

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки 27.04.04 Управление в технических системах
Кафедра систем управления и мехатроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Проектирование мехатронных систем микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами

УДК 621.865.8-529:681.586.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Петухов Олег Николаевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Извеков Владимир Николаевич	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения
P2	Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств.
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
 Направление подготовки 27.04.04 Управление в технических системах
 Кафедра систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой СУМ
 _____ Губин В.Е.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ5Б	Баранову Николаю Александровичу

Тема работы:

Проектирование мехатронных систем микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	От 28.02.17 г. № 1398/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2017 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является система микроперемещений с пьезоэлектрическим приводом. Привод микроперемещений на основе пьезокерамического актюатора должен удовлетворять заданным динамическим требованиям и быть оптимальным с точки зрения простоты реализации и стоимости.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 Изучение существующих приводов микроперемещений; 2 Обоснование приоритетности выбора пьезокерамического преобразователя в качестве силовой части; 3 Расчет динамических характеристик пьезокерамического преобразователя; 4 Разработка механизма преобразования виброперемещений; 5 Моделирование работы системы в пакете MatLAB Simulink; 6 Моделирование разработанного модуля в САПР; 7 Поиск методов улучшения частотных характеристик объекта; 8 Реализация и расчет предложенного метода увеличения рабочей частоты; 9 Разработка функциональной схемы нового привода.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов Олег Николаевич
Социальная ответственность	Извеков Владимир Николаевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.01.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 120 страница, 43 рисунка, 25 таблиц, 1 приложение.

Ключевые слова: система микроперемещений, пьезоэлектрический привод, пьезокерамика, привод микроперемещений, пьезопреобразователи, система управления микроперемещениями, преобразование вибродвижений, сапр autodesk inventor professional, пьезокерамические пакеты, 3d-моделирование.

Объектом разработки данной работы является система микроперемещений с пьезоэлектрическим приводом на основе пьезокерамического пакетного преобразователя.

Цель работы – разработка удовлетворяющего заданным динамическим требованиям модуля микроперемещений на основе пьезокерамического актюатора, оптимального с точки зрения простоты реализации и стоимости.

В процессе работы были изучены основные принципы построения приводов микроперемещений на основе преобразователей напряжения различной физической природы. Была обоснована приоритетность выбора пьезокерамического преобразователя энергии, в качестве исполнительного элемента проектируемого привода. Также был произведен расчет динамических характеристик данного преобразователя, разработана и рассчитана система преобразования виброперемещений в поступательные однонаправленные. На основании проведенных расчетов была создана модель привода в пакете MatLAB Simulink, которая позволила исследовать работу системы, определить зависимость вход-выходных параметров. Также была смоделирована работа системы в САПР Autodesk Inventor Professional. Произведена модернизация разработанного модуля с целью увеличения рабочей частоты.

В результате выполнения поставленных задач была создана функциональная схема пьезокерамического привода, пригодная для практической реализации, разработаны две трехмерные модели предложенных конструкций.

Примененный в работе механизм преобразования вибродвижений уникален с точки зрения простоты конструкции, энергетических затрат и не имеет аналогов в существующих промышленных миниатюрных двигателях.

Обозначения и сокращения

Аббревиатура	Краткая характеристика
СМП	система микроперемещений
БПП	биморфный пьезоэлектрический преобразователь
СПП	составной пьезоэлектрический преобразователь
ПКШ	пьезокерамическая шайба
ПКП	пьезокерамическая пластинка
АМР	автономный микроробот
МЭМС	микроэлектромеханическая система
ММС	микроманипуляционная система
ММ	микромеханический модуль
ПП	пьезоэлектрический преобразователь
САПР	система автоматизированного проектирования

Оглавление

Введение.....	11
1. Принципы построения приводов микроперемещений и используемые в них преобразователи энергии.....	13
2 Пьезокерамические преобразователи	19
2.1 Природа прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта	19
2.2 Пьезоэлектрические материалы	23
2.2.1. Пьезоэлектрические монокристаллы.	23
2.2.2 Пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика).	24
2.3 Принципы построения пьезокерамических преобразователей энергии	25
3 Проектирование системы микроперемещений на основе пьезокерамического пакетного преобразователя	28
3.1 Расчет пьезокерамического преобразователя пакетного типа	28
3.2 Подбор марки пьезокерамики.....	32
3.3 Разработка преобразователя движения.....	35
3.4 Функциональная схема устройства.....	39
3.5 Подбор и расчет элементов проектируемого модуля.....	41
3.5.1 Расчет параметров электромагнитов.....	41
3.5.2 Расчет быстродействия элементов и подбор рабочей частоты	43
3.6 Подбор транзисторов	45
3.7 Моделирование работы системы в пакете MatLab Simulink	45
3.8 Экспериментальное исследование динамических показателей	53
3.9 Моделирование модуля в САПР Autodesk Inventor Professional.....	56
4 Модернизация интегрирующего элемента	60
4.1 Функциональная схема устройства.....	61
4.2 Расчет дополнительных пьезокерамических элементов.....	62
4.3 Разработка 3D модели модернизированного модуля микроперемещений ...	66
4.4 Преимущества и недостатки технического решения	67
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	68

5.1 Организация и планирование работ	69
5.1.1 Поэтапное распределение НИР	69
5.1.2 Продолжительность этапов работ	71
5.1.3 Расчет накопления готовности проекта	73
5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	74
5.2.1 Расчет затрат на материалы.....	75
5.2.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	76
5.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	76
5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	77
5.2.5 Расчет затрат на социальный налог.....	77
5.2.6 Расчет амортизационных расходов	78
5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки	79
5.3 Оценка экономической эффективности проекта	79
5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР	80
6 Социальная ответственность	82
6.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	84
6.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследования.....	85
6.3 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов (техника безопасности и производственная санитария)	86
6.3.1 Микроклимат	86
6.3.2 Освещение.....	87
6.3.3 Расчет системы искусственного освещения на рабочем месте оператора в кабинете аудитории	89
6.3.4 Шум.....	93
6.3.5 Электромагнитные излучения.....	94
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	95

6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	95
6.4.2 Анализ причин, которые могут вызвать ЧС на производстве при внедрении объекта исследований.....	95
6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	97
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	99
Заключение	101
Список использованных источников	104
Приложение А	107

Введение

С давних времен электромеханическим системам отводилось центральное место, по уровню их развития определяли производственные возможности многих отраслей промышленности, успешность проведения различных научных исследований, боевые качества военной техники. В связи с этим, в период стремительного роста нано- и микротехнологий, необходимо целенаправленно решать вопросы создания и развития принципиально новых устройств микросистемной техники. Существует большой спектр различных задач, в котором необходимо обеспечить перемещения микрообъектов в микрометровым и нано метровом диапазонах с высокой точностью позиционирования. В первую очередь такие диапазоны характерны для систем микроперемещений (СМП) оптико механических устройств, микроманипуляторов для биологических исследований на уровне клетки, манипуляторов для сборки микроэлектродвигателей, микроклапанов, микроэлектронных схем и электромагнитных микрореле. Такие микроманипуляционные системы на базе традиционных электромеханических приводов наталкиваются на ряд технических трудностей. При создании микроперемещений и работе на сверхнизких скоростях электродвигатели постоянного и переменного тока работают в неустойчивых режимах, вследствие чего появляются нерегулярные колебания объекта позиционирования. Кроме того, отрицательное влияние оказывают нелинейности кинематических передач, избавиться от которых в данных условиях не представляется возможным. Даже в лучших шарико-винтовых передачах повторяемость позиции достигается с погрешностью от десятков долей до единиц микрометров. Большое влияние на точность микроперемещений оказывают тепловые и вибрационные возмущения, которые при больших диапазонах перемещений, как правило, не учитываются.

Таким образом, можно сделать вывод что, возросший спектр требований, в числе которых высокие точностные, динамические характеристики, а также максимальная компактность геометрических размеров

дали мощный толчок к развитию технологий с применением новых материалов, иных физических эффектов и конструктивных решений, что указывает на актуальность данного исследования.

Анализ литературных источников и существующих разработок показывает, что перспективными направлениями создания двигателей для нано- и микроперемещений являются – основанные на использовании пьезоэлектрического эффекта.

Целью данной работы является разработка оригинального, легко реализуемого привода, включающего в себя преобразователь энергии, способного реализовывать поступательное движение выходного звена амплитудой до 20 мм и усилием не менее 30Н. Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Изучение существующих приводов микроперемещений и преобразователей энергии, используемые в них;
2. Обоснование приоритетности выбора пьезокерамического преобразователя в качестве силовой части;
3. Расчет динамических характеристик пьезокерамического преобразователя;
4. Разработка механизма преобразования виброперемещений;
5. Разработка функциональной схемы привода;
6. Моделирование работы системы в пакете MatLAB Simulink;
7. Моделирование разработанного модуля в САПР Autodesk Inventor Professional;
8. Поиск методов улучшения частотных характеристик объекта;
9. Реализация и расчет предложенного метода увеличения рабочей частоты;
10. Разработка функциональной схемы нового привода;
11. Моделирование модернизированного модуля в САПР Autodesk Inventor Professional.

1. Принципы построения приводов микроперемещений и используемые в них преобразователи энергии

В зависимости от быстродействия, ходов и точности отработки движений рабочих органов микроманипуляционных систем, а также выходных звеньев приборных систем микроперемещений, применяют разные электромеханические преобразователи энергии, являющиеся приводными элементами систем.

СМП преобразующие энергию электромагнитного поля в механическую можно разделить на две группы:

- приводы прямого преобразования электроэнергии в механическую;
- приводы многоступенчатого преобразования электроэнергии в механическую: сначала например в тепловую или волновую энергию, а затем в механическую энергию.

Приводы прямого преобразования энергии широко применимы в микротехнических системах. К приводам прямого преобразования энергии относятся: (размещены согласно убывающему значению быстродействия).

- Электрогидродинамические приводы.
- Электроосмотические приводы;
- Электростатические приводы;
- Пьезоэлектрические и электрострикционные приводы;
- Магнестрикционные приводы;
- Электромагнитные приводы;
- Мини- и микроэлектродвигатели постоянного тока и шаговые вращательного и линейного типов;

Данные приводы имеют высокие показатели быстродействия.

Системы, совершающие преобразование электромагнитной энергии поля в механическую энергию (постоянная времени $\tau=10-50$ мс) обладают наихудшим быстродействием из представленных. Это обусловлено большой

массой ротора, а так же инерционностью индуктивной составляющей преобразователя [7].

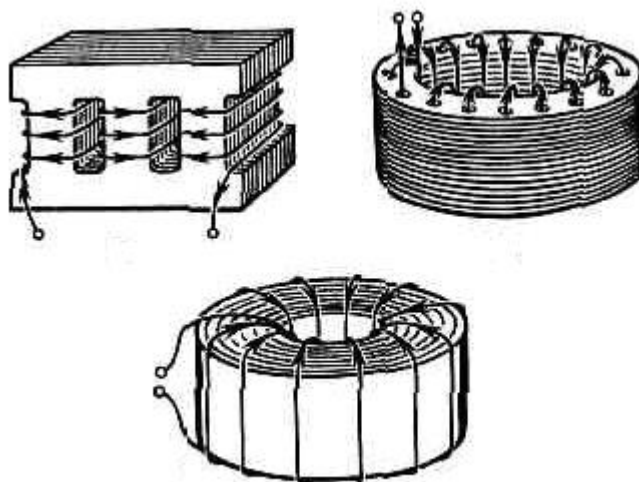


Рисунок 1 – Магнестрикционный преобразователь

Магнестрикционные преобразователи, представленные на рисунке 1, обладают лучшими показателями быстродействия, но им необходимо питание сравнительно большими токами (1 -5 А), из-за которых в микросистеме может возникнуть омический нагрев, что в большинстве случаев нежелательно. Электрострикционные и пьезоэлектрические преобразователи имеют наилучшее быстродействие: $\tau=1-20$ мс. На быстродействие влияет воздействие сравнительно большой электрической емкости соединенных параллельно электрострикционных или пьезо элементов. Токи в таких преобразователях на порядок ниже, чем у электромагнитных приводов, благодаря этому они не подвержены тепловым деформациям. Магнестрикционные преобразователи в разы опережают остальные типы приводов по своим силовым характеристикам. Существенным недостатком магнестрикционных преобразователей является наличие гистерезиса зависимости напряжение - перемещение. Столбик, состоящий из дисков пьезоэлектрика, может вызывать весьма большое усилие, но ход при этом мал.

Микроприводы электростатического типа обладают наилучшим быстродействием (рисунок 2): $\tau=10^{-2} - 10^{-1}$ мс, однако из рассматриваемых приводов, они имеют наихудшие силовые характеристики. Также

существенным недостатком таких приводов является нелинейная функция зависимости напряжение – перемещение. В самом элементарном исполнении электростатический привод имеет подвижный плоский электрод и неподвижный электрод. Усилие, развиваемое электростатическим приводом, обратно пропорционально квадрату расстояния (зазора) между электродами и пропорциональна квадрату приложенного напряжения.

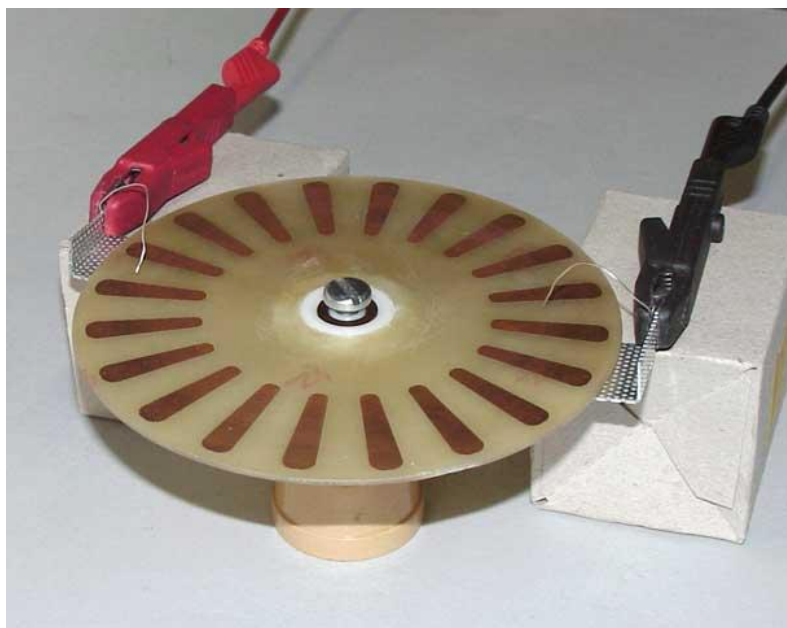


Рисунок 2 – Электростатический привод

Электрогидродинамические приводы основаны на электроосмотическом эффекте энергия электрического поля первоначально преобразуется в механическую энергию движущейся жидкости, а далее при помощи упругих микромембран или микросильфонов в перемещение выходного звена.

Электроосмос - эффект, заключающийся в движении жидкости через капилляры при наложении внешнего электрического поля. Под действием микронасоса жидкость перемещается по замкнутой гидравлической системе, раскручивая микротурбинку. Перемещение жидкости вызывается силой Кулона, наводимой благодаря разности потенциалов между 2-мя электродами микронасоса. [1]

Приводы, производящие многоступенчатое преобразование электроэнергии в механическую энергию, подразделяются на следующие типы:

- Микроприводы в которых энергия электрического тока преобразуется в тепловую энергию, а затем из тепловой энергии в механическую;
- Микроприводы с преобразованием электрической энергии в энергию электромагнитных волн, затем в тепловую энергию и после этого из тепловой энергии в механическую энергию.
 - Микроприводы на основе биметаллов.
 - Термолазерные приводы.
 - Микроприводы на основе металлов с памятью формы.
 - Микроприводы на основе фазового перехода.

Микроприводы созданные на основе биметаллов в большинстве случаев используются для изменения положения створки микроклапана. Биметаллические приводы обеспечивают сравнительно большую силу и перемещение. В основу построения таких приводов ложиться использование различных комбинаций двух металлических сплавов. Полученное давление возникает из-за разности коэффициентов теплового расширения сплавов и перепада температур. Из всего разнообразия комбинаций сплавов, на сегодняшний день наиболее перспективно применение кремниевой диафрагмы и слоя алюминия [3].

Миниатюрные приводы на основе сплавов, обладающих эффектом памяти формы, представлены на рисунке 3. Принцип работы таких приводов заключается в использовании спирали из особого сплава, которая при нагревании выше критической температуры возвращается в свое исходное положение.

Например, используя проволоку диаметром 0,5 мм, смотанную в спираль диаметром 3 мм, можно добиться перемещения поршня микроклапана на 1 мм при давлении около 0,2 МПа. Температуры в 50°C, необходимой для

перемещения поршня, добиваются путем использования спирали непосредственно в качестве электронагревателя. Для обеспечения приемлемого быстродействия ($r = 100 - 500$ мс), требуется ток около 1 А.

В таких приводах трудно добиться точного перемещения, вследствие этого, они применяются только с целью перемещения рабочего органа из одного фиксированного положения в другое.



Рисунок 3 – Эффект памяти формы

В термолазерном приводе происходит преобразование электрической энергии в энергию когерентного излучения, это является основным отличием от биметаллических и приводов с эффектом памяти формы. Преобразование тепловой энергии в механическую, происходит вследствие нагревания лучем поверхности металла. Основным преимуществом термолазерных приводов является отсутствие электрической цепи нагревателя [11].

Микроприводы на основе фазового перехода «жидкость-газ» также в большинстве случаев используют только для перемещения рабочего органа из одного крайнего положения в другое. Термопневматический привод на основе этого эффекта имеет подвижную диафрагму с герметичной камерой. За счет тока, идущего через сопротивление, помещённое внутрь камеры, жидкость в камере нагревается и переходит в газообразное состояние. Время включения зависит от мощности нагревателя и теплоёмкости, а время выключения (открытия) определяется теплопередачей в окружающую среду. Принцип действия термопневматического микроклапана показан на рисунке 4. Нагреватель выполнен вакуумным напылением резистивного слоя на

стеклянную подложку. При использовании фазового перехода жидкого хлорида метила, давление внутри камеры достигает 0,07 МПа за 5 мс при мощности нагревателя 200 мВт.

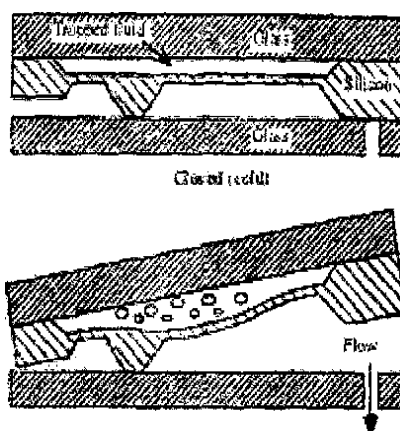


Рисунок 4 – Термопневматический привод

Таким образом, современный уровень техники дает большой спектр физических эффектов, применяемых в приводах СМП. Можно сделать следующие выводы:

- Наиболее универсальными и часто встречаемыми приводами являются электромеханические и электромагнитные приводы. Далее по распространенности следуют пьезоэлектрические и электростатические. Остальные типы рассмотренных приводов в настоящее время являются объектами исследований;

- Наилучшим быстродействием обладают электростатические приводы;

- Наилучшими силовыми характеристиками обладают пьезоэлектрические и магнитострикционные приводы (работающие на растяжение-сжатие);

- Наиболее перспективными в области точного позиционирования рабочих органов ММС являются электромеханические (микроэлектродвигатели), электромагнитные и пьезоэлектрические приводы.

2 Пьезокерамические преобразователи

Остановимся подробно на наиболее перспективном виде преобразователей движения – пьезоэлектрическом. Как было сказано ранее, пьезокерамические преобразователи имеют ряд неоспоримых преимуществ перед остальными приводами, такими как:

- Высокие удельные силовые характеристики;
- Малые значения электрических токов и потерь;
- Высокая надежность и технологичность изготовления;
- Радиационная и температурная стойкость.

Использование пьезопривода нано- и микроперемещений перспективно в точных электромеханических системах оборудования нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники, электронной микроскопии, астрономии и адаптивной оптики для позиционирования и совмещения. Совокупность этих достоинств определила выбор данного типа преобразователя энергии в качестве исполнительного элемента проектируемого привода.

2.1 Природа прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта

В 1880 году братьями Джексом и Пьером Кюри был открыт пьезоэлектрический эффект. Исследуя кристаллы кварца, ученые обнаружили, что при сжатии пластины с двух сторон появляется электрическая поляризация т.е на ее гранях перпендикулярных направлению сжатия возникают разноименные электрические заряды, причем степень поляризации оказалась пропорциональна величине приложенного воздействия. Немного позже Кюри обнаружил обратный эффект. Пластина кварца, помещенная в электрическое поле, сжималась и растягивалась с частотой соответствующей частоте смены знаков электрических зарядов [8].

Позже эти явления были названы прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Пьезоэлектрический эффект присущ только лишь определенным природным ионным кристаллам, таким как кварц и турмалин, сегнетова соль.

Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. В случае механического воздействия на такой кристалл происходит поляризация после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющих в каждой отдельной элементарной частице. Степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависимо, так как усилие сжатия или растяжения генерируют электрические поля, а, следовательно, и напряжение, противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

Пьезоэлектрический эффект объясняется следующим образом. В кристаллической решетке вследствие несовпадения центров положительных и отрицательных ионов имеется объемный электрический заряд. В отсутствие внешнего электрического поля эта поляризация не проявляется, так как она компенсируется зарядами на поверхности. При деформации кристалла положительные и отрицательные ионы решетки смещаются друг относительно друга, и соответственно изменяется электрический момент кристалла, который вызывает появление потенциалов на поверхности. Именно это изменение электрического момента и проявляется в пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и от характера и направления сил относительно кристаллографических осей кристалла.

Пьезоэлектрический эффект в кварце показан на рисунке 5. Здесь схематически показаны проекции положительных ионов Si (заштрихованные кружки) и отрицательных ионов O (светлые кружки) в плоскости, перпендикулярной к оптической оси Z. Этот рисунок не соответствует фактической конфигурации ионов в элементарной ячейке кварца, в которой ионы не лежат в одной плоскости, а их число больше показанного. Тем не

менее, рисунок правильно отображает симметрию взаиморасположения ионов, что уже достаточно для качественного пояснения.

На рисунке 5, а показан недеформированный кристалл. На грани А, перпендикулярной к оси X_1 , существуют выступающие положительные заряды, а на параллельной ей грани В – выступающие отрицательные заряды. При сжатии вдоль оси X_1 (рисунок. 5, б) элементарная ячейка деформируется. При этом положительный ион 1 и отрицательный ион 2 «вдавливаются» внутрь ячейки, отчего выступающие заряды (положительный на плоскости А и отрицательный на плоскости В) уменьшаются, что эквивалентно появлению отрицательного заряда на плоскости А и положительного заряда на плоскости В. При растяжении вдоль оси X_1 имеет место обратное (рисунок 5, в): ионы 1 и 2 «выталкиваются» из ячейки. Поэтому на грани А возникает дополнительный положительный заряд, а на грани В – отрицательный заряд [4].

