

На правах рукописи  
УДК 62–83, 621.95.01

Тун Лин Аунг

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИОНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ МИКРОСВЕРЛЕНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,  
материалов и приборов электронной техники

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва 2021

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:

**Суминов Игорь Вячеславович**  
доктор технических наук, профессор,  
директор научно-исследовательского  
центра плазменно-электролитных  
технологий МГТУ «СТАНКИН»  
**Павлов Николай Иванович**  
кандидат технических наук, главный  
технолог акционерного общества «Навис-  
Электроника»

Ведущая организация:

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)» (МАИ,  
Московский авиационный институт)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в 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 Д 212.141.18  
к.т.н., доцент



Мешков С.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Микроминиатюризация изделий радиоэлектронной техники и использование интегральных схем с высокой степенью интеграции приводят к усложнению конструкции устройств коммутации. Эта тенденция выражается в увеличении количества слоев многослойных печатных плат (МПП), что, в свою очередь, требует увеличения количества межслойных соединений, размер которых также закономерно уменьшается. Поскольку основным технологическим способом формирования межсоединений МПП является создание металлизированных отверстий, актуальной задачей является обеспечение высокой точности глубины глухих отверстий. Изучением этой проблемы занимались многие российские и зарубежные ученые, в том числе, В.Л. Заковоротный, К.Ф. Кумбз мл., А.М. Медведев, С.В. Новокрещенов, М.В. Одинодворцев, Ю.Б. Цветков и др., которые предлагали различные способы повышения точности межслойных соединений. Однако в совокупности они сводятся к действиям по изменению условий процесса сверления, например, применению новых материалов накладок, использованию высокоскоростных шпинделей с минимальной величиной радиального биения инструмента. Общим ограничением, присущим данным мерам обеспечения точности является отсутствие возможности влияния на величину суммарной погрешности, вследствие деформаций режущего инструмента в процессе обработки непосредственно материала платы, а также за счет влияния других составляющих. Для решения задачи обеспечения высокой точности глубины глухих отверстий предлагается использование дополнительных высокоточных исполнительных механизмов с точностью позиционирования в субмикронном диапазоне. В процессе производства МПП минимальный требуемый диаметр переходных отверстий составляет величину 50 мкм. На сегодняшний день близкие к оптимальным условия сверления могут быть реализованы при сверлении в стеклотекстолитах типа FR-4 отверстий диаметра 150 мкм и более. Однако при уменьшении толщины МПП возникает необходимость доведения диаметра отверстий до минимального уровня. При сверлении отверстий многослойных печатных плат возникает ошибка по вертикали по глубине отверстия. Для микросверления глухих отверстий диаметром от 50 мкм и более необходимо обеспечить допуск на глубину отверстия не более  $\pm 5$  мкм, а погрешность позиционирования инструмента по вертикальной оси не более  $\pm 0.5$  мкм. Типовая погрешность позиционирования привода современных станков при перемещении по вертикальной оси составляет  $\pm 10$  мкм, поэтому задача обеспечения точности позиционирования инструмента в субмикронном диапазоне на операции микросверления отверстий при изготовлении МПП является чрезвычайно актуальной.

**Объектом исследования** является технологическое оборудование для микросверления глухих отверстий при производстве многослойных печатных плат с точностью позиционирования в субмикронном диапазоне.

**Предметом исследования** являются технологические режимы вертикального позиционирования инструмента при микросверлении глухих отверстий в многослойных печатных платах.

### **Целью диссертационной работы**

Целью настоящей работы является разработка и исследование позиционирующей и виброизолирующей системы на основе магнитореологических эластомеров для оборудования микросверления многослойных печатных плат и обеспечение точности позиционирования инструмента по вертикальной оси в субмикронном диапазоне.

### **Основные задачи исследования**

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка экспериментального образца позиционирующей системы на основе магнитореологических (МР) эластомеров.
2. Разработка физико-механической и математической моделей привода позиционирующей системы, исследование магнитных, вязкоупругих и пластичных свойств МР эластомера.
3. Разработка методики проведения экспериментов, подготовка стенда и проведение экспериментальных исследований позиционирующей системы с системой управления, обработка экспериментальных данных.

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

1. Впервые исследованы вязкоупругие и пластичные свойства МР эластомеров с различной объемной концентрацией частиц, влияющие на основные параметры позиционирующей системы: погрешность позиционирования, быстродействие, эффективность виброизоляции, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.
2. Разработанная физико-механическая модель поведения МР эластомера позволяет определить методы регулирования точности и динамики процесса деформации мембраны из МР эластомера при позиционировании, а также методы повышения эффективности поглощения энергии колебаний.
3. Разработанная математическая модель однокоординатного привода на основе МР эластомера позволяет определить структуру, алгоритмы, корректирующие устройства и настроечные параметры процесса управления.
4. Разработанная методика позволяет рассчитывать и выбирать элементы позиционирующей системы на основе МР эластомера, а также структуру, алгоритмы и параметры управления с целью обеспечения заданной погрешности позиционирования, максимального быстродействия и эффективности поглощения энергии колебаний.

### **Практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. Разработаны рекомендации по расчёту и выбору геометрических, электромагнитных и силовых параметров позиционирующей системы на основе МР эластомеров для настройки на массу объекта, требуемый частотный диапазон и обеспечения максимальной эффективности позиционирования и виброизоляции.

2. Разработано техническое предложение на уровне конструкторской документации к изготовлению прототипа позиционирующей системы на основе МР эластомеров.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты исследований влияния вязкоупругих и пластичных свойств МР эластомеров с различной объемной концентрацией частиц на основные параметры позиционирующей системы: погрешность позиционирования, быстродействие, эффективность виброизоляции, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

2. Физико-механическая модель поведения МР эластомера, позволяющая определить методы регулирования точности и динамики процесса деформации мембраны из МР эластомера при позиционировании, а также методы повышения эффективности поглощения энергии колебаний.

3. Математическая модель однокоординатного привода на основе МР эластомера, позволяющая определить структуру, алгоритмы, корректирующие устройства и настроечные параметры процесса управления позиционированием.

