

На правах рукописи  
УДК 62-567.7

Копылов Алексей Андреевич



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ  
УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ  
ДЕМПФЕРАМИ

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

**Михайлов Валерий Павлович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Костишин Владимир Григорьевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
технологии материалов электроники  
Национального исследовательского  
технологического университета  
«Московский институт стали и  
сплавов»

**Макарьянц Георгий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой эксплуатации  
авиационной техники Самарского  
университета им. академика С.П.  
Королева

Ведущая организация:

АО «Научно-исследовательский  
институт точного машиностроения»  
(НИИТМ)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском  
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок +7-499-267-09-63.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на  
сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.02  
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Современные технологии производства и исследования микро- и наноструктур (плёнок, объёмных структур), обладают широким набором методов формирования и контроля локальных свойств поверхности, для чего необходимо проводить работы с разрешением менее 100 нм. К подобному технологическому и исследовательскому оборудованию относятся установки, использующие для обработки и анализа поверхности ионные, электронные или рентгеновские пучки (электронные микроскопы, сканирующие зондовые микроскопы, оборудование для микро- и нанолитографии, оборудование нанолокальной ионной и электронной обработки и др.), а также оптическое излучение (оптические микроскопы высокого разрешения, например, металлографические микроскопы и др.). При этом важнейшей задачей обеспечения качества работы такого оборудования является его эффективная защита от внешних вибрационных воздействий в области низких частот, при которых проявляются резонансные явления. Это особенно важно при интенсивном развитии нанотехнологий, которые реализуются в основном за счет использования сверхвысоковакуумного оборудования, элементы которого имеют низкую жесткость (тонкостенные вакуумные камеры, сильфоны, вводы движения в вакуум и др.) и соответственно, низкие резонансные частоты.

Эффективность виброизоляции согласно ГОСТ 24346-80 – это отношение пикового или среднего квадратического значения виброперемещения защищаемого объекта до введения виброзащиты к значению той же величины после введения виброзащиты. В настоящее время применяются различные типы виброизолирующих систем, которые подразделяются на пассивные и активные. Пассивные системы эффективно подавляют вибрации при частотах более 40-50 Гц, при этом, в низкочастотной области такие системы малоэффективны, так как не могут скомпенсировать резонансные явления. Для виброизоляции в низкочастотном диапазоне применяют системы активной виброизоляции, использующие энергию дополнительного источника. Такие системы для обеспечения заданных требований обязательно работают в автоматическом режиме. Наибольшей эффективностью обладают современные системы, объединяющие в себе активную и пассивную виброизоляцию. Изучением этой проблемы занимались многие российские и зарубежные ученые, в том числе: Фролов К.В., Генкин М.Д., Андреев Н.Н., Тартаковский Б.Д., Елисеев С.В., Кашина С.Г., Артоболевский И.И., Гордеев Б. А., Алабужев П.М., Синёв А.В., Ерофеев В.И., Сысуев В.А., Таньков Г.В., Гришко А.К., Михайлов В.П., Tanaka N., Kikushima Y., Сакмак D., Wolf H., Alujević N., Wang K., Michael Z.Q., Lihua Yang и др.

Однако, в комплексе задача подавления вибраций в области экстремально низких частот до сих пор не решена. Актуальность исследования связана с повышением эффективности методов активной защиты от вибраций в диапазоне частот 0,3–10 Гц и обеспечением эффективной виброизоляции до 100 Гц и выше, при этом коэффициент передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) должен быть не более 0,1. Для решения этой задачи предлагается использование в

качестве высокоточных исполнительных механизмов активных демпферов на основе магнитоэластических (МЭ) эластомеров (МЭ-демпферов). Однако для достижения заданных требований необходимо обеспечить автоматическое управление такими устройствами в режимах позиционирования и стабилизации положения объекта, защищаемого от внешних вибраций. Поэтому задача автоматизации управления МЭ-демпферами для повышения эффективности активной виброизоляции при экстремально низких частотах является чрезвычайно актуальной.

**Объектом исследования** является платформа на основе активных демпферов с использованием МЭ-эластомеров для виброизоляции прецизионного технологического оборудования.

**Предметом исследования** является процесс автоматического управления активными демпферами на основе МЭ-эластомеров.

**Цель диссертационной работы** – разработка и исследование процесса автоматического управления активными демпферами и платформой на основе МЭ-эластомеров для повышения эффективности виброизоляции прецизионного технологического оборудования.

#### **Основные задачи исследования**

1. Проведение аналитического обзора современного прецизионного оборудования, средств защиты от вибрационных воздействий и методов их автоматизации, формулировка комплекса требований к системам активной виброизоляции, в том числе требования обеспечения КПАВ не более 0,1 на низких частотах;

2. Определение осевой жёсткости МЭ-эластомерного стакана при деформации под действием магнитного поля, позволяющее найти передаточную функцию перемещаемого объекта системы автоматического регулирования (САР) активного демпфера на основе МЭ-эластомера;

3. Разработка математической модели процесса регулирования активного демпфера на основе МЭ-эластомерного стакана для определения коэффициентов передачи амплитуды виброперемещений, выбора алгоритмов и параметров автоматического управления при работе в режиме активной виброизоляции, проведения моделирования в программной среде Simulink MATLAB;

4. Сравнение результатов моделирования работы САР демпферов на основе МЭ-эластомерного стакана и МЭ-эластомерной мембраны при осевом перемещении;

5. Проведение экспериментальных исследований разработанной системы автоматического управления платформой для активной виброизоляции металлографического микроскопа ММР-1;

6. Разработка методики расчёта и проектирования элементов платформы для активной виброизоляции как объекта автоматического управления.

#### **Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель системы автоматического регулирования активного демпфера на основе МЭ-эластомерного стакана, позволяющая определить коэффициенты передачи амплитуды

виброперемещений, переходный процесс перемещения демпфера при воздействии гармонических вибрационных колебаний, а также алгоритмы управления, структуру и состав управляющей системы для обеспечения требуемых параметров активной виброизоляции на низких частотах за счет выбора типа регулятора и его настроечных параметров;

2. Впервые экспериментально получена амплитудно-частотная характеристика автоматически управляемой виброизолирующей платформы на основе активных МР-демпферов при частотах 0,3-100 Гц с коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений не более 0,075, которая подтверждает результаты моделирования и достижение повышенной эффективности виброизоляции на экстремально низких частотах.

