

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка пьезопривода

УДК: 62-8:681.586.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Дронов Даниил Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Фех Алина Ильдарона			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4,5; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2,3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Иметь представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии отрасли, навыки проведения работ с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС ВО (УК-5, ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
По профилям подготовки		
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, 7,8), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)

P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС ВО (ПК-2, 9, 10, 11), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов ЕU-АСЕи FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-АСЕ и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-АСЕ и FEANI
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-АСЕ и FEANI
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-АСЕ и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.003, «Работник по эксплуатации оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций»)
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-АСЕ и FEANI ,требования профессиональных стандартов (40.011, «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»)

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Гарганеев А.Г.
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Дронову Даниилу Владимировичу

Тема работы:

Разработка пьезопривода	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	27.02.2020 № 58-29/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (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.).</p>	<p>Система микроперемещений на основе пьезокерамического привода Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (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).</p>	<p>Титульный лист Задание Реферат Введение Раздел 1 Обзорная часть Раздел 2 Актюаторы Раздел 3 Проектирование системы микроперемещений на основе пьезокерамического пакетного преобразователя Раздел 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Раздел 5 Социальная ответственность Заключение Список литературы Приложение</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>- функциональная схема пьезопривода; -имитационная модель; -графики процессов перемещений преобразователя</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основное исследование</p>	<p>Качин О.С.</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Спицына Л.Ю.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Фех А.И.</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Пташкин А.С.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</p>	
<p>Раздел 1 Общие сведения об системе микроперемещения. Раздел 2 Происхождение пьезокерамики.</p>	
<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>15.02.2020 г.</p>

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин О.С.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Дронов Д.В.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения осенний/ весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2020	Календарное планирование работ по теме	3
12.03.2020	Описание объекта исследования	3
20.03.2020	Подбор и изучение материалов по теме	3
22.03.2020	Составление и утверждение технического задания	3
28.03.2020	Расчет основных параметров	3
11.04.2020	Исследование работоспособности пьезопривода	6
15.04.2020	Анализ полученных данных	3
25.04.2020	Контроль качества выполнения проекта и консультирование студента	3
02.05.2020	Оценка эффективности проделанной работы	3
10.05.2020	Технико-экономические расчеты	3
12.05.2020	Вопросы экологической безопасности	3
15.05.2020	Составление пояснительной записки	4
22.05.2020	Итого	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень / звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин О.С.	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень / звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Дронову Даниилу Владимировичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Суммарный бюджет затрат: не более 300000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 1550 руб. – материальные затраты; - 143602,4 руб. – затраты по основной заработной плате исполнителей темы; - 21540,36 руб. – затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы; - 1383,3 руб. – амортизация; - 43547,83 руб. – отчисления во внебюджетные фонды; - 32791,6 руб. – накладные расходы.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Согласно Налоговому кодексу РФ отчисления на социальные нужды составляют 30 %, из них: 22% - пенсионное страхование; 5,1 % - медицинское страхование; 2,9 % - социальное страхование (больничные).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Анализ конкурентных технических решений
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ; определение трудоемкости работ; разработка графика Ганта.
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование бюджета затрат на научное исследование: заработная плата (основная и дополнительная); отчисления на социальные цели; накладные расходы
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности проекта, расчет экономической эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Сегментирование рынка</i> 2. <i>Портрет потребителя</i> 3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i> 4. <i>Диаграмма FAST</i> 5. <i>Матрица SWOT</i> 6. <i>График проведения и бюджет НИИ</i> 7. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ</i> 8. <i>Потенциальные риски</i> 	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Дронов Даниил Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Дронову Даниилу Владимировичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Разработка модели пьезокерамического актюатора.

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования.	<i>Объектом исследования являются техническое решение по разработке модели актюатора на пьезокерамической основе.</i>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</p> <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"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. От 27.12.2018); – ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»; – СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий; – ГОСТ 12.2.061-81 «Общие требования безопасности к рабочим местам»; – ГОСТ 12.4.011 – 89 ССБТ. Средства защиты работающих.
<p>2. Производственная безопасность</p> <p>2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды.</p> <p>2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов</p>	<p><i>Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке имитационной модели частотно регулируемого электропривода двигателя ДКС:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Отсутствие или недостаток естественного света; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – электробезопасность
<p>3. Экологическая безопасность</p>	<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на литосферу – решение по обеспечению экологической безопасности

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – Анализ 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. – Пожаровзрывоопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	09.03.2020г
--	-------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Фех Алина Ильдаровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Дронов Даниил Владимирович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 139 страниц, 47 рисунков, 30 таблиц, 47 источников.

Ключевые слова: система микроперемещений, пьезоэлектрический привод, пьезокерамика, привод микроперемещений, система управления микроперемещений с пьезоэлектрическим приводом на основе пьезокерамического пакетного преобразователя.

Объектом исследования является система микроперемещений с пьезоэлектрическим приводом на основе пьезокерамического пакетного преобразователя.

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

Сделан расчет динамических параметров данного преобразователя, разработана и рассчитана система преобразования перемещений в поступательные однонаправленные.

На основе проведенных расчетов была создана модель привода в программной среде MATLAB Simulink 2018a.

Диссертация выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2016 на листах белого формата А4.

Оглавление	
Введение.....	15
Раздел 1. Обзорная часть.....	17
1.1. Пьезокерамические преобразователи	23
1.2. Природа прямого и обратного эффекта	23
1.3. Пьезоэлемент	27
Раздел 2. Актюаторы	29
2.1. Виды и применение	29
2.2. Пьезокерамические актюаторы	30
2.3. Конструктивные элементы пьезопроводов	31
2.4. Перспектива применения пьезопроводов	34
2.5. Современные производители пьезопроводов	35
Раздел 3. Проектирование системы микроперемещений на основе пьезокерамического пакетного преобразователя	46
3.1. Расчет пьезокерамического преобразователя пакетного типа	46
3.2. Подбор марки пьезокерамики	47
3.3. Разработка преобразователя движения	51
3.4. Функциональная схема устройства	55
3.5. Подбор и расчет элементов проектируемого модуля	57
3.5.1. Расчет параметров электромагнитов	57
3.5.2 Расчет быстродействия элементов и подбор рабочей частоты	60
3.6. Подбор транзисторов	61
3.7. Моделирование работы в системе Matlab Simulink	62
3.8. Экспериментальное исследование динамических показателей.....	68
Раздел 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	72

4.1. Предпроектный анализ	72
4.2. Инициация проекта	85
4.3. Планирование научно-исследовательской работ	87
4.4. Бюджет научно-технического исследования.....	93
4.5. Определение ресурсоэффективности исследования	99
Раздел 5. Социальная ответственность	105
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	106
5.2. Производственная безопасность	107
5.3. Экологическая безопасность	113
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	115
Заключение	120
Список публикаций	123
Список используемой литературы	124
Приложение.....	128

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 микрометровом и нано метровом диапазонах с высокой точностью позиционирования. В первую очередь такие диапазоны характерны для систем микроперемещений (СМП), оптикомеханических 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, которые указывают на актуальность данного исследования.

Большой вариант распространение получили пьезомоторы, обладающие высокими техническими показателями. Одними из перспективных видов пьезомоторов является пьезоэлектрический двигатель, функционирование исполнительных органов которых основано на пьезоэлектрическом эффекте. Явление, при котором диэлектрик деформируется на некоторую величину от приложенного к нему внешнего электрического поля, называется обратным пьезоэлектрическим эффектом. Материал, в котором возможны такие явления, называется пьезоэлектрическим.

