

Базиненков Алексей Михайлович

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЯХ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ СВЕРХТОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



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

Научный руководитель –

доктор технических наук, доцент
Михайлов Валерий Павлович

Официальные оппоненты –

Курбатов Олег Константинович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, генеральный директор ООО НПФ «Аргонавт – Темп» при ФГУП НИИ Вакуумной Техники им. С.А. Векшинского

Папко Вильямс Михайлович, кандидат технических наук, главный специалист ФГБУ науки Института космических исследований РАН

Ведущая организация –

ОАО «НИИ Точного машиностроения»

Защита состоится «30» октября 2013 г. 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

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ Баумана

Автореферат разослан «20 сентября» 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
доцент

Михайлов Валерий Павлович



2851

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время наблюдается интенсивный рост электронной промышленности, что сопровождается повышением степени миниатюризации и интеграции. Минимальный размер элемента на интегральной микросхеме (ИМС) уже к 2010 году достиг 32 нм. Одним из ключевых технологических процессов является микро- или нанолитография, служащая для создания топологии ИМС с размерами элементов в несколько нанометров и потенциальными возможностями в субнанометровом диапазоне. Однако предельный минимальный размер элемента определяется не физическими возможностями технологии, а техническим совершенством установок нанолитографии, в частности точностью механизмов совмещения источника излучения и полупроводниковой пластины. Требуемая погрешность позиционирования привода совмещения не должна превышать единиц нанометров при диапазоне перемещений до 300 мм.

Для кластерного оборудования нанолокальной обработки к указанным требованиям добавляется необходимость работы в вакуумной среде с давлением до 10^{-7} Па без ухудшения ее параметров. Одним из модулей платформы нанолокальной обработки является модуль сканирующего зондового микроскопа, где исследование поверхности на атомарном уровне производится керамическим зондом, перемещающимся по поверхности с погрешностью, не превышающей 1 нм при диапазоне сканирования до 1 мм.

В современной астрофизике широкое применение находят сверхбольшие адаптивные телескопы с главным зеркалом диаметром 10 м и более. Их главное зеркало выполняется составным, требует юстировки сегментов по двум угловым координатам с погрешностью не более 0,02 угловых секунд и одной линейной координате с погрешностью не выше 100 нм с целью получения единой отражающей поверхности, а также для компенсации атмосферных искажений волнового фронта в реальном времени. При этом постоянная времени привода юстировки сегментов не должна превышать 200 мс при массе сегмента до 100 кг.

В установках струйно-абразивного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы крайне важна равномерность скорости перемещения сопел относительно пластин, от контроля и возможности регулировки которой в значительной степени зависит качество получаемых кристаллов.

Кроме того, работа перечисленных классов прецизионного оборудования невозможна без качественной виброизоляции. Система должна обеспечивать виброизоляцию в диапазоне частот 0,1...200 Гц с коэффициентом передачи амплитуды вибраций 0,1...0,01. Современные устройства виброизоляции не обеспечивают качественной защиты от вибраций при ударных нагрузках амплитудой виброперемещения до 500 мкм и низких частотах до 5 Гц. Активная виброизоляция может осуществляться за счет контроля и управления виброперемещением, виброскоростью или виброускорением объектов.

Перед разработчиками современного оборудования стоит сложная задача, требующая выполнения большого числа зачастую противоречивых технических требований к точности перемещения, скорости и ускорению объектов. Электромеханический привод позволяет получить высокую точность перемещений за счет повышения качества, а, следовательно, и стоимости изготовления деталей. При этом такие устройства обладают невысоким быстродействием вследствие длинной кинематической цепи, включающей двигатель и передаточные звенья. В настоящее время также широко применяются пьезоэлектрические и магнитострикционные механизмы, которые обладают высокой точностью (минимальная погрешность – до 0,1 нм) и быстродействием (постоянная времени – до 1 мс), но малым диапазоном перемещений и малой нагрузочной способностью при увеличении хода. Задача повышения быстродействия и точности позиционирования объектов, а также их активной виброизоляции может быть успешно решена за счет применения механизмов на основе магнитоуправляемых материалов, к которым относятся магнитореологические жидкости (МРЖ). Также эти механизмы обладают возможностью гибкого управления характеристиками их переходных процессов: перерегулированием, постоянной времени и точностью. Они могут быть применены для управления перемещением, скоростью и ускорением объектов. Реологические свойства рабочей МРЖ определяются множеством параметров: ее составом (материалом, размером и концентрацией частиц дисперсной фазы, типом поверхностно-активных веществ и жидкости-носителя), скоростью течения и геометрическими параметрами гидравлической системы, что препятствует широкому применению механизмов на ее основе. При этом свойства МРЖ определяют уровень и закон изменения управляющих сигналов, подаваемых от системы управления на устройство перемещений.