**Практическая значимость работы** заключается в совершенствовании методов и средств защиты прецизионного оборудования от низкочастотных вибраций, разработке системы автоматического управления активными демпферами и платформой на основе МР-эластомеров, обеспечивающей заданную эффективность виброизоляции при частотах 0,3–100 Гц.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении Государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности № 9.8503.2017/БЧ на выполнение проекта по теме «Исследование и разработка систем нанопозиционирования и активной виброизоляции для нано- и микроэлектроники» (2017-2019г.), а также при выполнении Соглашения № 14.577.21.0128 с Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по теме «Разработка технологии для субтрактивной обработки многослойных гетерогенных структур с нанометровой точностью позиционирования исполнительных механизмов».

Полученные результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Системы автоматического управления технологическим оборудованием».

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: п.12 «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации.», п.18 «Математическое моделирование, оптимизация и оптимальное управление техническими системами, технологическими процессами и производствами в промышленности».

#### **На защиту выносятся:**

1. Математическая модель системы автоматического регулирования активного демпфера на основе МР-эластомерного стакана, позволяющая определить коэффициенты передачи амплитуды виброперемещений, переходный процесс перемещения демпфера при воздействии гармонических вибрационных колебаний, алгоритмы управления, структуру и состав

управляющей системы, тип регулятора и его настроечные параметры для обеспечения повышенной эффективности виброизоляции на низких частотах;

2. Результаты определения осевой жёсткости МР-эластомерного стакана при деформации под действием магнитного поля, позволяющие найти передаточную функцию перемещаемого объекта системы автоматического регулирования активного МР-демпфера для моделирования его работы;

3. Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика автоматически управляемой виброизолирующей платформы на основе МР-демпферов и упругой подвески с квазиулевым жесткостью при частотах 0,3-100 Гц с коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений не более 0,075, подтверждающая результаты моделирования и достижение повышенной эффективности виброизоляции на экстремально низких частотах.

#### **4. Методы исследования**

В работе использовались следующие методы: методы теории колебаний, теории автоматического управления, математического моделирования, теории планирования эксперимента. Экспериментальные исследования замкнутой системы автоматического управления платформой на основе активных МР-демпферов проводились на специально разработанном оборудовании.

**Достоверность** научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств измерений и стандартных методик проведения исследования, а также методов статистической обработки данных.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва, 2016, 2017, 2018, 2019 г.), на XXIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Крым, 2017 г.), на международной конференции IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering «EIconRus–2018» (Москва, 2018), на международной конференции IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering «EIconRus–2020» (Москва, 2020), на международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020) (г. Севастополь, РФ), на 14-ой международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва (2020 г.), на 16-ой международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва (2022 г.).

Положенные в основу диссертации разработки удостоены следующих наград: Лауреат конкурсной программы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2017»; Диплом I степени в номинации «Наноинженерия» XII Всероссийской молодежной научно-инженерной

выставки «ПОЛИТЕХНИКА», посвящённой 170-летию со дня рождения Н.Е. Жуковского (2017 г.).

### **Публикации**

Результаты проведённых исследований по теме диссертации отображены в 11 научных работах, в том числе: 5 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных работ, 4 работах, опубликованных в академических журналах, рецензируемых в системе SCOPUS, 2 тезисах докладов, опубликованных в сборниках трудов конференций.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора средств защиты от вибрационных воздействий и методов их автоматизации; выявлении требований к средствам виброизоляции, методам их автоматизации. Разработана математическая модель системы автоматического регулирования активных демпферов и платформы на основе МР-эластомеров. Проведены экспериментальные исследования активного режима виброизоляции с замкнутой системой управления, обработаны результаты экспериментов. Разработана методика расчета и проектирования основных элементов, входящих в состав виброизолирующей системы как объекта автоматического управления.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений, введения, четырех глав материала, выводов по работе, списка литературы из 84 наименований. Общий объем работы составляет 211 страницу, в том числе 115 рисунков, 13 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены основные задачи работы, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности полученных результатов и информация об апробации работы. Актуальность выбранной темы связана с необходимостью обеспечения защиты современного технологического и исследовательского оборудования от вибрационных возмущений и с недостаточной эффективностью методов активной защиты от них в области низкочастотного воздействия. Для этого необходимо использование системы, объединяющей в себе активную и пассивную виброизоляцию, в частности активную систему на основе МР-демпферов и пассивную систему квазиулевого жёсткости на основе упругой подвески с массовыми корректорами.

**В Главе 1** представлен аналитический обзор оборудования, применяемого в области производства и исследования изделий нано- и микроэлектроники. Это в первую очередь оборудование для микро- и нанолитографии (рентгенолитографии, электронно-лучевой литографии и др.) К наиболее распространённым современным типам оборудования для исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением, относятся электронные микроскопы,

сканирующие зондовые микроскопы, оптические микроскопы высокого разрешения и др.

Для замкнутых систем управления устройствами точных перемещений обрабатываемых, исследуемых изделий или инструмента в перечисленном оборудовании, погрешность позиционирования равна:  $\delta\varphi_D = \delta_B + \delta_L + \delta_C + \delta_H$  где  $\delta_B$  – ошибка, возникающая вследствие воздействия внешних вибраций;  $\delta_L$  – ошибка, обусловленная люфтом;  $\delta_C$  – ошибка, обусловленная наличием сил статического сопротивления в приводе;  $\delta_H$  – инструментальная ошибка. Использование безлюфтовых соединений позволяет исключить погрешность  $\delta_L$ . Современные прецизионные системы измерения положения, в частности, бесконтактные ёмкостные датчики позволяют сделать практически незначимой также погрешность  $\delta_H$  ( $\delta_H < 10^{-2}$  мкм). В этом случае погрешностями, определяющими точность устройств точных перемещений с замкнутой системой управления, остаются погрешности  $\delta_B$  и  $\delta_C$ , т. е.  $\delta\varphi_D = \delta_B + \delta_C$ . Погрешность  $\delta_C$  определяется зоной нечувствительности  $\delta_T$  привода:  $\delta_C = 2\delta_T = 2I_{TP} / (k_D \cdot k_U)$ , где  $\delta_T$  – зона нечувствительности привода;  $I_{TP}$  – ток трогания привода;  $k_D$  – коэффициент передачи датчика положения;  $k_U$  – коэффициент усиления измерительной системы. Погрешность  $\delta_C$  можно свести к пренебрежимо малой величине за счет увеличения общего коэффициента передачи  $k = k_D \cdot k_U$  измерительной системы без потери устойчивости. Таким образом, основной погрешностью, определяющей точность устройств точных перемещений с замкнутой системой управления, остается погрешность  $\delta_B$ , возникающая вследствие воздействия внешних вибраций. Уменьшение этой погрешности является основной задачей данной работы.