РАЗДЕЛ 1. ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ

В зависимости от быстродействия, ходов и точности обработки 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).

- Электродинамические приводы.
- Электроосмотические приводы.
- Электростатические приводы.
- Пьезоэлектрические и электрострикционные приводы.
- Магнитострикционные 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 также инерционностью индуктивной составляющей преобразователя [1].

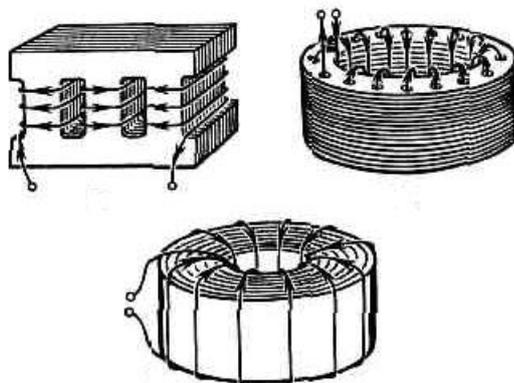


Рисунок 1.1. Магнитострикционный преобразователь

Магнитострикционные преобразователи, представленные на рисунке 1.1., 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 пьезоэлементов. Токи в таких преобразователях на порядок ниже, чем у электромагнитных приводов, благодаря этому они не подвержены тепловым деформациям. Магнитострикционные преобразователи в разы опережают остальные типы приводов по своим силовым характеристикам. Существенным недостатком магнитострикционных 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 1.2.): $\tau=10^{-2}-10^{-1}$ 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.

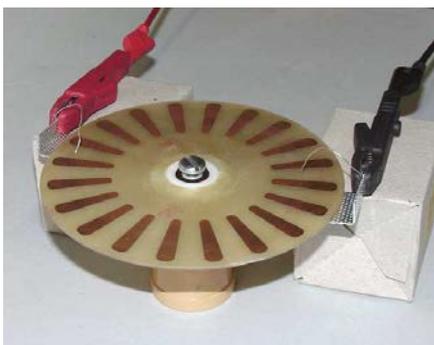


Рисунок 1.2. Электростатический привод

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 [2].

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 1.3. 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 1.3. 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 лучом поверхности металла. Основным преимуществом термолазерных приводов является отсутствие электрической цепи нагревателя [4].

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 теплоемкости, а время выключения (открытия) определяется теплопередачей в окружающую среду. Принцип действия термопневматического микроклапана показан на рисунке 1.4.

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.

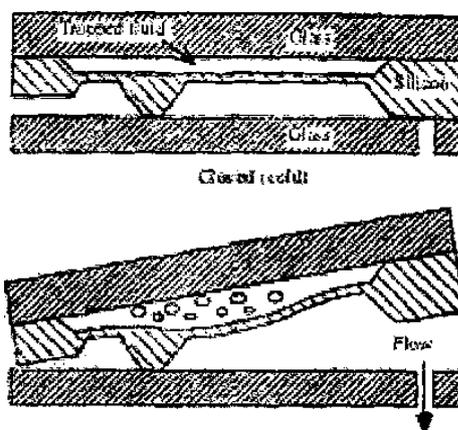


Рисунок 1.4. Термопневматический привод

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 являются электромеханические

(микроэлектродвигатели), электромагнитные и пьезоэлектрические приводы.

1.1. Пьезокерамические преобразователи

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

- 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.

1.2. 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 [5].

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 1.5. Здесь схематически показаны проекции положительных ионов - Si (заштрихованные кружки) и отрицательных ионов - O (светлые кружки) в плоскости, перпендикулярной к оптической оси Z.

На рисунке 1.5 (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 1.5, 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 1.5, в): ионы 1 и 2 «выталкиваются» из ячейки. Поэтому на грани А возникает дополнительный положительный заряд, а на грани В – отрицательный заряд [6].

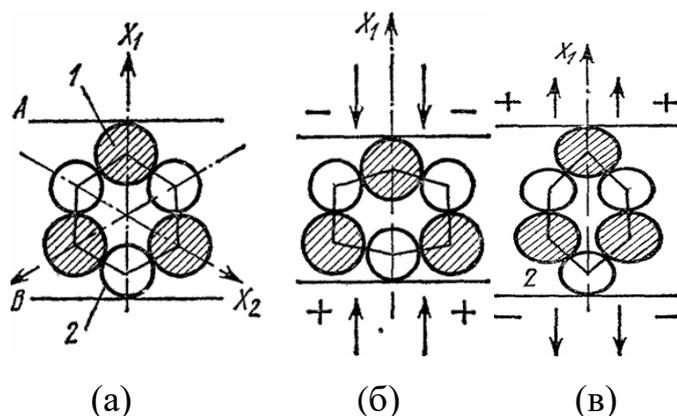


Рисунок 1.5. Пьезоэлектрический эффект в кристалле; А – недеформированный кристалл; Б – сжатие вдоль оси X; В – растяжение вдоль оси X

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.

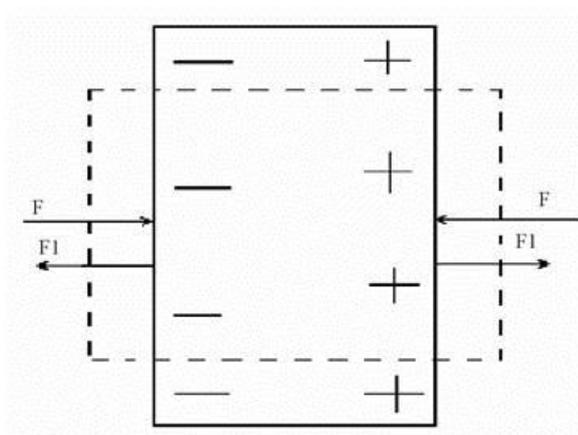


Рисунок 1.6. Связь прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов

Существование обратного пьезоэффекта вытекает из закона сохранения энергии и факта существования прямого пьезоэффекта. Рассмотрим пьезоэлектрическую пластинку, представленную на рисунке 1.6 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 1.6, то при создании такой же поляризации внешним полем пластинка будет растягиваться [7].

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.

1.3. Пьезоэлемент

Пьезоэлемент (ПЭ) – тело из пьезоэлектрика определенных размеров, геометрической формы и ориентации относительно основных кристаллографических осей (или направления поляризации в случае пьезокерамики, имеющее проводящие обкладки (электроды)).

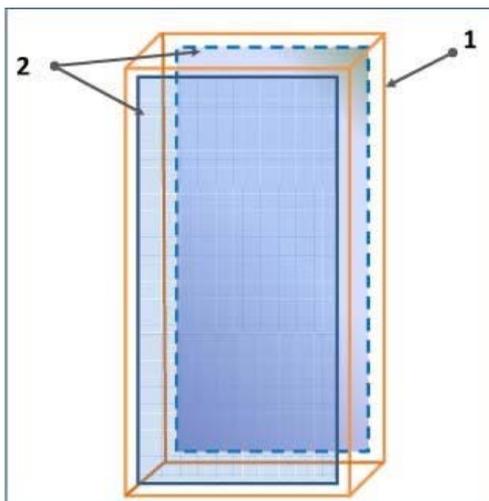


Рисунок 1.7. Пьезоэлемент (1 - пластина из пьезоэлектрика; 2 - электроды из проводящего материала, наложенные на грани пластины)

Таким образом, пьезоэлемент представляет собой электрический конденсатор с твёрдым (кристаллическим или керамическим) диэлектриком (рисунок 1.7). Особенностью такого конденсатора является наличие пьезоэлектрических свойств у диэлектрика, заполняющего пространство между электродами. Ниже будет показано, какое значение имеет наличие

пьезоэффекта и каким образом он оказывает влияние на электрические и механические характеристики. Если пьезоэлемент используется как электромеханический преобразователь, то его ориентацию выбирают исходя из требований достижения наибольшего эффекта. Внешние силы (как механические, так и электрические), воздействующий на элемент, могут быть как распределенными, так и сосредоточенными. Распределенные силы позволяют достичь более эффективного преобразования. Поэтому для более эффективной поляризации объема пьезоэлектрика используют электроды, покрывающие всю площадь граней пьезоэлемента. Для создания равномерно распределенного механического напряжения - накладки из упругого материала, хорошо прилегающие к граням пьезоэлемента и преобразующие внешние сосредоточенные силы в распределенные.