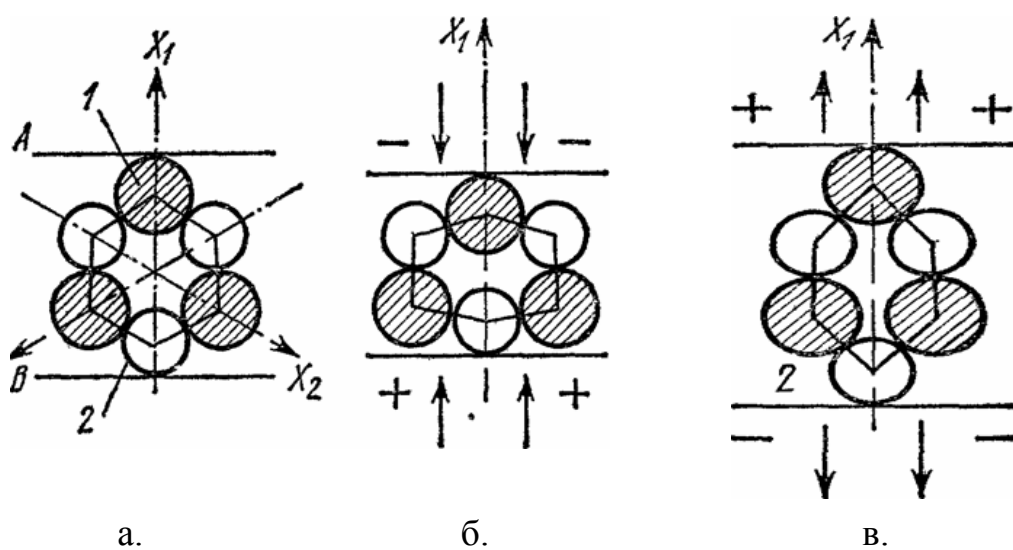


Рисунок 5 – Пьезоэлектрический эффект в кристалле; а – недеформированный кристалл; б – сжатие вдоль оси X_1 ; в – растяжение вдоль оси X_1 .

Наряду с пьезоэлектрическим эффектом существует и обратное ему явление: в пьезоэлектрических кристаллах возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями. Поэтому, если на металлические обкладки, укрепленные на кристалле, подать электрическое напряжение, то кристалл под действием поля поляризуется и деформируется.

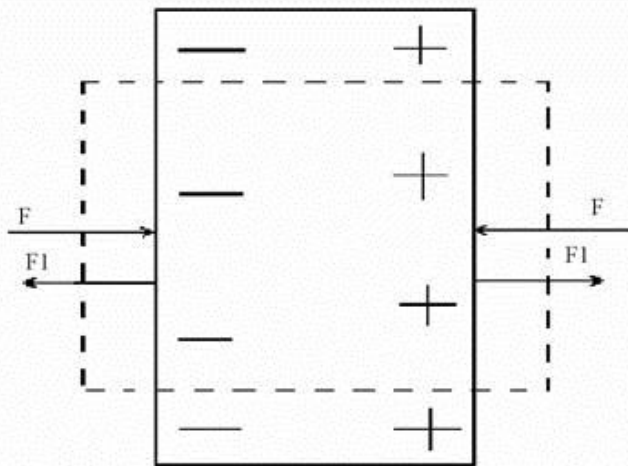


Рисунок 6 – Связь прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов

Существование обратного пьезоэффекта вытекает из закона сохранения энергии и факта существования прямого пьезоэффекта. Рассмотрим пьезоэлектрическую пластинку представленную на рисунке 6 и допустим, что она сжимается внешними силами F . Если бы пьезоэффекта не было, то работа внешних сил равнялась бы потенциальной энергии упруго деформированной пластинки. При наличии пьезоэффекта на пластинке появляются заряды и возникает электрическое поле, которое включает в себе дополнительную энергию. По закону сохранения энергии отсюда следует, что при сжатии пьезоэлектрической пластинки совершается большая работа, а значит, в ней возникают дополнительные силы $F1$, противодействующие сжатию. Это и есть силы обратного пьезоэффекта. Из приведенных рассуждений вытекает связь между знаками обоих эффектов. Если в обоих случаях знаки зарядов на гранях одинаковы, то знаки деформаций различны. Если при сжатии пластинки на гранях появляются заряды, указанные на рисунке 6, то при создании такой же поляризации внешним полем пластинка будет растягиваться [10].

Расчеты в теории твердого тела в согласии с опытами показывают, что пьезоэлектрический эффект возможен только в кристаллах, в которых элементарная ячейка не имеет центра симметрии. Расположение же ионов в ячейке кварца таково, что в нем центр симметрии отсутствует, и поэтому в нем возможен пьезоэлектрический эффект.

2.2 Пьезоэлектрические материалы

Одним из важных этапов проектирования является выбор пьезоэлектрического материала. Все материалы, обладающие пьезоэлектрическим эффектом анизотропны, их электрофизические и механические свойства различны по разным кристаллографическим направлениям кристалла. Пьезоэлектрические материалы характеризуют с помощью ряда безразмерных констант называемых коэффициентами связи, которые являются прямой мерой интенсивности электромеханического эффекта [11].

В настоящее время известно около 1500 кристаллических веществ, обладающих пьезоэффектом.

Наибольшее распространение получили кристаллы кварца, так как при наличии сильно выраженного пьезоэффекта кристалл в тоже время имеет очень высокую прочность и выделяется высокими изоляционными свойствами, практически не зависящими от температуры.

Кварц — минерал, безводная двуокись кремния, в зависимости от температуры его образования различают четыре кварца: р-кварц, обладающий пьезоэффектом. При нагревании до температуры 573°C (точка Кюри) структура Р-кварца переходит в структуру а-кварца, не обладающую пьезоэффектом. Два других вида кварца — тредимит и крис-табалит — также не обладают пьезоэффектом.

Пьезоэлектрические материалы условно можно разбить на пьезоэлектрические монокристаллы и пьезоэлектрическую керамику (пьезокерамику).

2.2.1. Пьезоэлектрические монокристаллы.

Пьезоэлектрические материалы, образовавшиеся в природе (Рисунок 7), имеют довольно высокую стоимость.



Рисунок 7 – Природный пьезоэлектрический кристалл

В связи с этим появилась необходимость в синтетических пьезоэлектрических монокристаллах (Рисунок 8), выращиваемых в специальных установках. Пьезоэлектрические свойства выращенных кристаллов с достаточно высокой повторяемостью можно задавать путем композиции входящих в него компонентов.



Рисунок 8 – Природный пьезоэлектрический кристалл

Выращиваемые кристаллы определенным образом режутся на пластины, некоторые из которых (сегнетоэлектрики) поляризуются, далее с помощью шлифования и нанесения электродов из кристаллов изготавливаются пьезоэлектрические элементы.

2.2.2 Пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика).

Проектируемый привод строится на основе пьезокерамических элементов, поэтому остановимся более подробно на их свойствах.

Пьезокерамические элементы изготавливаются методом экструзии горячего литья под давлением, полусухого прессования или изостатического прессования с последующим обжигом на воздухе при температуре 1000–1400 градусов по Цельсию. Далее на поверхность заготовок наносятся электроды.



Рисунок 9 – Пьезокерамические пластины

После этого керамику, помещают в сильное электрическое поле при температуре ниже точки Кюри, делают пьезоэлектрической с выбранным направлением поляризации. Окончательным процессом при изготовлении является термостабилизация и контроль параметров.

По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов) [37].

По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. С помощью изменения основного соотношения исходных материалов и введения добавок добиваются получения различных составов пьезокерамики, обладающих определенными пьезоэлектрическими и электрофизическими характеристиками. Самый распространённый пьезокерамический материал, типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС). В настоящее время активно ведутся разработки пьезокерамических материалов со свойствами, позволяющими использовать их вместо дорогостоящих пьезокерамических кристаллов.

2.3 Принципы построения пьезокерамических преобразователей энергии

Работа пьезокерамических двигателей основана на явлении обратного пьезоэффекта, при котором перемещения выходного звена происходит за счет деформации пьезокерамического элемента при приложении к нему внешнего электрического напряжения. Деформация исполнительного пьезоэлемента

пьезодвигателя соответствует его напряженному состоянию. Активными элементами (АЭ) пьезоэлектрических исполнительных устройств являются пьезоэлектрические электромеханические резонансные (частота электрических управляющих сигналов совпадает с частотой собственных механических колебаний пьезоэлектрического активного элемента) и нерезонансные АЭ. На основе резонансных электромеханических преобразователей разработаны вибродвигатели с упругим элементом, элементами передачи движения (при подключении напряжения в пьезоэлектрическом элементе возбуждаются колебания типа бегущей волны, сообщающие поверхности пьезоэлемента продольно-поперечные деформации, вызывающие радиальные колебания и движения); линейного перемещения; с фазовым управлением (при сдвиге фаз изменяется амплитуда колебаний и скорость вращения); с линейным регулированием скорости вращения (использование сегнетоэлектрических материалов с размытым фазовым переходом) [13].

На основе нерезонансных электромагнитных преобразователей разработаны монолитные устройства микроперемещений (используется поперечный пьезоэлектрический эффект для автоматического микропозиционирования в адаптивной оптике, растровых микроскопах); с крестообразным поперечным сечением (поперечный пьезоэффект приводит к продольной деформации, изгиб обеспечивает перемещение рабочего органа по трем координатам; управление в туннельных атомно-силовых микроскопах); трехкоординатные исполнительные устройства; многослойные двигатели с высокой частотой собственных колебаний [2].

Проанализировав литературу и патентные источники выпускаемых устройств можно прийти к выводу, что в большинстве случаев в качестве приводов микроперемещений используют следующие типы пьезокерамических преобразователей:

- Многослойные пакеты, работающие на сжатие-растяжение, собранные из пьезокерамических шайб или дисков

Такие приводы отличаются высокой жесткостью и силовыми характеристиками, которые ограничены лишь прочностными показателями пьезокерамики.

- Трубчатые пьезокерамические преобразователи, способные работать на сжатие-растяжение или изгиб;

В основе принципа работы лежит явление сужения внутреннего сечения полого пьезокерамического цилиндра. В основном применяются в сканирующих микроскопах и микронасосах. Трубчатые пьезокерамические преобразователи отличаются простотой и дешевизной. Однако при одинаковых продольных размерах с многослойными преобразователями их перемещения на порядок меньше. Жесткость таких преобразователей также ниже, чем у многослойных.

- Биморфные пьезокерамические преобразователи, собранные на основе склеенных пьезокерамических пластин, между которыми находится металлическая рессора, такие преобразователи работают на изгиб.

Характеризуется большими перемещениями, которые на 1-2 порядка выше перемещений, развиваемых приводами первого и второго типов, однако, жесткость и силовые характеристики их на 2-3 порядка хуже, чем у первого типа [21].

3 Проектирование системы микроперемещений на основе пьезокерамического пакетного преобразователя

3.1 Расчет пьезокерамического преобразователя пакетного типа

Основу проектируемого мехатронного модуля движения составляет пьезокерамический преобразователь движения (актюатор) пакетного типа, состоящий из набора пьезокерамических шайб, стянутых шпилькой, способный совершать продольные деформации растяжения и сжатия под действием подаваемого переменного напряжения высокой амплитуды. Выбор подобного типа исполнения преобразователя основан на:

- 1) Высоком значении развиваемого усилия в сравнении с актюаторами мембранного и биморфного типа.
- 2) Простоте конструкции и расчета.
- 3) Высоком КПД конструкции.
- 4) Возможности использования подобного типа преобразователя в высокотемпературных и агрессивных средах (в отличие от биморфных и мембранных аналогов, в нем не используются пластичные основания из алюминия, подверженные разрушению в агрессивных средах).
- 5) Низкой стоимости и доступности.

Основной недостаток подобного типа актюаторов – малое отклонение рабочей части. Данный недостаток может компенсироваться путем механизма, реализующего «накопление» перемещения торца на каждом цикле. Большие усилия, развиваемые преобразователем являются несомненным преимуществом перед биморфными аналогами. Рассчитаем максимальное перемещение торца при нулевой внешней нагрузке и развиваемую блокирующую силу при подаче напряжения на пьезопакет. Напряжение подается параллельно.

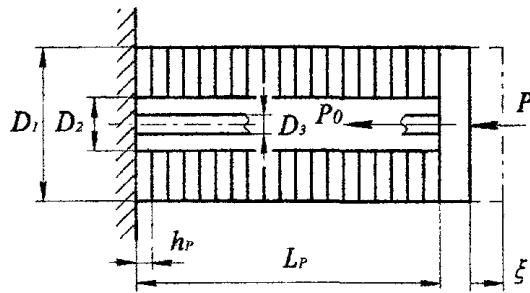


Рисунок 10 – Расчетная схема преобразователя

Предположим, что преобразователь состоит из n количества пьезокерамических шайб. Левый торец преобразователя неподвижно закреплен, а правый может совершать поступательные движения вдоль своей оси. Резьбовая шпилька, действует на пакет шайб с силой предварительной затяжки P_0 , необходимой для повышения жесткости привода и уменьшения гистерезиса. Также на пакет шайб действует сила полезного сопротивления внешней нагрузки P . При подаче напряжения U на электроды, толщина пьезокерамических шайб h_p увеличивается, или уменьшается в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Общее перемещение ξ торца пакета пьезошайб в n раз больше, чем изменение толщины одной пьезошайбы. [33].

Пусть толщина пьезошайбы во много раз меньше ее диаметра. Напряжение U подается на электроды, расположенные на плоских поверхностях пьезошайб, поэтому направление оси с номером 3 совпадает с осью пьезопакета. Очевидно, что и направление внешней силы P также совпадает с этой осью. Тогда в уравнениях обратного пьезоэффекта переменные $S_1, S_2, T_1, T_2, T_4, T_5, T_6, E_1, E_2 = 0$.

В этом частном случае уравнение обратного пьезоэффекта будет иметь вид

$$S_3 = T_3 s_{33}^E + d_{33} E_3 \quad (1)$$

где S_3 относительная деформация одной пьезошайбы в осевом направлении,

$T_3 \left[H / m^2 \right]$ – механическое напряжение в осевом направлении,

возникающее в шайбе, $s_{33}^E \left[m^2 / H \right]$ – податливость пьезокерамики – величина деформации возникающей под воздействием приложенного механического напряжения, (верхний индекс E говорит о том, что замеры происходят при постоянном электрическом поле (короткое замыкание), первая нижняя цифра показывает направление деформации, вторая направление механического напряжения),

d_{33} [Кл/Н]- пьезоэлектрический модуль пьезокерамики – отношение механической деформации к приложенному электрическому полю, при действии электрического напряжения в направлении деформации,

$$E_3 = \frac{U}{h_p}, \quad (2)$$

Где,

$E_3 \left[B / m \right]$ – напряженность электрического поля при действии напряжения U При предварительном затягивании резьбовой шпильки пакет пьезошайб сжимается, и правый торец перемещается влево на величину [34]

$$\xi_0 = -\frac{P_0 L_p}{\Omega_p Y_{33}}, \quad (3)$$

где $\Omega_p = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2)$, – площадь торцевой поверхности пьезошайбы,

Y_{33} – модуль упругости пьезокерамики при действии силы вдоль оси преобразователя. Для линейной модели пьезосреды усилие предварительной затяжки не имеет значения, поэтому при подаче напряжения уравнение статики для пьезошайбы будет иметь вид

$$T_3 \Omega_p = -P - T_M \Omega_M, \quad (4)$$

где $T_M \left[H / m^2 \right]$ –

дополнительное механическое напряжение в резьбовой шпильке,

появляющееся из-за деформации пьезошайбы, которая возникает при подаче

напряжения U , $\Omega_M = \frac{\pi}{4} D_3^2 [\text{м}^2]$ – площадь поперечного сечения тонкой цилиндрической части резьбовой шпильки (D_3 – диаметр цилиндрической части шпильки).

Закон Гука для резьбовой шпильки при подаче напряжения имеет вид

$$T_M = E_M S_M, \quad (5)$$

где $E_M [\text{Па}]$ – модуль упругости шпильки, S_M – деформация шпильки.

Выразим относительную деформацию шпильки через перемещение торца пьезокерамического преобразователя:

$$S_M = S_3 = \frac{\xi}{L_p}, \quad (6)$$

где $L_p [\text{м}]$ – общая длина пакета пьезошайб. Подставив выражения 2, 4, 5, 6 в уравнение обратного пьезоэффекта, получим

$$\xi = \frac{\frac{d_{33} U - s_{33}^E P}{h_p \Omega_p} L_p}{1 + s_{33}^E \frac{\Omega_M}{\Omega_p} E_M} \quad (7)$$

Выражение можно представить в виде

$$\xi = B_\xi \cdot U - C_\xi \cdot P \quad (8)$$

$$\text{где, } B_\xi = \frac{d_{33} L_p}{h_p (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_p})}, C_\xi = \frac{s_{33}^E L_p}{\Omega_p (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_p})}.$$

Очевидно, что перемещение торца преобразователя пропорционально подаваемому напряжению, к тому же увеличение внешней нагрузки и силы затяжки уменьшает перемещение рабочего торца. В частном случае, когда $\xi = 0 \text{ м}$, максимальная сила, которую может развить преобразователь, т.е. блокирующая сила, определяется по формуле

$$P_{\max} = \frac{d_{33} \Omega_P}{h_p s_{33}^E} U. \quad (9)$$

Так же можно вывести формулу для перемещения торца преобразователя при нулевой внешней нагрузке [5]:

$$\xi_{\max} = \frac{d_{33} L_P}{h_p (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_P})} U \quad (10)$$

Из практики известно, что напряжение ограничено не прочностью пьезокерамики, а допустимой напряженностью электрического поля $[E_3]$, при превышении которой может произойти деполяризация пьезокерамики:

$$U_{\max} \leq \frac{[E_3]}{h_p} \quad (11)$$

Для большинства пьезоматериалов напряженность электрического поля лежит в диапазоне 1,0 - 1,5 кВ/мм. Характеристика $\xi = f(U)$ линейна при рабочем напряжении до $0,3U_{\max}$, поэтому при толщине пьезоэлемента 1 мм напряжение обычно не превышает 300 - 500 В.

3.2 Подбор марки пьезокерамики

Подберем марку пьезокерамики. Наиболее распространенная в промышленности марка, выпускаемая серийно компанией «Элпа» - ЦТС-19, обладает высоким пьезоэлектрическим модулем d_{33} и низкой податливостью s_{33}^E . Как видно из формулы для перемещения торца преобразователя, это обеспечивает наибольшее перемещение при заданном значении напряжения по сравнению с другими марками, имеющими меньшее значение пьезокерамического модуля и большей значение податливости.

Пьезокерамика ЦТС-19 производится серийно и имеет несколько типов исполнения – биморфная балка, пластина и пакет пьезошайб. Нас интересует именно последний вариант, поэтому выбираем пакет ПП-11, состоящий из ста шайб, характеристики которых приведены в таблице 1. Внешний вид шайбы представлен на рисунке 11.

Таблица 1 – Параметры шайбы

Материал	Материал электрода	Масса, г	Геометрические размеры, мм		
			Ширина h	Внешний диаметр D	Внутренний диаметр d
ЦТС-19	Вж. Ср. 5-15	2,41	1,0	22,0	8,0

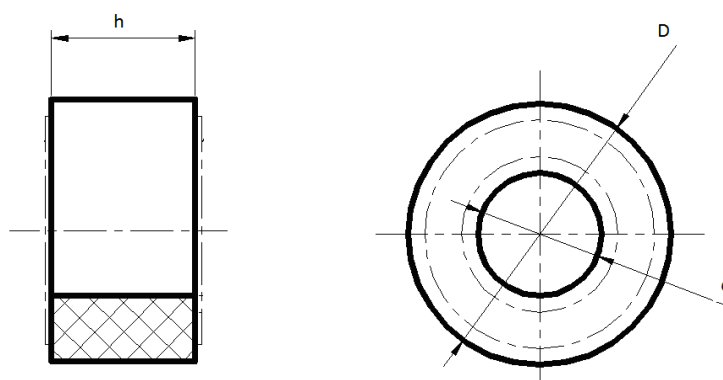


Рисунок 11 – Внешний вид шайбы

Ниже приведены характеристики материала ЦТС-19.

Таблица 2 – Характеристики ЦТС-19

Параметр	Символ	Размерность	ЦТС-19
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	1	1650
Быстродействие	t	мкс	0,5 – 5
Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле при : $E = 300 \text{ кВ} / \text{м}$	$\text{tg} \delta$	10^{-2}	-
Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле при : $E = 100 \text{ кВ} / \text{м}$	$\text{tg} \delta$	10^{-2}	-
Коэффициент электромеханической связи	K_p	1	0,56
	K_{31}	1	0,29
	K_{33}	1	0,64
Пьезоэлектрический модуль	$-d_{31}$	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}$	155
	d_{33}	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}$	360
	g_{31}	$10^{-3} \text{ м}^2 / \text{Кл}$	8,90
	g_{33}	$10^{-3} \text{ м}^2 / \text{Кл}$	22,30
Частотная постоянная	N_p	Гц	2,00
Скорость звука	V_E^1	$10^3 \text{ м} / \text{с}$	2,95

Параметр	Символ	Размерность	ЦТС-19
Упругая жесткость	S_{11}^E	$10^{-12} \text{ м}^2 / \text{Н}$	15,80
	S_{33}^E		16,80
Коэффициент Пуассона	σ	1	0,38
Предел механической прочности при статическом растяжении/сжатии, не менее	$\sigma_{\text{раст}}$	$10^6 \text{ Н} / \text{м}^2$	Не нормир.
	$\sigma_{\text{сжат}}$		294
Механическая добротность	Q_m	1	90
Точка Кюри	T_c	$^{\circ}\text{C}$	290
Плотность	ρ	$10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$	7,60

На основании выведенных формул рассчитаем перемещение торца преобразователя для нулевой внешней нагрузки и максимальном напряжении 500В.

Площадь торца поверхности шайбы:

$$\Omega_P = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) = \frac{3.14}{4} (484 - 64) \cdot 10^{-6} = 329.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения стягивающей металлической шпильки радиусом 1 мм:

$$\Omega_M = \frac{\pi}{4} D_3^2 = \frac{3.14}{4} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 3.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Общая длина пакета:

$$L_P = n \cdot h = 100 \cdot 10^{-3} = 10^{-1} \text{ м}.$$

Материал резьбовой шпильки – сталь, поэтому модуль Юнга $E_M = 210 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Таким образом, имея все данные, посчитаем максимальное удлинение пакета для нулевой нагрузки:

$$\xi_{\text{max}} = \frac{d_{33} L_P}{h_P \left(1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_P} \right)} U = 17.5 \text{ мкм}.$$

Далее определим максимальное блокирующее усилие, т.е. силу, развиваемую преобразователем при нулевом перемещении торца:

$$P_{\max} = \frac{d_{33} \Omega_P}{h_P s_{33}} U = 3532.5 \text{ Н.}$$

Расчеты подтвердили высокие силовые и динамические показатели марки ЦТС-19, что может гарантировать работу пакета с заданной нагрузкой на высоких частотах.

3.3 Разработка преобразователя движения

Как было отмечено выше, пьезокерамический преобразователь способен под действием подаваемого напряжения совершать продольные колебания, расширяясь и сужаясь попеременно. Однако, этого не достаточно для реализации посредством проектируемого механизма практических задач. Поэтому, перед нами встал вопрос о реализации постоянства направления движения выходного звена. В мехатронных модулях на основе биморфного актюатора эта задача решается очень просто: на преобразователе размещается элемент с высоким коэффициентом трения относительно выходного звена (как правило – металлического стержня), и, так как биморфный преобразователь совершает кроме поперечных деформаций еще и деформации кручения, то на каждой положительной полуволне управляющего напряжения данный элемент входит в тесный контакт с выходным звеном и увлекает его за собой. На отрицательной полуволне актюатор изгибается в обратную сторону, при этом не зацепляя выходное звено. В случае с пакетным преобразователем требуется другое техническое решение.

Таким образом, встает вопрос о разработке механизма, который бы мог связать выходное звено с подвижным торцом преобразователя на время его расширения и фиксировать стержень неподвижно на время сужения пьезопакета. Наиболее простым в плане реализации и дешевым решением является использование пары магнитов.

