» (Бенедиктсберн, Германия, 2006) и др. Технические разработки, основанные на результатах работы, представлялись на 7-м Международном салоне промышленной собственности «Архимед-2005» (Москва, Россия, 2005) и Европейской научно-технической выставке «Ехро Science Europe 2004» (Дрезден, Германия, 2004).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 11 печатных работах.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы. Содержит 184 страницы машинописного текста, 124 рисунка, 20 таблиц и библиографический список из 105 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен анализ современного перспективного технологического и исследовательского оборудования использующего механизмы сверхточных перемещений. С позиций требований к устройствам перемещений, рассмотрены такие области, как производство интегральных схем, адаптивная оптика, системы сборки и настройки оптоволоконна, сканирующая зондовая микроскопия, а также системы виброизоляции прецизионного оборудования. Наиболее важными параметрами, которые должны обеспечивать устройства перемещений для рассмотренных областей, являются число степеней подвижности, точность и диапазон перемещений, постоянная времени процесса позиционирования и нагрузочная способность.

Проведен анализ различных типов механизмов перемещений, обеспечивающих как предварительное длинноходовое перемещение объектов, так и юстировочные движения с погрешностью в субмикронном или нанометрическом диапазоне, с точки зрения обеспечения требований, предъявляемых перспективным оборудованием. Показано, что традиционные механизмы сверхточных перемещений, такие, как электромеханические, не в состоянии обеспечить весь комплекс требований. Так, при достаточно высокой точности перемещений существенно снижается диапазон и быстродействие: при погрешности позиционирования, не превышающей 100 нм постоянная времени превысит 200 мс. Наиболее распространенные в электронике пьезо- и магнитострикционные активаторы имеют недостаточный диапазон перемещений (500 мкм) и очень малую нагрузочную способность (до 100 Н).

Новым классом устройств, способных обеспечивать субмикронную точность перемещений в сочетании с высочайшим быстродействием, большим диапазоном перемещений и высокой нагрузочной способностью, являются МР модули, основы создания которых были заложены в работах В.П. Михайлова, В.В. Анисимова. Вопросам поведения реологических сред, используемых в МР модулях, посвящены работы З.П. Шульмана, В.И. Кордонского, Р. Розенцвейга, Й. Карлсона, Й. Джиндера, М. Джолли, Д. Босиса.

Для обеспечения возрастающих требований перспективного оборудования требуется улучшение рабочих характеристик модулей перемещений и оптимизация параметров управления, определяемых во многом свойствами реологических сред.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическим исследованиям поведения МР жидкостей в исполнительных элементах МР модулей, разработке конструкции МР модуля с улучшенными параметрами и его динамической модели.

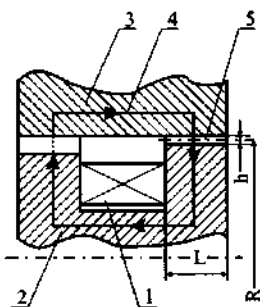


Рис. 1. Схема МР дросселя с кольцевым рабочим зазором

Главным исполнительным элементом МР модуля является МР дроссель. Схема МР дросселя с кольцевым рабочим зазором приведена на рис.1. Дроссель состоит из электромагнитной катушки (1), сердечника (2) и корпуса (3) из магнитной стали, которые выполняют функции магнитопровода. Ток, протекающий через обмотку катушки, вызывает появление магнитного поля и соответственно магнитного потока через магнитопровод. Магнитный поток (4) замыкается через зазор (5) и увеличивает динамический предел текучести МР жидкости протекающей через зазор.

Потери напора (перепад давлений)  $\Delta P$  на рабочем зазоре дросселя будут определяться реологическими свойствами среды находящейся в зазоре и его геометрическими характеристиками:

$$\Delta P = f(\tau, \tau_y, \eta, L, h). \quad (1)$$

Минимальный перепад давлений  $\Delta P_c$ , который необходим для сдвига одного слоя жидкости относительно другого, определяется пределом текучести структурированной среды  $\tau_y$ , зависящим от приложенного магнитного поля и является параметром, определяющим погрешность позиционирования модулей с МР управлением. Регулировка суммарных потерь напора  $\Delta P$  на рабочем зазоре дросселя определяет смещение контролируемого объекта и влияет на нагрузочную способность модуля.