Для обеспечения точностных характеристик работы прецизионного технологического и исследовательского оборудования, к помещениям, в которых оно устанавливается, также предъявляются повышенные требования по критериям виброзащиты. Аналитический обзор характеристик высокоточного оборудования и требований, предъявляемых к помещениям для работы такого оборудования, позволил сформулировать ряд требований к средствам виброизоляции, обеспечивающей требуемую эффективность гашения колебаний (коэффициент передачи амплитуды виброперемещений менее 0,1) при частотах 0,3-100 Гц. Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) или коэффициент передачи при виброизоляции согласно ГОСТ 24346-80 – это отношение амплитуды виброперемещения защищаемого объекта к амплитуде виброперемещения источника возбуждения при гармонической вибрации.

Для защиты высокоточного оборудования от внешних вибраций применяются различные типы виброизолирующих систем, которые подразделяются на пассивные и активные. Пассивные системы эффективно подавляют вибрации при частотах более 40–50 Гц с амплитудой 0,002–0,3 мм, при этом, в низкочастотной области 0,5–10 Гц, такие системы малоэффективны, так как не могут скомпенсировать резонансные явления. Для виброизоляции в низкочастотном диапазоне применяют системы активной виброизоляции, использующие энергию дополнительного источника. В зависимости от типа исполнительного механизма, активные системы можно разделить на следующие

группы: гидравлические, пневматические, электромагнитные, пьезоэлектрические, магнитострикционные и др. В первой главе рассмотрены амплитудно-частотные характеристики систем активной виброизоляции на основе пневматических, электромагнитных и пьезоэлектрических приводов, выявлены их недостатки в зависимости от типов исполнительных механизмов. На частотах менее 2-10 Гц подобные системы демонстрируют низкую эффективность виброизоляции, при этом величина коэффициента передачи амплитуды виброперемещений для них находится в диапазоне 0,1-1, в связи с чем необходимо разработать принципиально новую систему активной виброизоляции с улучшенными параметрами и алгоритмами управления.

В результате аналитического обзора, проведенного в главе, сформулирован комплекс требований к системам активной виброизоляции, определена необходимость совершенствования методов защиты оборудования от низкочастотных вибраций, обозначена важность разработки и исследования процесса автоматического управления активными демпферами и платформой на основе МР-эластомеров для повышения эффективности виброизоляции прецизионного технологического оборудования.

**В Главе 2** разработана математическая модель системы автоматического регулирования (САР) активного трехкоординатного МР-демпфера с последующим моделированием процесса в среде Simulink MATLAB. Фотография платформы активной виброизоляции без верхней плиты показана на Рисунке 1. Платформа представляет собой две плиты, между которыми располагаются четыре активных трехкоординатных или однокоординатных МР-демпфера 1 и четыре узла упругой подвески 2 с квазинулевой жесткостью. В конструкции трехкоординатного МР-демпфера МР-эластомерный элемент выполнен в форме стакана, а в однокоординатном МР-демпфере – в виде мембраны. Схема САР одного из каналов управления МР-демпфера показана на Рисунке 2.



Рисунок 1. Фотография платформы активной виброизоляции (верхняя плита не показана)

В нижней части расположена катушка, создающая магнитное поле в осевом направлении, в верхней части располагаются четыре горизонтальные направляющие, на которых зафиксированы четыре катушки, создающие магнитное поле в радиальном направлении, что позволяет перемещать демпфер в горизонтальном направлении.

В состав замкнутой САР платформы активной виброизоляции входит микроконтроллер на отладочной плате STM32, усилитель сигнала, 4-х каналный АЦП и делитель напряжения для чтения показаний каждого датчика перемещения, 4-х каналный ЦАП для передачи аналогового сигнала на усилитель, дисплей для вывода отладочной информации. САР обеспечивает обработку показаний каждого из четырех емкостных датчиков перемещения, а также выдачу управляющего сигнала, передаваемого на усилитель и затем в

катушку соответствующего активного демпфера, располагаемого под датчиком, тем самым создавая необходимое противофазное колебание. Система имеет независимые каналы регистрации возмущения, формирования управляющего сигнала и осуществления перемещения для всех защищаемых степеней свободы. Входным воздействием системы является механическое колебание, величиной  $0...1000$  мкм. Это колебание регистрируется емкостным датчиком Д1, и преобразуется в аналоговый сигнал величиной  $0...10$  В, далее сигнал передаётся в блок АЦП2 для преобразования в цифровой сигнал, который поступает для последующей обработки в управляющую программу САР.

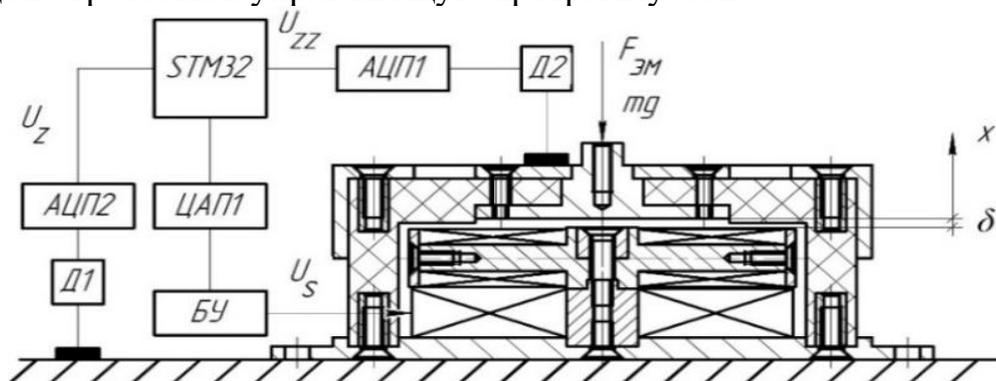


Рисунок 2. Схема САР одного из каналов управления МР-демпфера:  $F_{ЭМ}$  – электромагнитная сила,  $U_z$ ,  $U_{zz}$  – сигналы главной и обратной связи;  $U_s$  – управляющее напряжение, БУ – блок усилителей; Д1,2 – датчики емкостные; ЦАП1 – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП1,2 – аналогово-цифровые преобразователи  $\delta$  – перемещение подвижного сердечника; STM32 – микроконтроллер