Несмотря на ряд исследований МРЖ и механизмов на их основе, проведенный в последние три десятилетия рядом научных групп разных стран, в том числе З.П. Шульманом, В.И. Кордонским, В.В. Анисимовым, В.П. Михайловым, Д.Ю. Бориным, Ф. Гонсальвесом, Ш. Оденбахом и др., остается открытым вопрос о поведении МРЖ и работе механизмов в момент их трогания и торможения в режиме точной регулировки.

Для улучшения точностных и динамических характеристик этих механизмов необходимо решить задачу повышения качества переходных процессов как в МРЖ, так и в механизме перемещений в целом.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью работы является разработка теоретических основ расчета и выбора структуры, алгоритмов и параметров процесса управления многокоординатным сверхточным позиционированием и виброизоляцией магнитореологических (МР) модулей линейных перемещений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Определить комплекс требований к качеству систем позиционирования и виброизоляции прецизионного оборудования.
2. Разработать физическую модель поведения МРЖ в рабочем зазоре модуля при ее структурировании и релаксации под действием магнитных и сдвиговых сил в режимах «трогания».
3. Разработать динамическую модель многокоординатного МР модуля для режима точной регулировки.
4. Экспериментально определить статические характеристики МР модуля: силу статического сопротивления (ток «трогания»), жесткость, нагрузочную способность, диапазон многокоординатных перемещений.
5. Экспериментально определить динамические характеристики МР модуля: время переходного процесса для режима позиционирования, погрешность позиционирования и величину перерегулирования.
6. Разработать инженерную методику расчета и выбора параметров управления МР модулем, определения геометрических, электрических и магнитных характеристик элементов позиционирующей и виброизолирующей систем.
7. Разработать способ и устройство регулировки равномерности скорости объекта за счет управления трением в МР механизмах.

Методы исследований. Теоретические исследования основаны на теории автоматического регулирования, теории реологии, теории дисперсной химии, теории упругости, гидравлики. Экспериментальные исследования проводились на специально подготовленных стендах в лаборатории кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, конечно-элементное моделирование сильфонной системы МР модуля проводилось совместно с компанией «Текникер» (Испания), конечно-элементное моделирование магнитной системы магнитореологического дросселя проводилось совместно с Дрезденским техническим университетом (Германия). Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась на ПЭВМ с использованием теории вероятностей, математической статистики и дисперсионного анализа.

Научная новизна:

1. Разработанная физическая модель поведения МРЖ в рабочем зазоре позволила определить условия, механизм и место разрушения структуры микрочастиц, образовавшейся за счет МР эффекта под действием внешнего магнитного поля и разности давлений, что позволило рассчитать силу статического трения в МРЖ при перемещении модуля в режиме «трогания», которая, согласно теории точности, определяет погрешность позиционирования устройства.

2. Разработанная динамическая модель многокоординатного МР модуля позволила определить структуру (элементы неизменяемой части системы управления и тип регулятора), алгоритмы и настроечные параметры процесса управления для режима точной регулировки в условиях взаимного влияния каналов управления и компенсации веса объекта перемещения.

3. Разработан метод управления МР модулем, заключающийся в совмещении функций позиционирования и виброизоляции в одном устройстве, которое в зависимости от алгоритмов управления работает как в следующем режиме (режиме перемещения объекта), так и в режиме стабилизации положения (режиме виброизоляции объекта).

4. Разработанная инженерная методика расчета и выбора параметров управления МР модулем позволила провести анализ и синтез системы автоматического регулирования (САР) МР модуля, являющегося пространственной системой параллельной кинематики и работающего в режимах точной регулировки положения и активной виброизоляции. При этом использован метод компенсации погрешности позиционирования от сил статического сопротивления, обусловленных весом объекта, в любом пространственном положении.

Практическая ценность. Полученные результаты использованы для разработки систем управления устройствами точных перемещений и виброизоляции на основе МР жидкостей в рамках выполнения Государственного контракта № П692 «Повышение качества юстировки и виброзащиты оборудования для производства перспективных изделий микроэлектроники на основе разработки прецизионных позиционирующих систем реологического типа» по направлению «Микроэлектроника».

Разработан и создан МР регулятор скорости перемещения сопел установки струйно-абразивной резки полупроводниковых пластин на круглые кристаллы. Механизм сканирования сопел установки струйно-абразивной резки полупроводниковых пластин с МР регулятором внедрен на предприятии ООО «НПП Томилинский электронный завод».

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных результатов основывается на проведенном комплексном анализе результатов теоретических данных и экспериментального исследования. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными и не противоречат известным положениям.

На защиту выносятся:

1. Физическая модель поведения МРЖ в рабочем зазоре, позволяющая определить условия, механизм и место разрушения структуры микрочастиц в «кластерной мембране» под действием разности давлений, что дает

возможность рассчитать силу статического трения в МРЖ при перемещении модуля в режиме «трогания», которая определяет погрешность позиционирования.