4. Методика, позволяющая рассчитывать и выбирать элементы позиционирующей системы на основе МР эластомера, а также структуру, алгоритмы и параметры управления с целью обеспечения заданной погрешности позиционирования, максимального быстродействия и эффективности поглощения энергии колебаний.

#### **Методы исследования**

Исследования основаны на теории реологических процессов в эластомерах при действии магнитных и сдвиговых полей, теории упругости, теории колебаний, теории автоматического регулирования, методах моделирования динамических систем, методах статистической обработки результатов. Экспериментальные исследования проводились на специально созданных стендах в лаборатории кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**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.

#### **Реализация результатов работы**

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».

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы в учебном процессе кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана. Методика расчета элементов привода на основе МР эластомера и параметров управления внедрены в учебный процесс кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках учебной дисциплины «Системы автоматического управления технологическим оборудованием».

### **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 научно-технической конференции «INTERMATIC-2017» (Москва, 2017), на 60-ой всероссийской научной конференции МФТИ (Долгопрудный, 2017), на международной конференции IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering «EIconRus-2018» (Москва, 2018), на международной конференции «The 9th International Scientific Conference on Physics and Control «PhysCon-2019» (Иннополис, 2019)», 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).

Положенные в основу диссертации разработки удостоены следующих наград: Лауреат конкурсной программы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2017»; Победитель 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ; Диплом I степени в номинации «Наноинженерия» XII Всероссийской молодежной научно-инженерной выставки «ПОЛИТЕХНИКА», посвящённой 170-летию со дня рождения Н.Е. Жуковского.

### **Публикации**

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

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора позиционирующих и виброзащитных систем; выявлении требований к позиционированию и виброизоляции при микросверлении глухих отверстий многослойных печатных плат. Разработана физико-механическая модель поведения МР эластомера, математическая модель привода на основе МР эластомера. Проведены экспериментальные исследования привода на основе МР

эластомера, обработаны результаты экспериментов. Разработана методика расчета и проектирования элементов привода и позиционирующей системы.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка литературы (82 наименования). Изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок и 2 таблицы.

## **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 обеспечением высокой точности глубины глухих отверстий при микросверлении МПП. Для этого необходимо использование дополнительных высокоточных исполнительных механизмов с точностью позиционирования в субмикронном диапазоне.

**В Главе 1** представлены результаты анализа текущего состояния, тенденций и перспектив развития микросверления применительно к задаче получения микроразмерных переходных отверстий МПП. Показано, что на сегодняшний день микросверление является единственным технологическим методом, позволяющим решать задачи как глубокого (отношение глубины отверстия к диаметру более 10) микроразмерного сверления отверстий диаметра от 50 мкм, так и формирования отверстий диаметра 10 мкм и более на одной и той же технологической установке.

В связи с микроминиатюризацией изделий радиоэлектронной техники и использованием интегральных схем с высокой степенью интеграции конструкции устройств коммутации усложняются. Данная тенденция выражается в увеличении количества слоев МПП, что, в свою очередь, требует увеличения количества межслойных соединений, размер которых так же закономерно уменьшается. Поскольку основным технологическим способом формирования межсоединений МПП является создание металлизированных, либо заполненных металлом отверстий, актуальной задачей является обеспечение высокой точности глубины глухих отверстий. Для этого необходимо использование дополнительных высокоточных исполнительных механизмов с точностью позиционирования в субмикронном диапазоне.

Наиболее распространенным на сегодняшний день способом формирования микроразмерных переходных отверстий является микросверление. Одной из важнейших технологических проблем микросверления является сложность обеспечения требуемой точности глухих отверстий при изготовлении МПП, в особенности микроразмерных, что обусловлено целым рядом причин, в том числе ошибкой по вертикали по глубине отверстия в процессе сверления. В существующих работах российских и зарубежных инженеров и ученых, в том числе, В.Л. Заковоротного, К.Ф. Кумбза мл., А.М. Медведева, С.В. Новокрещенова, М.В. Одинодворцева, Ю.Б. Цветкова и др. по данной проблеме предлагаются различные способы повышения

точности сверления микроразмерных отверстий. Однако в совокупности они сводятся к действиям по изменению условий процесса сверления, например, применению новых материалов накладок, использованию высокоскоростных шпинделей с минимальной величиной радиального биения инструмента. Общим ограничением, присущим данным мерам обеспечения точности является отсутствие возможности влияния на величину суммарной погрешности, вследствие деформаций режущего инструмента в процессе обработки непосредственно материала платы, а также за счет влияния других составляющих.

Таким образом, своевременной и актуальной задачей является обеспечение высокой точности на операции микросверления отверстий при изготовлении многослойных печатных плат. На основании проведённых литературных исследований были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**В Главе 2** представлена позиционирующая система на основе МР эластомеров для микросверления глухих отверстий печатных плат. Дана математическая модель привода на основе МР эластомеров.

При микросверлении глухих отверстий диаметром от 50 мкм и более необходимо обеспечить оптимальное заглубление сверла, при котором сверло слегка просверливает медную фольгу между слоями стеклотекстолита. При этом допуск на глубину отверстия составляет не более  $\pm 5$  мкм, а погрешность позиционирования инструмента по оси Z не более  $\pm 0.5$  мкм. Схема получения глухого отверстия в МПП при оптимальном заглублении сверла показана на Рисунке 1.