Внешняя сила вызывает деформацию пьезоэлемента, его поляризацию и возникновение на электродах противоположных электрических зарядов. Внешняя сила сообщает пьезоэлементу энергию в виде упругой деформации, которая может быть рассчитана, если известны величины воздействующей силы и жёсткость пьезоэлемента. Одновременно с деформацией пьезоэлемента на его электродах возникает электрическое напряжение. Следовательно, часть энергии, сообщаемой пьезоэлементу внешней силой, оказывается электрической и её величина может быть рассчитана, если известны электрическое напряжение на электродах и ёмкость пьезоэлемента.

РАЗДЕЛ 2. АКТЮАТОРЫ

2.1. Виды и применение

Термин «*актюатор*» (actuator, англ.; aktor, нем.) предложен техническим комитетом ИФТоММ по стандартизации терминов как синоним часто используемого термина «*endeffektor*» (конечное действие). В русской транскрипции эти термины используются в робототехнике, мехатронике наряду со словосочетанием «исполнительный механизм».

Актюаторы условно подразделяются на мощные (пакетные), маломощные, к которым относятся гибкие (биморфы и ленточные) и осевые актюаторы, изготовленные по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы (Stack Actuators) уже сейчас применяются в космической, лазерной технике и оптических инструментах для настройки антенн и зеркал с манометрической точностью. Считается, что они найдут более широкое использование там, где важно развить движущее усилие при минимальном угле перемещения.

Одним из перспективных направлений является их применение в точной настройке станков. Благодаря своей жесткой структуре пьезоприводы являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки. Прилагая фиксированное напряжение в фазе с вращением шпинделя, можно обеспечить высокую точность обработки детали рабочим телом станка.

В станкостроении планируется их использование и для подавления (компенсации) вибрации. Нежелательную вибрацию станков можно компенсировать с помощью многослойных актюаторов, работающих в противофазе с вибрационными колебаниями. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению качества конечного изделия, а также позволит избежать чрезмерного износа инструмента и существенно снизит уровень шума станка. Компенсаторы вибрации могут найти применение не только в станкостроении, но и в других сферах.

2.2. Пьезокерамические актюаторы (пьезоприводы)

Актюаторы строятся на принципе обратного пьезоэффекта и поэтому предназначены для преобразования электрических величин (напряжения или заряда) в механическое перемещение (сдвиг) рабочего тела.

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые (мода d_{33}), поперечные (мода d_{32}) и гибкие (мода d_{31}). Осевые и поперечные актюаторы имеют еще общее название – многослойные пакетные, так как набираются из нескольких пьезоэлементов (дисков, стержней, пластин или брусков) в пакет. Они могут развивать значительное усилие (блокирующую силу) до 10 кН при управляющем напряжении 1 кВ, но при очень малых отклонениях рабочей части (от единиц нанометров до сотен микрон).

Гибкие актюаторы (биморфы) развивают незначительную блокирующую силу при малых (сотни микрон) отклонениях рабочей части. Однако американской компании APC International Inc. удалось создать и выйти на рынок с новым типом пластинчатого биморфа – «ленточным актюатором». Ленточный актюатор может обеспечивать блокирующую силу 0,95 Н и величину отклонения 1,2 мм или отклонение до 3 мм и блокирующую силу 0,6 Н.

Гибкие актюаторы относятся к группе маломощных. К этой же группе будут относиться и перспективные осевые актюаторы, представляющие собой моноблок, изготовленный по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы могут производиться предприятиями, не связанными с производством пьезокерамики. Гибкие же и осевые актюаторы из многослойной керамики сами по себе являются пьезокерамическими элементами. Их могут производить только предприятия, владеющие технологиями и оборудованием для производства пьезокерамических элементов.

2.3. Конструктивные элементы пьезопроводов

Пьезоактюаторы изготавливаются путем сборки пьезокерамических дисков и колец с металлизированными поверхностями в пакет, в котором для внешних соединений используются металлические межсекционные электроды. Жесткая конструкция формируется либо с помощью высококачественных клеевых материалов, либо путем пайки твердым припоем. Отдельные пьезоэлементы соединены между собой параллельно электрически, что позволяет создать устройство, обладающее максимальной деформацией. Толщина диска и кольца 0,25-0,5 мм, количество слоев 7-40 шт. Материал электродов – серебро и серебряно-палладиевый сплав – наносится методом трафаретной печати на керамическую поверхность (толщина слоя 6-12 мкм).

Для повышения механической прочности, стойкости к климатическим воздействиям и температурным перегрузкам пьезокерамические изделия помещаются в корпус из меди или ее сплавов, обеспечивающий лучший теплосъем. При помещении пьезокерамического актюатора в корпус с целью повышения жесткости конструкции и, соответственно, повышения эксплуатационных параметров и надежности, с помощью специальных устройств (пружин или гибких элементов) осуществляется предварительное механическое нагружение в осевом направлении (предварительное усилие) – усилие сжатия от 50 до 1500 Н. Предварительное нагружение позволяет работать при подаче положительного и отрицательного напряжения, исключает наклон концевых поверхностей актюатора и обеспечивает их параллельность при установке в изделиях.

Конструкция высоковольтных бескорпусных прямоугольных актюаторов представляет собой прямоугольный брус. Актюаторы изготавливаются из моноблока пьезокерамического материала по технологии изготовления пьезоизделий. На боковую поверхность наносятся серебряные

электроды (толщина слоя 6–12 мкм), к которым припаиваются провода. Максимальные габариты определяются возможностями существующего техпроцесса изготовления пьезокерамических изделий.

Конструкция низковольтных кольцевых актюаторов представляет моноблок из пьезокерамического материала в виде полого цилиндра, на боковые поверхности которого нанесены серебряные электроды.

На рисунке 2.1 представлены зависимости основных параметров пьезоактюаторов от напряжения, а на рисунке 2.2 – зависимость перемещения (хода) и развиваемой силы.