Рассмотрим более подробно данный алгоритм. В качестве устройства, фиксирующего выходной стержень на пьезоэлементе, был использован электромагнит М1 (расположенный на подвижном торце преобразователя),

срабатывающий на растяжении пакета и отключающийся на сжатии. Данный магнит создает усилие P_m , притягивающее выходной стержень к магниту. Это усилие обеспечивает необходимое трение, достаточное, чтобы зафиксировать стержень на расширяющемся пьезопакете.

Так как на выходное звено действует внешняя нагрузка, направленная в сторону, противоположную его перемещению, необходимо на тот промежуток времени, когда актюатор совершает деформацию сжатия, зафиксировать выходной стержень в неподвижном положении. Для этого используется магнит $M2$, закрепленный неподвижно в корпусе модуля, аналогичный расположенному на торце актюатора. Сила тяги магнита создает силу трения, которая позволяет избежать нежелательные перемещения выходного звена под действием внешней нагрузки.

Рисунок 12 наглядно демонстрирует принцип преобразования перемещений переменного направления в постоянное однонаправленное.

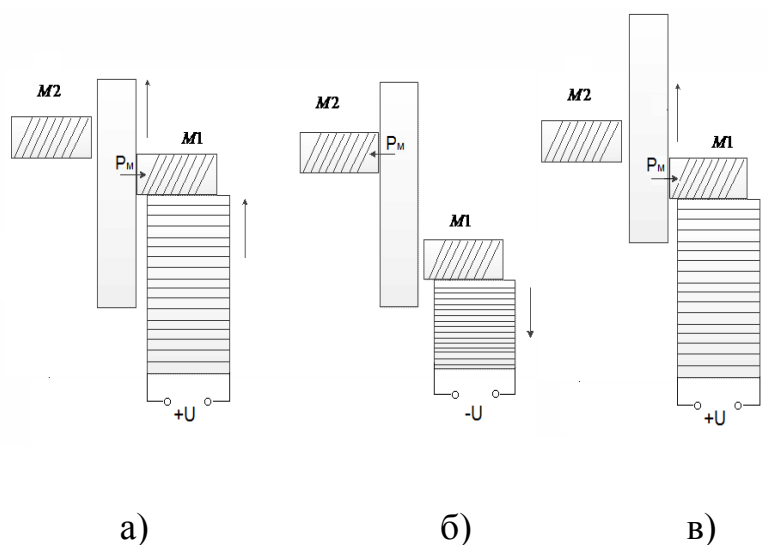


Рисунок 12 – Принцип преобразования перемещений переменного направления в постоянное однонаправленное (а – расширение пакета, б – сжатие пакета, второй цикл расширения пакета).

Очевидно, что оба магнита должны включаться попеременно. На рисунке 13 приведены график изменения амплитуды перемещения торца пьезопакета,

временные диаграммы работы магнитов, подвижного (M1) и неподвижного (M2), а также график перемещения выходного звена.

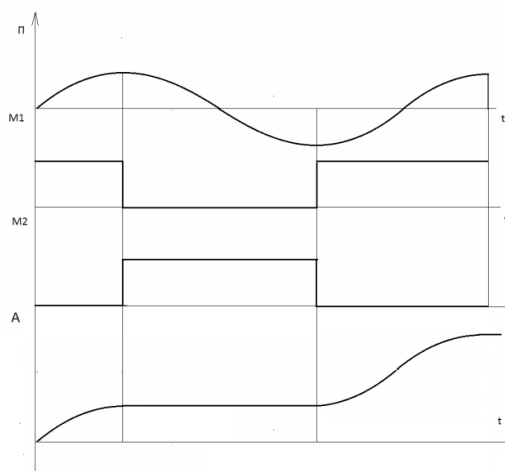


Рисунок 13 – График изменения амплитуды (Π) перемещения торца пьезопакета, временные диаграммы работы магнитов, подвижного (M1) и неподвижного (M2), график перемещения выходного звена (A)

Для минимизации потерь на трение выходной стержень устанавливается в корпус модуля через подшипник скольжения. Так как оба магнита и выходной стержень закреплены жестко и не могут совершать движения в направлении, перпендикулярном направлению деформации пьезопакета (при возникновении силы притяжения между магнитом и стержнем ни первый, ни второй не имеют хода), то для появления силы трения необходимо создать непосредственный постоянный контакт между ними. Для этого на выходное звено наносится слой эмали (рисунок 14) толщиной не более 0.01 мм, к которому и будут вплотную прилегать магниты.

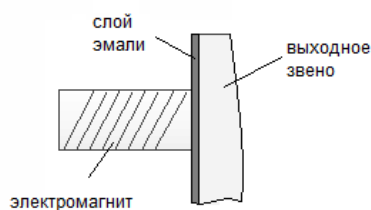


Рисунок 14 – Контакт магнита и выходного стержня через слой эмали

Так же, слой позволит уменьшить коэрцитивную силу, требуемую для полного размагничивания и отсутствия залипания магнита на стержне при отключении питания обмотки. Основной недостаток данного решения – механический контакт создает дополнительное трение между неработающим в данный момент магнитом и стержнем. Конечно, его значение гораздо меньше трения в состоянии, когда магнит включен и сила реакции опоры возрастает в разы.

Для обеспечения очередности включения магнитов целесообразно использовать комплиментарную пару транзисторов (р-n-p и n-p-n), управляемых одним источником напряжения. Цепь коллектора каждого из транзисторов соединена с соответствующим магнитом, питаемым от источника постоянного напряжения. Базы транзисторов подключены к источнику переменного напряжения, при этом один из транзисторов открывается на положительной полуволне (n-p-n), второй (р-n-p) – на отрицательной.

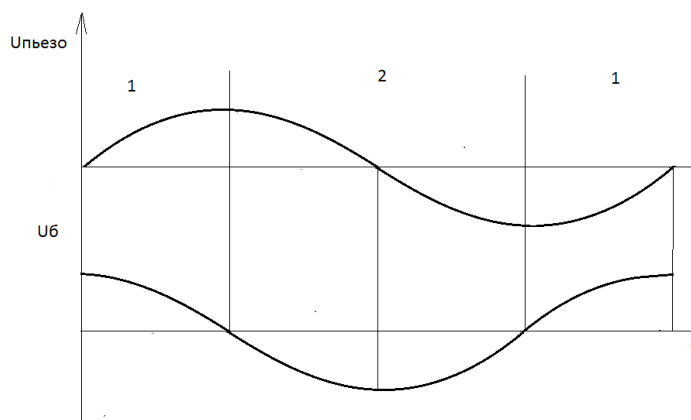


Рисунок 15 – График напряжения пьезопакета $U_{\text{пьеzo}}$ и управляющего напряжения базы транзисторов $U_{\text{б}}$

Важно заметить, что переменное напряжение, управляющее состоянием транзисторов, обязательно должно совпадать по частоте с напряжением, приложенным к пьезопакету, в противном случае произойдет рассогласование. Более того, оно должно быть сдвинуто по фазе на $\pi/2$ влево, так как переключение магнитов происходит на пике амплитуды напряжения, подаваемого на пьезокерамический актюатор. Рисунок 15 наглядно поясняет

данный факт. График разбит на 2 зоны, каждой из которых соответствует определенное состояние системы:

Зона №1: Пакет работает на расширение, напряжение базы положительно, открыт транзистор, замыкающий цепь подвижного магнита М1 – выходное звено перемещается.

Зона №2: Пакет сужается, напряжение базы отрицательно, открыт транзистор, замыкающий цепь неподвижного магнита М2 – выходное звено закреплено неподвижно.

3.4 Функциональная схема устройства

На рисунке 16 представлена функциональная схема устройства, на которой цифрами обозначены все основные узлы и компоненты системы:

- 1 – пьезокерамический пакет;
- 2 – подвижный магнит;
- 3 – выходное звено;
- 4 – неподвижный магнит;
- 5 – n-p-n транзистор;
- 6 – p-n-p транзистор;
- 7 – токоограничительный резистор цепи базы;
- 8 – токоограничительные резисторы цепей магнитов;
- 9 – корпус модуля;
- 10 – стягивающая шпилька.

Также на рисунке введены следующие обозначения:

$+E_{мп}$ – положительный полюс постоянного источника питания электромагнитов;

$U_{му}$ – переменное управляющее напряжение базы транзисторов;

$U_{пьеzo}$ – высоковольтный источник переменного напряжения, подаваемого на пьезопакет.

Важно отметить, что амплитуда перемещения торца преобразователя зависит от амплитуды подаваемого напряжения, откуда можем сделать вывод,

что скорость перемещения выходного стержня может задаваться двумя параметрами – частотой подаваемого напряжения и его амплитудой. Более того, амплитуда задает точность позиционирования, т.е. перемещение стержня за один цикл работы.

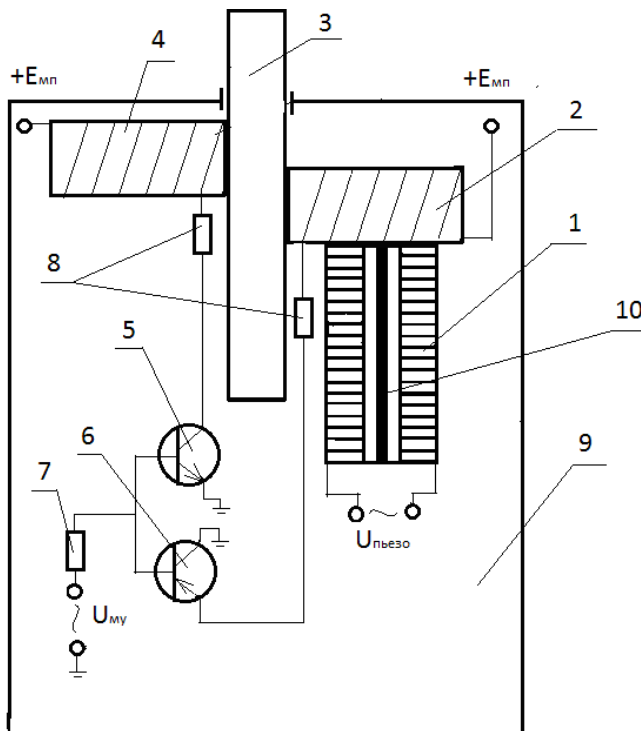


Рисунок 16 – Функциональная схема проектируемого привода

Исходя из этого, целесообразно говорить о том, что наиболее приемлемый вариант управления модулем – управление посредством микроконтроллера, который мог бы рассчитать требуемое время работы, величину шага (амплитуду подаваемого напряжения) и частоту питающего напряжения. Следует еще раз упомянуть тот факт, что частота напряжения питания базы обязательно должна совпадать с частотой напряжения, питающего пьезопакет, то есть они должны изменяться одновременно и на одинаковую величину.

3.5 Подбор и расчет элементов проектируемого модуля

3.5.1 Расчет параметров электромагнитов

Для того, чтобы фиксировать выходной стержень привода на подвижном конце пакета будем использовать электромагнит, срабатывающий на расширении пакета и отключающийся на сужении. Фиксацию выходного конца в неподвижном положении на сужении пьезопакета будет осуществлять второй такой же магнит, закрепленный в корпусе неподвижно.

Тяговая сила электромагнита рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{э}} = 4 \cdot 10^5 B_{\delta}^2 \cdot s_{\delta} \quad (12)$$

где B_{δ} [Тл] - магнитная индукция в зазоре, s_{δ} [м²]- площадь воздушного зазора, или в нашем случае – площадь сечения сердечника (диаметром обмотки пренебрегаем, т.к. он мал по сравнению с размерами сердечника).

В качестве материала сердечника должен использоваться магнитомягкий феррит, обладающим высоким быстродействием и малой коэрцитивной силой. В таблице 3 приведены характеристики различных марок магнитомягких ферритов. С учетом нагрузки примем тяговую силу равной 0.7 Н. Исходя из этого, подберем материал сердечника и площадь магнитного зазора.

Таблица 3 – Характеристика магнитомягких ферритов.

Материал сердечника – магнитомягкий термостабильный феррит 20ВН, максимальная индукция насыщения - 0.2 Тл. Приблизительное магнитное усилие – 0.7 Н, откуда найдем площадь сечения сердечника:

$$s_{\delta} = \frac{P_{\text{э}}}{4 \cdot 10^5 \cdot 0.2^2} = 0.44 \text{ см}^2$$

Тогда сторона квадрата сердечника равна 0.66см, откуда длина витка катушки $l_{cp} = 2.65$ см.

Определим число ампер-витков для обеспечения заданной индукции (магнитный зазор примем равным 0.01мм, что соответствует тонкому слою эмали, исключающему залипание магнита на якоре):

$$P_3 = (Iw)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{s_\delta}{\delta^2} = 4 \cdot 10^5 \cdot B_\delta^2 \cdot s_\delta, \quad (13)$$

Выразим из 13 величину Iw :

$$Iw = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \cdot B_\delta^2 \cdot \delta^2}{\pi \cdot 10^{-7}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0.2^2 \cdot 0.01^2}{\pi \cdot 10^{-7}}} = 1.6 \text{ А} \cdot \text{м}$$

Примем число витков $w=100$, тогда требуемый ток для обеспечения заданной индукции будет равен $I=0.016\text{А}$. Рассчитаем параметры обмотки:

1) Диаметр медного провода:

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_m \cdot l_{cp} \cdot (Iw)}{U_{num} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot 26.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1.6}{5 \cdot \pi}} = 0.014 \text{ мм},$$

где $\rho_m = 0.0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} / \text{м}$ - удельное сопротивление меди,

$l_{cp} = 26.5 \text{ мм}$ - средняя длина витка катушки, $U_{num} = 5 \text{ В}$ - напряжение питания. Получаем диаметр медного провода $d_m = 0.014 \text{ мм}$. Таким образом, для обеспечения данного значения тока при напряжении питания 5В необходим провод диаметром 0.014мм. Выберем ближайший по диаметру серийно производимый медный провод: $d_c = 0.05 \text{ мм}$. Провод диаметром больше рассчитанного увеличит ток цепи (т.к. обладает меньшим сопротивлением), что может быть скомпенсировано дополнительным сопротивлением. Рассчитаем диаметр провода с учетом изоляции:

$$d_{mu} = 1.3 \cdot d_c = 0.065 \text{ мм}.$$

Для того, чтобы определить длину катушки, необходимо число витков умножить на диаметр провода с изоляцией (витки укладываются вплотную, без зазоров).

$$l = w \cdot d_{mu} = 100 \cdot 0.065 = 6.5 \text{ мм}.$$

2) Проверим обмотку на нагрев.

Для проверки на нагрев обмотки рассчитывается плотность тока в ней:

$$j_p = \frac{4I}{\pi d_c^2} = \frac{4 \cdot 0.016}{\pi \cdot 0.05^2} = 8.15 \text{ А/мм}^2$$

Далее проверяется условие отсутствие перегрева обмотки:

$$j_p \leq j_{\text{дон}},$$

$j_{\text{дон}} = (5-12) \text{ A/mm}^2$ - допустимая плотность тока в катушке при повторно - кратковременном режиме её работы. Условие выполняется, катушка не подвержена перегреву.

Найдем массу магнита, что в последствии понадобится для определения внешней нагрузки, действующей на пьезопакет:

$$m = \rho_{\phi} \cdot a^2 \cdot l \cdot g + \rho_m \cdot 4 \cdot a \cdot S \cdot w \cdot g, \quad (14)$$

где $\rho_{\phi} \cdot V \cdot g$ (кг) - масса феррита, а $\rho_m \cdot 4 \cdot a \cdot S \cdot w \cdot g$ (кг) - масса обмотки (a – высота и ширина сердечника, l – длина сердечника, S – площадь сечения медного провода, w – число витков). Подставив значения, получаем: $m = 43$ гр.

3) Рассчитаем величину дополнительного сопротивления.

Сопротивление провода диаметром $d_c=0.05$ мм будет равно:

$$R = \frac{\rho_m \cdot l_{cp} \cdot w}{0.25 \cdot \pi \cdot d_{cm}^2} = 23.6 \text{ Ом}$$

Для обеспечения требуемой величины тока 0.016 А, в цепь необходимо включить добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$:

$$I = \frac{U}{(R + R_{\text{доб}})} \Rightarrow R_{\text{доб}} = \frac{U}{I} - R = 290 \text{ Ом}.$$

3.5.2 Расчет быстродействия элементов и подбор рабочей частоты

Рабочая частота тонких пьезокерамических пластин ЦТС-19, совершающих продольные деформации, согласно характеристикам изготовителя составляет не более 100 кГц. Оценим возможные рабочие частоты для электромагнитов.

Время срабатывания магнита

$$t_{\text{сраб}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}},$$

где $t_{\text{тр}}$ – время трогания, - интервал времени, в течение которого ток возрастает от нуля до тока, при котором срабатывает магнит; $t_{\text{дв}}$ – время движения якоря при его передвижении из нормального состояния

в притянутое (в нашем случае время движения равно 0, т.к магнит находится в непосредственном контакте с выходным звеном через слой эмали).

$t_{отп}$ -Время отпускания составляющих [5]. Также состоит из двух аналогичных составляющих.

Время движения якоря, как правило, существенно меньше времени трогания. Вследствие этого время срабатывания магнита определяется временем трогания.

Основной вклад в инерционность электромагнита вносит индуктивность. Катушка – дифференцирующее звено 1-го порядка, время переходного процесса для которого составляет 3 постоянных времени T .

Постоянная времени рассчитывается следующим образом:

$$T = \frac{L_{об}}{R_{об} + R_{доб}}, \quad (15)$$

где $L_{об} [Гн]$ – индуктивность обмотки, $R_{об} [Ом]$ – активное сопротивление медного провода, $R_{доб} [Ом]$ - добавочное активное сопротивление. Индуктивность катушки прямо пропорциональна квадрату числа ее витков, магнитной проницаемости материала сердечника катушки (для феррита 20ВН она равна 20) , площади сечения ее каркаса и обратно пропорциональна длине сердечника:

$$L_{об} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot \pi \cdot d_c^2}{4l} = \frac{20 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 \cdot \pi \cdot (0.05 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 6.5 \cdot 10^{-3}} = 7.5 \cdot 10^{-7} Гн$$

Тогда постоянная времени равна:

$$T = \frac{L_{об}}{R_{об} + R_{доб}} = \frac{7.5 \cdot 10^{-7} Гн}{(0.24 + 312) Ом} = 0.244 \cdot 10^{-7}.$$

Откуда получаем время переходного процесса равным 73.1 мс.

Очевидно, что при максимально допустимой частоте пьезокерамики не более 10 кГц, использование магнитов значительно срезает скоростные характеристики модуля.

Таким образом, возможная частота работы актюатора лежит в пределах от 0 до 3 кГц.

3.6 Подбор транзисторов

Для обеспечения очередности включения электромагнитов будем использовать комплиментарную пару транзисторов. Как было рассчитано ранее, ток коллектора должен быть не менее 0.016 А. В качестве управляющего элемента примем источник переменного напряжения с регулируемой частотой и амплитудой не более 5 В. Ниже приведены характеристики подходящих транзисторов.

Таблица 4 – Характеристики n-p-n транзистора

Наименование	Произв.	Тип	Uкэо max, В	Iк max, А	h21э,min	Рк, Вт	Корпус
AT-32011-TR1G PBF	Avago	NPN	5.5	0.032	70	0.2	SOT23

Таблица 5 – Характеристики p-n-p транзистора

Наименование	Произв.	Тип	Uкэо max, В	Iк max, А	h21э,min	Рк, Вт	Корпус
FMMT717TA SOT23	Zetex	PNP	5	2.5	50	0.625	SOT23

Важно отметить, что частота управляющего напряжения должна изменяться точно в соответствии с изменением частоты питания пьезопакета, в противном случае произойдет рассогласование в работе магнитов и пьезопакета.

3.7 Моделирование работы системы в пакете MatLab Simulink

Основным уравнением системы является уравнение, связывающее перемещение торца преобразователя с подаваемым напряжением и величиной внешней нагрузки

$$\xi = B_{\xi} \cdot U - C_{\xi} \cdot P, \quad (16)$$

где

$$B_{\xi} = \frac{d_{33} L_P}{h_P (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_P})} = 36 \cdot 10^{-9} \text{ M / B}$$

$$C_{\xi} = \frac{s_{33}^E L_P}{\Omega_P (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_P})} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ M / H}$$

Данное уравнение описывается сумматором, на входе которого – подаваемое напряжение с учетом коэффициента B_{ξ} и внешняя нагрузка с учетом коэффициента C_{ξ} . Модель уравнения состояния пьезопреобразователя представлена на рисунке 17.

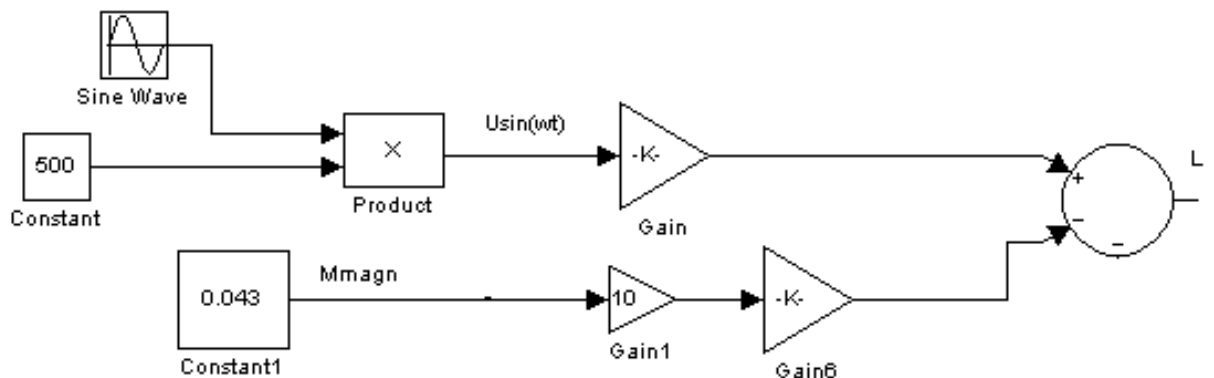


Рисунок 17 – Модель уравнения состояния пьезопреобразователя

Однако, мы не можем не учитывать тот факт, что суммарная нагрузка на пьезопакет представляет собой не только статическую нагрузку в виде силы тяжести магнита, расположенного на торце преобразователя, но и динамическую нагрузку в виде силы инерции этого магнита, которая равна произведению массы магнита на ускорение:

$$P = P_{ст} + P_{дин} = m_{магн} (g + a) \quad (17)$$

Ускорение системы мы можем найти как вторую производную от перемещения торца по времени:

$$a = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (18)$$

Динамическая нагрузка будет представлена в модели в виде обратной связи на сумматор, описывающий динамику пьезопреобразователя:

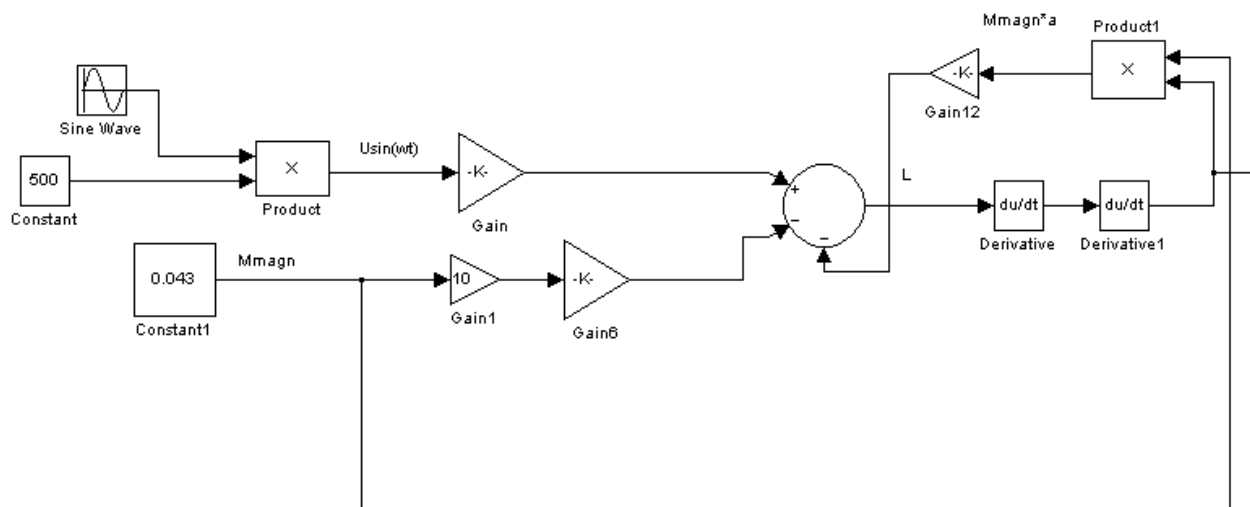


Рисунок 18 – Модель уравнения состояния пьезопреобразователя с учетом динамической нагрузки

На рисунке 18 представлена модель уравнения состоянием пьезопреобразователя с учетом динамической нагрузки. Таким образом, мы имеем: модель движений пьезопреобразователя с магнитом на подвижном торце. На выходе – ускорение. Для того, чтобы перейти к развиваемому усилию, необходимо выходной сигнал перемножить с массой магнита, получив при этом усилие, с которым магнит способен воздействовать на выходной стержень и внешнюю нагрузку.