Если добавить на один из участков магнитопровода МР дросселя постоянный магнит, то можно обеспечить структурирование жидкости в зазоре при отсутствии тока в обмотках катушки. При соответствующей схеме подключения катушки, приложением внешнего магнитного поля компенсируется поле постоянного магнита. Подобная конструкция позволяет обеспечить статическую жесткость МР устройства, удерживая заданный перепад давлений на зазоре полем постоянного магнита. При отсутствии расхода жидкости через рабочий зазор дросселя перепад давлений, выдерживаемой структурированной жидкостью в зазоре будет определяться модулем сдвига  $G$ , который соответствует составляющей статической жесткости механизма  $k_{cm}$ .

Быстродействие МР модулей во многом определяется временем структурирования частиц в цепочки и кластеры  $t_c$  и временем релаксации напряжений  $t_p$  в данных структурах при изменении прикладываемого магнитного поля. Классическая теория диполь-дипольного представления не дает полного представления о динамике процессов взаимодействия магнитных микрочастиц в вязкой среде, поэтому в работе показана теоретическая возможность использования метода механических моделей

для определения времени структурирования релаксации МР среды под действием магнитного поля и внешних сдвиговых напряжений. Расчеты основаны на динамике деформации модели Максвелла и деформации модели Фогта, которые описываются зависимостями (1) и (2) соответственно.

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{\lambda_M}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  - напряжения, действующие в модели Максвелла,  $\tau_0$  - начальные напряжения,  $t$  - время,  $\lambda_M$  - время релаксации напряжений в модели.

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_\Phi}}), \quad (2)$$

где  $\gamma$  - деформация модели Фогта,  $G$  - модуль упругости,  $\lambda_\Phi$  время запаздывания модели Фогта.

Для магнитного поля с напряженностью  $H_1=35 \text{ кА/м}$ ,  $H_2=85 \text{ кА/м}$ ,  $H_3=135 \text{ кА/м}$  время переходных процессов для модели Максвелла составляет  $T_{M1}=2 \text{ мс}$ ,  $T_{M2}=3 \text{ мс}$ ,  $T_{M3}=4 \text{ мс}$  соответственно и время переходных процессов для модели Фогта составляет  $T_{\Phi1}=1,7 \text{ мс}$ ,  $T_{\Phi2}=2,5 \text{ мс}$ ,  $T_{\Phi3}=4 \text{ мс}$  соответственно.

Параметры МР модуля сверхточных перемещений и влияющие на них параметры магнитоуправляемой среды представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры МР модуля и влияющие на них параметры МР жидкости

Диапазон перемещений	$\Sigma \Delta P$	$\tau(H, \dot{\gamma})$
Нагрузочная способность	$\Delta P_c$	$\tau_y(H)$
Точность позиционирования	$t_c, t_p$	$f(H, \dot{\gamma})$
Быстродействие	$k_{cm}$	$G(H)$
Статическая жесткость		

Для расчета параметров МР механизмов точного позиционирования, а так же для разработки их комплексных динамических моделей необходима нелинейная модель МР дросселя, позволяющая для заданного значения расхода рабочей среды, определять суммарный перепад давлений на рабочем зазоре дросселя в зависимости от управляющего сигнала. Нелинейная модель МР дросселя получается за счет объединения уравнений описывающих его работу, в соответствии со структурной схемой (рис. 2).

Для расчета предложенной модели используется дифференциальная зависимость Ходгдона для магнитного гистерезиса в элементах магнитопровода (формула (3)), размагничивающий фактор, зависимость перепада давлений на рабочем зазоре от сдвиговых напряжений (формула (4)) и экспериментальные зависимости  $\tau_y(H)$  и  $B(H)$  для МР жидкости, полученные в 3 главе диссертации.

$$\dot{H} = |\dot{B}| [f(B) - H] + Bg(B), \quad (3)$$

где  $f(B)$  и  $g(B)$  функции, зависящие от кривой намагничивания и постоянных коэффициентов, определяемых материалом магнитопровода.

$$\Delta P = \frac{12\eta Q_n L}{h^3 2\pi R} + \frac{c\tau_p(H)L}{h}, \quad (4)$$

где  $Q_n$  – расход МР жидкости через дроссель  $c$  – эмпирический коэффициент.