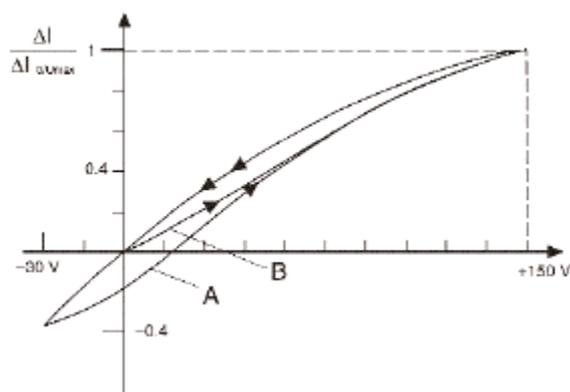


Рисунок 2.1. Нормализованная зависимость ход[х] – усилия [F] от напряжения (А – для биполярного напряжения, Б – для однополярного напряжения)

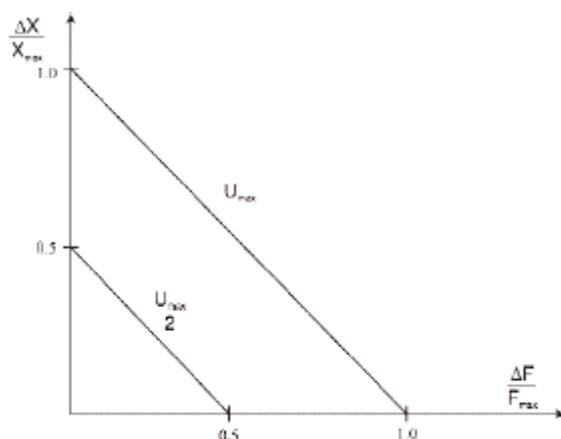


Рисунок 2.2. Нормализованная зависимость ход[х] от усилия [F] для однополярного максимального напряжения [U_{max}]

Широкое внедрение актюаторов сдерживает их относительно высокая стоимость и габариты, что связано со сложностью их компоновки в изделиях.

В последние годы созданы недорогие многослойные актюаторы – альтернатива пакетным актюаторам.

Многослойные актюаторы (рисунок 2.3) состоят из чередующихся тонких слоев пьезокерамики и электродов. Толщина керамического слоя обычно 20-100 мкм. В многослойном актюаторе каждый слой соединен с последующим слоем электрически параллельно. Перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев.

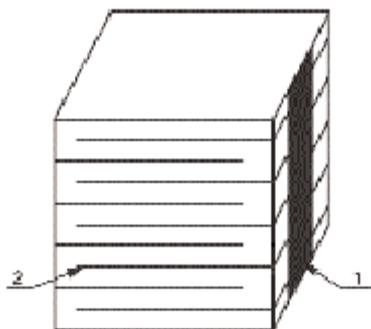


Рисунок 2.3. Конструкция многослойного актюатора
(1 – внешний электрод, 2 – внутренний электрод)

Преимущество конструкции заключается в том, что для заданного уровня деформации требуется напряжение в N раз ниже (N - количество слоев, обычно от 10 до 40), чем в монолитном исполнении с теми же размерами. Многослойные актюаторы изготавливают по стандартной технологии многослойных конденсаторов. На начальном этапе формируется пакет из тонкослойных пластин или шайб.

При большом давлении пакет уплотняется и спекается при высокой температуре. Образуется многослойный керамический блок с параметрами, близкими к теоретическому пределу монолитной керамики. В отличие от пакетных актюаторов, многослойные актюаторы имеют более высокую жесткость и деформацию и, соответственно, более высокую резонансную

частоту и быстродействие. Они способны развивать значительные усилия пропорционально площади сечения (сечение $1 \times 1 \text{ мм}^2$ может создать усилие до 1000 Н).

2.4. Перспектива применения пьезопроводов

Области применения актюаторов в настоящее время весьма обширны. Основное применение актюаторов направлено к минимизации технологий. Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели весьма конкурентны в этой области. Пьезоэлектрические актюаторы, как приводы точных микроперемещений, находят все большее применение в различных областях техники. Обеспечивая перемещение от единиц до 200–300 мкм с точностью 0,01 – 0,005 нм, они способны развивать усилия до 50 кН.

В зависимости от степени миниатюризации используются различные типы микромоторов. Для макроуровня, где требуется большая мощность при относительно малых размерах, применяются миниатюрные электромагнитные двигатели и соленоиды. Для микроустройств в настоящее время широко используются интегральные приводы, созданные по MEMS-технологии.

Пьезопроводы проигрывают электромагнитным двигателям по мощности, а MEMS микромоторам – по степени микроминиатюризации. Однако основное преимущество микропьезомоторов – возможность прямого позиционирования с субмикронной точностью. Кроме того, эти приводы имеют и множество других преимуществ перед своими электромагнитными конкурентами.

Электромагнитные микроэлектродвигатели (коллекторные, шаговые и бесколлекторные) в настоящее время достигли предела миниатюризации. Например, серийно выпускаемый шаговый электродвигатель типа A0820 имеет диаметр 8 мм, весит 3,3 грамма и стоит около \$10. Двигатели этого типа довольно сложны и содержат сотни деталей. При дальнейшем уменьшении размеров усложняется процесс сборки, а также теряется эффективность

двигателя. Для намотки катушек статора приходится использовать более тонкий провод, который имеет более высокое сопротивление. Так, при уменьшении размеров коллекторного микроэлектродвигателя до 6 мм гораздо большая часть подводимой электрической энергии преобразуется в тепло, нежели в механическую энергию. В большинстве случаев для получения линейных приводов на базе электродвигателей необходимо применение дополнительных механических передач и редукторов, которые преобразуют вращательное движение в поступательное и обеспечивают нужную точность позиционирования. При этом возрастают размеры всего устройства в целом, а значительная часть энергии тратится на преодоление трения в механической передаче. Диаграмма, приведенная на рисунке 2.4, показывает, что при размерах менее 7 мм (диаметр корпуса двигателя) выгоднее применять пьезокерамические двигатели, а не электромагнитные.

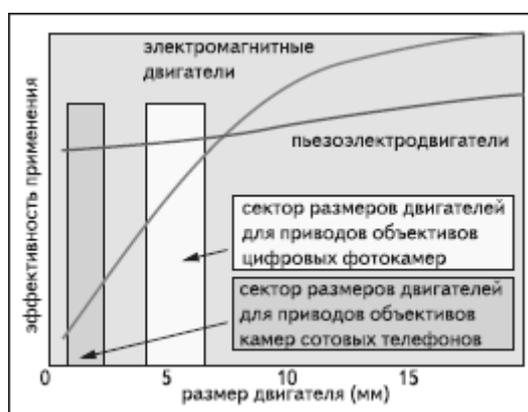


Рисунок 2.4. При размерах менее 7 мм пьезоэлектродвигатели более эффективны, чем электромагнитные двигатели

2.5. Современные производители пьезоприводов

В настоящее время многими фирмами освоено серийное производство пьезомоторов. Рассмотрим продукции двух производителей пьезоприводов: немецкого Physik Instrumente (PI) и американского New Scale Technologies. Выбор фирм не случаен. Американская фирма на данный момент производит самые маленькие в мире пьезодвигатели, а немецкая является одним из

лидеров в секторе пьезоприводов для прецизионного оборудования. Производимые ею пьезомоторы имеют уникальные функциональные характеристики и пользуются заслуженной репутацией среди производителей прецизионного технологического и измерительного оборудования. Обе фирмы используют свои патентованные решения. Принцип работы двигателей обеих фирм, а также их конструкция различны [8].

Конструкция и принцип работы пьезоэлектродвигателя SQUIGGLE.

На рисунке 2.5. показаны конструкция и принцип работы пьезопривода SQUIGGLE фирмы New Scale Technologies.