Перейдем теперь к моделированию работы магнитов. Уравнение для силы тяги магнита зависит от силы тока в обмотке и записывается следующим образом:

$$P_{\text{г}} = (Iw)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{s_{\delta}}{\delta^2} \quad (19)$$

В этом уравнении w , s_{δ} и δ постоянные величины, поэтому мы можем переписать его в виде:

$$P_{\text{г}} = k \cdot I^2 \quad (20)$$

Тогда модель, описывающая работу магнита, будет выглядеть следующим образом:

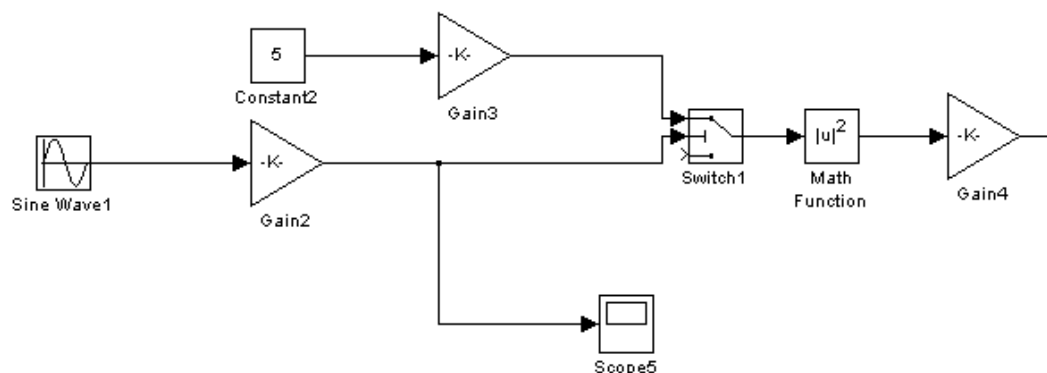


Рисунок 19 – Модель описывающая работу магнита

Модель, описывающая работу магнита, представлена на рисунке 19. Здесь звено Constant2 представляет собой постоянный источник напряжения питания магнитов, звено Gain3 – величина, обратная значению сопротивления токоограничительного резистора (ту же самую функцию выполняет звено Gain2). Sine Wave1 является моделью источника напряжения, подключаемого к базе транзисторов, Switch1 моделирует принцип работы n-p-n транзистора, переходящего в открытое состояние на положительной полуволне напряжения базы. В итоге на выходе имеем магнитное усилие. Для того, чтобы перейти к силе трения, необходимо силу тяги умножить на коэффициент трения между магнитом и выходным стержнем.

Не следует забывать, что проектируемый модуль включает в себя пару магнитов – подвижный и неподвижный. Их модели практически не отличаются друг от друга, за исключением того, что Switch (транзистор) подвижного магнита пропускает входной сигнал при положительном значении управляющего напряжения, а неподвижного при отрицательном, поэтому в модель неподвижного магнита необходимо после звена Sine Wave добавить масштабирующее звено с коэффициентом передачи равным -1.

Включим оба магнита в модель системы:

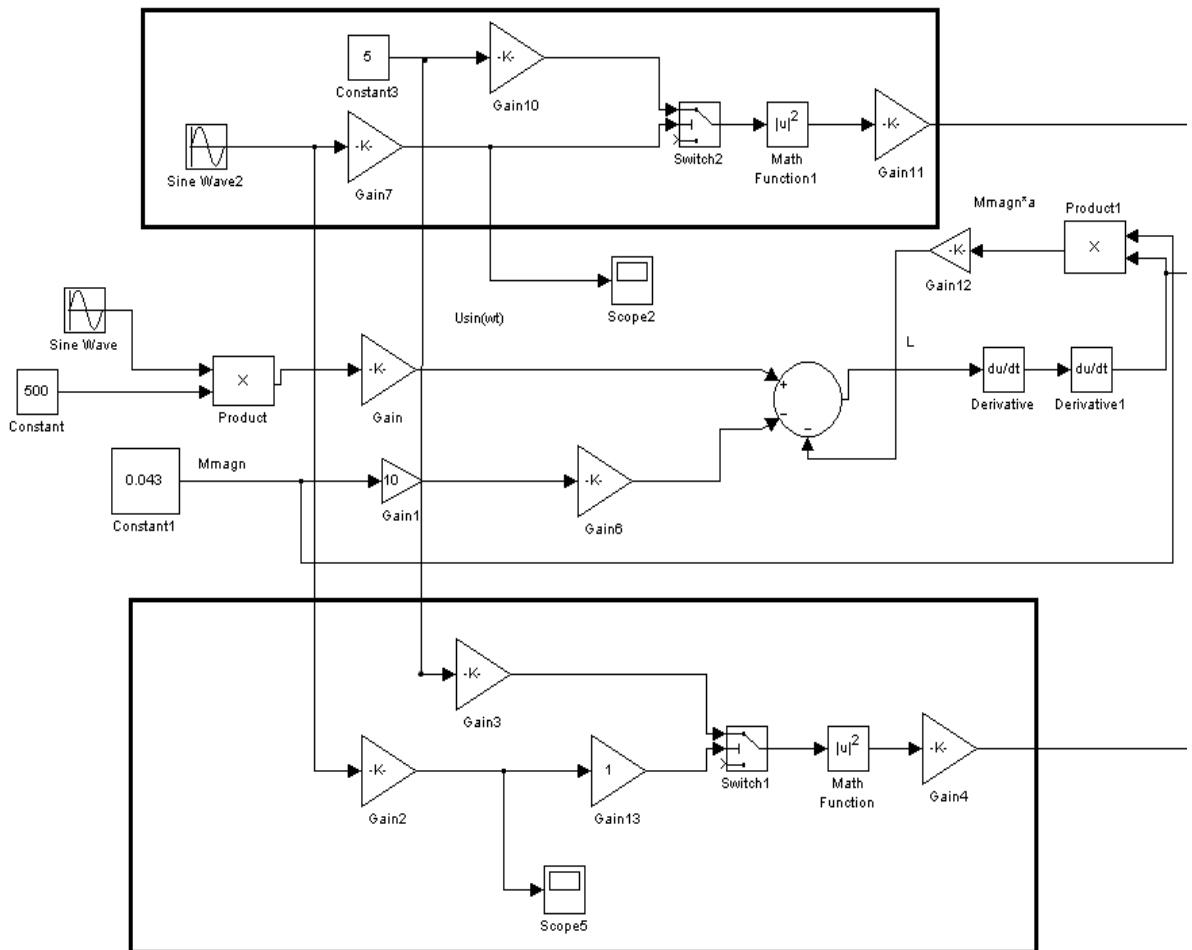


Рисунок 20 – Модель системы с магнитами

На рисунке 20 изображена модель системы с включенными в нее моделями магнитов (обведены жирным контуром). Из рисунка видно, что источники напряжения (питания обмоток и управления током базы) являются общими для обоих магнитов, как и было, заявлено в проекте.

Теперь необходимо связать работу пьезопреобразователя, магнитов, выходного звена и внешней нагрузки. Основная трудность на данном этапе – моделирование сил трения между подвижным магнитом и выходным стержнем, т.к. они являются внутренними для системы. Эта сила пассивна и проявляет себя только при относительном движении магнита и стержня. В представленной модели принцип действия этой силы представлен звеном Switch. Алгоритм его работы таков: звено имеет два входа, на один из которых подается усилие со стороны преобразователя. На второй вход подается сила трения равная произведению тяговой силы магнита и коэффициента трения

между звеном и магнитом. Значение тяговой силы изменяется импульсно и, как только она становится больше нуля, звено Switch открывается и пропускает усилие со стороны преобразователя, которое начинает воздействовать на выходной стержень. Так как наша модель не учитывает проскальзывания, т.е. в любой момент сила трения больше динамической нагрузки, вызванной силой инерции стержня, то данная модель в полной мере описывает алгоритм работы внутренних сил трения.

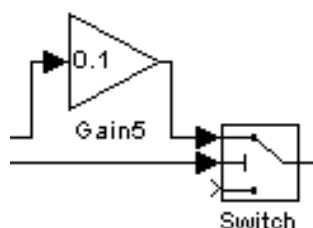


Рисунок 21 – Модель внутреннего трения

Сила трения, создаваемая неподвижным магнитом, является внешней для системы и моделируется более наглядно. На рисунке 22 изображены элементы, моделирующие работу неподвижного магнита. Рассмотрим сумматор с тремя входами. На стержень постоянно действует его собственная сила тяжести и сила внешней нагрузки. Эти силы приходят на сумматор с отрицательным знаком. Сила трения, которая также действует на стержень при их относительном перемещении приходит в сумматор с положительным знаком, так как она всегда будет направлена в сторону, противоположную силе тяжести и внешней нагрузке. Очевидно, выход сумматора не может быть положительным, он либо равен нулю, либо отрицателен, так как сила трения пассивна. Вследствие этого необходимо после выхода сумматора включить дополнительно звено Switch, которое будет обнулять сигнал при его положительном значении и пропускать при отрицательном. Выход сумматора отрицателен в тот момент, когда магнит отключен и выходное звено вместе с нагрузкой движется вместе с пьезопакетом. Этот отрицательный сигнал приходит на второй сумматор, где его значение вычитается из усилия со стороны актюатора и на выходе мы получаем ускорение стержня, помноженное

на его массу. Далее сигнал проходит через масштабирующее звено с коэффициентом передачи равным значению, обратному величине массы стержня. На выходе масштабирующего звена имеем ускорение стержня, проинтегрировав которое два раза, получаем значение для перемещения выходного звена.

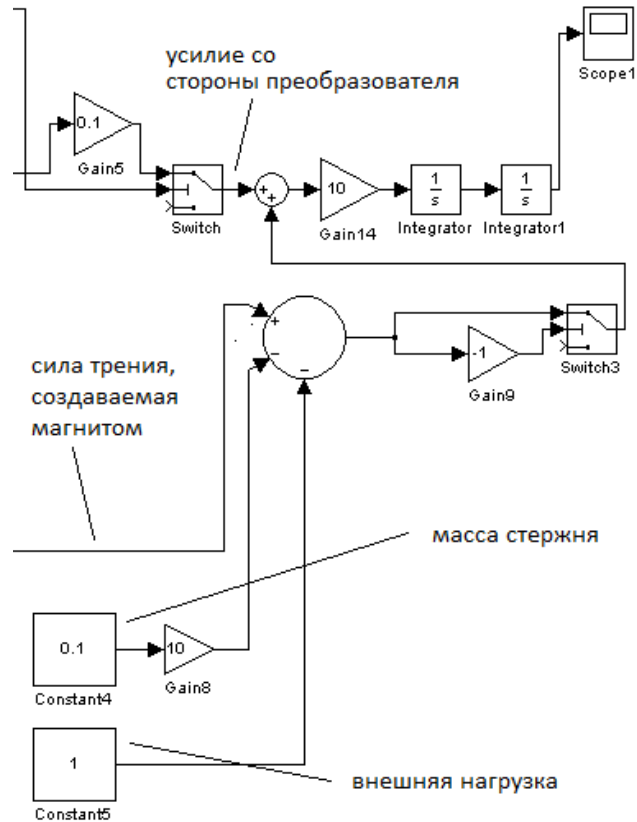


Рисунок 22 – Модель работы неподвижного магнита

На рисунке 23 изображена модель мехатронного модуля движения в сборке.

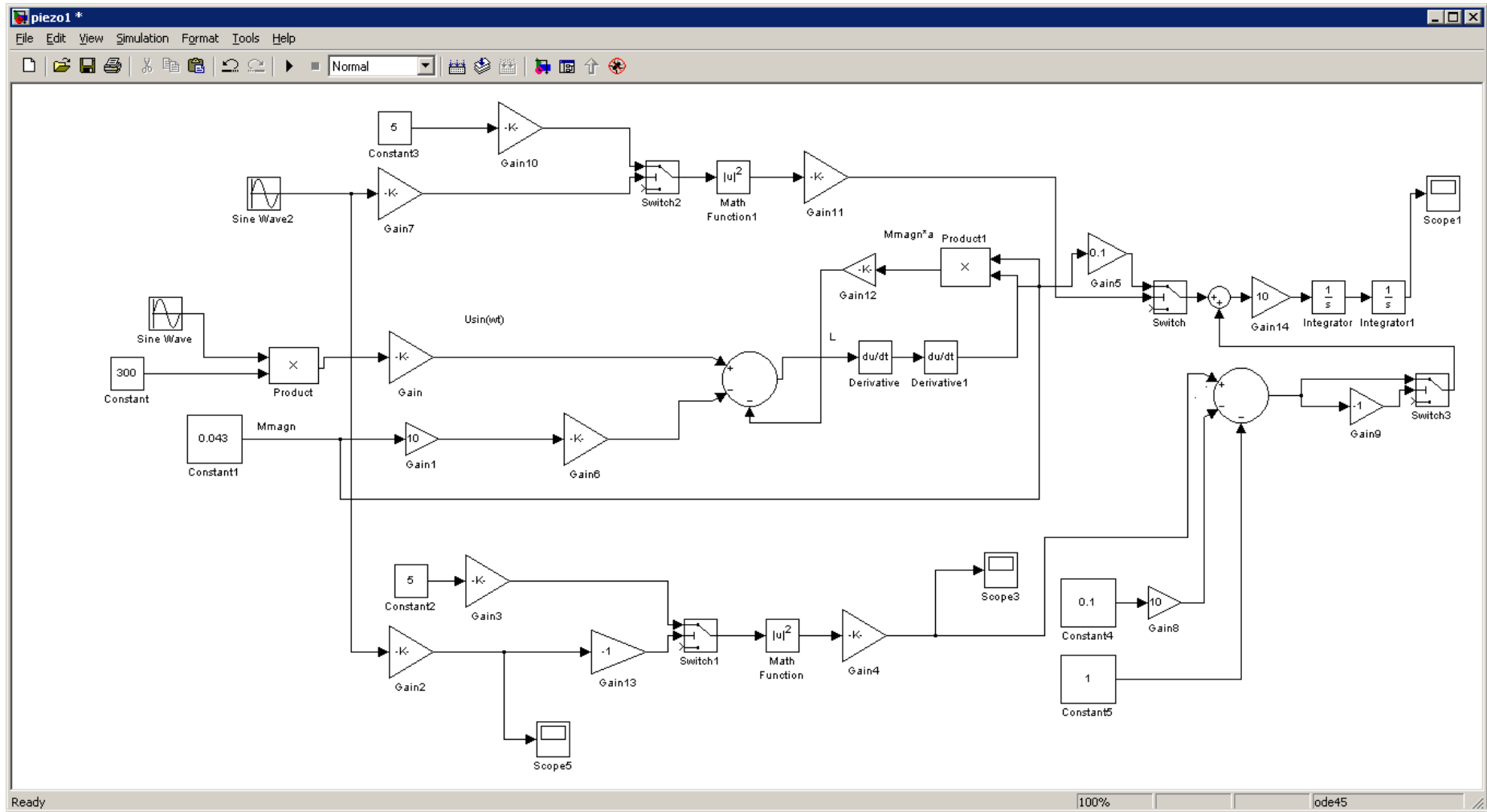


Рисунок 23 – Модель пьезокерамического мехатронного модуля

3.8 Экспериментальное исследование динамических показателей

Рассмотрим теперь развиваемые скорости, ускорения и перемещение стержня при различных величинах амплитуды подаваемого напряжения и частоты.

Зададим время моделирования равным 0.01 секунды, частоту питания 1 кГц и амплитуду 300 В. Получаем:

На рисунке 24 приведен график перемещение выходного звена:

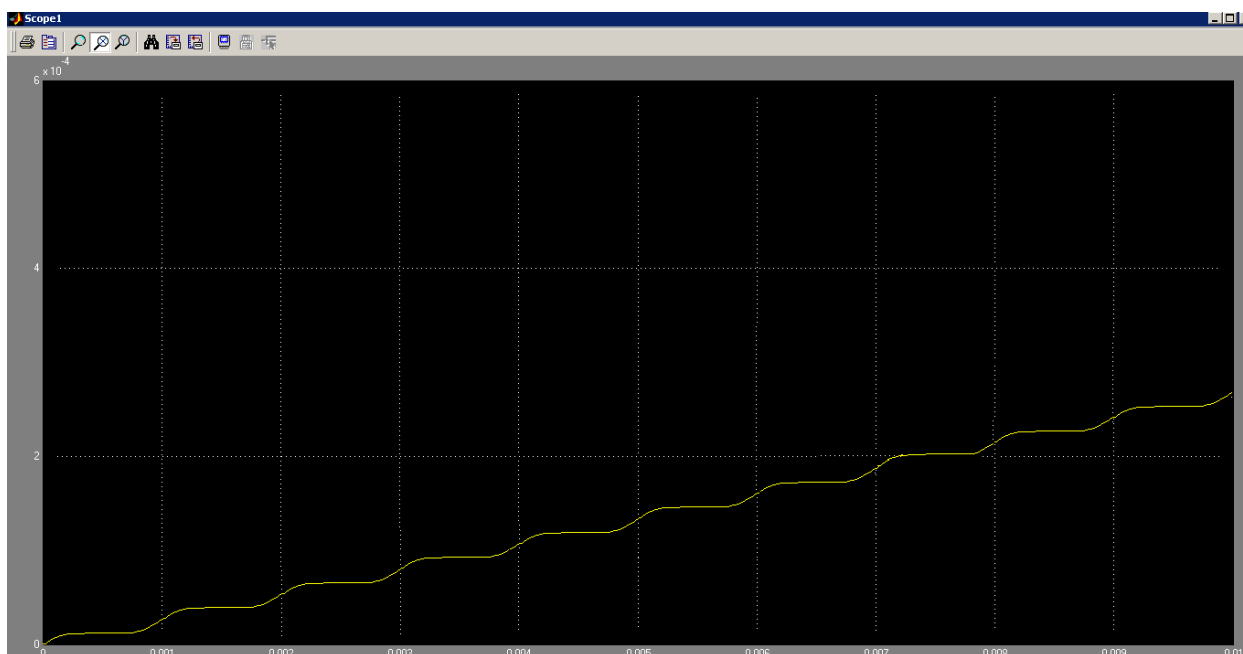


Рисунок 24 – График перемещения выходного звена (амплитуда напряжения 300 В, частоту питания 1000 Гц)

При заданных параметрах за 0.01 с. имеем перемещение 270 мкм.

График перемещения торца преобразователя представлен на рисунке 25.

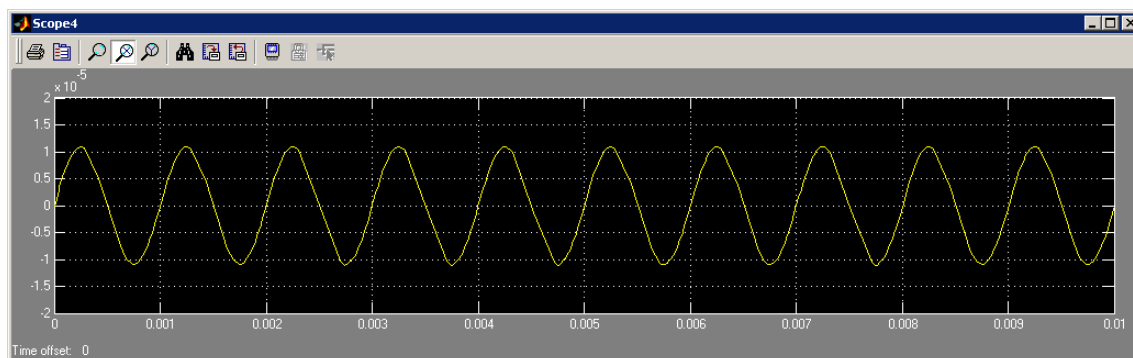


Рисунок 25 – График перемещения торца преобразователя

При заданных параметрах напряжения и нагрузки максимальное растяжение пьезопакета равно 11 мкм.

Зададим теперь время моделирования 0.01 с, амплитуду напряжения 500 В и частоту питания 1000 Гц.

График перемещения стержня приведен на рисунке 26.



Рисунок 26 – График перемещения выходного звена (амплитуда напряжения 500 В, частоту питания 1000 Гц)

В данном случае видим, что уменьшая амплитуду питающего напряжения, мы можем изменять величину перемещения выходного звена, в данном случае она составила 300 мкм. Также можно проследить те моменты, когда торец не перемещается.

График перемещения торца преобразователя представлен на рисунке 27:

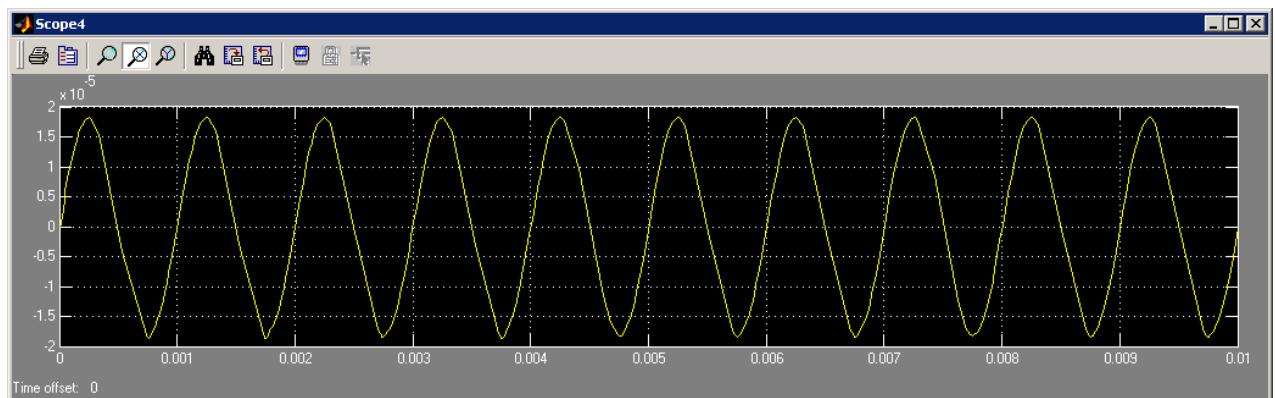


Рисунок 27 – График перемещения торца преобразователя

На графике перемещения торца преобразователя можно заметить, что, с увеличением амплитуды питающего напряжения, увеличивается амплитуда перемещения торца и составляет 18 мкм.

Рассмотрим экспериментальные временные диаграммы срабатывания магнитов и сравним результаты с требуемыми. На рисунке 28 изображены графики перемещения торца преобразователя (показания Scope 4) и временные диаграммы работы подвижного и неподвижного магнитов (показания Scope 2 и Scope 3 соответственно). Показания полностью согласуются с требуемыми, приведенными на рисунке 28.