При работе МР модуля в реверсивном режиме «точной регулировки положения» расход  $Q_n$  через зазор дросселя стремится к 0 и на МР жидкость действуют экстремально малые сдвиговые скорости (до  $10^{-4}$  с $^{-1}$ ). Структурированная среда перемещается в рабочем зазоре дросселя прерывисто и приобретает вязко-пластично-упругие свойства. В этих условиях кривая вязкопластичного течения МР жидкости через рабочий зазор дросселя имеет существенно нелинейный характер. Таким образом, в данном случае необходимо рассматривать модели, учитывающие нелинейный фактор. Таким решением является аппроксимация Кэссона:

$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_p^{\frac{1}{2}} + (\eta_p \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{2}}, \quad \tau \geq \tau_p, \quad (5)$$

Обоснованность использования данной аппроксимации к МР жидкостям подтверждается экспериментально с использованием специального реометра, что показано в 3 главе.

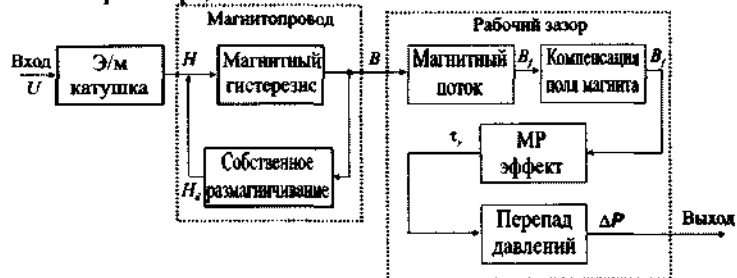


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой модели МР дросселя

Конструкция разработанного 3-х координатного механизма позиционирования элементарных зеркал (ЭЗ) сверхбольшого телескопа, скомпонованного на линейных МР модулях представлена на рисунке 3. Устройство обладает увеличенным диапазоном перемещений и возможностью обеспечения статической жесткости. Корпуса шести гидроцилиндров (по два на каждую координату) закреплены к неподвижному корпусу привода. Рабочая МР жидкость поступает при помощи насоса в гидроцилиндры. Подачей управляющих сигналов от системы управления на электромагнитные катушки, расположенные в дросселях, подключенных по мостовой схеме, регулируются свойства МР жидкости в рабочих зазорах и создается требуемый перепад давления в гидроцилиндрах, под действием

которого ЭЗ перемещается относительно арретира (узел упругой подвески) по трем координатам (две угловые и одна линейная).

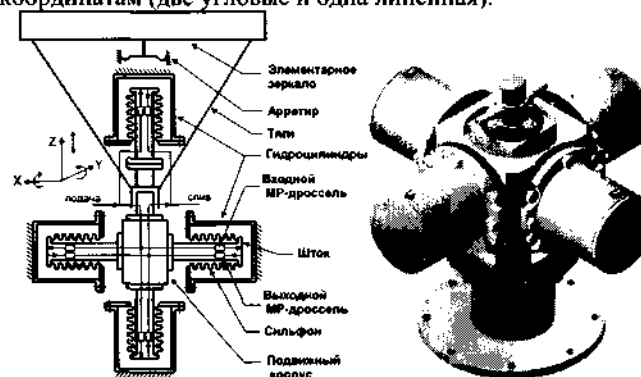


Рис.3. Принципиальная схема кустировочного МР-модуля и общий вид кустировочного МР-модуля (без верхнего гидроцилиндра)

Сборочный чертеж гидроцилиндра МР модуля приведен на рисунке 4. Электромагнитные катушки 1, втулки 2,3,4, постоянные магниты 5,6 и шток 15 составляют систему входного и выходного МР дросселей. Регулируя напряженность магнитного поля создаваемого катушками 1, можно управлять вязкостью МРЖ в зазорах образованных втулками 2,3,4 и штоком 5 и соответственно регулировать перепад давлений в противоположных гидроцилиндрах, за счет которого осуществляется перемещение ЭЗ. При отсутствии внешнего давления (модуль выключен) МРЖ в рабочих зазорах структурирована постоянными магнитами 5,6 и удерживает давление в гидроцилиндре, обеспечивая статическую жесткость модуля.