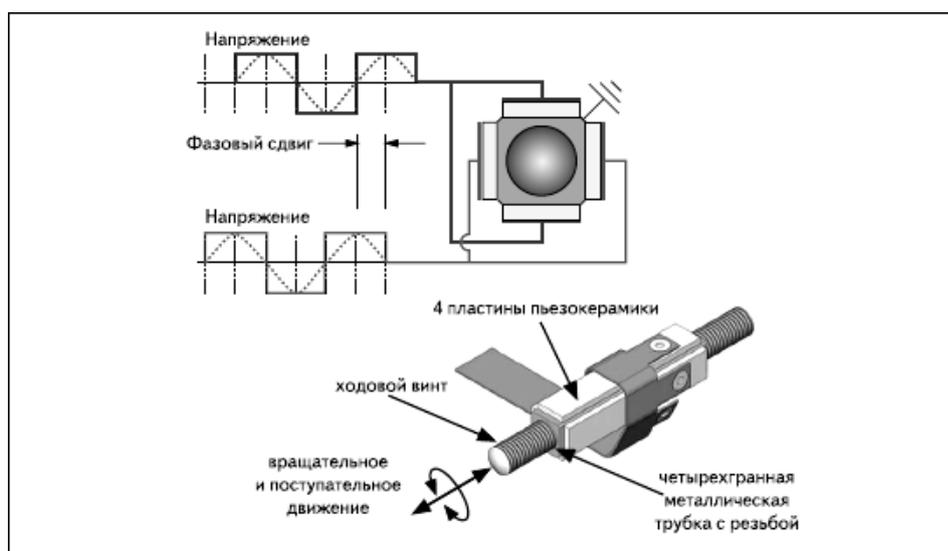


Рисунок 2.5. Конструкция и принцип работы микропривода SQUIGGLE

Основа привода – муфта прямоугольного сечения с внутренней резьбой и ходовой винт (червяк). На гранях металлической муфты смонтированы пьезокерамические пластины актуаторов. При подаче двухфазных сигналов на пары пьезоэлектрических актуаторов создаются вибрационные колебания, которые передаются в массу муфты. Для более эффективного преобразования электрической энергии в механическую актуаторы работают в резонансном режиме. Частота возбуждения зависит от размеров пьезопривода и находится в диапазоне от 40 до 200 кГц. Механические колебания, действующие на границе двух рабочих поверхностей муфты и винта, вызывают появление сил сдвливания с поворотом (типа вращения хула-хупа). Результирующая сила

обеспечивает вращение червяка относительно неподвижного основания – муфты. При движении винта и происходит преобразование вращательного движения в линейное перемещение. В зависимости от сдвига фаз управляющих сигналов можно получать вращение винта как по часовой, так и против часовой стрелки.

В качестве материалов винта и муфты используются немагнитные материалы, такие как бронза, нержавеющая сталь, титан. Резьбовая пара муфта–червяк не требует смазки для работы.

Пьезоприводы практически безынерционные, обеспечивают отличную приемистость (движение с ускорением до 10 g), практически бесшумны в звуковом диапазоне (30 Гц – 15 кГц). Точность позиционирования может достигаться без использования датчиков положения – благодаря тому, что движение происходит без проскальзывания (при условии, что нагрузка на рабочий винт находится в рабочих пределах), и перемещение прямо пропорционально числу импульсных сигналов, приложенных к пластинам актуатора. Пьезоприводы имеют практически неограниченный срок службы, разве что со временем за счет износа винтовой передачи может быть частично потеряна точность позиционирования. Пьезопривод может выдерживать режим блокировки движения за счет приложения сил торможения, превосходящих усилие тяги привода. В этом случае будет происходить проскальзывание без разрушения винтовой передачи.

Сегодня микромоторы серии SQL признаны самыми маленькими электродвигателями в мире, которые производятся серийно.

По заказу фирмы New Scale Technologies разработан интегральный драйвер для пьезоприводов серии SQL. Таким образом, потребитель имеет возможность использовать набор готовых компонентов для получения своего OEM электромеханического модуля.

Области применения пьезоприводов SQUIGGLE:

– *Привод для объективов фото- и видеокамер.*

Один из самых больших секторов применения микроэлектроприводов – цифровые фотокамеры и видеокамеры. Микропривод используется в них для управления фокусировкой объектива и оптическим зумом.

– *Медицинский шприц-дозатор.*

Во всем мире насчитывается сотни миллионов людей, нуждающихся в периодических дозированных инъекциях медицинских препаратов. В этом случае следить за временем, дозами, а также проводить процедуру инъекции должен сам пациент. Этот процесс можно значительно упростить и тем самым облегчить жизнь пациента, если создать программируемый шприц-дозатор (рисунок 2.6). На базе пьезопривода SQL уже реализован программируемый насос-шприц для инъекций инсулина. Дозатор состоит из микроконтроллерного модуля управления, емкости с препаратом, шприца и управляемого привода. Управление дозатором осуществляется встроенным микроконтроллерным модулем с батарейным питанием. Элемент питания – литиевая батарея.

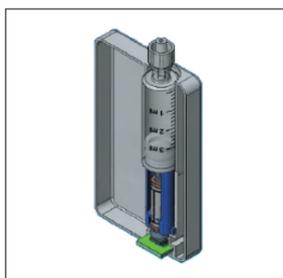


Рисунок 2.6. Использование привода в шприц- дозаторе

– *Лабораторный микронасос.*

На базе пьезопривода могут быть созданы микронасосы для дозированной подачи жидкостей в лабораторном исследовательском

оборудовании. Основные достоинства микронасоса такой конструкции – высокая точность дозирования и надежность работы.

– *Двигатель для вакуумного оборудования.*

Пьезопривод подходит для создания механических устройств, работающих в условиях как высокого, так и сверхвысокого вакуума, и обеспечивающих высокую точность позиционирования. Материалы привода обладают малым газовыделением в вакууме. При работе привода в режиме микроперемещений выделяется мало тепла. В частности, такие двигатели найдут широкое применение при создании новых поколений сканирующих электронных микроскопов, ионных сканирующих масс-спектрометров, а также в технологическом и тестирующем оборудовании для электронной промышленности, в оборудовании, применяемом в ускорителях частиц, таких как синхротроны.

Пьезоприводы фирмы PI

Немецкая фирма Physik Instrumente (PI) была образована в 1970 году. В настоящее время имеет подразделения в США, Великобритании, Японии, Китае, Италии и Франции. Основной сектор – оборудование для нанопозиционирования и обеспечения контроля движения с высокой точностью. Фирма является одним из ведущих производителей оборудования данного профиля.

Конструкция и принцип работы пьезприводов PI

На рисунке 2.7 показана конструкция пьезодвигателя фирмы PI.

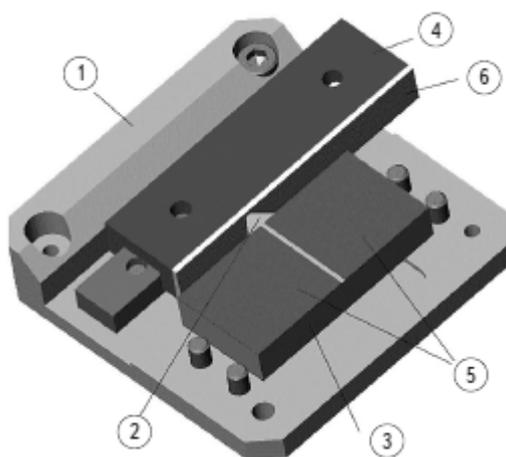


Рисунок 2.7. Конструкция пьезопривода фирмы PI

(1–неподвижное основание (керамика), 2– алюминиевый наконечник толкателя, 3– керамический пьезоактюатор, 4– подвижная каретка, 5– возбуждающий электрод, 6– приклеенная полоска фрикциона)

PILine – патентованная конструкция пьезопривода, разработанная фирмой PI. Сердцем системы является прямоугольная монолитная керамическая плата – статор, которая разделена с одной стороны на два электрода. В зависимости от направления движения, левый или правый электрод керамической платы возбуждается импульсами с частотой в десятки и сотни килогерц. Алюминиевый фрикционный наконечник (толкатель) прикреплен к керамической плате. Он обеспечивает передачу движения от

колеблющейся пластины статора к фрикциону каретки. Материал фрикционной полосы обеспечивает оптимальную силу трения при работе в паре с алюминиевым наконечником. Эта серия пьезоприводов считается линейным перемещением.