2. Динамическая модель многокоординатного МР модуля, позволяющая определить структуру (элементы неизменяемой части системы управления, тип корректирующих звеньев или регулятора), алгоритмы и настроечные параметры процесса управления для режима точной регулировки в условиях взаимного влияния каналов управления и компенсации веса объекта перемещения.

3. Метод управления МР модулем, заключающийся в совмещении функций позиционирования и виброизоляции в одном устройстве, которое в зависимости от алгоритмов управления работает как в следящем режиме (в качестве механизма перемещений), так и в режиме стабилизации положения (в качестве системы виброизоляции).

4. Инженерная методика расчета и выбора параметров управления МР модулем, позволяющая провести анализ и синтез САР МР модуля, являющегося пространственной системой параллельной кинематики и работающего в режимах точной регулировки положения и активной виброизоляции. При этом использован принцип компенсации погрешности позиционирования от сил статического сопротивления, обусловленных весом объекта, в любом пространственном положении.

5. Метод управления равномерностью скорости движения струйно-абразивных сопел при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы за счет управления трением рабочей МРЖ в зазоре регулятора привода установки.

Личный вклад автора. Базиненковым А.М. проведен аналитический обзор современного исследовательского и технологического оборудования, в котором для соответствия своим техническим характеристикам необходимо применение механизмов точного перемещения, регулировки скорости или ускорения. Проведен количественный анализ характеристик механизмов, применяемых на оборудовании в настоящее время. Обоснована актуальность применения механизмов на основе МРЖ. Разработана математическая модель разрушения структуры частиц МРЖ в рабочем зазоре основного управляющего элемента механизмов – МР дросселя при трогании МР модуля. Также разработана динамическая модель трехкоординатного МР модуля параллельной кинематики при его работе в режиме стабилизации и точной регулировки положения. Проведены экспериментальные исследования статических и динамических характеристик МРЖ, МР модуля и его элементов. Разработана методика проектирования САР МР модуля с заданными характеристиками. На основе разработанной методики регулирования скорости перемещения объекта внедрен МР регулятор скорости привода сопел на установке струйно-абразивной обработки полупроводниковых пластин.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электронных технологий в машиностроении федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана» Министерства образования и науки Российской Федерации, регулярно докладывались на конференциях: научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (г. Сочи (Россия) в 2007, 2009 и 2010; п. Дагомыс (Россия) в 2008; г. Судак (Украина) в 2011 и 2012), Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (г. Москва (Россия) в 2005, 2007, 2009-2012), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва (Россия) 2009-2012), Международной интернет-конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС) (г. Москва (Россия) 2005-2006). Технические разработки, основанные на результатах работы представлялись на выставках Научно-технического творчества молодежи и студентов (НТТМ-2006) (г. Москва, Россия), по результатам выставки присуждена премия как победителю Всероссийского конкурса научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2006», и международной выставке 6th Expo-Sciences Europe 2006 (ESE-2006) в (г. Таррагона, Испания). Результаты исследований частично вошли в отчеты о НИР по ГК № П2421 от 19 ноября 2009 г. «Создание новых методов и приборов основанных на наномеханике и физике сухого трения для предотвращения технологических катастроф в электронике, газотранспортных системах, ядерной технике» (руководитель Е.А. Деулин) и отчет о НИР по ГК № П692 от 12 августа 2009 г. «Повышение качества юстировки и виброзащиты оборудования для производства перспективных изделий микроэлектроники на основе разработки прецизионных позиционирующих систем реологического типа» (руководитель В.П. Михайлов).

Внедрение результатов работы. Методика регулирования скорости объекта позволила провести расчет и подбор геометрических характеристик и электрических параметров МР регулятора скорости перемещения привода сопел установки струйно-абразивной резки полупроводниковых пластин исходя из регулируемого диапазона перемещений сопел 120...150 мм и регулировки скорости в интервале 0,05...0,3 м/с. Разработанное устройство реализовано на предприятии НПП «Томилинский электронный завод» (п. Томилино, Московская область) и удовлетворяет заявленным характеристикам, о чем свидетельствует наличие акта внедрения.

Методика расчета параметров управления МР модулем внедрена в учебный процесс кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках учебного курса «Прецизионные механизмы микро- и наноперемещений».

Результаты работы рекомендуются к внедрению на следующих предприятиях: Научно-исследовательский институт Точного Машиностроения (г. Зеленоград, г. Москва), Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского (г. Москва), Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (г. Москва), Сарапульский электрогенераторный завод (г. Сарапул, Удмуртская республика).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 35 научных работах, из них 15 работ в рецензируемых журналах, входящий в перечень ВАК РФ, получен патент РФ на изобретение.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы.