Для создания программно-математического обеспечения САУ, реализующего заданные режимы перемещения, выбранные регуляторы и

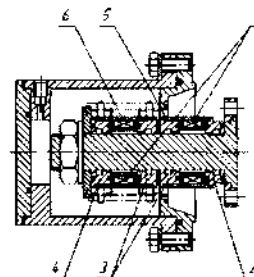


Рис. 4. Сборочный чертеж гидроцилиндра МР модуля

корректирующие контуры с целью достижения максимальных точностных, динамических характеристик и требуемой устойчивости работы модуля разработана динамическая модель модуля. Модель модуля в режиме предварительной регулировки положения основана на нелинейной модели МР дросселя, когда структурированная МР жидкость представляет собой вязкое или вязко-пластичное тело. Кроме того, учитываются потери давления на сжимаемость трубопровода, а также силы сопротивления перемещению. Для моделирования модуля в

режиме точной регулировки положения используется модель вязко-упругих колебаний упругого тела, которое представляет собой структурированная в рабочем зазоре дросселя МР жидкость. Структурная схема модели приведена на рисунке 5. Динамика колебаний описывается моделью Фогта (формула 2), при этом напряжения в модели определяются по аппроксимации Кэссона (формула 5).

Для достижения устойчивости САР МР модуля, предлагается использовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Для режима предварительной юстировки подобраны параметры регулятора с помощью возможностей Simulink:  $P=200$ ;  $I=10$ ;  $D=0,1$ . При этом амплитудно-частотный анализ показывает, что система является устойчивой и обеспечивает погрешность позиционирования  $5 \text{ мкм}$  и постоянную времени  $T=85 \text{ мс}$ . В режиме точной регулировки положения, колебательным звеном помимо перемещаемого объекта является упругое тело, сформированное средой в рабочем зазоре дросселя, динамика которых описывается моделью Фогта. В САР МР модуля в режиме точной регулировки положения предлагается использовать ПД регулятор с параметрами  $P=0,5$ ;  $D=0,1$ . Погрешность позиционирования составляет  $50 \text{ нм}$  при времени переходного процесса  $5 \text{ мс}$ .



Рис. 5. Структурная схема МР модуля в режиме точной регулировки положения

Третья глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям, которые проводятся с целью подтверждения теоретических положений о поведении МР жидкостей, обеспечения адекватности модели МР дросселя и динамических моделей МР модуля в режимах предварительной и точной регулировки положения.

Для исследования вязкости МР жидкостей, динамических характеристик МР эффекта был разработан реометр, позволяющий получать экстремально малые значения сдвиговых скоростей (до  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) и однородное магнитное поле (не менее 99% в вертикальном направлении). С использованием реометра получены экспериментальные зависимости

вязкости МР жидкости от магнитного поля (рисунок 6), необходимые для расчета диапазона перемещений и нагрузочной способности МР модулей. Анализ зависимостей позволяет сделать вывод о справедливости вязко-упругой модели Кэссона, т.е. подтверждается предположение, что при соответствующих значениях магнитных полей и сдвиговых скоростей структуры, образованные частицами в жидкости, не разрушаются и заставляют проявлять МРЖ значительные упругие свойства.

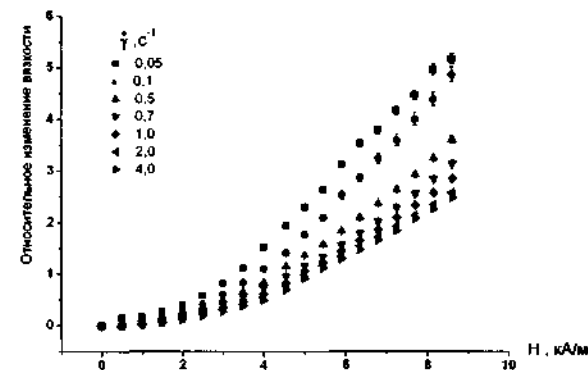


Рис. 6. Изменение вязкости МР жидкости в зависимости от приложенного поля

Для расчета параметров передаточных функций динамической модели МР модулей, используя аппроксимацию Кэссона и результаты экспериментов по измерению реологических свойств сдвига, были построены кривые течения МР жидкости для малых (рисунок 7) и экстремально малых (рисунок 8) значений сдвиговых скоростей.