На основе полученных данных программа вычисляет управляющий сигнал и выдаёт его в цифровом формате в ЦАП1 (Рисунок 2), который преобразует цифровой сигнал в аналоговый, величиной  $0...5$  В. Как правило, уровень сигнала, который формирует ЦАП, мал и требует предварительного усиления, поэтому с выхода ЦАП1 сигнал поступает на вход блока усилителя БУ, где усиливается до необходимого уровня  $U_s$ , и передаётся в катушку МР-демпфера. Под действием управляющего напряжения  $U_s$ , в катушке возникает ток  $I$ , создавая магнитное поле с индукцией  $B$  в рабочем зазоре демпфера, формируя электромагнитную силу  $F_{ЭМ}$ , что приводит к перемещению подвижного сердечника на величину  $\delta$ . Подвижный сердечник является жёстким центром мембраны из МР-эластомера и соединяется с верхней плитой платформы. Перемещение подвижного сердечника измеряется емкостным датчиком Д2, после чего этот аналоговый сигнал, пропорциональный величине перемещения  $\delta$ , преобразуется АЦП1 в цифровой сигнал  $U_{zz}$  и поступает в микроконтроллер STM32 для дальнейшей обработки управляющей программой, реализуя алгоритм управления по закону ПИД регулятора для вычисления величины ошибки.

Определена осевая жёсткость МР-эластомерного стакана, состоящего из мембраны и трубчатого элемента, при осевой деформации под действием магнитного поля, что позволило найти передаточную функцию подвижного сердечника САР активного МР-демпфера. Коэффициент жесткости  $k_1$  мембраны из МР-эластомера был определен ранее экспериментально. Коэффициент

жесткости  $k_2$  трубчатого элемента согласно формуле Максвелла, зависит от магнитных и механических характеристик МР-эластомера:

$$k_2 = \frac{S}{L} (9,81 \cdot 10^{12} \cdot (B/5000)^2 \varphi_v + E_{\text{МРЭ}}^0),$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубчатого элемента из МР-эластомера ( $\text{м}^2$ );  $L$  – высота трубчатого элемента из МР-эластомера ( $\text{м}$ );  $\varphi_v$  – объёмная концентрация частиц дисперсной фазы;  $B$  – магнитная индукция в МР-эластомере ( $\text{Тл}$ );  $E_{\text{МРЭ}}^0$  – модуль упругости МР-эластомера при отсутствии магнитного поля ( $\text{Па}$ ). Магнитная индукция  $B$  в МР-эластомере зависит от множества факторов: размера и распределения частиц дисперсной фазы в эластомерной матрице, их относительной магнитной проницаемости, нелинейно зависящей от магнитного поля, объёмной концентрации частиц и др. Таким образом, определение коэффициента жёсткости  $k_2$  по формуле Максвелла приводит к большой погрешности, поэтому его целесообразно найти как  $k_2 = \frac{E_{\text{МРЭ}} S}{L}$ , где  $E_{\text{МРЭ}}$  – модуль упругости МР-эластомера при действии магнитного поля, определенный в данной работе экспериментально. Суммарный коэффициент жёсткости  $k$  МР-эластомерного стакана определяется как коэффициент жесткости последовательно соединенных мембраны и трубчатого элемента при осевой нагрузке. Использование МР-эффекта позволяет регулировать суммарный коэффициент жесткости  $k$  упругого МР-эластомерного стакана за счет изменения величины магнитной индукции  $B$ . При этом можно управлять динамическими и точностными характеристиками активного МР-демпфера, а также повысить устойчивость трубчатого элемента из МР-эластомера. Передаточная функция подвижного сердечника (жесткого центра мембраны) будет иметь вид:

$$W_C(s) = \frac{Y(s)}{F_{\text{Маг}}(s)} = \frac{1}{m_{\text{пр}} s^2 + Hs + k} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{m_{\text{пр}}}{k} s^2 + \frac{H}{k} s + 1} = \frac{\frac{1}{k}}{T_{\text{кор}}^2 s^2 + T_B s + 1},$$

где  $Y$  – перемещение подвижного сердечника вдоль продольной оси  $Y$ ;  $m_{\text{пр}}$  – приведенная масса подвижного сердечника;  $H$  – коэффициент вязкостного трения в МР-эластомере;  $k$  – коэффициент жесткости МР-эластомерного стакана;  $T_{\text{кор}}$  – постоянная времени подвижного сердечника при действии инерционных и упругих сил ( $T_{\text{кор}} = \left(\frac{m_{\text{пр}}}{k}\right)^{1/2}$ );  $T_B$  – постоянная времени подвижного сердечника при действии вязкоупругих сил ( $T_B = H / k$ ).

Было проведено моделирование разработанной САР активного МР-демпфера в программной среде Simulink MATLAB. В процессе моделирования была проанализирована реакция системы при одновременном действии гармонических вибрационных возмущений и ступенчатом управляющем сигнале с пошаговым перемещением МР-демпфера на 5 мкм. Было проведено сравнение моделей поведения работы трехкоординатного и однокоординатного МР-демпферов при осевом перемещении, которое показало сходные динамические характеристики при небольшом уменьшении осевой жёсткости МР-эластомерного стакана. При этом коэффициент передачи амплитуды виброперемещений для обеих моделей не превышает 0,1 в диапазоне частот 0,3–100 Гц. Моделирование позволило также выбрать алгоритмы управления,

структуру и состав управляющей системы. Структурная схема САУ одного канала управления трёхкоординатного МР-демпфера с ПИД регулятором приведена на Рисунке 3.

ПИД-регулятор 1 встроен после сумматора сигналов последовательно со звеньями САУ МР-демпфера: электромагнитной катушкой 2, магнитопроводом 3, МР-эластомером 4, подвижным сердечником 5, измерительной системой 6.