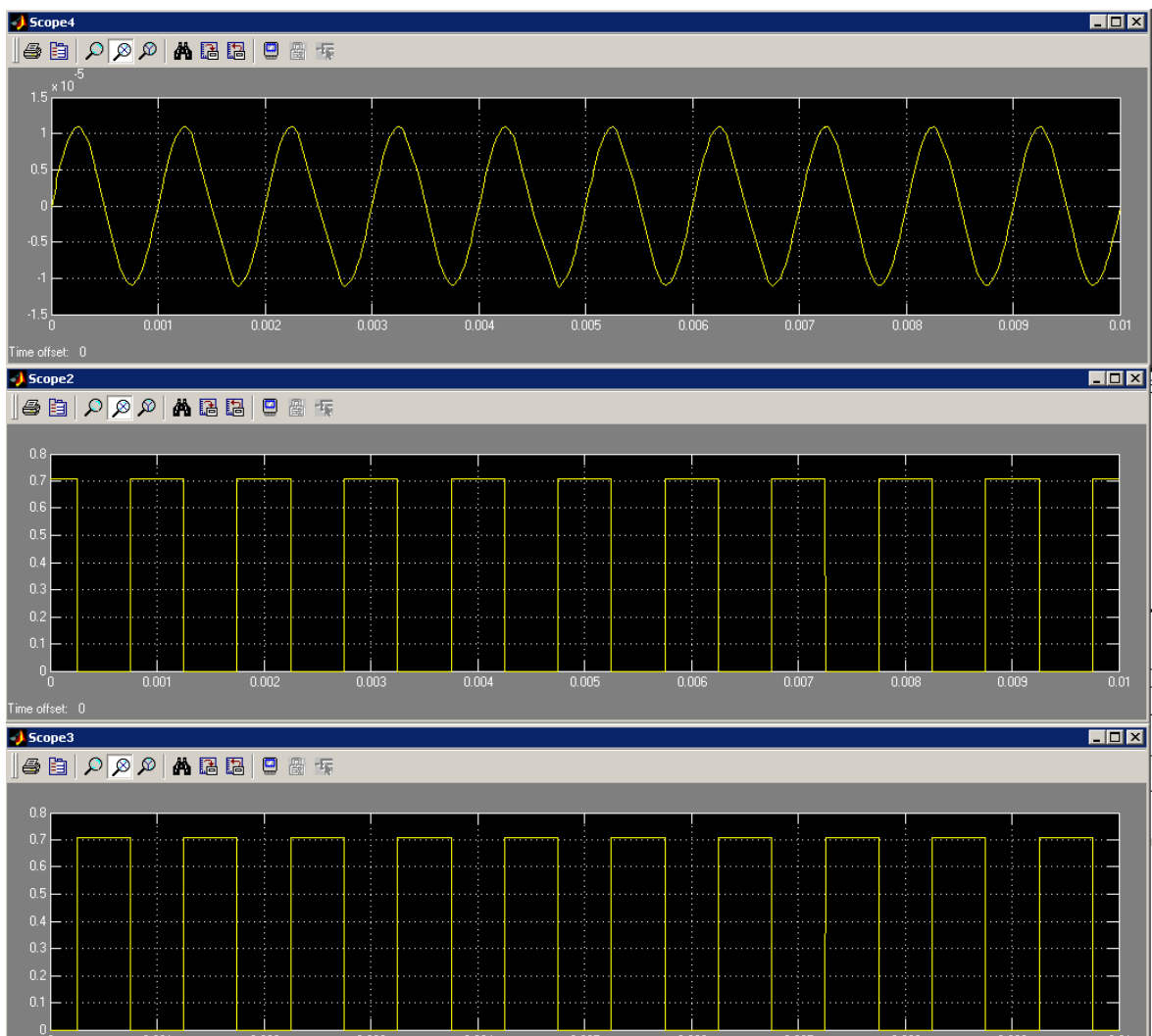


Рисунок 28 – График перемещения торца преобразователя и временные диаграммы работы магнитов

3.9 Моделирование модуля в САПР Autodesk Inventor Professional

Autodesk Inventor — система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования

Работа по проектированию модуля будет осуществляться в несколько этапов: создание корпуса, моделирование пьезокерамического актюатора, моделирование магнитов, создание сочленений и моделирование анимации движений выходного стержня и пьезопакета.

Разработанная модель корпуса приведена на рисунке 29.

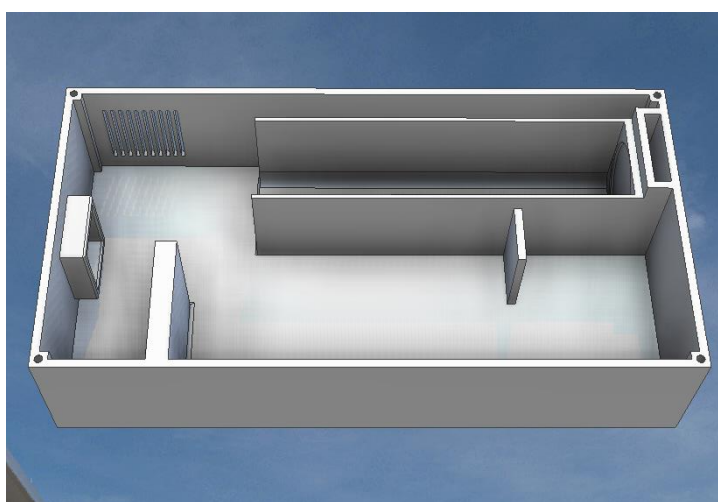


Рисунок 29 – 3D модель корпуса

Модель представляет собой пластиковый корпус, внутри которого расположено направляющее технологическое отверстие для выходного стержня, место для крепежа пьезопакета, вентиляционные отверстия, выходы для подключения питания пьезопакета, питания магнитов и управляющего напряжения для транзисторов. Корпус закрывается крышкой из органического стекла для возможности мониторинга работы пакета и диагностики возможных неполадок.

Модель пьезокерамического пакета представляет собой набор тонких пьезокерамических шайб имеющих по концам два фланца, стянутых винтовой шпилькой с тонкой средней частью посредством двух гаек. Тонкостенная пластмассовая втулка служит в качестве изолятора и элемента центрирующего

весь пакет секций пьезокерамических шайб. Слюдяные шайбы 6 также являются изоляторами, обладающими высокой жесткостью при сжатии.

Рассмотрим более подробно модель разработанного пьезокерамического модуля микроперемещений.

На рисунке 30 приведена сборка пьезокерамического пакета.

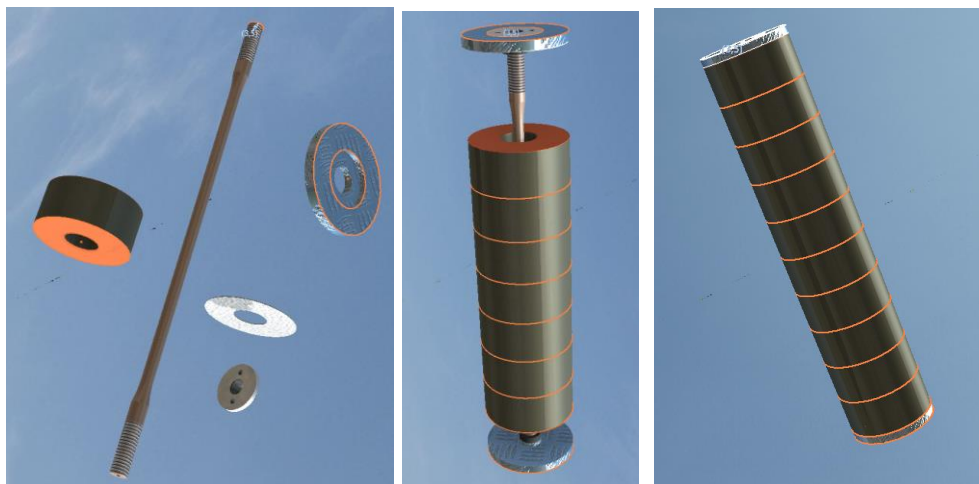


Рисунок 30 – 3D модель пьезоэлектрического пакета

Между пластинами шайб пьезопакета нанесено металлическое напыление с целью подключения электрических клемм.

Рассмотрим основные элементы модуля микроперемещений.

Модель магнитов с обмоткой приведена на рисунке 31.

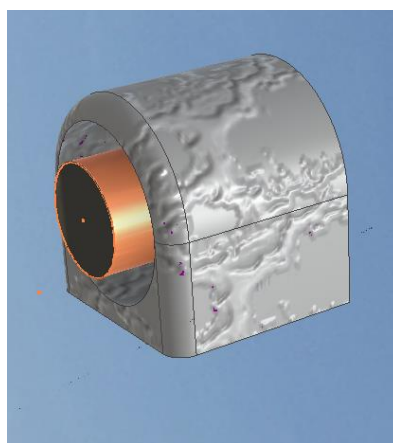


Рисунок 31 – 3D модель магнита

На рисунке 32 показано расположение пьезопакета в корпусе модуля.

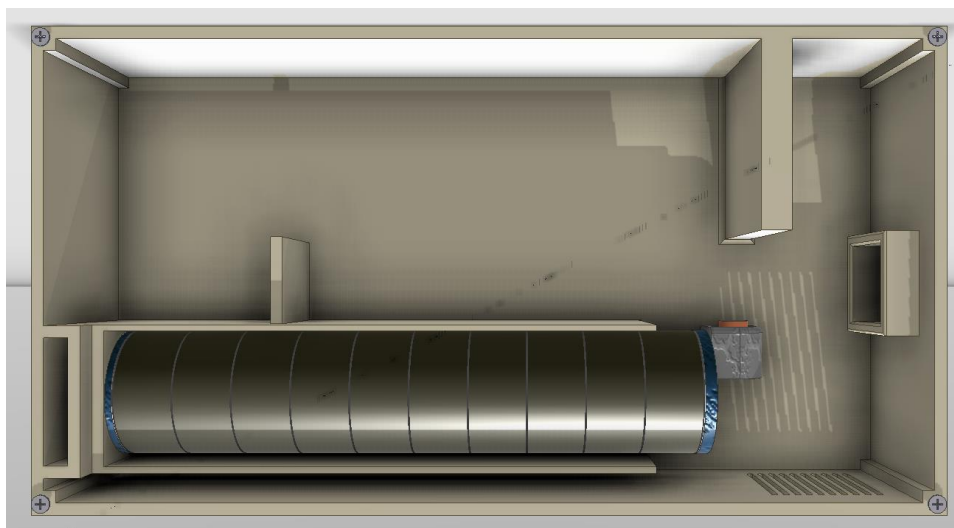


Рисунок 32 – Расположение пакета в корпусе

Расположение неподвижного и подвижного магнита закрепленного на стенке пьезопакета, показано на рисунке 33.

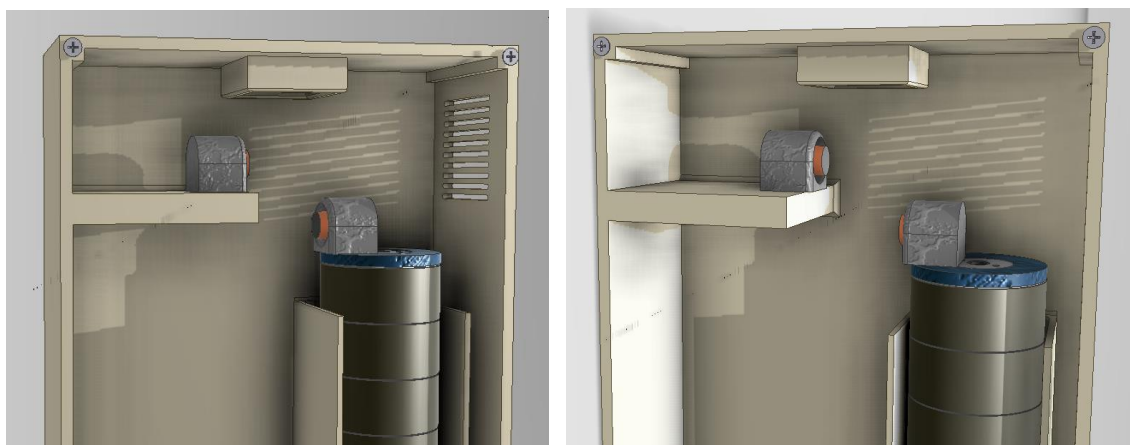


Рисунок 33 – Расположение подвижного и не подвижного магнитов

Выходной стержень устанавливается в направляющую втулку, расположенную в корпусе модуля микроперемещений. (рисунок 34). Конструкция корпуса и выходного стержня выполнена таким образом, что выходной стержень может перемещаться в строго заданных пределах и только в направляющей втулке.

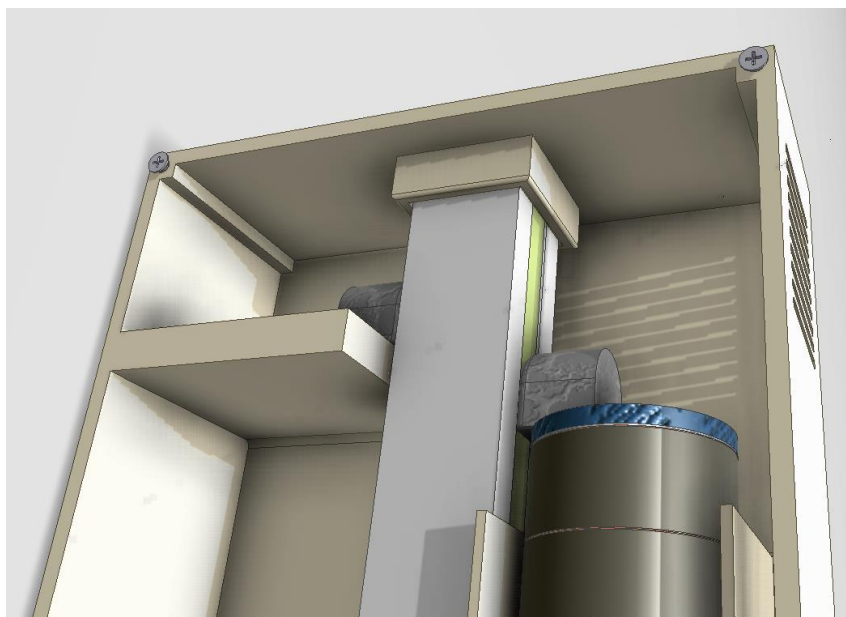


Рисунок 36 – Расположение стержня

К корпусу с помощью болтов крепится крышка. Готовая модель модуля микроперемещений представлена на рисунке 37.

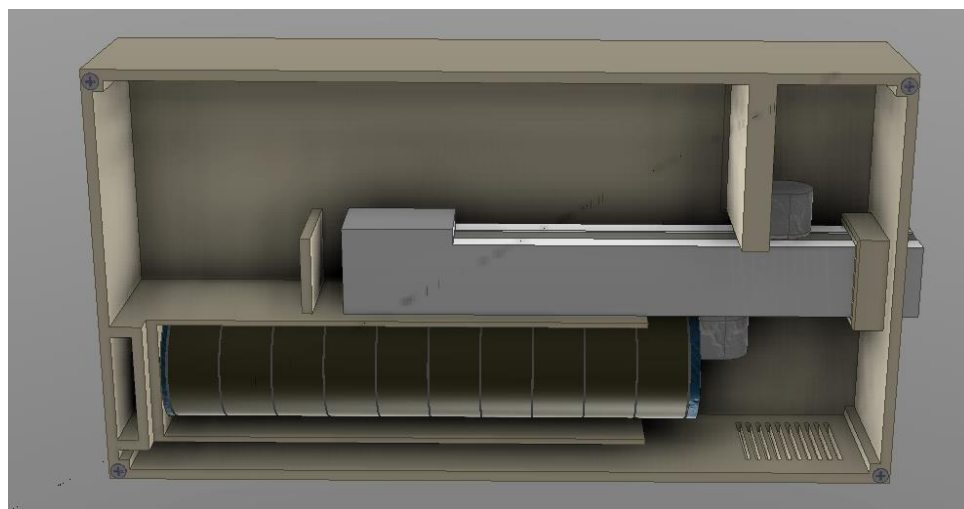


Рисунок 37 – 3D модель модуля в сборке

4 Модернизация интегрирующего элемента

Как было сказано ранее, использование в качестве преобразователей движения пары магнитов значительно урезает быстродействие системы из-за инерционности. Поэтому, было решено произвести модернизацию интегрирующего элемента. Был найден простой и эффективный способ, позволивший решить данную проблему – использование пьезокерамических пакетов в качестве фиксирующих элементов.

Предложенная схема приведена на рисунке 38.

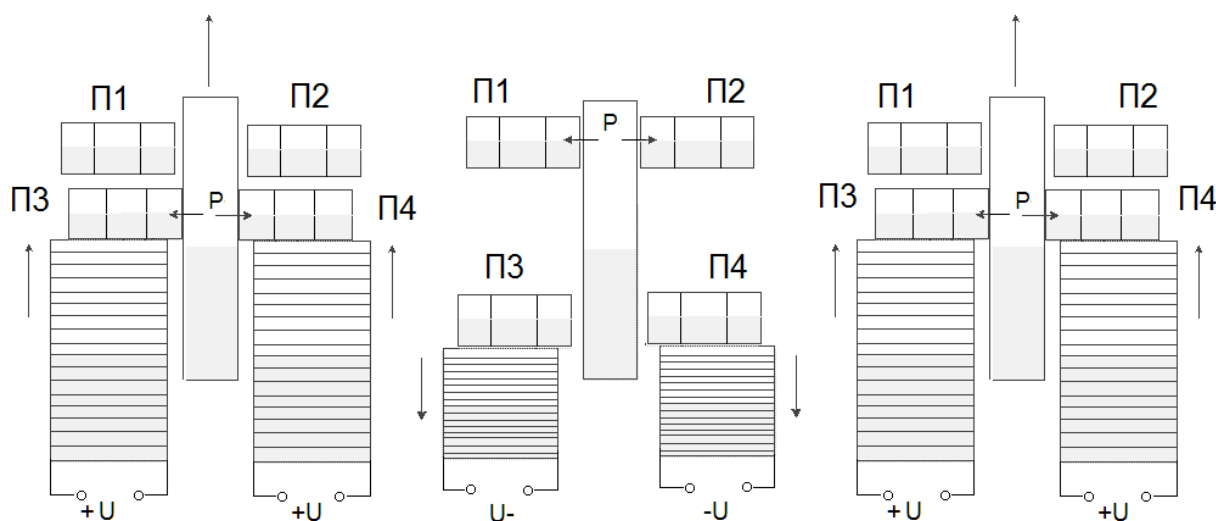


Рисунок 38 – Схема преобразования движения с использованием пьезопакетов

Принцип действия данного технического решения заключается в следующем: электромагниты заменяются на пьезопакеты с меньшим количеством пьезопластин (по три в каждом). При подаче напряжения осуществляется фиксация выходного стержня на деформируемом актюаторе и он увлекается вместе с растяжением. После того, как деформация основного пакета достигла своего пика, включается другая пара пакетов, неподвижно закрепленных в корпусе. Они фиксируют рабочий орган и не позволяют внешней силе «вдавить» его обратно.

Разработанный принцип обладает существенными преимуществами в

сравнении с решением, требующим использование магнитов:

1) Быстродействие определяется максимально возможными частотами пьезокерамики, а не инерционностью магнитов;

2) Простота реализации;

3) Значительно большее прижимное усилие полностью исключает проскальзывание;

4) Предложенное решение обеспечивает вдвое большее выходное усилие, т.к. в нем используется не один, а два основных пьезопакета.

4.1 Функциональная схема устройства

На рисунке 39 представлена функциональная схема устройства, на которой цифрами обозначены все основные узлы и компоненты системы:

1 – пьезокерамические преобразователи;

2 – вторичные пьезопакеты;

3 – стягивающие шпильки;

4 – направляющие;

5 – блок питания;

6 – вторичные фиксирующие пакеты в держателях;

7 – рабочий орган;

8 – корпус модуля.

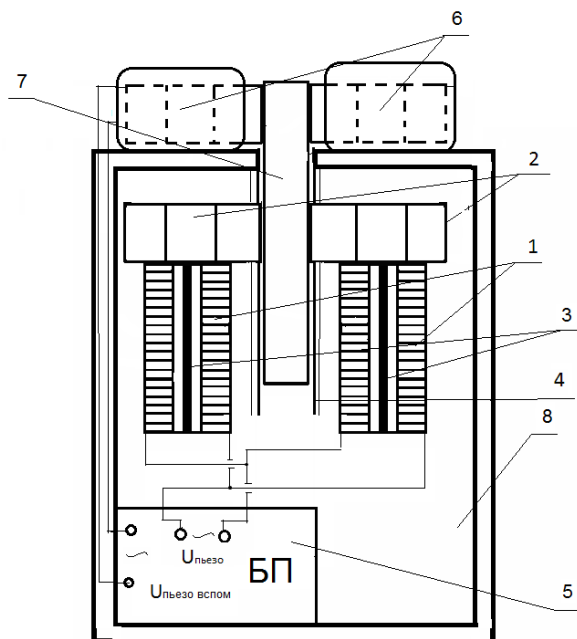


Рисунок 39 – Функциональная схема доработанного устройства

Также на рисунке введены следующие обозначения: $U_{\text{пъезо вспом}}$ – питание фиксирующих пьезопакетов, $U_{\text{пъезо}}$ – высоковольтный источник переменного напряжения, подаваемого на пьезопакет.

Как и в предыдущем техническом решении, очень важно, что амплитуда перемещения торца преобразователя зависит от амплитуды подаваемого напряжения, откуда можем сделать вывод, что скорость перемещения выходного стержня может задаваться двумя параметрами – частотой подаваемого напряжения и его амплитудой. Более того, амплитуда задает точность позиционирования, т.е. перемещение стержня за один цикл работы. Также, следует еще раз упомянуть тот факт, что частота напряжения питания вспомогательных пьезопакетов обязательно должна совпадать с частотой напряжения, питающего основные пьезопакеты, то есть они должны изменяться одновременно и на одинаковую величину.

4.2 Расчет дополнительных пьезокерамических элементов

Подберем марку пьезокерамики. В данном случае будем использовать пакет, состоящий из трех пьезопластин квадратной формы. Для реализации

подобного механизма необходима марка пьезокерамики, обладающая меньшими силовыми характеристиками, нежели ЦТС-19, которая была использована в актюаторе. НЦТБС-1 – выпускаемая серийно марка пьезокерамики, обладающая меньшими пьезоэлектрическим усилием и большей упругой жесткостью, чем ЦТС-19, однако в данном случае высокие показатели не требуются, т.к. нужно обеспечить выходное усилие 40Н (увеличенное в сравнении с усилиями магнитов во избежание проскальзывания). НЦТБС-1 имеет приемлемый в нашем случае пьезоэлектрический модуль d_{33} и среднюю податливость s_{33E} .

Пьезокерамика НЦТБС-1 производится серийно и имеет два типа исполнения – биморфная балка и пластина. Для удобства реализации будем использовать пластинчатое исполнение, это позволит без особых проблем закрепить ее в корпусе и на торце основного преобразователя. Пакет будет состоять из пластин, характеристики которых приведены в таблице 6. Внешний вид пластины представлен на рисунке 40.