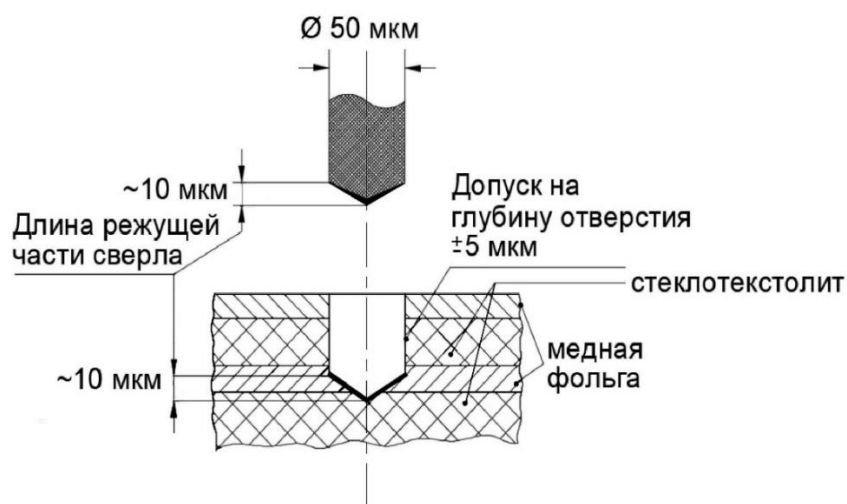


Рисунок 1. Схема получения глухого отверстия в МПП при оптимальном заглублении сверла

Для обеспечения высокой точности глубины глухих отверстий необходимо использование дополнительных высокоточных исполнительных механизмов с точностью позиционирования в субмикронном диапазоне. При этом система предварительного перемещения инструмента подводит инструмент к образцу и используется для грубой обработки, а прецизионная система перемещения заготовки используется для точной финишной обработки.



Примером оборудования с таким способом повышения точности обработки, когда используется дополнительная высокоточная позиционирующая система, служит гравировально-фрезерный станок CAM 1020 Active Pro фирмы VHF (Германия) с погрешностью обработки до 10 мкм (Рисунок 2). Точность позиционирования предварительной ступени перемещения достигает по осям X и Y  $\pm 50$  мкм, по оси Z  $\pm 10$  мкм. Максимальная скорость хода по X, Y: 180 мм/с.

Магнитореологические (МР) эластомеры являются перспективными материалами для использования в качестве активных элементов позиционирующих и виброизолирующих механизмов для повышения качества технологических процессов. На основе МР эластомеров разработана и исследована позиционирующая система для микросверления глухих отверстий печатных плат.

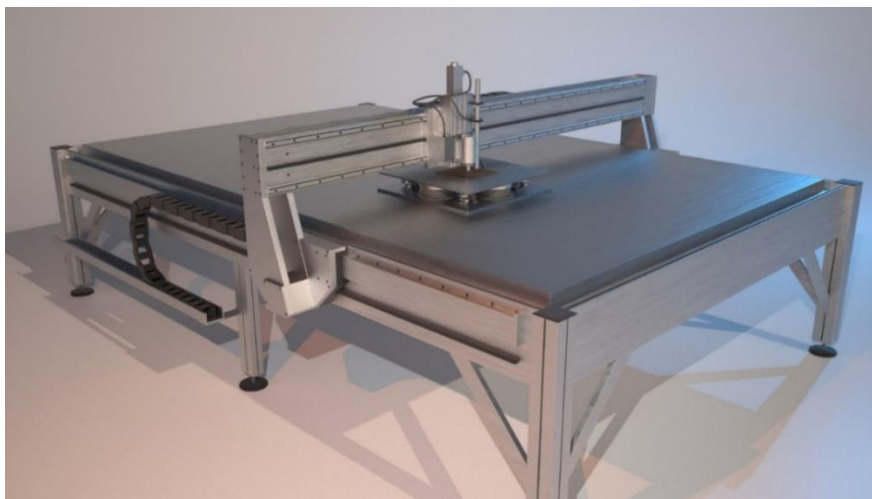


Рисунок 2. Гравировально-фрезерный станок CAM 1020 Active Pro фирмы VHF (Германия) с установленной позиционирующей системой

Позиционирующая система представляет собой две плиты, между которыми располагаются четыре узла упругой подвески с массовыми корректорами и четыре привода на основе магнитореологического (МР) эластомера. Общий вид позиционирующей системы на основе МР эластомера показан на Рисунке 3 (верхняя плита не показана).

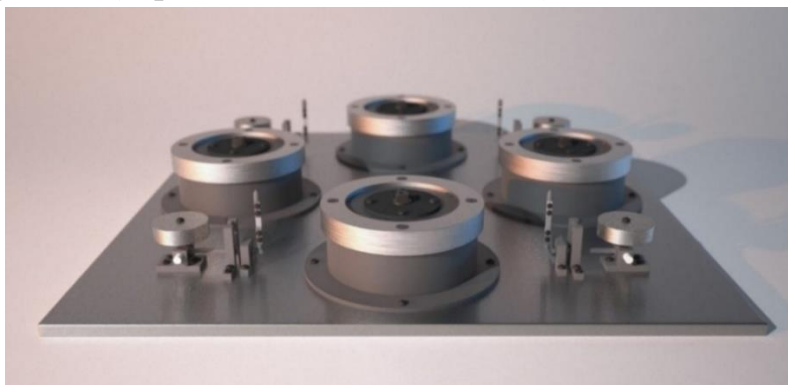


Рисунок 3. Общий вид позиционирующей системы на основе МР эластомера.  
(верхняя плита не показана)

Привод (Рисунок 4, а) позиционирующей системы содержит мембрану 1 из МР эластомера с подвижным жестким центром 2, корпус 3, электромагнитную катушку 4, сердечник 5, основание 6. Сердечник образует с жестким центром

воздушный зазор. Привод работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку в электромагнитной системе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране формируется радиальное магнитное поле с индукцией, которая имеет максимум вблизи жесткого центра. Под действием магнитной индукции мембрана 1 с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора. МР эластомер представляет собой матрицу из силиконового каучука, в которой распределены частицы карбонильного железа сферической формы с размерами частиц от 1 до 10 мкм (Рисунок 4, б). МР эластомеры при действии магнитного поля могут обратимо деформироваться и менять вязкоупругие и пластичные свойства. Эта способность МР эластомеров позволяет улучшить демпфирование позиционирующей системы и повысить точность перемещения. Таким образом привод выполняет также функцию привода.