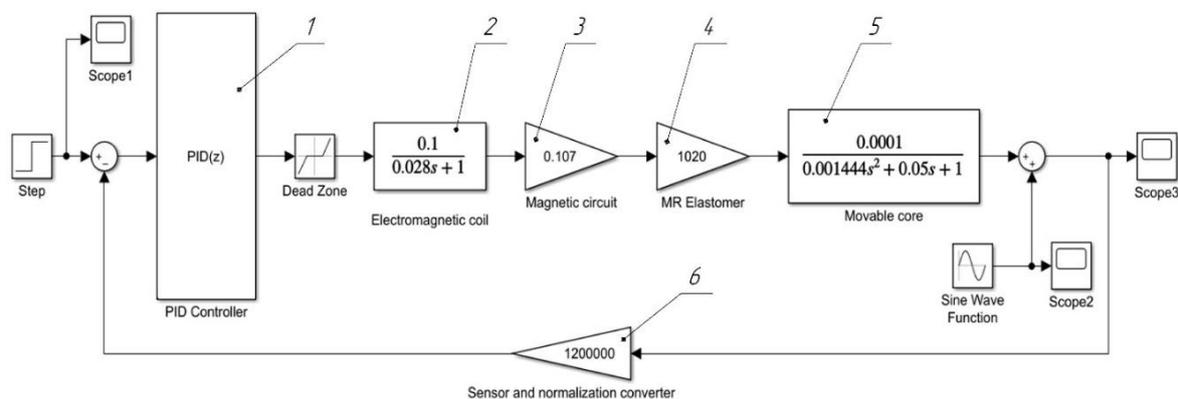


Рисунок 3. Структурная схема САУ одного канала управления трёхкоординатного МР-демпфера с ПИД-регулятором

Переходный процесс САУ трёхкоординатного МР-демпфера при воздействии синусоидального вибрационного воздействия с амплитудой колебаний 5 мкм и частотой 20 Гц, с входным ступенчатым сигналом – 5 мкм показан на Рисунке 4. Время переходного процесса составило не более 0,2 с, при этом наблюдаются остаточные вибрации, не компенсируемые ПИД регулятором. Величина коэффициента передачи амплитуды виброперемещений составляет 0,03...0,05.

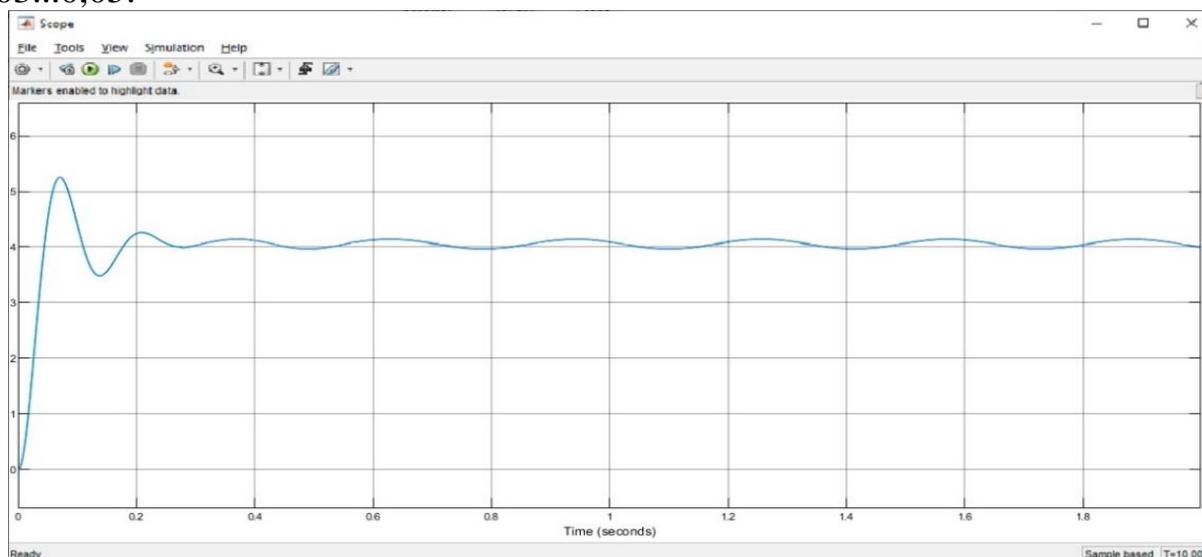


Рисунок 4. Переходный процесс САУ трёхкоординатного МР-демпфера

В Главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований активного демпфера и платформы, позволяющие определить режимы работы системы, проводить настройку САУ и демонстрирующие эффективность работы платформы активной виброизоляции с замкнутой системой управления.

Замкнутая САР осуществляет перемещение однокоординатных МР-демпферов в противофазе внешним возмущениям. Применение обратной связи в схеме САР значительно увеличивает точность системы, но снижает её быстродействие. Для определения быстродействия проводился анализ баланса составляющих времени переходного процесса при отработке перемещения активного демпфера в противофазе внешним воздействиям под управлением микроконтроллера STM32, в результате чего было выявлено, что переходные процессы в ней продолжаются менее 10 мс, что является достаточным для эффективной виброизоляции в полном частотном диапазоне от 0,3 до 100 Гц.

Для исследований активного режима виброизоляции с замкнутой системой управления в качестве защищаемого объекта был выбран металлографический микроскоп высокого разрешения ММР-1. Фотография стенда по оценке эффективности работы платформы для защиты микроскопа ММР-1 показана на Рисунке 5, схема стенда – на Рисунке 6.



Рисунок 5. Фотография стенда по оценке эффективности работы платформы активной виброизоляции металлографического микроскопа ММР-1

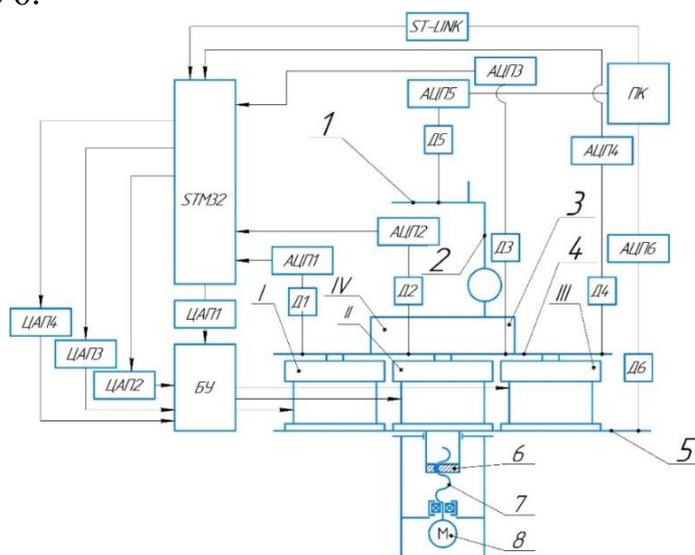


Рисунок 6. Схема стенда по оценке эффективности работы платформы

На схеме стенда показаны: демпферы I, II, III; предметный столик 1; стойка микроскопа 2; основание микроскопа 3; верхняя плита 4; нижняя плита 5; гайка с толкателем 6; винт ходовой 7; шаговый двигатель 8; блок усилителей БУ; датчики емкостные Д1-6; персональный компьютер ПК; цифро-аналоговые преобразователи микроконтроллера ЦАП1-4; аналогово-цифровые преобразователи АЦП1-6; программатор ST-LINK. Для оценки эффективности работы платформы активной виброизоляции используются показания с емкостного датчика Д5, расположенного над предметным столиком микроскопа и датчика Д6, установленного на основании платформы. Данные с датчиков записываются в файл и обрабатываются по заданному алгоритму для определения КПАВ для замкнутой системы автоматического управления.