Работа содержит 224 страницы машинописного текста, 152 рисунка, 20 таблиц и библиографический список из 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность работы. Приведены основные области применения механизмов точных перемещений и основные типы этих механизмов.

Первая глава. Проведен обзор и анализ современного исследовательского и технологического оборудования, в котором применяются механизмы точных перемещений, регулировки скорости перемещения или ускорения. Рассмотрены требования к устройствам точных перемещения и виброизоляции, которые применяются в системах совмещения-экспонирования установок микро- и нанолитографии, нанолокальной обработки, адаптивной оптике, прецизионной металлообработке, юстировке оптоволоконных систем. Рассмотрены требования к регулировке скорости привода сопел установки струйно-абразивной обработки полупроводниковых пластин. Анализ позволил выделить требования к механизмам: погрешность перемещений, диапазон перемещений, постоянная времени, нагрузочная способность, диапазон частот виброизоляции и коэффициент передачи амплитуды колебаний. Кроме того требования накладываются на погрешность скорости перемещения объекта механизмом и на ускорение объекта.

Проведенный анализ механизмов точных перемещений показал, что традиционные механизмы, такие как электромеханические, при достаточно малой погрешности перемещений (1 мкм) обладают большой постоянной времени за счет наличия длинных кинематических цепей от источника движения к объекту. Пьезоэлектрические и магнитострикционные механизмы при минимальной погрешности 0,1 нм обладают низким диапазоном перемещений (до 100 мкм) и малой нагрузочной способностью

при увеличении хода. Аналогичными недостатками обладают механизмы на основе материалов с памятью формы.

Альтернативным классом устройств являются механизмы, рабочими средами в которых выступают магнитоуправляемые материалы, в частности МРЖ. Такие гидравлические приводы обладают высокой нагрузочной способностью (1 кН), малой погрешностью перемещений (100 нм) и низкой постоянной времени (100 мс) за счет отсутствия в их конструкции пар внешнего трения.

Поведению реологических сред, к которым относится МРЖ, посвящены работы З.П. Шульмана, В.И. Кордонского, Р. Розенцвейга, М. Джолли, Д. Боссиса, Ф. Гонсальвеса. Основы создания устройств на основе МРЖ заложены в работах В.В. Анисимова, В.П. Михайлова, Д.Ю. Борова. Расчет сильфонных герметизирующих узлов МР модуля проводился на основании работ Л.Е. Андреевой, В.И. Феодосьева, Е.А. Деулина, Д.Р. Ахмадиева, Р.А. Невшупы. Теоретические исследования системы автоматического регулирования МР модуля основывались на методах теории автоматического управления, разработанных в трудах В.В. Солодовникова, В.А. Бессекерского, Е.П. Попова, В.И. Смирновой, Е.И. Юревича и др.

Поведение МРЖ трудно поддается моделированию из-за зависимости ее реологических свойств от состава (размера и концентрации частиц дисперсной фазы, типа поверхностно-активных веществ и жидкостеносителя) и скорости течения МРЖ, геометрии гидравлической системы механизмов. Свойства МРЖ определяют уровни управляющих сигналов, подаваемых с системы управления на устройство перемещений. Такие механизмы обладают возможностью гибкого управления характеристиками их переходных процессов: уменьшения перерегулирования, постоянной времени и повышения точности.

Вторая глава. Проведено моделирование поведения структуры частиц в рабочем зазоре МР дросселя (МРД), разработана динамическая модель трехкоординатного гидравлического модуля параллельной кинематики с МР управлением (МР модуль) в режиме точной регулировки положения объекта.

МР модуль (Рис. 1) параллельной кинематики обеспечивает перемещения по трем координатам в диапазоне ± 5 мм с погрешностью 0,1 мкм. Модуль установлен на основании (1) состоит из пяти гидроцилиндров (2) (одна пара гидроцилиндров условно не показана) с сильфонными узлами (6) в качестве герметизирующих и направляющих элементов. Подача рабочей МРЖ в модуль происходит при помощи насосной станции (3). МРЖ подается параллельно во все гидроцилиндры. Регулирование поступления жидкости в гидроцилиндры происходит с помощью МРД (5), которые в парах гидроцилиндров установлены по мостовым схемам. При достижении определенной разности давлений в гидроцилиндрах происходит деформация сильфонов узлов (6) и

перемещение штоков всех гидроцилиндров, жестко прикрепленных к подвижному корпусу (1).