Таблица 6 – Параметры пластины

Материал	Материал электрода	Геометрические размеры, мм			Масса, г
		Длина	Ширина	Толщина	
ЦТС-19	НЦТБС-1	10	10	5	5.54

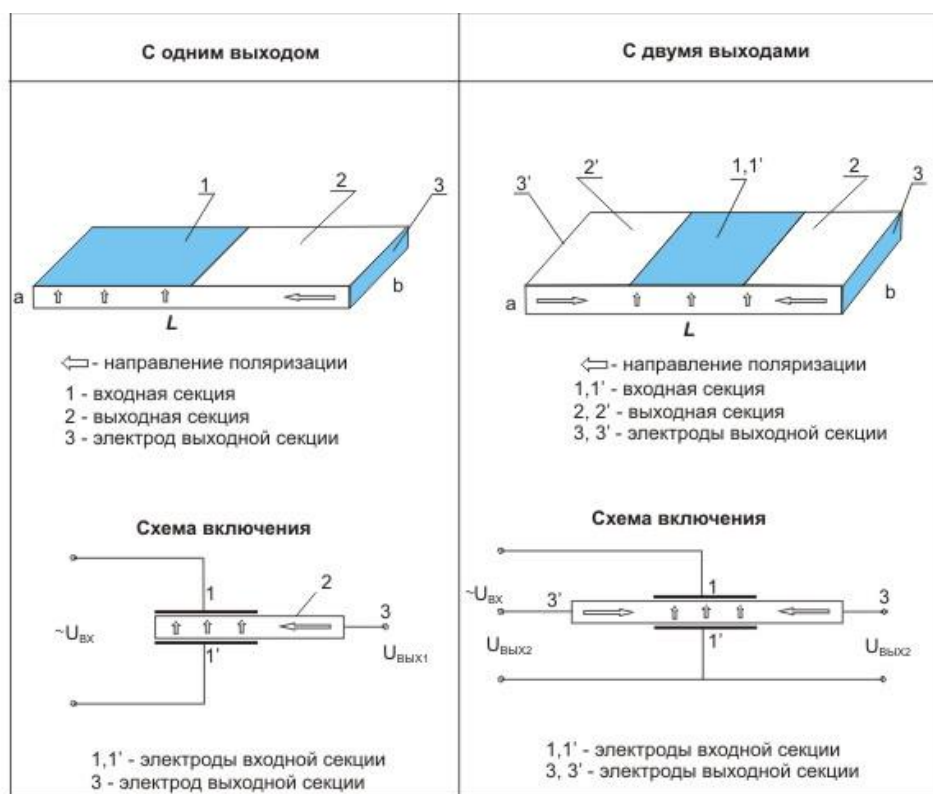


Рисунок 40 – Внешний вид пластины

В таблице 7 приведены характеристики материала НТЦБС-1.

Таблица 7 – Характеристики НТЦБС-1

Параметр	Символ	Единица измерения	НТЦБС – 1
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1	1650
Быстродействие	t	мкс	0,5 – 5
Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле при: $E = 300 \text{ кВ} / \text{м}$	$\text{tg } \delta$	10^{-2}	-
Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле при: $E = 100 \text{ кВ} / \text{м}$	$\text{tg } \delta$	10^{-2}	-
Коэффициент электромеханической связи	K_p	1	0,56
	K_{31}	1	0,29
	K_{33}	1	0,64
Пьезоэлектрический модуль	$-d_{31}$	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}$	140
	d_{33}	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}$	120
	g_{31}	$10^{-3} \text{ м}^2 / \text{Кл}$	8,90
	g_{33}	$10^{-3} \text{ м}^2 / \text{Кл}$	22,30
Частотная постоянная	N_p^E	Гц	2,00

Параметр	Символ	Единица	HTЦБС-1
Скорость звука	V^1_E	10^3 м/с	2,95
Упругая жесткость	S^E_{11}	$10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$	13,2
	S^E_{33}		24.35
Коэффициент Пуассона	σ	1	0,38
Предел механической прочности при статическом растяжении/сжатии, не менее	$\sigma_{\text{раст}}$	10^6 Н/м^2	<i>не нормир.</i>
	$\sigma_{\text{сжат}}$		294
Механическая добротность	Q_m	1	110
Точка Кюри	T_c	$^{\circ}\text{C}$	140
Плотность	ρ	10^3 кг/м^3	4,5

Рассчитаем перемещение торца преобразователя для нулевой внешней нагрузки и максимальном напряжении 220В.

Площадь торцевой поверхности пьезошайбы:

$$\Omega_p = L^2 = 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения стягивающей металлической шпильки радиусом 1 мм:

$$\Omega_M = \frac{\pi}{4} D_3^2 = \frac{3.14}{4} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 3.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Общая длина пакета:

$$L_p = n \cdot h = 3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Материал резьбовой шпильки – сталь, поэтому модуль Юнга $E_M = 210 \cdot 109 \text{ Па}$. В данном случае нам требуется рассчитать лишь блокирующее усилие, т.к. пакеты будут находиться в непосредственном контакте с рабочим органом и не будут иметь хода.

Далее определим максимальное блокирующее усилие, т.е. силу, развиваемую преобразователем при нулевом перемещении торца:

$$P_{\text{max}} = \frac{d_{33} \Omega_p}{h_p s_{33} E} U = \frac{120 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/В} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 24.35 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{Кл/В} \cdot \text{Н}^2} \cdot 220 \text{ В} = 21 \text{ Н}.$$

Таким образом, фиксирующие преобразователи способны обеспечить удерживающее усилие в 42 Ньютона (по 21Н на каждый). Это позволит обеспечить выходное усилие согласно поставленным требованиям.

4.3 Разработка 3D модели модернизированного модуля микроперемещений

Модернизация корпуса. Введение дополнительного пьезопреобразователя потребовало модернизации модели корпуса. Был добавлен второй паз под пакет, а также были добавлены крепления под фиксирующие преобразователи, на торцах пьезопакетов были добавлены крепления для вторичных пакетов.

Результатом модернизации модуля стала сборочная модель, представленная на рисунке 41. Как и в предыдущем случае, модель упростит понимание разработанного принципа накопления движения.

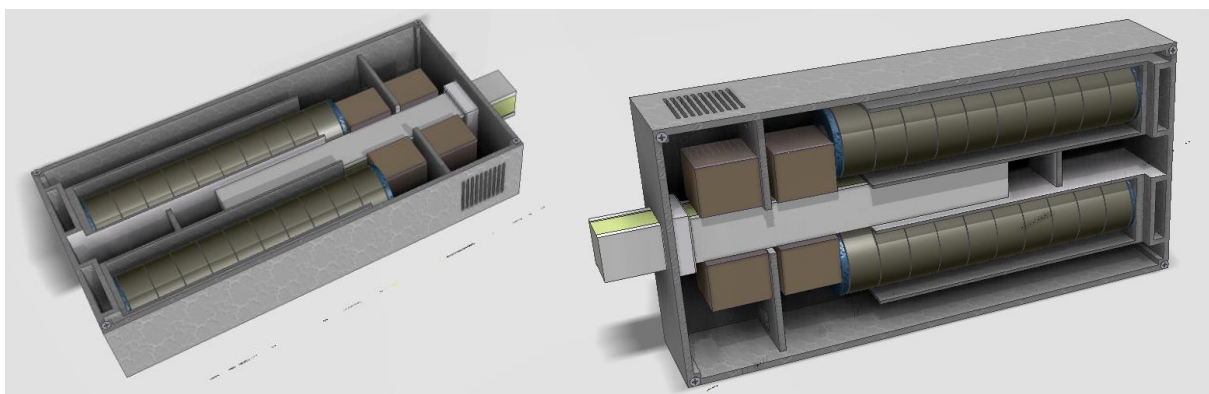


Рисунок 41 – Общий вид модернизированного модуля микроперемещений

4.4 Преимущества и недостатки технического решения

Как говорилось ранее, модернизация привода позволила решить основную проблему среза рабочей частоты, повысив ее до максимально допустимой частоты колебаний преобразователя. Кроме того, можно выделить следующие преимущества и недостатки.

Преимущества:

- Увеличенная рабочая частота;
- Модуль способен работать в более агрессивных средах (температура, запыленность, высокая влажность);
- развиваемое усилие увеличено в два раза;
- исключена возможность проскальзывания.

Недостатки:

- Удорожание стоимости;
- Повышение сложности реализации;

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос, наблюдение.
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Проведение предпроектного анализа и определение возможных альтернатив проведения НТИ.
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	Определение структуры и трудоёмкости работ в рамках НТИ, разработка графика проведения НТИ, планирование бюджета НТИ
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Оценка экономической эффективности проекта, оценка научно-технического уровня НИР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. менеджмента ИСГТ	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Организация и планирование работ

Для организации НИР применяются различные методы экономического планирования с целью более эффективного использования времени и рабочей силы, снижения трудозатрат. Планирование НИР заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи; определении участников; установлении продолжительности в рабочих днях; построения линейного графика и его оптимизации.

5.1.1 Поэтапное распределение НИР

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице №8.

Таблица 8 – Перечень выполняемых работ с указанием доли участия исполнителей

Этап проведения НИР	Исполнители
1. Постановка целей и задач исследования	НР, С
2. Обзор литературы	С
3. Разработка содержания ВКР	НР, С
4. Разработка календарного плана выполнения работ	НР, С
5. Проведение исследования по тематике работы	НР, С
6. Обработка полученных результатов	НР, С
7. Оформление расчетно-пояснительной записки	С
8. Оформление графического материала	НР, С
9. Подведение итогов	С

На первом этапе происходит постановка цели и задачи исследования – проектирование мехатронных систем микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. Тематика выбирается научным руководителем и обсуждается со студентом.

На втором этапе студент производит поиск научной литературы по предоставленной тематике для ознакомления и изучения необходимого материала. В дальнейшем данный материал будет использоваться для проведения исследований и разработки устройства.

На третьем этапе студент совместно с научным руководителем разрабатывают общее содержание ВКР. Данный документ является основополагающим при проведении дальнейшего исследования и разработки.

На четвертом этапе реализуется календарный план выполнения работ, обусловленный сроком обучения в магистратуре.

На пятом этапе студент занимается разработкой функциональной, структурной и схем. Данные схемы показывают общую структуру устройства и связи между его компонентами. В дальнейшем модернизация пьезоэлектрическая система управления микроперемещениями будет основываться на данных документах.

На шестом этапе производится выбор алгоритмов управления. Затем студент начинает выполнение исследовательской части работы (седьмой этап) – в данном случае исследование заключается в разработке пьезоэлектрической системы управления микроперемещениями.

На восьмом, девятом и десятом этапе студент, под руководством научного руководителя занимается интерпретацией и обработкой результатов, а также оформлением расчетно-пояснительной записки и графического материала (графические материалы результатов исследования, презентация проекта).

Одиннадцатый этап заключается в подведении итогов проведенной работы, получении студентом обратной связи от научного руководителя и комиссии на защите дипломного проекта.

5.1.2 Продолжительность этапов работ

Наиболее ответственной частью экономических расчетов по теме является расчет трудоемкости работ, так как трудовые затраты составляют основную часть стоимости НИР.

Под трудоемкостью работ понимают максимально допустимые затраты труда в человеко-днях на выполнение НИР с учетом организационно-технических мероприятий, обеспечивающих наиболее рациональное использование выделенных ресурсов.

Так как отсутствует нормативная база по проводимым работам, а также достоверная информация о процессе выполнения подобных работ иными исполнителями, воспользуемся экспертным способом оценки продолжительности выполнения запланированных работ.

Определим ожидаемое время проведения работ, длительность этапов в рабочих и календарных днях, по формулам, воспользовавшись формулой:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5},$$

где:

$t_{ож}$ – ожидаемое время выполнения i -го этапа работ в чел.-дн.,

t_{min} , t_{max} – минимальная, максимальная продолжительность работы, дн.

Ожидаемое, минимальное и максимальное время исполнения в предложенной выше формуле, оцениваются в рабочих днях на человека. Произведем перевод этих величин в календарные дни, воспользовавшись следующей формулой:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К},$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$); $T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$); $T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

$$T_K = \frac{365}{365-52-10} = 1,2$$

В свою очередь рабочие дни рассчитываются по следующей формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_D,$$

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$; K_D – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_D = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Для простоты расчетов примем K_D и $K_{ВН}$, равными единице. Тогда формула для расчета календарных дней преобразуется в следующую:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_K = t_{ож} \cdot T_K = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} \cdot 1,2$$

Воспользовавшись данными из таблицы 8, приведенными выше формулами, произведем расчет продолжительности выполнения работ студентом в календарных днях. Результаты расчетов представлены в таблице 9. На основе данной таблице составим линейный график работ, представленный в таблице 10.

Таблица 9 – Расчет трудозатрат на выполнение проекта

Этап	Трудоемкость работ, человеко-дней			Длительность работ, дней	
				$T_{РД}$	$T_{КД}$
	t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	С	С
1	2	3	4	5	6
1. Постановка целей и задач исследования	2	3	2,4	1,44	2
2. Обзор литературы	8	10	8,8	5,28	8
3. Разработка содержания ВКР	9	11	8	4,8	7

Этап	Трудоемкость работ, человеко-дней			Длительность работ, дней	
	7	10	7,8	4,66	7
4. Разработка календарного плана выполнения работ	7	10	7,8	4,66	7
5. Проведение исследования по тематике работы	12	14	12,8	7,68	11
6. Обработка полученных результатов	7	10	8,2	6,56	9,7
7. Оформление расчетно-пояснительной записки	14	18	15,6	15,6	23,8
8. Оформление графического материала	4	8	5,6	5,6	8,288
9. Подведение итогов	4	5	4,4	0	0
Итого:			73,6	51,71	75,9

5.1.3 Расчет накопления готовности проекта

Произведем оценку текущих результатов работы. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом. Степень готовности рассчитывается по следующей формуле:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}},$$

• где TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении; $TP_{общ.}$ – общая трудоемкость проекта; TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении; TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, $m = 2$.

Таблица 10 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этапы работы	$TP_i, \%$	$CG_i, \%$
1. Постановка целей и задач исследования	3,5	3,5
2. Обзор научной литературы	6,53	10,03
3. Разработка технического задания (ТЗ)	27,07	37,1
4. Разработка календарного плана выполнения работ	5,42	42,52

Этапы работы	<i>ТР_i, %</i>	<i>СГ_i, %</i>
5. Разработка схем: структурной, функциональной и внешних проводок	7,8	50,32
6. Разработка принципиальной эл. схемы и выбор компонентов	15,13	65,45
7. Проведение исследования по тематике работы	7,64	73,09
8. Обработка полученных результатов	6,53	79,62
9. Оформление расчетно-пояснительной записки	12,43	92,05
10. Оформление графического материала	4,45	96,5
11. Подведение итогов	3,5	100

5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

В ходе выполнения проекта отсутствуют расходы на командировочные, услуги связи, услуги сторонних организаций и арендная плата за пользование имуществом. Таким образом основу расходов данного проекта составляют:

- материалы и покупные изделия;

- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

5.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования.

На первом этапе работ необходимо провести теоретические исследования. Для этого необходим ряд программных пакетов, таких как Microsoft Word, MathCAD, MATLAB, Autodesk Inventor Professional. Большинство данных продуктов предоставляются ТПУ бесплатно для студентов и профессоров, а остальные находятся в свободном доступе на интернет ресурсах. Таким образом затраты на материальные расходы данного этапа исследований включают в себя расходы на бумагу, тетради и пр. На втором этапе проводится исследования. Для этого использовался персональный компьютер с программой MATLAB, которая была предоставлена бесплатно.

В материальные затраты также входят транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), которые обуславливаются затратами на совершение купли-продажи материалов, их доставку. Обычно ТЗР составляют от 5% до 20% от общей цены материалов. Положим норму ТЗР равной 10%.

Таблица 11 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Ед.	Сумма, руб.
Распечатка листов А4	2,0	200	шт	400
Ручка	20,0	5	шт	100
Блокнот	40,0	3	шт	120
ТЗР		10	%	62
Итого:				682,0

5.2.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

5.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 11.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная з/плата} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25 \text{ дней}} ;$$

При расчете учитывалось, что в году 302 рабочих дня и, следовательно, в месяце 25 рабочих дней. районный коэффициент КРК=1,7 и северная надбавка Кс= 0,5 (K = 2,2).

Таблица 12 – Расчет затрат на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	16751,29	993,25	30	1,69	60429,33
С	11 200	1002,3	56	2,2	56326,2
Итого					116755,35

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили $Z_{ЗП} = 116755,35$ руб.

5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данная статья учитывает затраты на электроэнергию, которая потребляется всем оборудованием в течение работы над проектом. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об.} \cdot t_{об.} \cdot Ц_{э},$$

где $P_{об.}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час ($Ц_{э} = 3,1$ руб/кВт·ч); $t_{об.}$ – время работы оборудования, час. Время работы оборудования определяется по формуле:

$$t_{об.} = T_{РД} * K_t,$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{об.}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Для выполнения работ студентом использовался персональный компьютер и учебный стенд. Определим затраты на потребленную оборудованием электроэнергию и сведем результаты расчетов в таблицу 13.

Таблица 13 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	K_t	Время работы оборудования, ч	Затраты на электроэнергию
Персональный компьютер	0,35	0,9	1680,4	1823,234
Принтер	0,25	0,001	0,7	0,54
Итого				1823,77

5.2.5 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), который включает в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту и рассчитывается по

формуле $C_{\text{соц}} = C_{\text{эл}} * 0,3$. Для проведения исследования затраты на социальный налог составляют $C_{\text{соц}} = 116755,35 * 0,3 = 35026,5$ руб.

5.2.6 Расчет амортизационных расходов

Расчет амортизационных расходов производится по следующей формуле:

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_A * C_{\text{об}} * t_{\text{рф}} * n}{F_D},$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования; $C_{\text{об}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР, F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году, $t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Персональный компьютер и принтер входят в группу – вычислительная техника, следовательно, они имеют срок полезного использования 2-3 года.

Так как к сроку начала работ компьютер и принтер эксплуатировались более 5 и 10 лет соответственно, то срок их полезного использования истек, следовательно, амортизационные расходы на ПК и принтер оборудования равны нулю.

Паяльная станция была приобретена к началу выполнения работ и данный тип оборудования входит в пятую группу – специальное технологическое оборудование для производства электронной и радиотехники. Срок полезного использования таковой составляет от 7 до 10 лет. Зададим конкретное значение CA , равное 8 годам.

Таким образом, амортизационные расходы на использование оборудования составят:

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{OБ} * t_{рф} * n}{F_D} = 0,00 \text{ руб.}$$

5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Рассчитав сумму всех расходов на выполнение запланированных работ, произведем расчет общей себестоимости проекта. Результаты расчетов представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет общей себестоимости проекта

Статья затрат	Обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	C_{mat}	682
Заработная плата	$C_{зп}$	116755,35
Отчисления в социальные фонды	$C_{соц}$	35026,5
Расходы на электроэнергию	$C_{эл.}$	1823,77
Амортизационные отчисления	$C_{ам}$	0,00
Прочие расходы	$C_{проч}$	108372,56
ИТОГО:		355095,18

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 355095,18$ руб.

5.3 Оценка экономической эффективности проекта

Результатом проведения НИР является пьезоэлектрическая система управления микроперемещениями. В результате выполнения дипломной работы был разработан модуль микроперемещений на основе пьезокерамического преобразователя напряжения, удовлетворяющий поставленным требованиям точности и динамики.

Для получения количественной оценки экономической эффективности разработанного проекта необходимо проведение специального комплексного исследования, которое выходит за рамки представленной работы.

5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

В данном разделе произведем оценку научно-технического уровня разработки при помощи вычисления интегрального индекса научно-технического уровня $I_{НТУ}$. Расчет данного индекса производится как взвешенная сумма количественных оценок НИР по трем признакам: уровень новизны, теоретический уровень и возможность реализации.

Таблица 15 – Критерии оценки уровня новизны НИР

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны – n_1	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 16 – Критерии оценки теоретического уровня НИР

Теоретический уровень полученных результатов – n_2	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 17 – Критерии оценки возможности реализации НИР по времени

Время реализации – n_3	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Разрабатываемая система по оценке таблицы 15 имеет уровень новизны равный 8, т.к. подобные системы существуют, однако с такой точки зрения не рассматривались.

Критерии оценки теоретического уровня НИР равен 6, т.к. результатом данной работы стал модуль микроперемещений на основе пьезокерамического актюатора удовлетворяющего заданным динамическим требованиям

Критерий оценки возможности реализации НИР по времени равен 10, т.к. реализация разработки имеет ограниченный срок 2,5 года.

Таким образом, произведем расчет интегрального индекса НТУ НИР:

$$I_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 k_i \cdot n_i = 0,4 \cdot 8 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 8,8$$

Так как индекс НТУ равен 8,8 балла, то это означает, что НТУ соответствует высокому уровню проведенной НИР.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Разработка пьезоэлектрической системы управления микроперемещениями
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>Рабочим местом является аудитория №027 10 корпуса Томского политехнического университета. В аудитории рабочей зоной является место за персональным компьютером, отведённое студенту для выполнения работы. Основным оборудованием, на котором производится работа, является персональный компьютер с периферийными устройствами.</p> <p>Вредными факторами производственной среды, которые могут возникнуть на рабочем месте, являются: освещённость рабочей зоны, естественное освещение, шум, электромагнитные излучения, влажность воздуха, температура, скорость.</p> <p>Опасными проявлениями факторов производственной среды, которые могут возникнуть на рабочем месте, являются: электрический ток.</p> <p>Чрезвычайной ситуацией, которая может возникнуть на рабочем месте, является возникновение пожара.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<ul style="list-style-type: none"> - анализ воздействия объекта ВКР и области его использования на ОС; - разработка решений по обеспечению экологической безопасности

<ul style="list-style-type: none"> – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	Выбор и описание возможных ЧС; типичная ЧС – пожар. <ul style="list-style-type: none"> – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Специальные правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Извеков В.Н.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Баранов Николай Александрович		

6 Социальная ответственность

6.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Перечень опасных и вредных факторов, влияющих на персонал в заданных условиях деятельности, представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Перечень опасных и вредных факторов технологии производства

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
- Управление механизмами аудитории, работа с ПЭВМ; - Выполнение визуальных осмотров всех основных и вспомогательных механизмов до начала их использования при выполнении работ;	- Температура, влажность, скорость; - Напряженность зрения; - Напряженность труда в течение смены; - Естественное и искусственное освещение; - Электромагнитные излучения; - Шум.	Электрически й ток.	- Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4-548-96; - Нормы естественного и искусственного освещения предприятий, СНИП 23-05-95; - Допустимые уровни шумов в производственных помещениях. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ; - Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; - Защитное заземление, зануление, ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ.

Эти факторы могут влиять на состояние здоровья, привести к травмоопасной или аварийной ситуации, поэтому следует установить эффективный контроль за соблюдением норм и требований, предъявленных к их параметрам.

6.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследования

В условиях современного интенсивного использования ПЭВМ высокое значение имеет изучение психофизиологических особенностей и возможностей человека с целью создания вычислительной техники, обеспечивающей максимальную производительность труда и сохранение здоровья людей. Игнорирование эргономики может привести к довольно серьезным последствиям.

Основным документом, определяющим условия труда на персональных ЭВМ, являются «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». Санитарные нормы и правила СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, которые были введены 30 июня 2003 года.

В Правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Основным опасным фактором является опасность поражения электрическим током. Исходя из анализа состояния помещения, аудиторию корпуса по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности (согласно ПУЭ).

Основным опасным производственным фактором на рабочем месте является высокое напряжение, от которого питается модуль микроперемещений.

6.3 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов (техника безопасности и производственная санитария)

6.3.1 Микроклимат

Благоприятные (комфортные) метеорологические условия на производстве являются важным фактором в обеспечении высокой производительности труда и в профилактике заболеваний. При несоблюдении гигиенических норм микроклимата снижается работоспособность человека, возрастает опасность возникновения травм и ряда заболеваний, в том числе профессиональных.

Оптимальные и допустимые параметры температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в таблице 19, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [10] и СанПиН 2.2.4.548-96 [1].