На рисунке 2.8 показана конструкция пьезокерамического статора PLine.

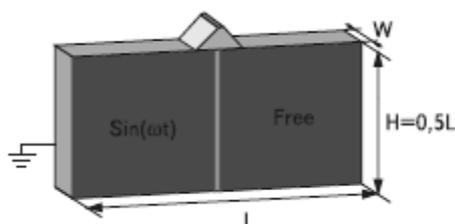


Рисунок 2.8. Конструкция керамического статора пьезопривода PLine

При отсутствии сигнала наконечник толкателя прижат к полоске фрикциона и сила трения, действующая на границе между наконечником и фрикционом, обеспечивает фиксацию каретки.

Также фирма PI производит модули управления (контроллеры) для своих пьезоприводов. Плата управления содержит интерфейс управления, преобразователь напряжения и выходной драйвер для возбуждения пьезокерамического актюатора. В контроллерах приводов используется традиционная схема пропорционального управления. В зависимости от условий применения приводов в контроллере может использоваться цифровой или аналоговый тип пропорционального управления. Для управления самими актюаторами применяются синусоидальные сигналы, а также может использоваться обратная связь по датчикам положения.

Линейные пьезоприводы типа NEXLINE.

Пьезоприводы NEXLINE обеспечивают более высокую точность позиционирования. Конструкция привода содержит несколько актюаторов, работающих согласованно. В отличие от приводов PLine, в этих устройствах

актюаторы работают не в резонансном режиме. В этом случае получается многотактная схема перемещения подвижной каретки несколькими толкателями актюаторов. Тем самым не только повышается точность позиционирования, но и увеличиваются моменты сил движения и удержания каретки. Приводы этого типа так же, как и приводы PLine, могут поставляться как с датчиками положения каретки, так и без них.

Основные преимущества серии пьезопроводов NEXLINE:

- Очень высокое разрешение, ограниченное только чувствительностью датчиков положения.

В режиме аналогового перемещения с использованием датчиков положения достигается точность позиционирования 50 нм (0,05 мкм).

- Работа с высокой нагрузкой и большой силой фиксации каретки.

Приводы NEXLINE могут обеспечивать усилия до 600 Н. Жесткая конструкция и применение резонансных частот возбуждения в диапазоне сотен герц позволяют конструкции подавлять вибрацию от внешних воздействий. Аналоговый режим работы может активно применяться для сглаживания вибрации и дрожания основания привода.

- Может работать как в режиме с открытым контуром обратной связи, так и с обратной связью по датчикам положения.

Цифровой контроллер NEXLINE может использовать сигналы положения от линейных энкодеров или же от лазерных интерферометров, а для очень высокой точности позиционирования использовать сигналы абсолютного положения от емкостных датчиков.

- Сохраняет стабильное положение каретки при выключении питания.
- Длительный срок службы – более 10 лет.

На рисунке 2.9 показаны различные варианты реализации многокоординатных устройств позиционирования на базе пьезоприводов фирмы PI.



а)

б)

в)

Рисунок 2.9. Варианты реализации: а) - Платформа с пьезоприводами NEXLINE, имеющая 6 степеней свободы – микроробот HEXAPOD. б) - Низкопрофильная двухкоординатная платформа с параллельной кинематической схемой для микроскопии. в) – Полностью независимый трехкоординатный пьезопривод для объектива микроскопа

В заключение следует отметить основные достоинства и недостатки вращающихся и линейных пьезодвигателей. Важнейшими достоинствами пьезодвигателей, особенно при их использовании в робототехнических и компьютерных устройствах, являются следующие:

- Высокая разрешающая способность по перемещению: до 1-10мкм в режиме преобразователя колебаний и до 0,01мкм – при использовании управляемых деформаций преобразователей.
- Высокое быстродействие: время разгона и торможения составляют единицы миллисекунд.
- Пьезоэлектрические двигатели обладают значительным усилием самоторможения при снятии напряжения питания за счет сил трения.
- Диапазон регулирования скорости пьезодвигателей достигает 10^6 .

Пьезодвигатели хорошо встраиваются (интегрируются) в сложные механические узлы и применяются в приводах устройств считывания и записи информации ЭВМ, магнитофонов, видеомагнитофонов и киноаппаратов. Применение линейных пьезодвигателей для позиционирования считывающей головки позволяет повысить плотность записи на магнитных дисках в 2–3 раза.

Возможность получения у пьезоэлектрических исполнительных механизмов до 5 степеней свободы при минимальных угловых и линейных перемещениях звеньев определяет возможность их широкого применения в прецизионных системах автоматизации и управления. Например, в астрономии, в космических исследованиях – там, где требуется точная ориентация по весьма малым объектам; в ускорителях заряженных частиц, где необходимо удерживать пучок частиц в строго ограниченных геометрических координатах; в кристаллографических исследованиях. Использование пьезопривода нано- и микроперемещений перспективно в точных электромеханических системах оборудования нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники, электронной микроскопии, и адаптивной оптики для позиционирования и совмещения.

Однако использование пьезодвигателей в исполнительных механизмах связано с рядом сложностей. Существенная зависимость резонансной частоты преобразователя от напряжения питания электродов, момента нагрузки и момента инерции на валу двигателя затрудняет обеспечение оптимального преобразования энергии. Регулировочные характеристики двигателя нелинейные, параболические; имеется довольно широкая зона нечувствительности. Механические характеристики довольно мягкие и имеют вид гипербол.

Компенсация этих недостатков может быть осуществлена путем выполнения исполнительного механизма с обратной связью по скорости. Обратная связь может быть реализована либо с непосредственным

использованием измерителей скорости типа тахогенераторов, либо косвенным методом, основанным на том, что угловая скорость ротора пропорциональна активной мощности, потребляемой электронным преобразовательным устройством. При этом необходимо применение специальных способов управления высокочастотными источниками питания пьезоэлементов, которые при существенной нелинейности характеристик самих пьезопреобразователей и нелинейности механических и регулировочных характеристик двигательной части могли бы обеспечить устойчивую работу при сильных случайных возмущениях. На практике для обеспечения требуемых статических и динамических характеристик при регулировании или стабилизации скорости применяются:

- амплитудный способ, основанный на регулировании амплитуды напряжения на электродах пьезоэлемента,
- амплитудно-фазовый способ, основанный на регулировании амплитуды напряжения и сдвига по фазе тока на электродах пьезоэлемента.

РАЗДЕЛ 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.