При подаче напряжения на катушку МРД (1) (Рис. 2) в магнитопроводе (2)-(4) наводится магнитный поток, который приводит к МР эффекту в рабочем зазоре (5) и образованию в нем структуры частиц, препятствующей течению МРЖ («кластерной мембраны»). Структура способна выдержать до разрушения определенный перепад давлений $\Delta P(H)$. Этот перепад определяется предельными касательными напряжениями сдвига, при которых происходит разрушение структуры частиц $\tau_y(H)$ (статический предел текучести). Оба параметра зависят от приложенного магнитного поля. Перепад давлений при разрушении структуры определяется:

$$\Delta P(H) = \frac{9,24 \cdot D_{cp} \cdot L \cdot \varphi \cdot \mu_0 \cdot M_s^{\frac{1}{2}}}{(D_{нар}^2 - D_{вн}^2)} \cdot H^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где $D_{нар}$, $D_{вн}$, D_{cp} – наружный, внутренний, средний диаметр кольцевого рабочего зазора, соответственно,

L – длина рабочего зазора,

φ – объемная концентрация частиц дисперсной фазы в МРЖ,

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} (М \cdot КГ) / (с^2 \cdot А^2)$ – магнитная постоянная,

M_s – намагниченность насыщения частиц дисперсной фазы.

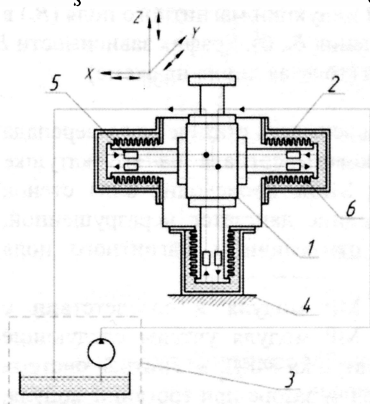


Рис. 1.

Схема МР модуля: 1 – подвижный корпус, 2 – гидроцилиндр, 3 – насосная станция, 4 – основание, 5 – МРД, 6 – сифонный узел

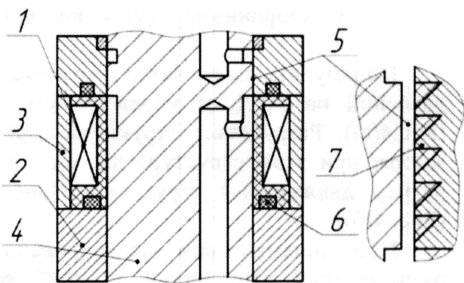


Рис. 2.

Схема МРД: 1 – катушка; 2,3,4 – магнитопровод; 5 – рабочий зазор; 6 – уплотнения; 7 – концентраторы магнитного поля

Расчет индукции магнитного поля в магнитной системе МРД методом

конечных элементов показал неравномерность ее распределения в рабочем зазоре, как в радиальном (r), так и осевом направлении (z) (Рис. 3(а)). Показано, что радиальная составляющая индукции магнитного поля (B_r) в рабочем зазоре МРД существенно превышает осевую составляющую (B_z). В качестве расчетного принято среднее по зубцам значение составляющей индукции поля (B_r) на кольцевой поверхности в середине рабочего зазора (Рис. 3(б)).

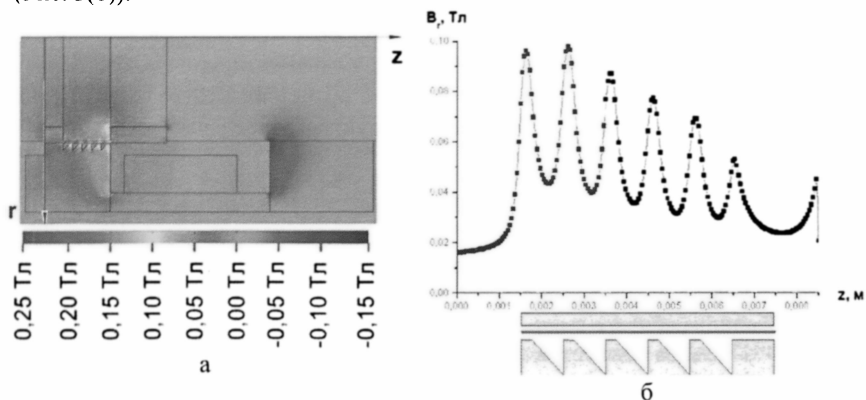


Рис. 3.

Распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля (B_r) в магнитопроводе МРД: а). Эпюра распределения B_r , б). График зависимости B_r от координаты z в середине зазора (толстая линия на схеме)

По результатам расчетов построена зависимость статического перепада давлений на МРД от управляющего токового сигнала на его катушке (Рис.4(а)). Разрушение структуры частиц МРЖ происходит близ стенок зазора, при этом структура частиц в середине движется неразрушенной, размер движущейся структуры зависит от величины магнитного поля (Рис. 4(б)).

При динамическом моделировании МР модуля в соответствии с разработанной структурной схемой САР МР модуля учтены следующие элементы МР модуля: электромагнитная катушка МРД, магнитная система МРД, разрушение структуры частиц в рабочем зазоре при трогании модуля, гидравлическая система МР модуля, сильфонные узлы и инерционные характеристики гидроцилиндров, а также емкостной датчик перемещений.