Таблица 19 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
Холодный	22-24	18-25	40-60	15-75	0.1	Не больше 0.1
Теплый	23-25	20-28	40-60	55 при 28°С	0.1	0.1-0.2

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют

вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

В зимнее время в помещении предусмотрена система отопления. Она обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В соответствии с характеристикой помещения расход свежего воздуха приведен в Таблице 20.

Таблица 20 – Расход свежего воздуха

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение
Объем до 20 м ³ на человека	Не менее 30
20...40 м ³ на человека	Не менее 20

6.3.2 Освещение

Правильное освещение помещений и рабочих зон одно из главных условий создания безопасных и благоприятных условий труда. При недостаточной освещенности развивается утомление зрения, понижается общая работоспособность и производительность труда, повышается опасность производственного травматизма, низкая освещенность способствует развитию близорукости.

Рабочая зона или рабочее место оператора освещается таким образом, чтобы можно было отчетливо видеть процесс работы, не напрягая зрения, а также исключается прямое попадание лучей источника света в глаза. Кроме того, уровень необходимого освещения определяется степенью точности зрительных работ. Наименьший размер объекта различения составляет 0.5 – 1 мм. В помещении присутствует естественное освещение. По нормам освещенности и отраслевым нормам, работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности для любого типа помещений.

Согласно СНИП 23-05-95 нормы на освещение для оператора поста управления берутся для производственных помещений. Эти нормы представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Нормирование освещенности для работы с ПК

1	2	3	4	5	Искусственное освещение				Естественное освещение	
					6	7	8	9	КЕО е _н , %, при	
									10	11
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	Б	1	Не менее 70	300	100*	21 18**	15	3,0	1,0
			2	Менее 70	200	75*	24 18**	20 15****	2,5	0,7

Где:

1-характеристика зрительных работ;

2-наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм;

3-разряд зрительной работы;

4-подразряд зрительной работы;

5-относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность, %;

6-освещенность на рабочей поверхности от системы общего искусственного освещения, лк;

7-цилиндрическая освещенность, лк;

8- Объединённый показатель UGR, не более;

9- Коэффициент пульсации освещённости КП, %, не более;

10-КЕО при верхнем освещении, %;

11-КЕО при боковом освещении, %

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК, представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Требования к освещению на рабочих местах с ПК

Освещенность на рабочем столе	300–500 лк
Освещенность на экране ПК	не выше 300 лк
Блики на экране	не выше 40 кд/м ²
Прямая блескость источника света	200 кд/м ²
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%

В случае отключения рабочего освещения предусмотрено аварийное освещение $E = 10$ лк.

Эвакуационное освещение предусмотрено в проходах, на лестницах, которое обеспечивает освещенность в помещениях 0,5 лк, на открытых территориях 0,2 лк.

Светильники аварийного освещения присоединяются к независимому источнику питания, а светильники для эвакуации людей к сети независимого от рабочего освещения. Для аварийного освещения применяют светильники с лампами накаливания.

6.3.3 Расчет системы искусственного освещения на рабочем месте оператора в кабинете аудитории

Расчет системы искусственного освещения проводится для прямоугольного помещения, размерами: длина $A = 5$ (м), ширина $B = 4$ (м), высота $H = 2,4$ (м), количество ламп $N = 8$ (шт).

Вычисления будут, производится по методу светового потока, предназначенного для расчета освещенности общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей. Согласно отраслевым нормам освещенности уровень рабочей поверхности над полом составляет 0,8 (м) и установлена минимальная норма освещенности $E = 300$ (Лк).

Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta), \quad (1)$$

Где: E_n – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, (Лк);

S – площадь освещаемого помещения, (m^2);

K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным $Z = 1,1$;

n – число светильников;

η - коэффициент использования светового потока, (%);

Φ – световой поток, излучаемый светильником.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ($\rho_{ст}$) и потолка ($\rho_{п}$).

Индекс помещения определяется по формуле

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} \quad (2)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно.

Произведем расчет:

$$h = H - 0,8 = 2,4 - 0,8 = 1,6 \text{ (м)}, \quad (3)$$

где h – расчетная высота подвеса светильников над рабочей поверхностью.

Экономичность осветительной установки зависит от отношения, представленного в формуле:

$$l = \frac{L}{h}, \quad (4)$$

где L – расстояние между рядами светильников, м.

Рекомендуется размещать люминесцентные лампы параллельными рядами, принимая $l = 1,4$, отсюда расстояние между рядами светильников:

$$L = l \cdot h = 1,4 \cdot 1,6 = 2,24 \text{ (м)} \quad (5)$$

Два ряда светильников будут расположены вдоль длинной стены помещения. Расстояние между двумя рядами светильников и стенами вычисляется по формуле:

$$L = \frac{(B - L)}{2} = \frac{(4 - 2,24)}{2} = 0,88 \text{ (м)} \quad (6)$$

Определим индекс помещения вычисляя по формуле (5.2) получаем:

$$i = \frac{20}{(5 + 4) \cdot 1,6} = 1,39$$

Найдем коэффициенты отражения поверхностей стен, пола и потолка.

Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен $P_{ст} = 50\%$. Так как поверхность потолка светлый окрашенный, то коэффициент отражения поверхности потолка $P_{п} = 30\%$.

Учитывая коэффициенты отражения поверхностей стен, потолка и индекс помещения i , определяем значение коэффициента $\eta = 36\%$.

Подставив все значения в формулу (1), по которой рассчитывается световой поток одного источника света, получаем:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,36} = 3438 \text{ (лм)}$$

По полученному световому потоку подбираем лампу, наиболее подходящей является лампа ЛХБР-80 со световым потоком 3460 (лм).

Выразим E из формулы (5.1):

$$E = \frac{(F \cdot N \cdot \eta)}{(k)} = \frac{(3438 \cdot 8 \cdot 0,36)}{(1,5 \cdot 20 \cdot 1,1)} = 300,044 \text{ (лм)} \quad (7)$$

Как видно из расчета, минимальная освещенность в пределах нормы.

Для того чтобы доказать, что использование люминесцентной лампы ЛБР-80-1 является наиболее рациональным, рассчитаем необходимое количество светильников по формуле:

$$N = \frac{(E \cdot k \cdot S \cdot Z)}{(n \cdot \eta \cdot F)}, \quad (8)$$

где E – норма освещенности $E = 300$ (Лк);

k – коэффициент запаса учитывающий старение ламп и загрязнение светильников, $k = 1,5$;

S – площадь помещения;

Z – коэффициент неравномерности освещения, $Z = 1,1$;

n – число рядов светильников, $n = 2$;

η – коэффициент использования светового потока, $\eta = 0,36$;

F – световой поток, излучаемый светильником.

Подставим численные значения в формулу (5.8), получим количество светильников в одном ряду:

$$N = \frac{(300 \cdot 1,5 \cdot 20 \cdot 1,1)}{(2 \cdot 3438 \cdot 0,36)} = 3,99 \approx 4 \text{ (шт)}$$

Длина одного светильника равна 1,5 (м), в одном светильнике 2 лампы ЛХБР-80. План размещения светильников приведен на рисунке 42.

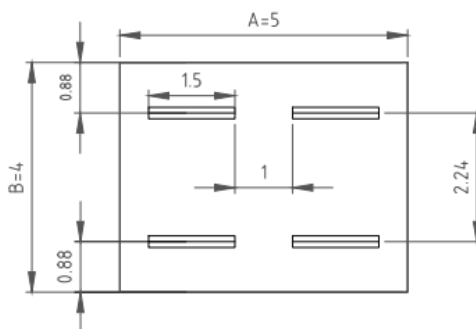


Рисунок 42 – план размещения светильников

Так как в рассматриваемом помещении количество ламп 8 (шт), по два светильника в двух рядах, следовательно, нормы безопасности по искусственному освещению в данном случае соблюдены.

6.3.4 Шум

Одним из важных факторов, влияющих на качество выполняемой работы, является шум. Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Повышенный уровень шума на рабочих местах отнесен к группе физических опасных и вредных производственных факторов. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают головную боль, головокружения, под его влиянием развивается раздражительность, снижается внимание, замедляются сенсомоторные реакции, а при чрезвычайно интенсивном действии понижаются возбудительные процессы в коре головного мозга. Воздействие шума повышает пороги слышимости звуковых сигналов, снижает остроту зрения и нарушает нормальное цветоощущение. Работа в условиях шума может привести к появлению гипертонической или гипотонической болезни, развитию профессиональных заболеваний – тугоухости и глухоте. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ(А)) на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

При выполнении основной работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 80 дБ. Допустимые уровни звукового давления в помещениях для персонала, осуществляющего эксплуатацию ЭВМ при разных значениях частот, приведены в СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Значения ПДУ звукового давления согласно этим документам представлены в таблице 23. (для постоянных шумов)

Таблица 23– ПДУ шума для поста управления

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструирование и проектирование. Рабочие места в лабораториях	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для оценки соблюдения ПДУ шума необходим производственный контроль (измерения и оценка). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия по защите от действия шума (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

6.3.5 Электромагнитные излучения

Электромагнитным излучением называется излучение, прямо или косвенно вызывающее ионизацию среды. Контакт с электромагнитными излучениями представляет серьезную опасность для человека, по сравнению с другими вредными производственными факторами (повышенное зрительное напряжение, психологическая перегрузка, сохранение длительное время неизменной рабочей позы).

Источником ЭМП в диспетчерском пункте является ПЭВМ.

ПЭВМ, при долгой работе, нагревается, что делает воздух не только слабо ионизированным, но и сухим. Такой воздух является очень вредным, он тяжелый для дыхания и способствует, при благоприятной среде, развитию многих аллергических заболеваний и, соответственно болезней органов дыхания.

Нормы электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ приведены в таблице 24 и таблице 25, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [10].

Таблица 24 - Временные допустимые ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Таблица 25- Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 В/м

Для оценки соблюдения уровней необходим производственный контроль (измерения). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В этом разделе наиболее актуальным для аудитории корпуса будет рассмотрение вида ЧС - пожар, определение категории помещения по пожаро взрывобезопасности и регламентирование мер противопожарной безопасности.

Основным поражающим фактором пожара для помещений данной категории является наличие открытого огня и отравление ядовитыми продуктами сгорания оборудования.

6.4.2 Анализ причин, которые могут вызвать ЧС на производстве при внедрении объекта исследований

Пожар в помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

Рабочее место оператора в аудитории, должно соответствовать требованиям ФЗ Технический регламент по ПБ [12] и норм пожарной

безопасности (НПБ 105-03) [13] и удовлетворять требованиям по предотвращению и тушению пожара по ГОСТ 12.1.004-91 и СНиП 21-01-97.

Согласно НПБ 105-2003 [13] в зависимости от характеристики и количества веществ обращающихся в производстве, производства подразделяются по пожарной и взрывной опасности на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение аудитории относится к категории В – горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнем (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов).

К причинам электрического характера относятся: короткое замыкание; перегрузка проводов; большое переходное сопротивление; искрение; статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Причины возникновения короткого замыкания: ошибки при проектировании, старение изоляции, увлажнение изоляции.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

Пожарная опасность переходных сопротивлений – возможность воспламенения изоляции или других близлежащих горючих материалов от тепла, возникающего в месте аварийного сопротивления (в переходных клеммах, переключателях и др.).

6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Пожарная безопасность может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты. Пожарная профилактика включает комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожара или уменьшение его последствий. Активная пожарная защита – меры, обеспечивающие успешную борьбу с пожарами или взрывоопасной ситуацией.

Пожарная защита должна обеспечиваться применением средств пожаротушения, а также применением автоматических установок пожарной сигнализации.

Для исключения возникновения пожара необходимо:

- вовремя выявлять и устранять неисправности;
- не использовать открытые обогревательные приборы, приборы кустарного производства в помещении лаборатории;
- определить порядок и сроки прохождения противопожарного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму, а также назначить ответственного за их проведения.

Также должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- обеспечение эффективного удаления дыма, т.к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- обеспечение правильных путей эвакуации;
- наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Для тушения пожаров на участке производства необходимо применять углекислотные (ОУ-5 или ОУ-10) и порошковые огнетушители (например, типа ОП-10), которые обладают высокой скоростью тушения, большим

временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнем.

Помещение оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. В качестве пожарных извещателей в помещении устанавливаются дымовые фотоэлектрические извещатели типа ИДФ-1 или ДИП-1.

Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации.

План эвакуации представляет собой заранее разработанный план (схему), в которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации по п. 3.14 ГОСТ Р 12.2.143-2002.

Согласно Правилам пожарной безопасности, в Российской Федерации ППБ 01-2003 (п. 16) в зданиях и сооружениях (кроме жилых домов) при одновременном нахождении на этаже более 10 человек должны быть разработаны и на видных местах вывешены планы (схемы) эвакуации людей в случае пожара.

План эвакуации людей при пожаре из аудитории №027 корпуса №10, представлен на рисунке 43

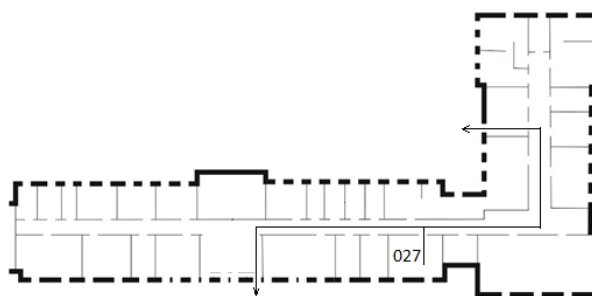


Рисунок 43 - План эвакуации при пожаре

Ответственность за нарушение Правил пожарной безопасности, согласно действующему федеральному законодательству, несет руководитель объекта.

6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно–правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами.

В условиях непрерывного производства нет возможности использовать режим рабочего времени по пяти– или шестидневной рабочей неделе. По этой причине применяются графики сменности, обеспечивающие непрерывное обслуживание производственного процесса, работу персонала сменами постоянной продолжительности, регулярные выходные дни для каждой бригады, постоянный состав бригад и переход из одной смены в другую после дня отдыха по графику. На объекте применяется четырехбригадный график сменности. При этом ежесуточно работают три бригады, каждая в своей смене, а одна бригада отдыхает. При составлении графиков сменности учитывается положение ст. 110 ТК о предоставлении работникам еженедельного непрерывного отдыха продолжительностью не менее 42 часов.

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно–правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами.

К таким органам относятся:

- Федеральная инспекция труда;
- Государственная экспертиза условий труда Федеральная служба по труду и занятости населения (Минтруда России Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России)).
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др.

Так же в стране функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, положение о которой утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации, в соответствии с которым, система объединяет органы управления, силы и средства.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан модуль микроперемещений на основе пьезоэлектрического преобразователя напряжения, удовлетворяющий поставленным требованиям точности и динамики. Были предложены два варианта реализации интегратора перемещений, произведен их расчет и моделирование. Каждый из предложенных вариантов обладает своим достоинствами и недостатками, поэтому выбор конкретного технического решения должен производиться исходя из технико-экономических требований, предъявляемых к модулю.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Были изучены существующие типы приводов микроперемещений и преобразователи энергии, используемые в них;
- на основании анализа был выбран и рассчитан пьезокерамический актюатор, способный удовлетворить заданным динамическим требованиям;
- изучены существующие типы преобразователей виброперемещений в поступательные однонаправленные;
- исходя из сложности реализации существующих преобразователей движения, был разработан и рассчитан оригинальный механизм преобразования, основанный на поочередной работе магнитов;
- была пересмотрена конструкция преобразователя движения и предложено новое техническое решение, основанное на использовании вспомогательных пьезопакетов;
- произведен расчет модернизированного преобразователя движения;
- разработаны функциональные схемы;
- создана модель привода с магнитным преобразователем в пакете MatLAB Simulink.

- на основании созданной модели были опытным путем получены графики перемещений торца преобразователя и выходного звена при различных значениях подаваемого напряжения;
- разработаны анимированные трехмерные модели приводов в САПР.

Каждый из разработанных модулей состоит из двух частей – силовой и преобразующей. Силовая часть представляет собой пакетный пьезокерамический преобразователь, способный совершать виброперемещения под действием приложенного к нему переменного напряжения. Амплитуда перемещения торца преобразователя зависит от двух факторов – амплитуды подаваемого напряжения и величины внешней нагрузки. Преобразующая часть первого технического решения представляет собой интегратор, состоящий из пары магнитов – подвижного и неподвижного, и выходного звена. Зацепление выходного стержня с торцом актюатора осуществляется посредством силы трения, создаваемой подвижным магнитом. Исключить нежелательные перемещения выходного звена вследствие внешней нагрузки позволяет неподвижный магнит, фиксирующий стержень на сжатии пьезопакета. Преобразующая часть второго технического решения представляет собой интегратор, состоящий из двух пар вторичных пьезопакетов (пары подвижных и пары неподвижных – закрепленных в корпусе). Зацепление в этом случае осуществляется посредством зажатия рабочего органа между вторичными пьезопакетами. Фиксация и предупреждение «вдавливания» рабочего органа под действием внешнего усилия также осуществляется за счет пары неподвижных пьезоэлементов.

Примененные в работе принципы получения однонаправленного перемещения выходного звена не имеют аналогов в существующих СМП и позволяют использовать в качестве исполнительного элемента не сложный биморфный пьезокерамический актюатор, а легко реализуемый, не требующий больших материальных затрат на производство, составной пакетный пьезопреобразователь.

Каждое из технических решений имеет свои преимущества и недостатки, однако можно выделить общие сильные стороны разработанных модулей:

- Высокий КПД;
- относительная простота реализации;
- возможность работы в крайне агрессивных средах;
- универсальность применения;
- низкая стоимость материалов.

Список использованных источников

1. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа. 1990. - 400 с.
2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение. 1981. - 392 с.
3. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние. 1990. - 272 с.
4. Архитектурная бионика/ Под ред. Ю.С. Лебедева. М.: Стройиздат. 1990. -269 с.
5. Афонин С.М. Параметрическая структурная схема пьезопреобразователя //Изв. АН МТТ. 2002.№6. С. 101-107.
6. Балкаров О.М., Леонов А.М. Биморфный пьезокерамический элемент для сканирования лазерного луча // Труды МВТУ. 1974. № 199. С. 101-105.
7. Бансявичус Р.Ю., Рагульскис К.М. Вибродвигатели. Вильнюс: Мокслас. 1981.- 193 с.
8. Бараускас Р.А. и др. Расчет биморфных пьезокерамических элементов. //Вибротехника. 1983. Вып 46 №2 С 118-127.
9. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития МЭМС за рубежом //Микросистемная техника. 1999. №1.
10. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Т. 6. 2-е изд./ Ред. совет К.В. Фролов М.: Машиностроение. 1995. - 456 с.
11. Гордиенко И.Е., Чутко В.М. Конечно-элементный расчет связанных электроупругих колебаний составного преобразователя. Киев: Наукова думка. 1986.-208 с.
12. Даринцев О.В. Алгоритмы адаптивного и интеллектуального управления мобильным микроманипуляционным роботом. Автореферат дисс. канд. тех. наук. Уфа: УГАТУ, 1999. 24 с.

13. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. СПб.: Политехника. 1994. - 608 с.
14. Джамал Рисан Ахмед. Алгоритмические и аппаратурные способы коррекции гистерезиса в пьезоэлектрических переключателях оптических каналов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.13.05. -Одесса, 1991. 16 с.
15. Домаркас В.И., КажисР.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974, - 220 с.
16. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Микроманипуляционные системы с биморфными пьезоприводами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2002. № 1.С. 73-79.
17. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические устройства мехатрони-ки // Мехатроника. 2002. № 2. С. 38 -46.
18. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. №5. С. 40-44.
19. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводами // Микросистемотехника. 2003. № 3. С. 34 38.
20. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводом // М-лы XIII научн.-технич. конф. «Экстремальная робототехника» СПб.: СПбГПУ, 2003. С. 85 92.
21. Ерофеев А.А., Бойцов С.В., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Использование пьезодвигателей в приводах грубых перемещений сканирующего туннельного микроскопа // М-лы Междунар. научн.-техн. конф. «Пьезотех-ника-92», СПб.: ЛДНТП, 1992. С. 55 57.
22. Ерофеев А.А., Поплевкин Т.А. Способы и системы компенсации пьезоэлектрического гистерезиса // Тр. ЛПИ. II. 1988. - №423. - С. 38 - 43.

23. Ерофеев С.А., Ерофеев А.А., Смирнов А.Б. Сферический пьезодвигатель многокоординатных систем точного позиционирования // М-лы Междунар. научн.-техн. конф. «Пьезотехника-2000». М.: Изд-во МИРЭА. 2000. С. 266-268.
24. Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. Л.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
25. Иванов А. А. Проектирование систем автоматического манипулирования миниатюрными изделиями. М.: Машиностроение, 1981.-271 с.
26. Катус П.Г., Катус Г.П. Микродатчики, реализованные на основе МЭМС и МОЭМС // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 3 7.
27. Кеди У. Пьезоэлектричество и его практические применения. М.: Изд. иностр. лит., 1957. - 720 с.
28. Коваленко В.А. Пьезоэлектрический двигатель вращения как элемент автоматических систем: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.05. -М., 1998. -15 с.
29. 43 Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневецкий В.С. Пьезоэлектрические двигатели. М.:Энергия, 1980. 110 с.
30. 54 Сайт Sandia National Laboratory, <http://www.mems/sandia/gov/>
31. 55 Сайт АО ЭЛПА <http://www.elpapierzo.ru>.
32. 56 Сайт журнала «Микросистемная техника», <http://www.microsystems.ru>.
33. 57 Сайт Инструментального колледжа лондонского университета <http://www.ucl.ac.uk/g23istruments/>
34. 58 Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические устройства микрогидроавтоматики // Труды Междунар. Бизнес-Форума «Информационные и бизнес-технологии XXI века» СПб.: СПбГТУ, 2000. С. 53 56.

Приложение А

Microdisplacement systems

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM5Б	Баранов Николай Александрович		

Консультант проф. кафедры:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Рудницкий В. А.	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Пичугова И.Л.			

Microdisplacement systems

Microdisplacement (MDP) miniature systems are used in the instrument production for decades and mainly associated with optical-mechanical devices and watch movements. A huge jump in the late 20th and early 21st centuries in the development of technologies related to the production of computer technology has allowed creating fundamentally new devices with microsystem technology. Instead of the fact that in 60-80 years of last century the electronic components had been already developed and ways for further miniaturization had been clearly defined, prospects for miniaturization of electromechanical items were vague.

That is why a qualitative leap to reduce the size of mechanical devices couldn't happen as mechanics suited to their "physical" limit. Robotic systems with micro displacements for automatic building of miniature items were unreliable, cumbersome, required the constant presence of operators and service engineers. By 70–80 years of the 20th century, a clear contradiction between the highly developed production of electronics and backward production of miniature electro-mechanical systems appeared, and this fact hampered the traditional technologies of precision engineering and instrumentation low-automatic control. The increased requirements for military and aerospace technology, medicine, environmental monitoring and security of nuclear power plants gave impetus for the development of miniature and micro-electromechanical systems (MEMS). Here we need to clarify what we mean by the terms "miniature" and "micro". Miniature electro-mechanical systems can be roughly classified as devices which dimensions are ranged from 10x10x10 mm to 50x50x50 mm, everything that has smaller dimensions can be attributed as microsystems. Microdisplacements systems comprise devices that enable the movement of the output link to a distance of a millimeter increment as low as a tenth of a micrometer. Furthermore, the micro-electromechanical systems may be classified as micro displacements systems, in particular working bodies.