Предварительно был проведён анализ амплитудно-частотной характеристики микроскопа, т.е. анализ амплитуд колебаний, передаваемых предметному столику микроскопа от основания при внешних вибрационных воздействиях амплитудой 0,3 мм в диапазоне частот 0,3-100 Гц. График амплитудно-частотной характеристики представлен на Рисунке 7. На графике

видно, что резонансные частоты металлографического микроскопа ММР-1 находятся в диапазоне 10-18 Гц, а пиковое значение резонансной частоты составляет 13 Гц.

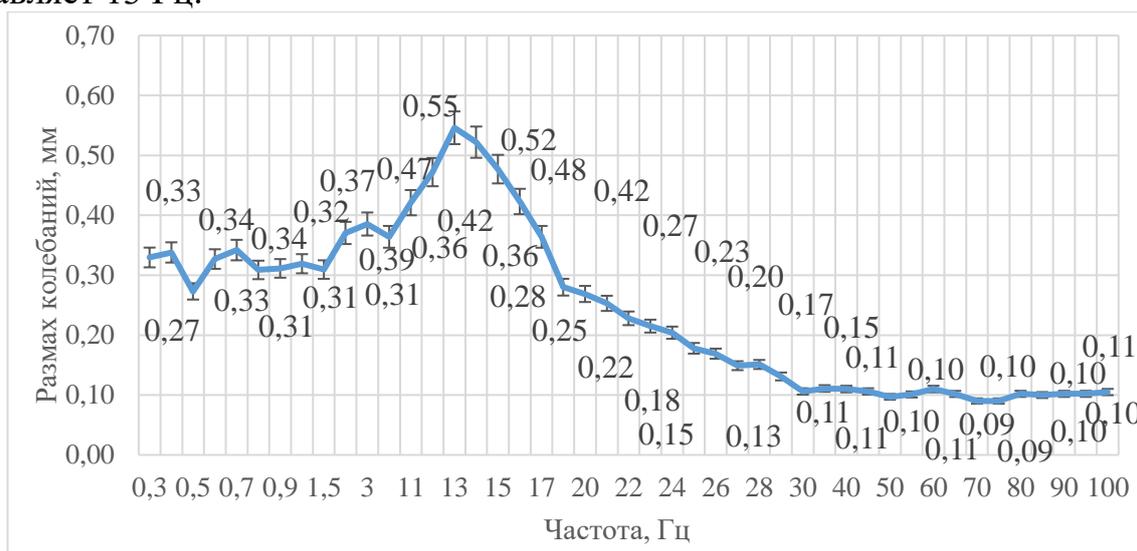


Рисунок 7. Амплитудно-частотная характеристика микроскопа ММР-1

В ходе исследований активного режима виброизоляции микроскопа ММР-1 были проведены эксперименты в диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц. Для всего диапазона частот рассчитан КПАВ от частоты внешних возмущений для замкнутой системы автоматического управления на основе микроконтроллера STM32. КПАВ показывает, какая доля виброперемещений передаётся при вибрациях с нижней плиты платформы на предметный столик микроскопа. Этот параметр важен для оценки эффективности работы активной платформы в целом, т.е. для оценки её виброизолирующих свойств:  $KPAV = \frac{A_1}{A_0}$ , где  $A_1$  — амплитуда виброперемещений предметного столика микроскопа,  $A_0$  — амплитуда виброперемещений нижней плиты. Рисунок 8 демонстрирует эффективность системы активной виброизоляции при резонансной частоте металлографического микроскопа ММР-1 – 13 Гц, для которой удалось снизить внешние вибрации, передаваемые на предметный столик металлографического микроскопа ММР-1 с амплитуды 318 мкм, до 20-26 мкм.

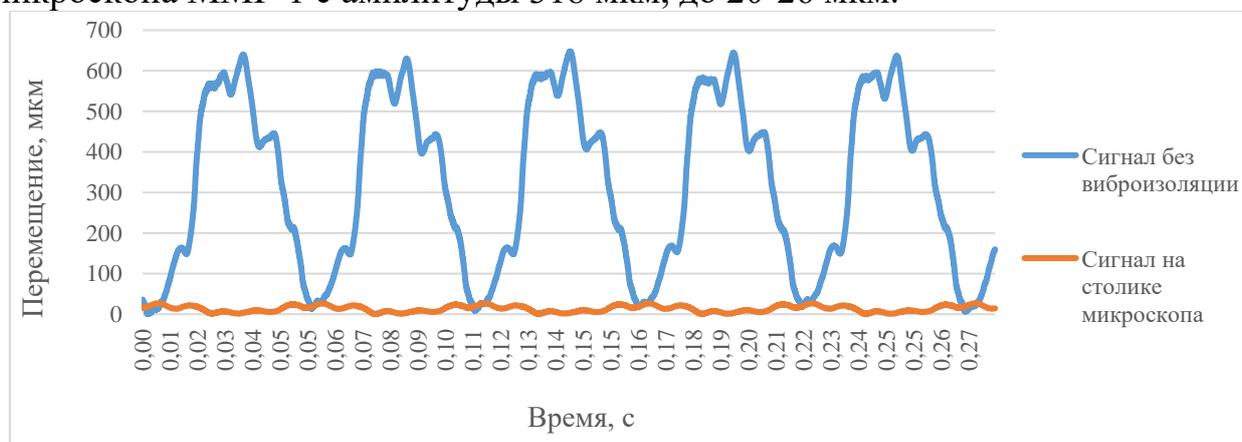


Рисунок 8. Графики зависимости перемещения от времени: для сигнала на столике микроскопа ММР-1 и для сигнала без активной виброизоляции при резонансной частоте микроскопа ММР-1

В ходе исследований были проведены эксперименты в диапазоне частот от 0,3 до 100 Гц, при максимальном размахе вибрационных возмущений 600 мкм. На Рисунке 9 приведён график зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений платформы от частоты внешних возмущений для режима активной виброизоляции металлографического микроскопа ММР-1, показывающий высокую эффективность работы системы, при этом максимальное значение коэффициента передачи амплитуды виброперемещений во всем исследуемом диапазоне не превышает 0,071. График также демонстрирует смещение резонансной частоты в область низких частот с 13 Гц до 2 Гц.