Выявлено, что наибольшее влияние на качество переходного процесса МР модуля оказывает передаточная функция, характеризующая сильфонные узлы и инерционные характеристики гидроцилиндров:

$$W_s(S) = \frac{F_{\text{эф.сильф}}}{m_o \cdot S^2 + (a_{\text{мест}} + a_{\text{вязк}}) \cdot S + k_{\text{сильф}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{эф.сильф}}$ – эффективная площадь сильфонных узлов,

m_o – масса объекта,

$a_{\text{лест}}, a_{\text{вплн}}$ – коэффициенты линеаризации сил статического трения в гидроцилиндре,

$k_{\text{сильф}}$ – коэффициент жесткости сильфонной системы модуля.

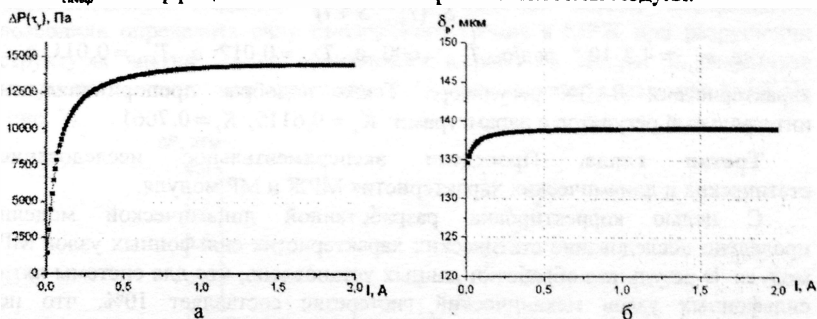


Рис. 4.

Характеристики разрушения структуры частиц в зависимости от управляющего тока: а). Статический перепад давлений, разрушающий структуру, б). Размер неразрушенной части структуры частиц

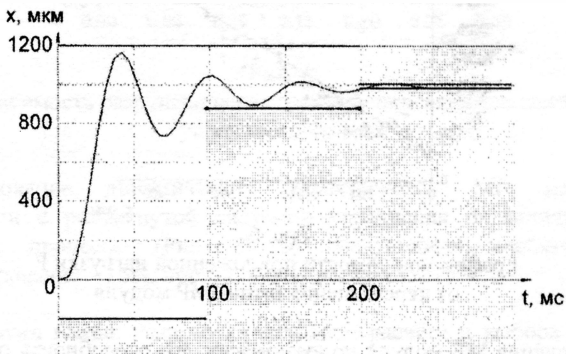


Рис. 5.

Переходный процесс МР модуля в режиме точной регулировки положения объекта

Динамическое моделирование МР модуля проводилось в программной среде Simulink MATLAB (The Mathsoft) в режиме точной регулировки положения объекта (Рис. 5) и позволило получить переходные процессы МР модуля в режиме точной регулировки положения объекта со следующими параметрами качества: перерегулирование составляет 16%, постоянная времени – 200 мс.

Для обеспечения заданного качества переходного процесса САР МР модуля в структурную схему при моделировании введено корректирующее звено вида:

$$W_{\text{рег}}(S) = \frac{\omega_{1\text{yc}} \cdot (T_{2\text{yc}} \cdot S + 1) \cdot (T_{4\text{yc}} \cdot S + 1)}{S \cdot (T_{3\text{yc}} \cdot S + 1)}, \quad (3)$$

где $\omega_{1\text{yc}} = 4,3 \cdot 10^2$ рад/с, $T_{2\text{yc}} = 600$ с, $T_{3\text{yc}} = 0,012$ с, $T_{4\text{yc}} = 0,011$ с – характеристики ЛАЧХ регулятора. Также подобран пропорционально-интегральный регулятор с параметрами: $K_p = 0,6115$, $K_i = 0,7061$.

Третья глава. Проведено экспериментальное исследование статических и динамических характеристик МРЖ и МР модуля.

С целью корректировки разработанной динамической модели проведено исследование статических характеристик сильфонных узлов МР модуля. В результате обработки данных установлено, что для системы пяти сильфонных узлов механический гистерезис составляет 10%, что не противоречит требованиям к узлу, а «зона нечувствительности» 10 Н учтена в динамической модели (Рис. 6).

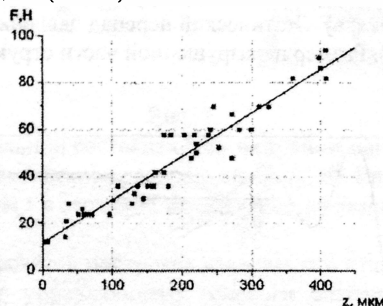


Рис. 6.