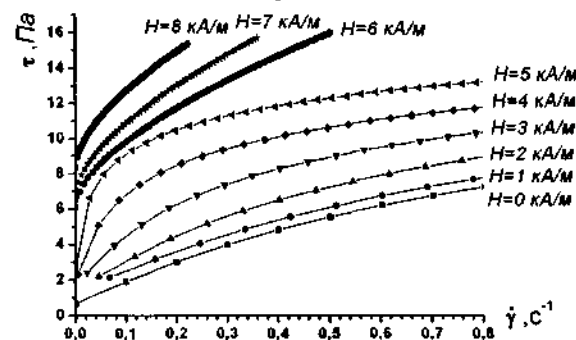


Рис. 7. Кривые течения МР жидкости для малых сдвиговых скоростей

Кривые течения при малых сдвиговых скоростях ( $0.1 \text{ с}^{-1} - 1.0 \text{ с}^{-1}$ ) соответствуют режиму предварительной регулировки положения в заключительной стадии, а кривые течения при экстремально малых сдвиговых скоростях ( $\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1} - 0.1 \text{ с}^{-1}$ ) режиму точной регулировки положения.

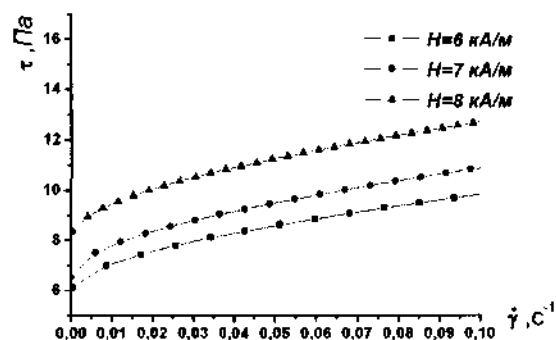


Рис. 8. Кривые течения МР жидкости для экстремально малых сдвиговых скоростей

По полученным экспериментальным зависимостям определяются сдвиговые напряжения и соответственно суммарный перепад давлений на рабочем зазоре дросселя для заданных значений магнитного поля и сдвиговой скорости.

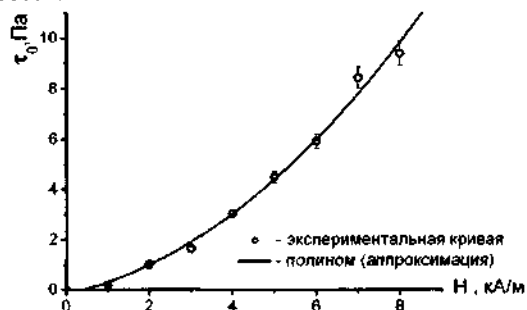


Рис. 9. Зависимость предела текучести от магнитного поля

Были проведены экспериментальные исследования зависимости динамического предела текучести структурированной МР жидкости, определяющего погрешность позиционирования модуля с МР управлением от приложенного магнитного поля. Экспериментальная кривая представлена на рисунке 9.

Для инженерных расчетов при определении предела текучести можно использовать аналитический метод, когда экспериментально измеренной зависимости сдвиговых напряжений в МР жидкости от магнитной индукции приложенного поля ставится в соответствие полином, например:

$$\tau_y = k_1 H + k_2 H^2, \quad (6)$$

где  $k_1, k_2$  – постоянные коэффициенты, определяемые графически и  $H$  – напряженность магнитного поля действующего на МР жидкости.

Коэффициенты  $k_0=0,36021$ ;  $k_1=0,11124$  и рассчитаны аналитически.

Для точных расчетов МР модулей была получена кривая намагничивания МР жидкости. Эксперименты проводились с использованием вибрационного магнитометра Lake Shore VSM 7400. Экспериментальная зависимость удовлетворительно описывается функцией:

$$M = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{-\frac{H - H_0}{dH}}}, \quad (7)$$

где  $A_1, A_2, H_0$  и  $dH$  – подгоночные параметры;  $A_1$  – физического смысла не имеет,  $A_2$  – имеет смысл среднеквадратического уровня шума,  $dH$  – диапазон  $H$ , где наблюдается максимальная скорость затухания  $M(H)$ .