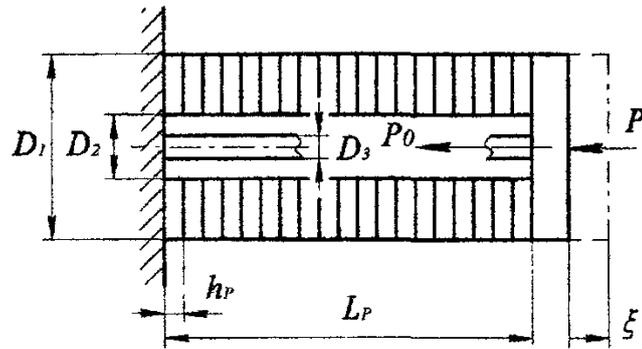


Рисунок 3.1. Расчетная схема преобразователя

3.2. Подбор марки пьезокерамики

Подберем марку пьезокерамики. Наиболее распространенная в промышленности марка, выпускаемая серийно компанией «Элпа» - ЦТС-19, обладает высокими пьезоэлектрическим модулем и низкой податливостью. 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 [10].

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 3.2.

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

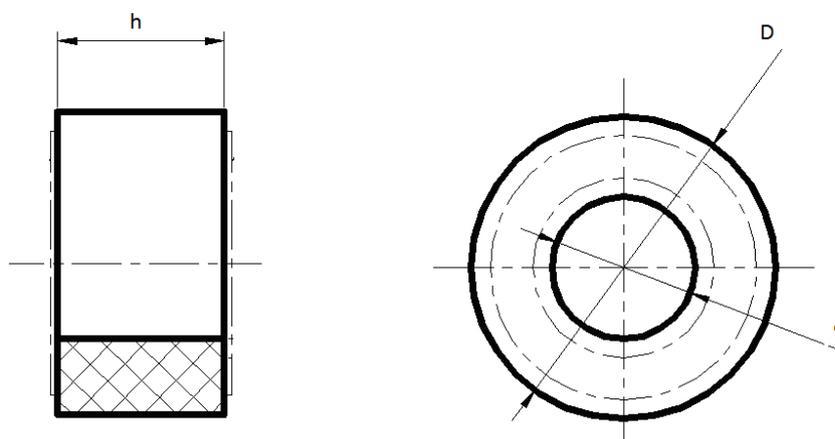


Рисунок 3.2. Внешний вид шайбы

Ниже приведены характеристики материала ЦТС-19.

Таблица 2 – Характеристики ЦТС-19

Параметр	символ	ЦТС-19
Относительная диэлектрическая проницаемость	у.е.	1650
Быстродействие	t	0.5-5

Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле, при: E=300 КВ/м	10^{-2}	-
Тангенс угла диэлектрических потерь в сильном поле, при: E=100 КВ/м	10^{-2}	-
Коэффициент электро-механической связи	k_p	0,56
	k_{31}	0,29
	k_{33}	0,64
Пьезоэлектрический модуль	$-d_{31}$	155
	d_{33}	360
	g_{31}	8.9
	g_{33}	22.3
Частотная постоянная	N_p	2
Скорость звука	v_E^{-1}	2,95
Упругая жесткость	S_{11}^E	15.8
	S_{33}^E	16.8
Коэффициент Пуассона	σ	0.38
Механическая добротность	Q_m	90

Точка Кюри	T_c	290
Плотность	ρ	7.60

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

Площадь торца поверхности шайбы:

$$\Omega_p = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) = \frac{3.14}{2}(484 - 60) \cdot 10^{-6} = 329 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения стягивающей металлической шпильки радиусом 1мм:

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

Общая длина пакета:

$$L_p = n \cdot h = 10 \cdot 10^{-1} \text{ м}$$

Материал резьбовой шпильки – сталь, поэтому модуль Юнга:

$$E_m = \frac{d_{33} \cdot L_p}{h_p (1 + s_{33}^E E_m \frac{\Omega_M}{\Omega_p})} U = 17.5 \text{ мкм}$$

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

$$P_{\text{макс}} = \frac{d_{33} \cdot \Omega_p}{h_p s_{33}^E} U = 3532.5 \text{ Н}$$

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 недостаточно 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 F_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 3.3 наглядно демонстрирует принцип преобразования перемещений переменного направления в постоянное однонаправленное.

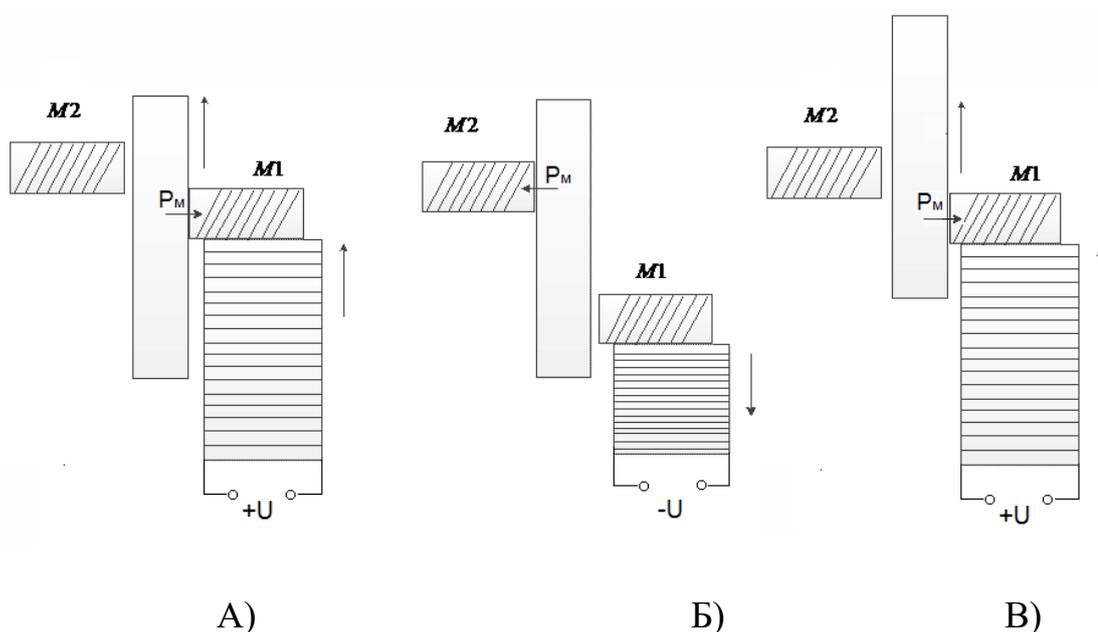


Рисунок 3.3. Принцип преобразования перемещений переменного направления в постоянное однонаправленное (а – расширение пакета, б – сжатие пакета, второй цикл расширения пакета)

Очевидно, что оба магнита должны включаться попеременно. На рисунке 3.4 приведены график изменения амплитуды перемещения торца

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

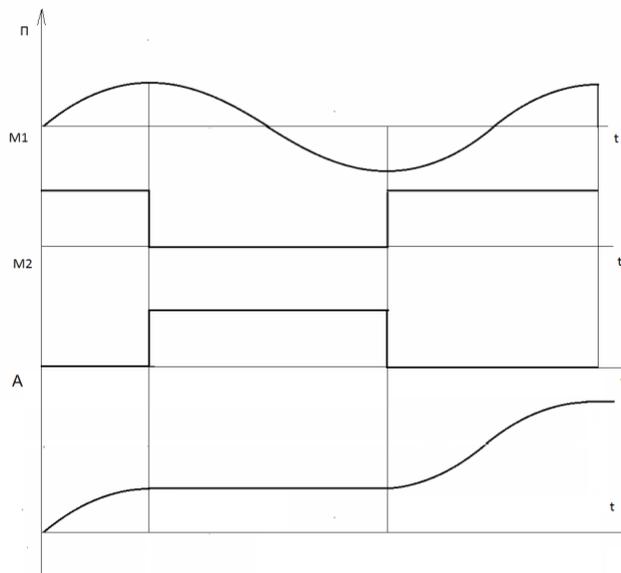


Рисунок 3.4. График изменения амплитуды (Π) перемещения торца пьезопакета, временные диаграммы работы магнитов, подвижного (M1) и неподвижного (M2), график перемещения выходного звена (A)

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 3.5) толщиной не более 0.01 мм, к которому и будут вплотную прилегать магниты.