График зависимости приложенной нагрузки F от перемещения штока МР модуля

Конструкция МР модуля подразумевает его способность обеспечивать не только активную виброизоляцию (при работе в режиме стабилизации положения объекта), но и пассивную виброизоляцию. Это объясняется наличием в конструкции упругих и вязких элементов. Исследования характеристик пассивной виброизоляции модуля на частоте 50 Гц и дисперсионный анализ результатов свидетельствуют, что МР модуль способен осуществлять виброизоляцию с коэффициентом передачи амплитуды колебаний 0,9.

В ходе исследований установлено, что изменение объемного модуля сжимаемости МРЖ при воздействии на нее давлений до $2 \cdot 10^5$ Па и в интервале регулирования индукций внешнего магнитного поля 0...0,1 Тл составляет 10% от номинального значения.

Исследования динамических характеристик МРЖ состояли в установлении зависимости величины магнитного поля в рабочем зазоре МРД (управляющего тока «трогания» на катушке), при котором происходит разрушение структуры частиц в нем от перепада давлений. Совместно с математической моделью разрушения цепочки частиц исследования позволили определить силу статического трения в МРЖ при разрушении структуры частиц и ее образовании в рабочем зазоре. В результате получено значение тока «трогания» 0,14А при перепадах давлений 1×10^4 Па (Рис. 7).

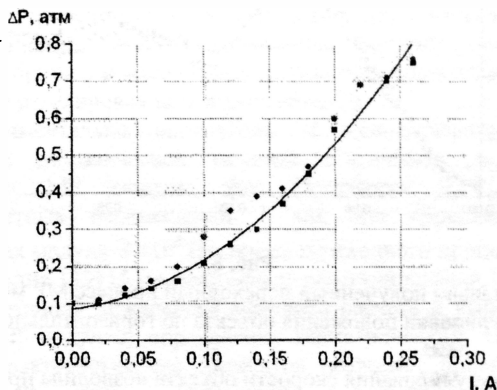


Рис. 7.

Зависимость разрушающего структуру перепада давлений от управляющего тока

Исследование динамических характеристик МР модуля при перемещении с разомкнутой системой управления позволили получить переходные процессы (Рис. 8) со следующими характеристиками: перерегулирование – 16%, постоянная времени 155 ± 15 мс.

Четвертая глава. Разработка методики расчета и выбора параметров управления МР модулем, а также методика регулирования скорости объекта за счет управления статическим трением в МРЖ.

Методика расчета параметров МР механизма позволила произвести подбор конструктивных параметров элементов МР модуля для адаптивной оптики и его САР. Определены конструктивные параметры МР модуля, сильфонных узлов, а также управляющего тока (0...2 А) на катушке и напряженности магнитного поля (0...22 кА/м) в рабочем зазоре МРД.

Разработанная физическая модель позволила определить статический перепад давлений, приводящий к разрушению структуры частиц в МРЖ и троганию МР модуля (0... $0,145 \times 10^5$ Па) Подбор производится исходя из обеспечения заданного быстродействия (постоянная времени – 200 мс),

нагрузочной способности (предельная масса объекта – 100 кг) и перерегулирования в режиме точной регулировки положения объекта. Разработаны алгоритмы управления МР модулем при его работе в режимах точной регулировки и стабилизации положения объекта.

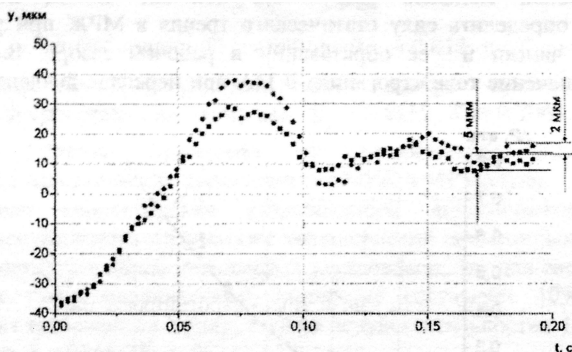


Рис. 8.

Экспериментально полученный переходный процесс МР модуля в режиме точной регулировки положения объекта по горизонтальной координате

Методика регулирования скорости объекта позволила провести расчет и подбор геометрических характеристик и электрических параметров МР регулятора скорости перемещения привода сопел установки струйно-абразивной резки полупроводниковых исходя из регулируемого диапазона перемещений сопел 120...150 мм и регулировки скорости в интервале 0,05...0,3 м/с.

Разработанное устройство внедрено на предприятии НПП «Томилинский электронный завод» и удовлетворяет заявленным характеристикам, о чем свидетельствует наличие акта внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1). Проведенный анализ современного технологического и исследовательского прецизионного оборудования позволил сформировать комплекс требований к качеству систем позиционирования и виброизоляции. Установлено, что МР механизмы могут быть применены для управления перемещением, скоростью и ускорением объектов с обеспечением заданных требований.