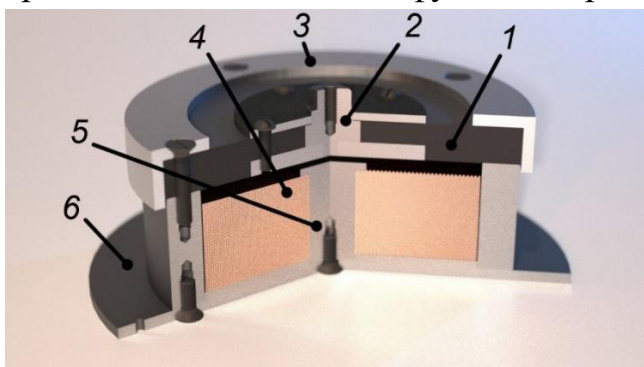


Рисунок 4. (а) Привод позиционирующей системы на основе МР-эластомера

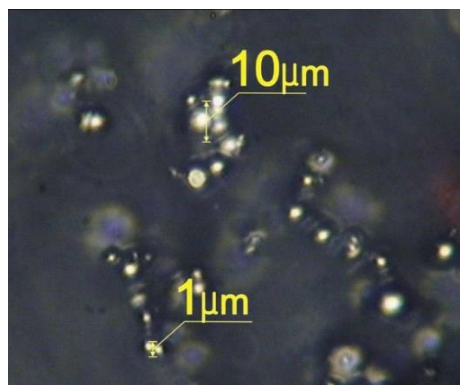


Рисунок 4. (б) Фотография МР-эластомера на основе карбонильного железа

Разработана физико-механическая модель поведения МР-эластомера при сдвиговой деформации. На мембрану из МР-эластомера действует внешнее магнитное поле с индукцией  $B$  (Рисунок 5). Под действием внешней силы  $F$  нижняя стенка зазора смещается относительно верхней на величину  $X$ , при этом сдвиг равен  $\gamma = \frac{X}{h}$ .

Сила магнитного сцепления  $F_N$  между соседними слоями частиц дисперсной фазы определяется по формуле Максвелла как  $F_N = 9.81 \cdot 10^{12} \cdot \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot S_{\text{сл}} \cdot \varphi_V$ , или как  $F_N = K \cdot B^2 \cdot S_{\text{сл}} \cdot \varphi_V$ , где  $\varphi_V$  – коэффициент объемной концентрации частиц;  $S_{\text{сл}}$  – площадь сечения рабочего зазора, перпендикулярная магнитному потоку.

При сдвиге слоев МР-эластомера возникает касательная сила сопротивления  $F_{\tau 1}$ , обусловленная магнитным сцеплением между соседними слоями и равная  $F_{\tau 1} = F_N \cdot \tan \alpha = K \cdot B^2 \cdot S_{\text{сл}} \cdot \varphi_V \cdot \frac{X}{h}$ . Кроме того, возникает упругая касательная сила  $F_{\tau 2} = G S_{\text{сл}} \frac{X}{h}$ , где  $G$  – модуль сдвига эластомера.

Коэффициент жесткости упругой мембраны МРЭ равен:

$$k = \frac{S_{\text{сл}}}{h} (K B^2 \varphi_v + G) = \frac{S_{\text{сл}}}{h} (9,81 \cdot 10^{12} \cdot (B/5000)^2 \varphi_v + G)$$

Использование МР-эффекта позволяет за счет изменения величины магнитной индукции  $B$  регулировать коэффициент жесткости  $k$  упругой мембраны и, соответственно, точностные и частотные характеристики привода и позиционирующей системы.

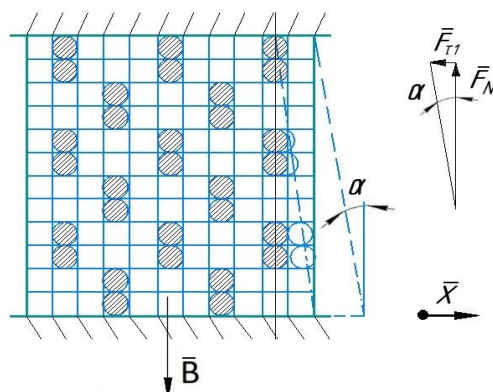


Рисунок 5. Схема сдвиговой деформации мембраны из МР эластомера

Разработана математическая модель привода на основе МР эластомеров. Экспериментально-аналитически определена передаточная функция мембраны с жестким центром. Экспериментально исследованы зависимости перемещения жесткого центра от индукции магнитного поля в зазоре между жестким центром и сердечником. По результатам измерений был построен график зависимости осевой магнитной силы от магнитной индукции (Рисунок 6).

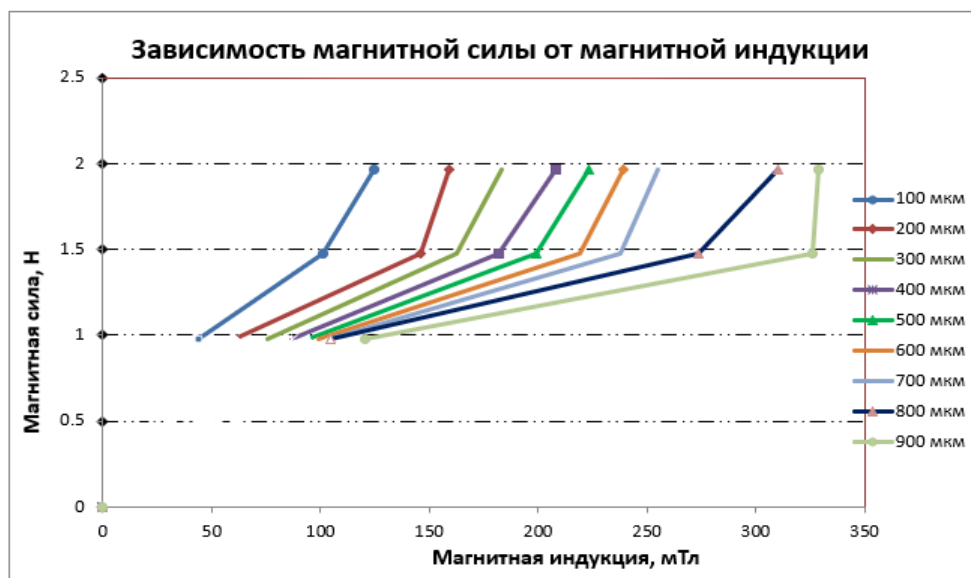


Рисунок 6. График зависимости осевой магнитной силы от магнитной индукции

Моделирование работы привода позволило выполнить анализ и синтез системы автоматического регулирования (САР) и определить параметры качества и точности. В процессе моделирования в программной среде Simulink MATLAB была проанализирована реакция системы при одновременном воздействии синусоидальных вибраций и ступенчатом управляющем сигнале с пошаговым перемещением привода на 5 мкм.