Huge investments in the production of microelectronic technology and especially in the production of large-scale silicon-based integrated circuits made it

possible to find a promising way for micro-mechanical devices and systems development. Surface and bulk micromachining of semiconductor materials based on the methods of photographic and X-ray lithography (LIGA-technology) that enables microscopic objects to create almost any shape with dimensions of up to several microns. These technologies, which enable precise control of the depth of etching, the side walls forming, and forming the channels within the array in semiconductor material, can produce bulky mechanical structures which have a relatively high strength and rigidity necessary for the transmission of forces and torques in micromechanical transmissions.

Thus, the basis for the development of microelectronics, MEMS is a technology that is used in almost all products based on silicon. Nanodimensional electromechanical systems, due to the integrating effect of the combination of a drive elements and controls, are a good example of mechatronics effective principles. This contributes to the overall manufacturing process of electronic components and mechanical parts.

Since the last decades of the 20th century, a rapid increase in the number of experimental and implemented projects took place. They are united by a common technological approach to the manufacture of all components of Microsystems Engineering. An important result of this integrated approach to development is that a huge amount of the elements of automated systems are combined in a relatively small volume.

It should be emphasized that the creation of MDP is based not only on the technology of production of electronic components, but also on traditional technologies of precision engineering and instrument making.

Analyzing the patent and literature references, we can define the main directions of development of MDPs (Figure 1). According to the purpose and functionality of these systems, they can be divided into micromanipulation system (MMS), autonomous micro-robots (SAM) and component MDPs.

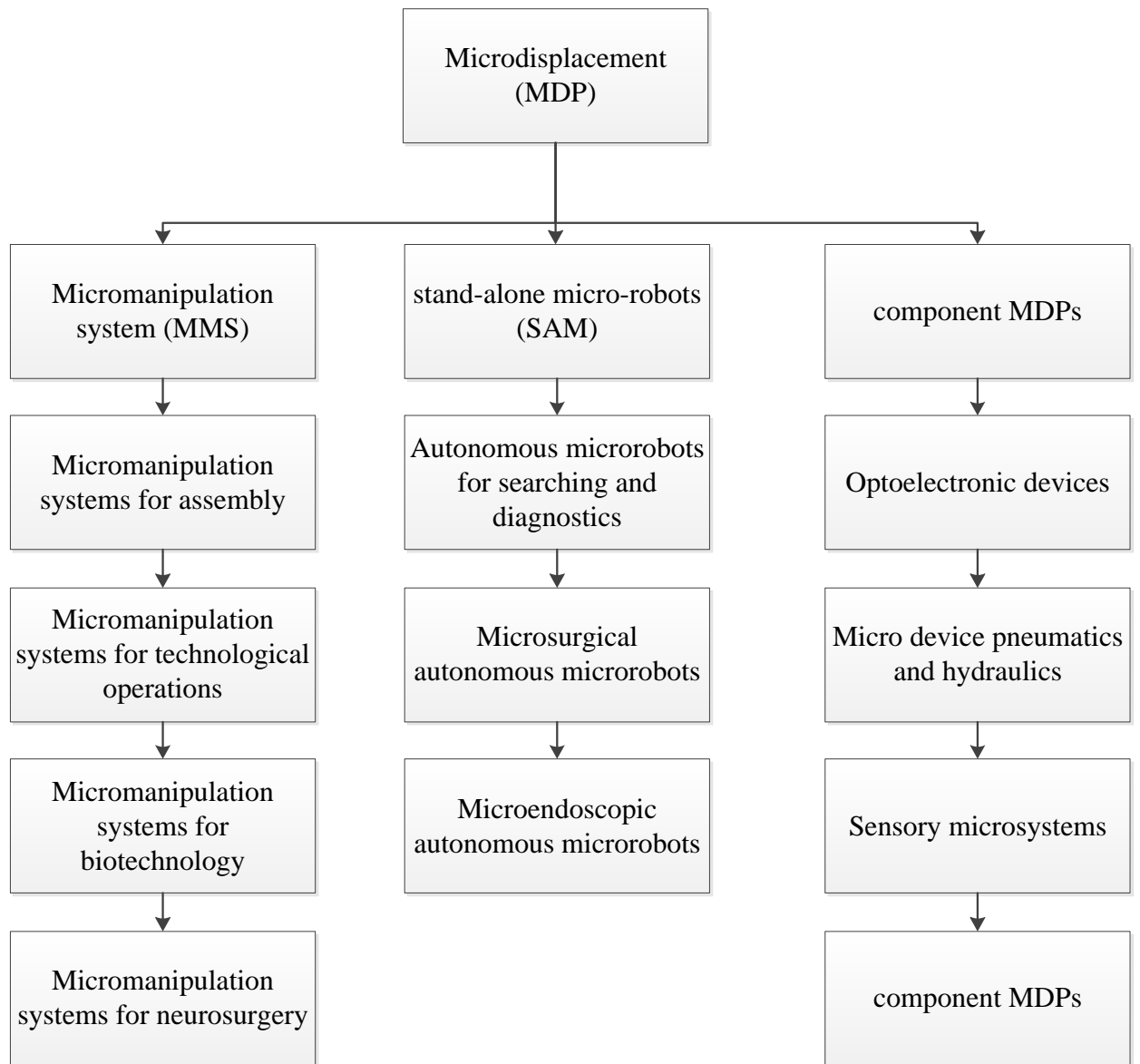


Figure 1. The main perspective directions of the development of the MDP

MMSs are automated electromechanical systems designed to perform processing operations or to move (manipulate) mini- and microdimensions. These include mechanical assembly MMS micromechanical devices. Such systems are similar in function and features of the robotic arm assembly of precision engineering, they have a higher positioning accuracy and fewer strokes. Depending on the progress, working body of MMSs may vary from 0.2 mm to 5 mm, and positioning accuracy (resolution or degree) may vary from 0.5 mm to 0.05 mm. MMS for processing operations are intended for micro welding, brazing, gluing microscopic as well as for control and testing of microdevices parameters (e.g.,

electrical resistance measurement for microcircuits). Their characteristics are similar to the previous case, but their specific character is that the working body should control applied pressure in the range from 103 N to 0.1 N.

Currently, widespread MMSs are intended for biological research and technology. The operations of artificial fertilization have been possible since the 90s of the last century because of MMSs. MMSs are applied for the study of cell membrane. It requires a higher resolution than in the previous case (the degree of resolution of the order of 0.05 mm).

The first ophthalmic microoperations using MMSs were carried out in the late 90s, patented in the U.S. Micromanipulators allow operations on vessels that supply the optic nerve. However, they are still quite primitive and perform only auxiliary actions. The accuracy of mining movement is quite low – about 0.05 mm. In the future the ability of such operations at a distance is planned, i.e. a highly skilled surgeon and at the same time the operator of micromanipulator can be situated in the clinic and the patient may be placed in the operating room as well as in any place with the Internet connection. Remote control is possible only in the presence of highly reliable communications systems and equipment sensor devices. Therefore, the prospects in this area are very high.

The analysis of different references and existing developments shows that promising directions for creating engines for nano- and microdisplacement are based on the use of piezoelectric effect. Therefore, the aim of this work is to develop a drive that includes an energy converter that can provide forward motion of the output with amplitude level of 20 mm and force no less than 30N. The drive under development must be simple to implement and inexpensive.

For this purposes the following tasks should be solved:

1. Studying basic types of energy converters into mechanical energy;
2. Choosing an energy converter that can satisfy the specified requirements;
3. Calculating the selected energy converter;
4. Finding the optimal design solution that allows movements in micrometer dimensions;

5. Selecting and calculating the elementary basis on which this design decision will be implemented;
6. Simulating the system in MatLab Simulink.
7. Creating a 3D-model of the module in computer-aided design Autodesk Inventor Professional;
8. Searching alternative design solutions that, while maintaining the power and precision performance of the module, allow increasing its speed and ease of implementation.
9. Simulating its work;
10. Creating a modernized 3D-model of the module in computer-aided design Autodesk Inventor Professional.

Piezoceramics origins

Piezoceramics are materials that demonstrate what is known as the piezoelectric effect.

Piezoelectricity is the interaction between electrical and mechanical systems. The direct piezoelectric effect causes electric charge to be produced as a result of mechanical stress, whereas the converse effect causes mechanical strain to be generated as a result of an applied electric field (Figure 1).

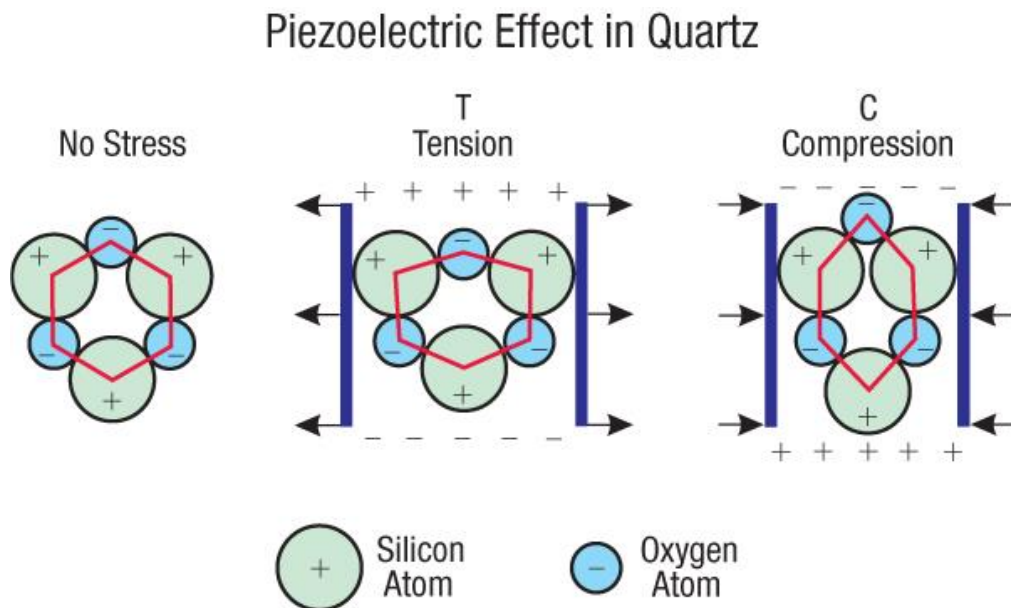


Figure 1. Piezoelectric effect in a quartz crystal

The principle of piezoelectricity and direct piezoelectric effect was first demonstrated in the late 19th century by the Curie brothers. Later in the 20th century, piezoelectric devices were first used in practical applications like sonar. The early 1940s saw an intense search for man-made piezoelectric crystals suitable for electroacoustic transducers.

The phenomenon of the pseudo-effect is explained by the displacement of ions, causing the electric polarization of the crystal's structural units. When an electrical field is applied, the ions are displaced by electrostatic forces, resulting in the mechanical deformation of the whole crystal. Piezoelectric crystals are used in such devices as the transducer, record-playing pickup elements, and the microphone.

Quartz, Rochelle salt, Topaz are a few examples of naturally occurring crystals that exhibit the piezoelectric effect. Apart from these, there are ferroelectric ceramic materials like lead zirconate titanate (PZT) that have been developed with improved piezoelectric properties. Because they are ceramics (piezoceramics), they can be formed to most any shape or size (Figure 2).

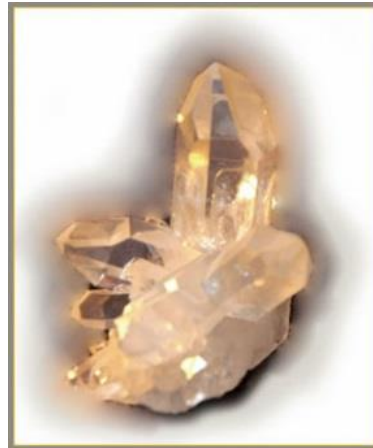


Figure 2. Natural piezoelectric crystal of quartz

The polarization of dipoles in piezoelectric material affects the direction of the piezoelectric effect in the material. Prior to polarization, the dipoles are randomly directed (Figure 3). When this piezoelectric material is heated above a ‘Curie’ temperature (TC) under the application of a strong electric field, all dipoles are forced to align in the direction of polarization. The Curie temperature is the temperature at which intrinsic dipoles of a material change direction, and the material’s spontaneous electric polarization changes to induced electric polarization, or vice versa. When the ceramic cools, the ions “remember” this polling and act accordingly.

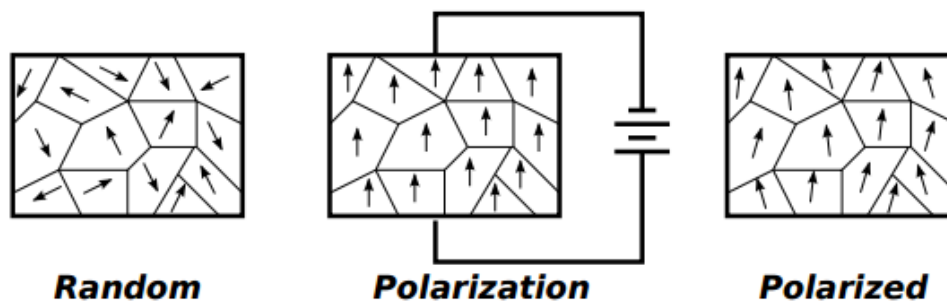


Figure 3. Polarization process to generate piezoelectric effect

After cooling, when the external field is reduced to zero, some dipoles switch back but most of the dipoles only become less strongly aligned, and do not return to their original alignment.

The absence of centre of symmetry in a material is a required condition for the material to be piezoelectric in nature. Piezoelectric media are therefore intrinsically anisotropic. Piezoelectricity provides a coupling between elastic and dielectric phenomena and hence the properties are always discussed with reference to the elastic and dielectric constants. Convention and the IEEE Standard on piezoelectricity state that the poling axis can be termed the “3” direction with the same positive/negative sense as the applied voltage field.

The piezoelectric effect provides the ability to use these materials as both a sensor and actuator. Strain, for example, can be measured by capturing the voltage created across the material when it is strained. As a sensor, these materials can also be used for damage detection in structures in which they are imbedded. Piezoceramics can be used as actuators because they can strain or displace when an electric voltage is applied across the poling axis. This makes Piezoceramics good candidates for valve actuation or active control systems. Piezoceramics are also used as structural dampers because of their ability to efficiently transform mechanical energy to electrical energy and vice versa. When a piezoelectric element, PZT, is used for passive vibration suppression, the force from the vibration strains the PZT, which generates a voltage difference. This voltage, electrical energy, can then be dissipated through a resistive circuit.

For example, the use of piezoelectric elements for passive electronic damping has already been proven to work effectively in commercial products such as the K2 ski (Smart Ski Technology). The K2 ski designers used a resistor and capacitor (RC) shunt circuit to dissipate the vibration energy absorbed by piezoelectric devices imbedded into the skis (Figure 4).

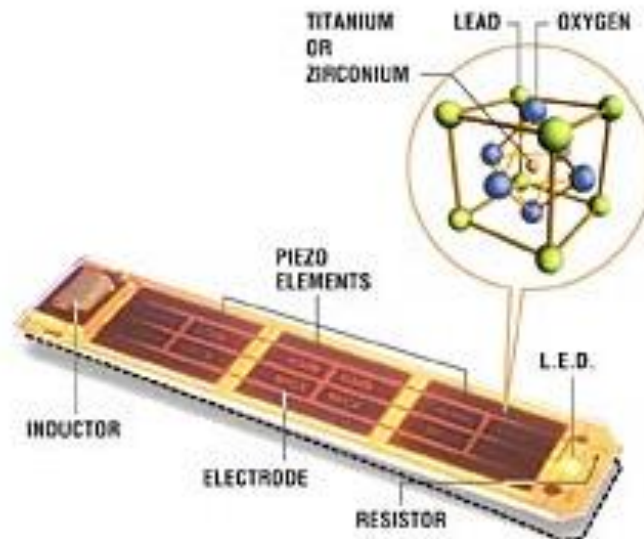


Figure 4. Smart Ski Technology

Active Control eXperts, Inc. developed the Copperhead ACX bat that has shunted piezoceramic materials that convert the mechanical vibration energy into electrical energy. Anyone who has played baseball or softball for some length of time has probably experienced the painful sting resulting from a poorly hit ball. The reason bats sting is because the impact with the ball causes the bat to vibrate, and the vibrations in the handle result in a painful sensation in the hands of the player holding the bat, especially in the top hand. Developed method of damping significantly reduces the sting during impact and gives the bat a larger sweet spot (Figure 5).

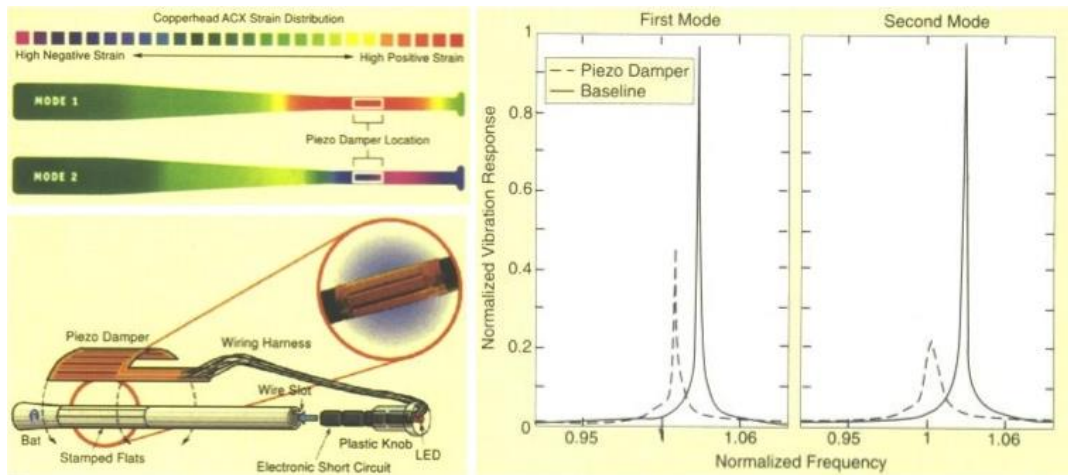


Figure 5. ACX Piezoelectric Damper

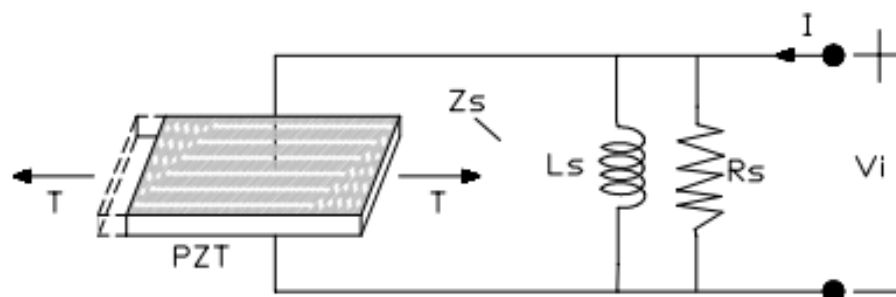
Structural controls have recently been used to reduce acoustic radiation from vibrating structures, also referred to as structure-borne noise. Almost all of the studies have involved the implementation of an active control system. Sun et al. used piezoelectric actuators to reduce the structural vibrations and interior noise of a uniform cylindrical shell that models a fuselage section. Two distributed piezoelectric actuators were developed based upon the understanding of structural-acoustic coupling properties of the system.

Control of sound radiation from a plate in an acoustic cavity using smart materials was investigated by Shields. They applied a patch of active piezoelectric damping composites to the center of a 29.8-cm square plate made of thin aluminum. The patch was made of PZT fibers embedded in resin. Using a derivative feedback controller, they obtained a 70% attenuation of vibration and sound pressure levels. Active control of sound radiating from a plate was also demonstrated by Varadan et al. on a thin square metal plate [11]. The structural vibrations of the plate responsible for the sound/noise radiation were actively controlled with piezoelectric sensors and actuators. This effective method of active noise control was demonstrated for the interior noise of a cabin enclosure by Varadan. They used discrete piezoelectric actuators and sensors for the active vibration control of the walls of the enclosure. They were able to achieve significant global noise reduction within the cavity for the dominant modes of the radiation panel. The active

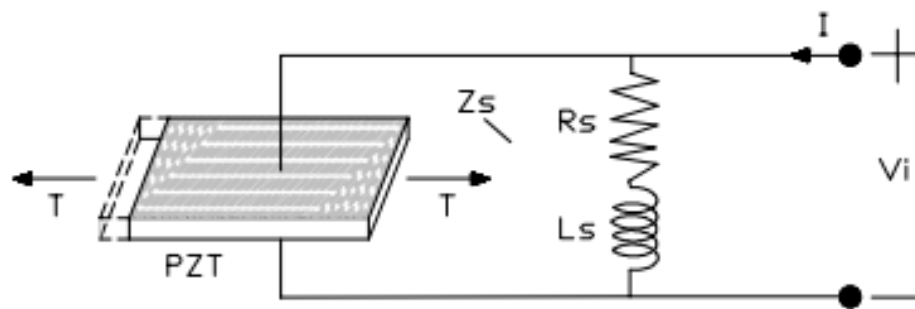
structural acoustic control was developed by integrating piezoceramic materials as sensors and actuators into some structural elements of the car. By controlling the vibrations, the structure-borne noise was reduced. A simple feed forward a control system was implemented to control the floor panel vibrations.

Active control using piezoceramics has been implemented to control the sound transmission through a panel. Henriouille et al. added a flexible honeycomb structure with a piezoelectric PVDF (polyvinylidene fluoride) layer to a double panel partition. With active control of the PVDF, they were able to increase the transmission loss by 10 dB at frequencies below 400 Hz. Xiaoqi et al. used active control with piezoelectric actuators and sensors to increase the transmission loss through a thin aluminum plate. The plate was actively controlled at the resonance frequencies of the passive plate where the isolation performance was poor. With one sensor and one actuator, a global sound reduction of 15-22 dB was achieved at the first three resonance frequencies.

In addition to the K2 ski designers, many researchers have investigated the use of passive electric shunts as a potential way to suppress vibrations. In 1979, Forward was the first to suggest the possibility of using passive electrical shunts with piezoelectric elements for vibration damping and control. Forward experimentally investigated the effect of using inductive shunting with a piezoelectric element on a metal beam. Hagood and von Flotow developed the first quantitative analytical models for piezoelectrics shunted with two types of circuits, a resistor circuit (RC) and a resistor and inductor circuit (RLC) (Figure 6).



(a) Shunt Circuit Concept Used by Wu



(b) Shunt Circuit Concept Used by Hagood and von Flotow

Figure 6. Shunt Circuit Design Concepts Used by Hagood and Wu

They showed that when a PZT was attached to a resistor circuit, the frequency dependence of the PZT was similar to visco-elastic damping materials. A PZT shunted with the inductor and resistor had an electrical resonance that could be tuned to be similar to a vibration absorber. Hagood and von Flotow validated both circuit models experimentally on a cantilevered beam and developed techniques that analyzed shunted systems. Further piezoelectric theory was developed by Davis and Lesieutre on the damping performance prediction of shunted piezoceramics. They developed a method where the damping is predicted from the effective fraction of the modal strain energy stored in the PZT, the effective piezoelectric material loss factor, and the frequency shaping factor. They determined the strain energy factor using finite element methods, the loss factor to be related to the electromechanical coupling coefficient, and the frequency shaping factor from the dynamic response of the shunting circuit.

Since Hagood and von Flotow's initial research, many have worked to understand, optimize, and improve shunting techniques. Edberg, for instance, replaced the heavy commercial inductor used by Hagood with a lightweight electronic circuit. They also showed that it was possible to simultaneously dissipate two vibration modes using one tuned shunt circuit. Hollkamp also expanded the piezoelectric theory to show that it was possible to suppress multiple modes using a single PZT.

All in all, this chapter presents background information on piezoelectric materials including an introduction to the piezoelectric effect and possible application of piezoelectric materials.

A literature review has been made to present research topics related to this study and to provide additional background information on piezoelectric materials. Finally, the shunt circuit design used for this study has been explained in detail.