Подгоночные коэффициенты экспериментально полученной для исследуемой МР жидкости зависимости имеют следующие значения:  $A_1=424.54597 \pm 0.69065$ ,  $A_2=425.74626 \pm 0.54366$ ,  $H_0=0.4652 \pm 0.28017$ ,  $dH=96.81181 \pm 0.40056$ .

Исследования демпфирующих свойств МР жидкости проводились эксперимент, в котором измерялись колебания измерительной части реометра без МР жидкости в зазоре между штоком и основанием и с зазором, заполненным МР жидкостью. Получено, что для колебаний на наиболее критических частотах для электронной промышленности коэффициент передачи колебаний составляет:  $k=0,15$  для  $f=1$  Гц,  $k=0,33$  для  $f=5$  Гц,  $k=0,45$  для  $f=10$  Гц.

Был разработан экспериментальный стенд для исследования параметров МР модуля. Конструкция стенда позволяет поворачивать опору совместно с МР модулем, узлом подвески и макетом зеркала под различными углами вокруг горизонтальной оси и фиксировать в нужном положении, что необходимо для имитации работы МР модуля в качестве юстировочного механизма ЭЗ сверхбольшого астрономического телескопа. Для расчета динамической модели МР модуля экспериментально определялись статическая жесткость модуля и несущей системы. Статическая жесткость МР модуля для адаптивной оптики составляет 6 Н/мкм, жесткость несущей системы 4 Н/мкм. Долевое влияние элементов на общую деформацию системы составляет: сильфонных узлов 89%, несущей системы – 11%. Для



обеспечения точности и быстродействия перемещений необходимо вывешивание объекта позиционирования при помощи узла пневмоподвески.

Результаты экспериментов использовались для расчета динамической модели МР модуля, представленной во 2-ой главе.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики расчета и выбора параметров управления МР модулем. Решается задача обеспечения заданной точности и времени позиционирования объекта известной массы, в определенном диапазоне перемещений, в зависимости от требований технологического процесса или исследовательского оборудования, для которого разрабатывается МР модуль. Исходя из требуемой точности перемещения объекта, требуемого времени позиционирования (постоянная времени МР модуля), требуемой нагрузочной способности, диапазона перемещений объекта и статической жесткости МР модуля, определяются конструктивные параметры МР модуля и дросселей, диапазон изменения напряженности управляющего магнитного поля, диапазон изменения магнитной индукции, тип и параметры корректирующего звена САУ МР модулем.

Предложенная методика позволяет провести анализ и синтез САУ МР модулем, реализующей заданные режимы перемещения, выбранные регуляторы и корректирующие контуры с целью достижения максимальных точностных и динамических характеристик и требуемой устойчивости работы модуля. Полученные в соответствии с методикой параметры регуляторов МР модуля для адаптивной оптики, обеспечивающего точность позиционирования 40 нм, при постоянной времени 100 мс, в диапазоне перемещений 10 мм и удерживаемой статической нагрузкой до 500 Н, приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Параметры регуляторов МР модуля для адаптивной оптики

Режим работы	Тип регулятора	Параметры регулятора		
		<i>П</i>	<i>И</i>	<i>Д</i>
Предварительная юстировка	<i>ПИД</i>	200	10	0,1
Точная регулировка	<i>ПД</i>	0,5	-	0,1

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1) Анализ комплекса требований к качеству систем юстировки перспективного сверхточного оборудования показал, что задача обеспечения субмикронной, миллисекундной юстировки может быть решена благодаря использованию МР модулей, основанных на применении МР жидкостей с управляемыми свойствами.

2) Физическая модель МР дросселя, основанная на процессах, происходящих в его элементах и в МР жидкости, протекающей через рабочий зазор, при воздействии на нее полей постоянного магнита и управляющих сигналов, позволяет выбирать расходные характеристики дросселя. Показано, что для сигнала в диапазоне от 0 до 1 А и расходе жидкости до  $8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с управляемый перепад давлений на рабочем зазоре дросселя составляет от 0 до  $1,4 \cdot 10^6$  Па.

3) При определении параметров МР жидкости в рабочем зазоре дросселя определяющих качество юстировки модуля в реверсивном режиме точной регулировки положения (при сдвиговых скоростях до  $10^{-4}$  с<sup>-1</sup>) рекомендуется применять модель Фогта и аппроксимацию Кэссона.