Структурная схема САР привода приведена на Рисунке 7. На ней показаны передаточные функции следующих элементов: электромагнитной катушки, магнитопровода, мембраны из МР эластомера, подвижного жесткого центра и

датчика положения привода. В математической модели также учтена нелинейность зависимости перемещения привода от управляющего напряжения, которая определяется зоной нечувствительности привода. Эта нелинейность определяется интервалом напряжений ( $-U$ ;  $+U$ ) или тока, при котором привод остается неподвижным. Структурная схема содержит также элементы для наблюдения сигналов, задатчик входного управляющего ступенчатого сигнала, задатчик синусоидальных вибраций и элементы сравнения сигналов.

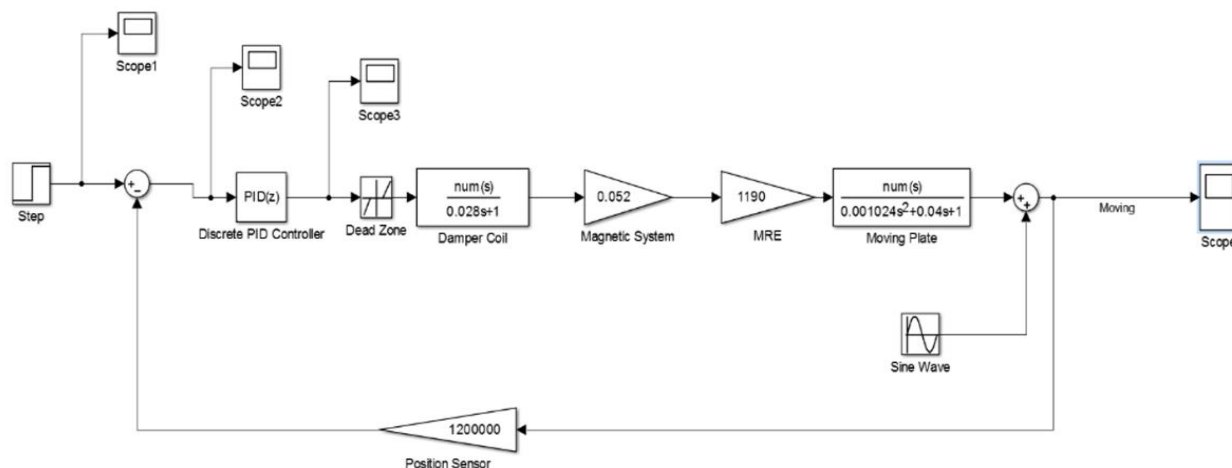


Рисунок 7. Структурная схема САР привода при синусоидальном вибрационном воздействии и ступенчатом управляющем сигнале

Для обеспечения параметров качества был использован пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор, который был встроен последовательно со звеньями САР привода после сумматора сигналов. Амплитудно-частотный анализ системы с ПИД-регулятором показал (Рисунок 8), что система является устойчивой и обеспечивает требуемую погрешность позиционирования не более 0,5 мкм и постоянную времени не более  $T_{\Pi}=0,22$  с.

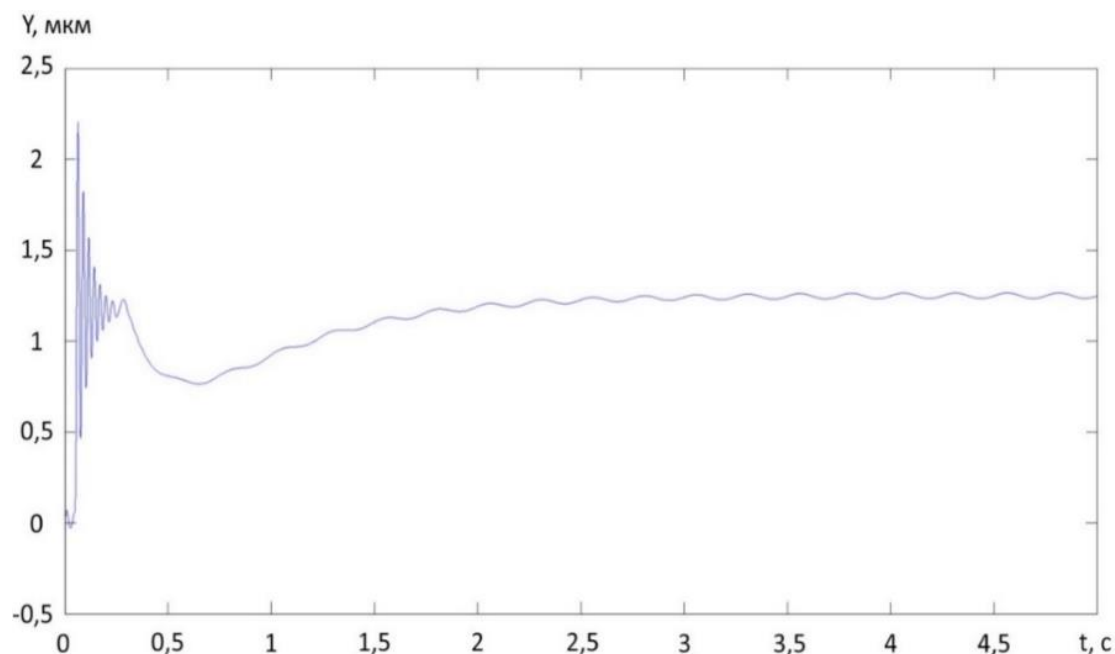


Рисунок 8. Переходный процесс САР привода при синусоидальном вибрационном воздействии и пошаговом перемещении

**В Главе 3** приведены экспериментальные исследования привода на основе МР эластомеров, позволяющие определить его параметры: ток трогания, время переходного процесса и коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

Были определены токи трогания для МР эластомера в приводе, т.е. такие минимальные значения управляющего тока в катушке, при котором в эластомере наблюдается заметное перемещение. Знание значения тока трогания важно при настройке позиционирующей системы для работы в активном режиме. Кроме того, в процессе измерения можно проанализировать, как ведёт себя конкретный эластомер при увеличении тока в катушке и, соответственно, магнитного поля, действующего на эластомер. Это важно, поскольку при изготовлении эластомеров есть некоторая погрешность, из-за которой каждый эластомер имеет жёсткость, отличную от предыдущей, и поэтому его поведение в магнитном поле также будет отличаться.