2). Разработанная физическая модель поведения МР жидкости в рабочем зазоре модуля при ее структурировании и релаксации под действием магнитных и сдвиговых сил в режиме «трогания» позволила определить зависимость перепада давлений в рабочем зазоре МРД, при котором происходит разрушение структуры частиц, образованной внешним

полем, от управляющего тока на катушке МРД. Установлено, что разрушение структуры частиц происходит у стенок рабочего зазора, при этом размер неразрушенной центральной части структуры зависит от управляющего тока и при максимальном токе 2 А составляет 140 мкм. Модель дает возможность определить силу статического трения в МР жидкости при перемещении модуля в режиме «трогания», которая, соответственно, определяет погрешность позиционирования.

3). Разработанная динамическая модель многокоординатного МР модуля в условиях взаимного влияния каналов управления и компенсации веса объекта перемещения позволяет определить структуру (элементы неизменяемой части системы управления, корректирующие звенья и регулятор), алгоритмы и настроечные параметры процесса управления для режима точной регулировки положения объекта.

4). Экспериментально определены и использованы для анализа физической и динамической моделей статические и динамические характеристики МР модуля: ток «трогания» 0,14 А, диапазон многокоординатных перемещений 1 мм при перепаде давлений в гидроцилиндрах модуля 2×10^4 Па, время переходного процесса для режима позиционирования 135 ± 15 мс, величина перерегулирования 16%.

5). Разработанная инженерная методика расчета и выбора параметров управления МР модулем, определения геометрических, электрических и магнитных характеристик его элементов позволяет провести анализ и синтез САР МР модуля в соответствии с заданным быстродействием, перерегулированием и нагрузочной способностью. При этом используется способ компенсации погрешности позиционирования от сил статического сопротивления, обусловленных весом объекта, в любом пространственном положении.

6). Разработанный метод управления равномерностью скорости движения позволил обеспечить регулировку скорости струйно-абразивных сопел в диапазоне 0,05...0,3 м/с при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы за счет управления трением рабочей МРЖ в зазоре регулятора скорости перемещения привода установки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для нанотехнологического оборудования / А.М. Базиненков [и др.] // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2010. № 5. С. 138-148.

2. Управление активной виброизоляцией и позиционированием магнитореологических устройств / А.М. Базиненков [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 7. С. 5-9.

3. Демпфирующие свойства магнитореологических эластомеров / А.М. Базиненков [и др.] // Наноинженерия. 2012. № 9. С. 29-33.
4. Системы реологического типа для микро- и нанопозиционирования и виброизоляции / А.М. Базиненков [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 45-50.
5. Системы точного позиционирования и активной виброизоляции для нанотехнологического оборудования / А.М. Базиненков [и др.] // Наноинженерия. 2011. № 3. С. 16-25.
6. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для прецизионного вакуумного оборудования / А.М. Базиненков [и др.] // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21, № 3. С. 165-170.
7. Михайлов В.П., Акимов И.Ю., Базиненков А.М. Системы виброизоляции и юстировки реологического типа // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 6. С. 51-56.
8. Борин Д.Ю., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Моделирование магнитореологического дросселя модуля линейных сверхточных перемещений // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2007. № 4. С. 58-71.
9. Базиненков А.М., Conte M. Влияние жесткости сильфонного узла на характеристики гидравлического модуля для виброизоляции прецизионного оборудования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 11. С. 19-23.
10. Базиненков А.М., Добер В.А., Михайлов В.П. Исследование характеристик системы активной виброизоляции прецизионного оборудования // Наноинженерия. 2012. № 10. С. 8-14.
11. Исследование сильфонного узла гидравлического модуля для виброизоляции прецизионного оборудования / А.М. Базиненков [и др.] // Наноинженерия. 2011. № 5. С. 3-6.
12. Управление виброизоляцией прецизионного оборудования / А.М. Базиненков [и др.] // Наука и образование. 2012, URL <http://technomag.edu.ru/doc/454475.html>.
13. Базиненков А.М., Добер В.А., Михайлов В.П. Исследования свойств магнитореологических жидкостей и их использования в устройствах перемещения и виброизоляции // Наука и образование. 2012. URL <http://technomag.edu.ru/doc/434696.html>.
14. Positioning magnetorheological actuator / A. Bazinenkov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2009. V.149, № 1. URL <http://iopscience.iop.org/1742-6596/149/1/012075>.
15. Магнитореологическая позиционирующая и виброизолирующая система: Патент РФ № 2443911 / В.П. Михайлов, А.М. Базиненков, Д.Ю. Борин, И.Ю. Акимов заявл. 2010128978/06, 14.07.2010; опубл. 27.02.2012. Бюллетень. № 6.