4) Динамическая модель поведения МР жидкости позволила определить время структурирования и релаксации частиц в МР жидкости, находящейся в рабочем зазоре дросселя. За счет этого возможно варьирование динамических параметров МР модуля в режиме точной регулировки положения. Установлено, что для напряженностей поля в рабочем зазоре  $H=35$  кА/м; 85 кА/м; 135 кА/м время структурирования составляет  $t=2$  мс; 3 мс; 4 мс.

5) Динамическая модель МР модуля в режиме предварительной юстировки и в режиме точной регулировки положения позволяет определить параметры переходных процессов. Погрешность позиционирования и быстродействие для данных режимов составляют 5 мкм, 85 мс и 50 нм, 5 мс соответственно.

6) Для синтеза САУ МР модуля в двух режимах позиционирования и для выбора регуляторов, необходимых для устойчивой работы модуля, рекомендуется применять разработанную комплексную динамическую модель модуля.

7) Проведенные исследования позволили создать методику расчета параметров управления МР дросселями и МР модулями с улучшенными характеристиками. При точности позиционирования 40 нм увеличен диапазон линейных перемещений до 10 мм, обеспечена статическая жесткость (удерживаемая нагрузка до 500 Н при выключенной САУ) и обеспечена постоянная времени модуля не превышающая 100 мс.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Борин Д.Ю., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Моделирование магнитореологического дросселя прецизионного привода линейных перемещений // Конверсия в машиностроении. - 2007. - №3. - С. 37-44.

2. Борин Д.Ю., Михайлов В.П. Перспективы использования магнито-реологических материалов // МИКМУС-2004: избранные труды XVI международной Интернет - конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – Москва, 2005. – С. 74-82.
3. Борин Д.Ю. Магнито-реологический механизм для позиционирования зеркал сверхбольших астрономических телескопов с нанометровой точностью // Материалы федеральной научно-технической конференции творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам. - Звенигород, 2003. – С. 115-117.
4. В.П. Михайлов, Д.Ю. Борин. Управление трением магнитной жидкости в рабочем зазоре многокоординатного вакуумного позиционирующего модуля // Вакуумная наука и техника: материалы десятой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. – Судак, 2003. – С. 309-312.
5. В.П. Михайлов, И.К. Зобов, Д.Ю. Борин и др. Исследование фундаментальных параметров рабочей среды в точных вакуумных механизмах реологического типа // Вакуумная наука и техника: материалы десятой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. – Судак, 2003. – С. 563-566.
6. Е.А. Деулин, В.П. Михайлов, Д.Ю. Борин и др. Использование реологических процессов для прецизионного привода // Вакуумные технологии и оборудование: сборник докладов 4-го международного симпозиума. – Харьков, 2001. – С.163-166.
7. Е.А. Деулин, В.П. Михайлов, Д.Ю. Борин и др. Сверхвысоковакуумный многокоординатный привод реологического типа с точностью позиционирования в нанодиапазоне // Вакуумная наука и техника: материалы восьмой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. – Судак, 2001. – С.374-379.
8. D. Borin, V. Mikhailov. Hydraulic positioning actuators with magnetorheology control // Book of Abstracts of Euromech Colloquium 470: Recent Development in Ferrofluid Research. – Dresden (Germany), 2006. - P. 65-66.
9. Borin D., Mikhailov V. Magnetorheological actuator for the control of primary mirror elements of extra-large telescope // Book of Abstracts of 7<sup>th</sup> German Ferrofluid Workshop. – Benediktbeuern (Germany), 2006. - P. 66.
10. Deulin E.A., Mikhailov V.P., Borin D.Y., Sytchev V.V.. Variable rheology usage for precise drive // Abstract of papers of 2-nd World Tribology Congress. – Vienna (Austria), 2001. – P.256.
11. Deulin E.A., Mikhailov V.P., Borin D.Y., Sytchev V.V. Ultra high vacuum rheology manipulators with nanometer precision // Book of Abstract of 7<sup>th</sup> European vacuum conference. – Madrid (Spain), 2001. – P.54.

Подписано к печати 07.09.07. Заказ № 606  
 Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.  
 Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана  
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5  
 263-62-01