Для оценки значения тока трогания используется критерий Фишера, или F-критерий:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \sum_{i=1}^n x_i \\ f &= n - 1 \\ S^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{f} \\ D &= \sqrt{S^2}\end{aligned}$$

где  $D$  – разброс значений,  $f$  – количество степеней свободы соответствующей выборки,  $S^2$  – дисперсии соответствующей выборки,  $n$  – количество элементов выборки,  $x_i$  – элемент выборки,  $\bar{x}$  – среднее значение элементов выборки.

Оценка разброса значений при фоне позволяет определить начальную точку измерений, а также фоновый шум, обуславливающий разброс значений. Если разность среднего значения, измеренного при заданном токе, и среднего значения фона больше разброса при фоне, то это означает, что эластомер деформировался и начал перемещаться, следовательно, это значение соответствует току трогания.

Ток трогания определяет зону нечувствительности, а, следовательно, погрешность позиционирования привода. Зависимость перемещения привода от управляющего тока представлена на Рисунке 9, где сплошная кривая соответствует экспериментальным данным, вертикальные отрезки – доверительным интервалам, а пунктирная кривая – аппроксимации. Ток трогания привода, определяющий важнейшие параметры: зону нечувствительности и погрешность позиционирования привода, составляет величину 0,05 А.

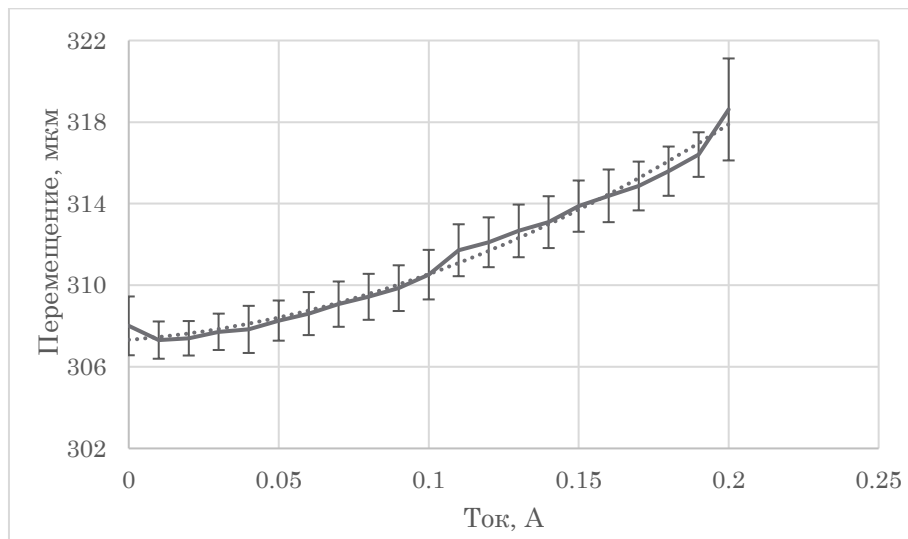


Рисунок 9. Зависимость перемещения привода от управляющего тока

С целью оценки параметров качества переходных процессов разработана САР с возможностью изменения величины заданного перемещения и коэффициента передачи регулятора.

Для перемещения привода с замкнутой системой управления разработан алгоритм управления в среде LabVIEW, который реализует алгоритм управления по закону интегрального регулятора (I-controller). В ходе экспериментального исследования было измерено положение жесткого центра мембраны привода в зависимости от времени. По итогам измерений определялись параметры переходных процессов: время переходного процесса, величина перерегулирования. В результате проведенных экспериментов были построены графики переходных процессов для различных значений коэффициента передачи регулятора системы управления (Рисунок 10). Из представленных графиков видно, что с увеличением коэффициента передачи регулятора, колебательность и величина перерегулирования повышаются при сохранении практически неизменного времени переходного процесса.