В результате проведённых исследований была доказана высокая эффективность разработанной системы автоматического управления платформой активной виброизоляции на основе МР-демпферов в области экстремально низких частот, при которых возникают опасные резонансные колебания прецизионного оборудования.

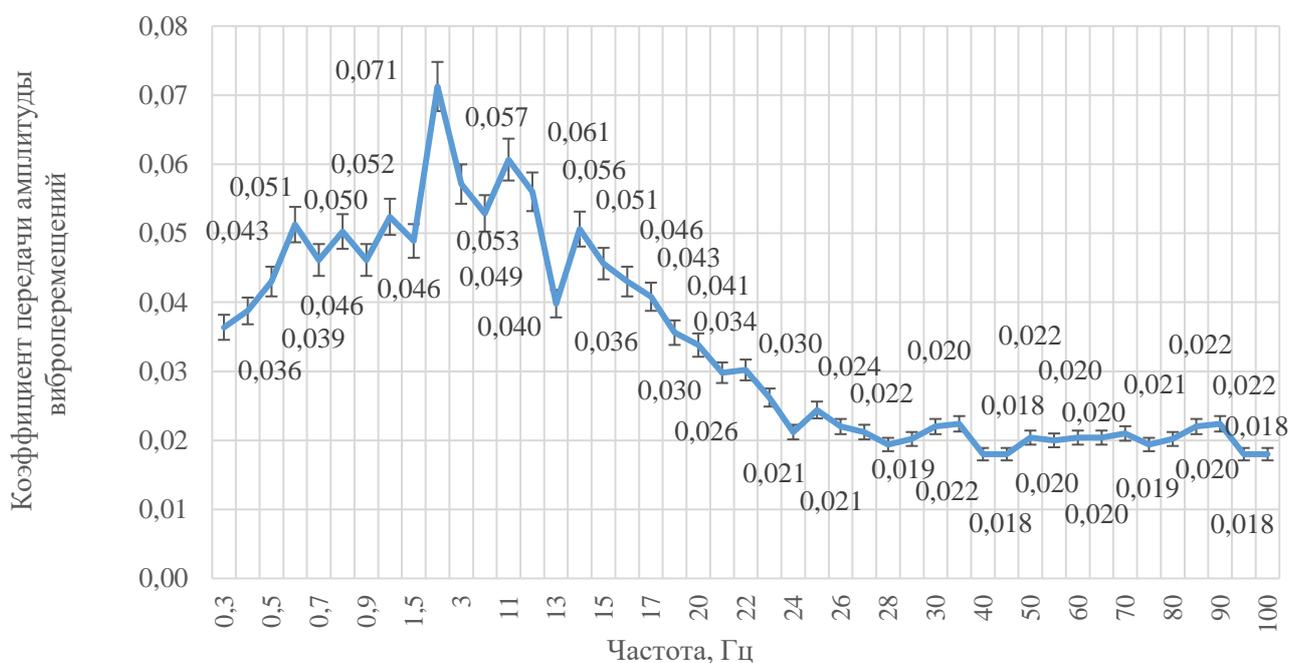


Рисунок 9. График зависимости коэффициента передачи амплитуды виброперемещений платформы от частоты внешних возмущений для режима активной виброизоляции микроскопа ММР-1

На Рисунке 10 показаны сравнительные графики зависимости КПАВ от частоты внешних возмущений для предлагаемой платформы и современных систем активной виброизоляции разных типов. Платформа на основе МР-демпферов (график 3) демонстрирует более высокую эффективность виброизоляции в диапазоне частот 0,3-3 Гц по сравнению с пьезоэлектрической системой STACIS (график 1) и в диапазоне частот 0,3-20 Гц по сравнению с платформой на основе электромагнитного силового привода DVIA-MB (график 2).

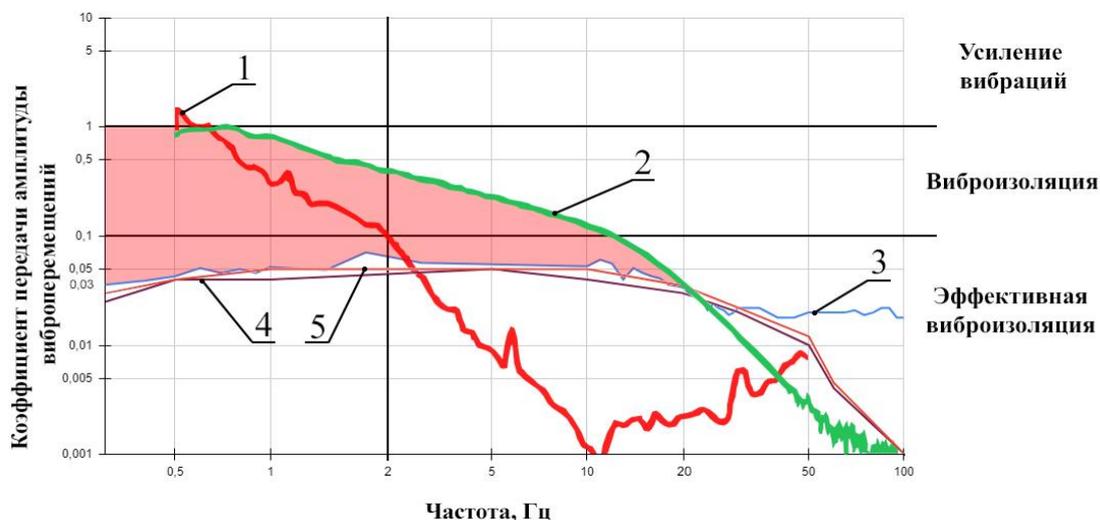


Рисунок 10. Графики зависимости КПАВ от частоты внешних возмущений для: 1 - активной пьезоэлектрической системы STACIS; 2 - платформы с электромагнитным силовым приводом DVIA-MB; 3 – платформы на основе МР-демпферов; 4, 5 – моделей САР, соответственно, трехкоординатного и однокоординатного активных МР-демпферов в Simulink MATLAB

**В Главе 4** представлена методики расчёта и проектирования основных элементов, входящих в состав многокоординатной виброизолирующей системы как объекта автоматического управления. К ним относятся: активные МР-демпферы и узлы упругой подвески с квазинулевой жесткостью. Приведена методика расчёта электромагнитной системы активного МР-демпфера в вертикальном и горизонтальном направлениях, методика расчета несущей способности узлов упругой подвески с квазинулевой жесткостью и их настройки на требуемую резонансную частоту. В результате выполнения работы решена актуальная задача повышения эффективности виброизоляции прецизионного технологического оборудования при экстремально низких частотах за счёт автоматизации управления платформой на основе активных МР-демпферов.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Сформулирован комплекс требований к системам активной виброизоляции, в том числе требование обеспечения КПАВ не более 0,1 на низких частотах, основанный на аналитическом обзоре современного прецизионного оборудования, средств защиты от вибрационных воздействий и методов их автоматизации.