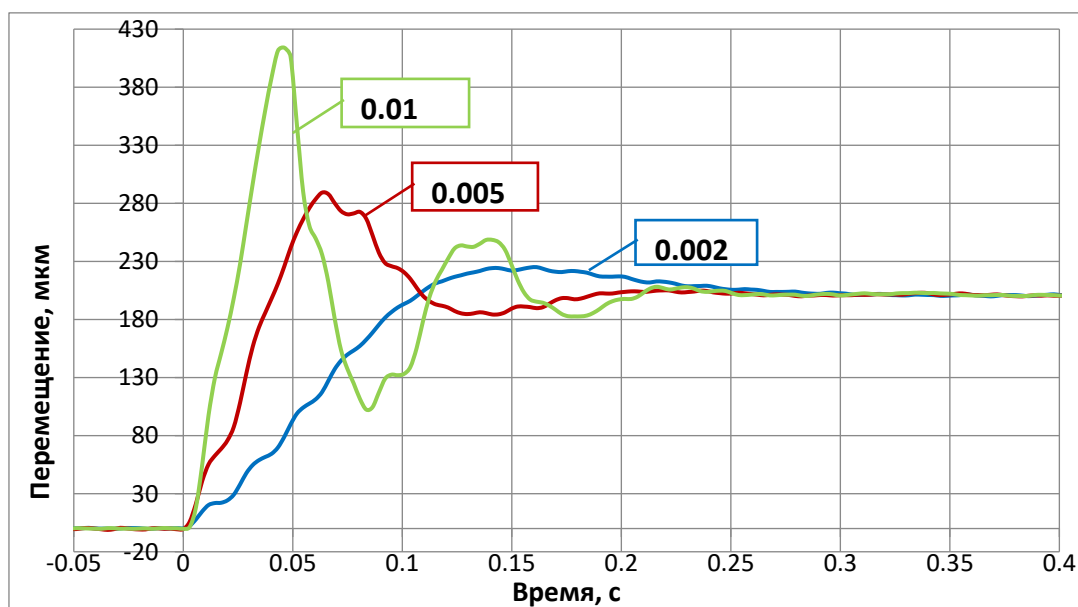


Рисунок 10. Графики переходных процессов при перемещении на 200 мкм



Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) показывает какой процент колебаний передаётся при вибрациях с основания привода на верхний фланец. Этот параметр важен для оценки эффективности работы позиционирующей системы, т.е. для оценки его демпфирующих свойств:

$$\text{КПАВ} = \frac{A_1}{A_0}$$

где  $A_1$  – амплитуда на верхнем фланце,  $A_0$  – амплитуда на основании.

Для исследования работы привода при резонансе были проведены измерения амплитуд виброперемещений привода и основания на разных частотах при нулевом управляющем токе. На основе полученных данных построен график зависимости КПАВ от частоты вибраций, создаваемых генератором сигналов в диапазоне от 10 до 200 Гц с шагом 5 Гц (Рисунок 11).

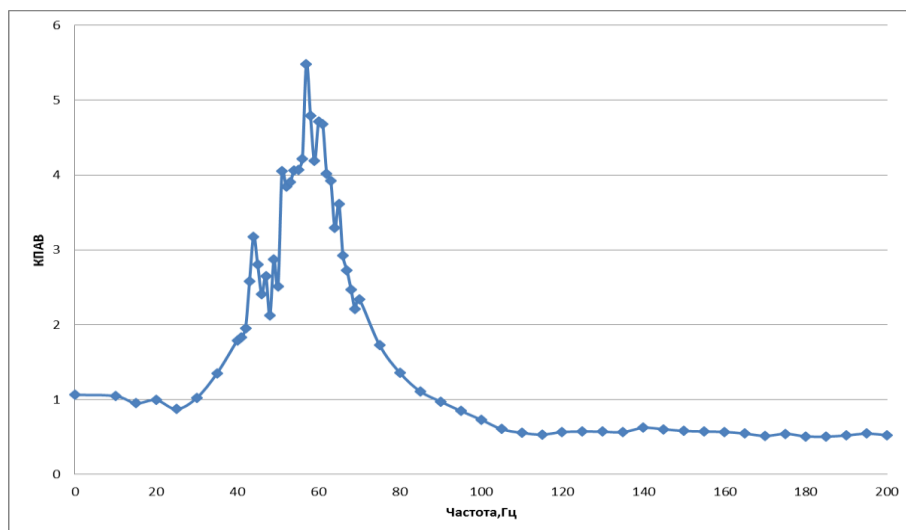


Рисунок 11. Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений привода от частоты колебаний при нулевом управляющем токе

Следующим этапом исследования стало выявление эффективности снижения КПАВ при резонансной частоте привода за счёт подачи управляющего сигнала на привод в диапазоне от 0 до 1,2 А с шагом 0,05 А. На основе полученных данных построен график зависимости КПАВ от величины управляющего тока (Рисунок 12). Из графика на Рисунке 12 видно, что эффективное снижение коэффициента передачи амплитуды виброперемещений привода более, чем в пять раз, происходит при подаче управляющего тока 1 А.

Дальнейшее уменьшение коэффициента передачи достигается за счет полностью замкнутого управления приводом. Для этого было проведено динамическое моделирование работы привода. Была разработана структурная схема системы автоматического регулирования привода для режима активной виброизоляции в низкочастотном диапазоне при одновременном воздействии синусоидальных вибраций и ступенчатом управляющем сигнале при пошаговом перемещении привода на 5 мкм. Параметры воздействия: амплитуда колебаний основания привода 5 мкм, частота колебаний 4 Гц. В структурной схеме для обеспечения устойчивости и уменьшения времени переходных процессов

использован ПИД регулятор. Был получен переходный процесс САР привода. Время переходного процесса для погрешности позиционирования 0,25 мкм составляет 0,6 с. Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений привода при этом составляет 0,02, что удовлетворяет требования к системам активной виброизоляции.

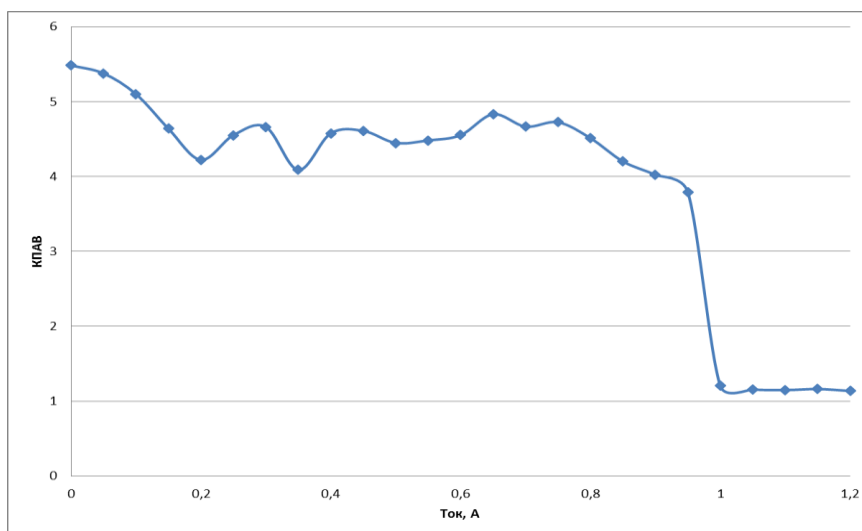


Рисунок 12. Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений привода при резонансной частоте колебаний от управляющего тока

В Главе 4 разработана методика расчета элементов позиционирующей системы на основе МР эластомеров для точных перемещений и активной виброизоляции. Разработана методика расчета магнитной системы, составлена программа в среде Mathcad, которая позволяет быстро проводить расчет по задаваемым параметрам. Определены конструктивные параметры МР эластомера, а также значения управляющего тока (0...1 А) на катушке и тяговое усилие привода (10 Н).