2. Определение осевой жёсткости МР-эластомерного стакана при деформации под действием магнитного поля позволило найти передаточную функцию перемещаемого объекта САР активного МР-демпфера для моделирования его работы.

3. Разработанная математическая модель САР активного демпфера на основе МР-эластомерного стакана дала возможность определить алгоритмы управления, структуру и состав управляющей системы для обеспечения требуемых параметров активной виброизоляции на низких частотах, выбрать тип регулятора и его настроечные параметры, повысить устойчивость, быстродействие и точность системы.

4. Моделирование САР демпферов на основе МР-эластомерного стакана и МР-эластомерной мембраны в программной среде Simulink MATLAB позволило определить КПАВ, переходные процессы перемещения демпферов при воздействии гармонических вибрационных воздействий.

5. Сравнение результатов моделирования работы САР демпферов на основе МР-эластомерного стакана и МР-эластомерной мембраны при осевом перемещении показало сходные динамические характеристики. При этом разность уменьшения амплитуд колебаний, определяемого как  $20lg$  (КПАВ) для этих моделей, составляет не более 3,6 дБ для всего диапазона частот 0,3-100 Гц.

6. Экспериментально определенная амплитудно-частотная характеристика металлографического микроскопа ММР-1 показала, что его резонансные частоты находятся в диапазоне 10-18 Гц, а пиковое значение резонансной частоты составляет 13 Гц. Эти данные использованы для настройки упругой подвески с квазинулевой жесткостью, которую рекомендуется настраивать на вес защищаемого объекта и минимальную резонансную частоту.

7. Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика автоматически управляемой виброизолирующей платформы на основе активных МР-демпферов при частотах 0,3-100 Гц с коэффициентом передачи амплитуды виброперемещений не более 0,075 подтвердила результаты моделирования и достижение повышенной эффективности виброизоляции на экстремально низких частотах.

8. Разработанная методика расчёта и проектирования элементов платформы как объекта автоматического управления позволяет определить порядок её настройки на вес защищаемого объекта при помощи несущих пружин упругой подвески, минимальную резонансную частоту при помощи массовых корректоров, требуемый частотный диапазон за счет обеспечения необходимой магнитной индукции в рабочих зазорах МР-демпферов для достижения максимальной эффективности виброизоляции.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Михайлов В.П., Копылов А.А. Исследование виброизоляции металлографического микроскопа платформой активной виброизоляции с замкнутой автоматизированной системой управления // Перспективы науки. 2022. № 10. С. 54-60. (0,83 п.л./0,72 п.л.). Методика настройки замкнутой САР и экспериментальные исследования активного режима виброизоляции.

2. Михайлов В.П., Копылов А.А. Исследование платформы для активной виброизоляции с замкнутой автоматической системой управления // Перспективы науки. 2022. № 11. С. 50-53. (0,76 п.л./0,64 п.л.). Методика настройки замкнутой САР, результаты экспериментальных исследований автоматической системы управления.

3. Михайлов В.П., Копылов А.А. Платформа активной виброизоляции металлографического микроскопа ММР-1 с автоматизированной системой управления // Автоматизация в промышленности. 2022. № 11. С. 47-48. (0,23 п.л./0,17 п.л.). Амплитудно-частотные характеристики металлографического микроскопа ММР-1, результаты исследований активного режима виброизоляции металлографического микроскопа.

4. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования / А.А. Копылов [и др.]. // Нанотехнологии. Разработка. Применение. XXI век. 2017. № 4. - С. 44-48. (0,59 п.л./0,21 п.л.). Результаты экспериментальных исследований платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования, в которой используются активные демпферы на основе магнитореологических эластомеров.

5. Platform for active vibration isolation of the precision equipment based on magnetorheological elastomers / A.A. Kopylov [et al.]. // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2018. – P. 1992-1995. (0,48 п.л./0,17 п.л.). Особенности конструкции платформы для активной виброизоляции, результаты экспериментальных исследований активного магнитореологического демпфера.

6. Study of an active vibration isolation device for the nanopositioning based on magnetorheological elastomers / A.A. Kopylov [et al.]. // The 9th International Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon-2019), Иннополис, Москва, Россия. 2019. P. 25–28. (0,59 п.л./0,31 п.л.). Результаты исследования САР платформы активной виброизоляции.

7. Study of Influence of Control Signal on the Amplitude-Frequency Characteristic of the Active Damper Based on Magnetorheological Elastomers / A.A. Kopylov [et al.]. // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – P. 2212-2215. (0,54 п.л./0,23 п.л.). Описание платформы активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров, результаты исследования амплитудно-частотных характеристик активного демпфера.

8. The technology of printed circuit board microdrilling / A.A. Kopylov [et al.]. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 971. – №. 2. – P. 022060. (0,43 п.л./0,17 п.л.). Устройство и принцип действия высокоточного позиционирующего привода на основе МР-эластомера для выполнения глухих отверстий в многослойных печатных платах, результаты экспериментальных исследований привода с замкнутой системой управления в пошаговом режиме перемещения.

9. Активная виброизоляция высоковакуумного оборудования / А.А. Копылов [и др.]. // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № 6s. С. 16-22. (0,83 п.л./0,52 п.л.). Результаты экспериментальных исследований активного демпфера.

10. Михайлов В.П., Копылов А.А. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № 3-4. С. 232–238. (0,75 п.л./0,67 п.л.). Результаты экспериментальных исследований активного демпфера в низкочастотном диапазоне.

11. Михайлов В.П., Копылов А.А. Активная виброизоляция прецизионного высоковакуумного оборудования // 16-я международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва, 2022. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://vacuum.org.ru/proceedings/vactmt-2022/4186/> (дата обращения: 12.01.2023) (0,75 п.л./0,67 п.л.). Результаты экспериментальных исследований платформы активной виброизоляции в низкочастотном диапазоне.