Узлы упругой подвески с квазинулевой жесткостью позиционирующей системы представляют собой горизонтальный маятник с регулируемой несущей пружиной и массовым корректором. Масса маятника — эквивалент одной четверти массы виброизолируемого объекта. Узлы упругой подвески позволяют настраивать позиционирующую систему на требуемую массу объекта с помощью регулируемой несущей пружины и резонансную частоту посредством массового корректора.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Аналитический обзор современного технологического и исследовательского прецизионного оборудования позволил сформулировать совокупность требований к точности и быстродействию систем позиционирования для проведения микросверления глухих отверстий МПП. Установлено, что необходимо решение задачи повышения точности позиционирования рабочих органов технологического оборудования в субмикронном диапазоне и обеспечения активной виброизоляции при низких частотах до 200 Гц.



2. Исследованы вязкоупругие и пластичные свойства МР эластомеров с различной объемной концентрацией частиц, влияющие на основные параметры позиционирующей системы: погрешность позиционирования, быстродействие, эффективность виброизоляции, коэффициент передачи амплитуды виброперемещений.

3. Разработана физико-механическая модель поведения МР эластомера, которая позволяет определить методы регулирования точности и динамики процесса деформации мембраны из МР эластомера при позиционировании, а также методы повышения эффективности поглощения энергии колебаний.

4. Разработаны математические модели привода для различных начальных условий. Исследовалось влияние входного ступенчатого сигнала и возмущающих вибрационных сигналов различной формы: синусоидальной, прямоугольной, случайной. При амплитуде синусоидальных колебаний 5 мкм и частоте колебаний 4 Гц время переходного процесса при пошаговом перемещении для погрешности позиционирования 0,25 мкм составляет 0,6 с. Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений привода равен 0,02.

5. Разработаны методы управления точностными, динамическими и амплитудно-частотными характеристиками привода. Для обеспечения устойчивости и уменьшения времени переходных процессов использован ПИД регулятор, параметры которого подбираются в программной среде MATLAB в зависимости от действующих начальных условий. Для определения методов управления приводом были найдены резонансные частоты, для чего были проведены измерения амплитуд виброперемещений объекта и основания на разных частотах при нулевом управляющем токе.

6. Способом снижения коэффициента передачи амплитуды виброперемещений при резонансных частотах является подача управляющего сигнала на привод. Показано, что эффективное снижение коэффициента передачи амплитуды виброперемещений привода в 5,5 раз происходит при подаче управляющего тока 1 А.

7. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что для привода необходимо проводить предварительное тестирование для определения резонансных частот, индивидуальных амплитудно-частотных характеристик и диапазонов управляющих сигналов для использования полученных данных в процессе управления позиционирующей системой.

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

1. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования / Тун Лин Аунг [и др.] // Журнал Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2017. № 4. С. 44–48. (0,38 п. л. / 0,27 п. л.)

2. Инженерная методика расчета и экспериментальные исследования платформы для активной виброзащиты / Тун Лин Аунг [и др.] // Журнал «Труды МФТИ», Том 10, № 1(37), 2018, – С. 92–96. (0,33 п. л. / 0,21 п. л.)

3. V.P. Mikhailov, Tun Lin Aung, A.A. Kopylov, D.K. Tovmachenko. Platform for active vibration isolation of the precision equipment based on magnetorheological

elastomers // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018, pp. 1992–1995. (0,47 п. л. / 0,28 п. л.)

4. Tun Lin Aung, Valeriy Mikhailov, Alexey Bazinenkov, Alexey Kopylov, Dmitry Tovmachenko. Study of Influence of Control Signal on the Amplitude-Frequency Characteristic of the Active Damper Based on Magnetorheological Elastomers // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020. pp. 2212–2215. (0,5 п. л. / 0,39 п. л.)

5. Mikhailov Valeriy Pavlovich, Tun Lin Aung, Kazakov Alexandr Viktorovich. New Technology of Printed Circuit Board Microdrilling // NT: International Conference on New Technologies, Development and Applications (NT2020), LNNS 128, 2020, pp. 250–255. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_28) (0,69 п. л. / 0,34 п. л.)

6. V.P. Mikhailov, Tun Lin Aung, A.V. Kazakov and A.A. Kopylov. The technology of printed circuit board microdrilling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 022060 doi:10.1088/1757- 899X/971/2/022060 (0,51 п. л. / 0,25 п. л.)

7. Исследование платформы для активной виброизоляции прецизионного вакуумного оборудования / Тун Лин Аунг [и др.] // Восьмая Российская студенческая научно-техническая конференция "Вакуумная техника и технология": материалы конференции (20-23 апреля 2015 г.); М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, -2015. - С 142-143. (0,21 п. л. / 0,11 п. л.)

8. Платформа для активной виброизоляции прецизионного оборудования / Тун Лин Аунг [и др.] // 7-ая Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология. Список докладов», 2015. С. 150–151. (0,24 п. л. / 0,1 п. л.)

9. Исследование платформы для активной виброизоляции вакуумного оборудования / Тун Лин Аунг [и др.] // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIV Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА, 2017. С. 117–121. (0,51 п. л. / 0,21 п. л.)

10. Исследование платформы для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования / Тун Лин Аунг [и др.] // Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2017», 2017. С. 654–657. (0,41 п. л. / 0,20 п. л.)

11. Tun Lin Aung, Valeriy Mikhailov, Alexey Bazinenkov, Alexander Kazakov, Alexey Kopylov, Dmitry Tovmachenko. Study of an active vibration isolation device for the nanopositioning based on magnetorheological elastomers // The 9th International Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon-2019), Иннополис, Москва, Россия. 2019. pp. 25–28. (0,50 п. л. / 0,20 п. л.)