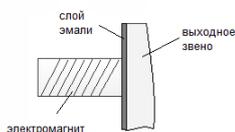


Рисунок 3.5. Контакт магнита и выходного стержня через слой эмали

Так же, слой позволит уменьшить коэрцитивную силу, требуемую для полного размагничивания и отсутствия залипания магнита на стержне при отключении питания обмотки. Основным недостатком 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 комплементарную пару транзисторов (р-п-р и п-р-п), 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 (п-р-п), второй (р-п-р) – на отрицательной.

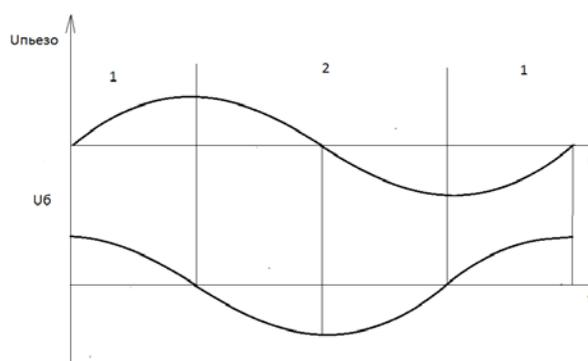


Рисунок 3.6. График напряжения пьезопакета $U_{\text{пьеzo}}$ и управляющего напряжения базы транзисторов $U_{\text{б}}$

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 влево, так как переключение магнитов происходит на пике амплитуды напряжения,

подаваемого на пьезокерамический актюатор. Рисунок 3.6 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 3.7 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:

+Емп – положительный полюс постоянного источника питания электромагнитов;

Уму – переменное управляющее напряжение базы транзисторов;

Упьеzo – 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.

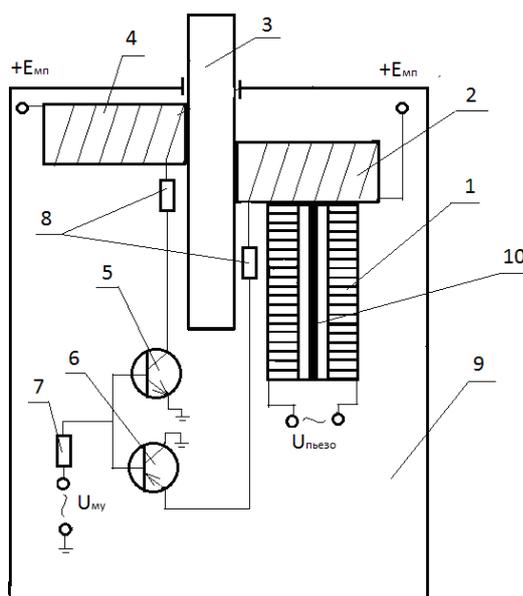


Рисунок 3.7. Функциональная схема проектируемого привода

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:

$$P_{\text{э}} = 4 \cdot 10^5 B_{\delta}^2 \cdot s_{\delta},$$

где B_{δ} [Тл] – магнитная индукция в зазоре, s_{δ} – 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.

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 $l_{\text{ср}} = 2.65$ 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):

$$P_{\delta} = (Iw)^2 2\pi 10^{-7} \frac{S_{\delta}}{\delta^2} = 4 \cdot 10^5 B_{\delta}^2 S_{\delta}$$

Тогда выразим Iw :

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

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

1) Диаметр медного провода:

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

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, $U_{пит} = 5 \text{ В}$ - напряжение питания. Получаем диаметр медного провода 0.014мм. 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:

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

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

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

2) Проверим обмотку на нагрев.

Для проверки на нагрев обмотки рассчитывается плотность тока в ней:

$$j_p = \frac{4I}{\pi d_c^2} = 8.15 \text{ A / мм}^2$$

Далее проверяется условие отсутствие перегрева обмотки:

$$j_p \leq j_{дон},$$

где $j_{дон} = (5-12)$ А/мм – 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:

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

Подставив значения, получаем $m=43$ гр.

3) Рассчитаем величину дополнительного сопротивления.

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

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

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

$$R_{доб} = \frac{U}{I} - R = 290 \text{ Ом}$$

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

$$t_{сраб} = t_{mp} + t_{оэ},$$

где t_{mp} - интервал времени, в течение которого ток возрастает от нуля до тока, при котором срабатывает магнит; $t_{оэ}$ - 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).

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:

$$T = \frac{L_{об}}{R_{об} + R_{дооб}},$$

где $L_{об}$ – индуктивность обмотки, $R_{об}$ – активное сопротивление медного провода, $R_{дооб}$ - 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:

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

Тогда постоянная времени равна:

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

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 комплементарную 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 3 – Характеристики n-p-n транзистора

Наименование	Произв.	Тип	Uкэо max, В	Iк max, А	h21э, min	Pк, 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 пьезоактатора,

в противном случае произойдет рассогласование в работе магнитов и пьезопакета.

3.7. Моделирование работы в системе Matlab Simulink

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

$$\xi = B_{\xi} \cdot U - C_{\xi} \cdot P,$$

$$\text{где } B_{\xi} = \frac{d_{33} L_p}{h_p (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_p})} = 3.6 \cdot 10^{-9} \text{ м / В}$$

$$C_{\xi} = \frac{s_{33}^E \cdot L_p}{\Omega_p (1 + s_{33}^E E_M \frac{\Omega_M}{\Omega_p})} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м / Н},$$

Данное уравнение описывается сумматором, на входе которого – подаваемое напряжение с учетом коэффициента и внешняя нагрузка с учетом коэффициента C_{ξ} . Модель уравнения состояния пьезопреобразователя представлена на рисунке 3.8.

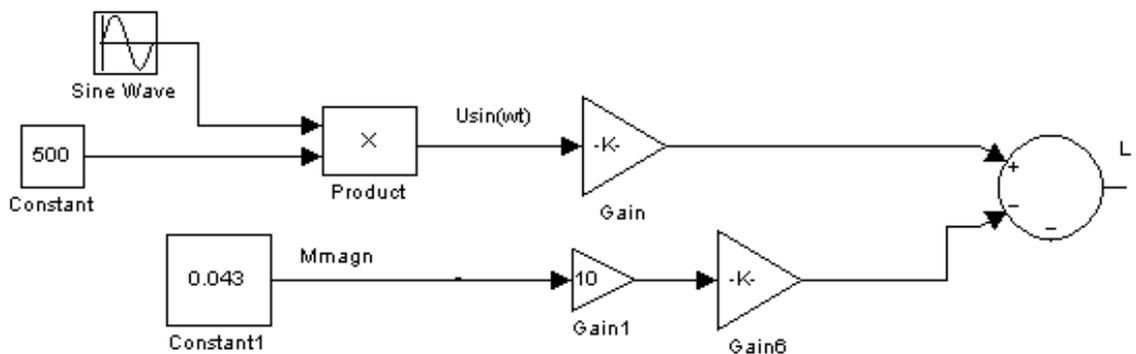


Рисунок 3.8. Модель уравнения состояния пьезопреобразователя

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:

$$P = P_{ст} + P_{дон} = m_{магн} (g + a)$$

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

$$a = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

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

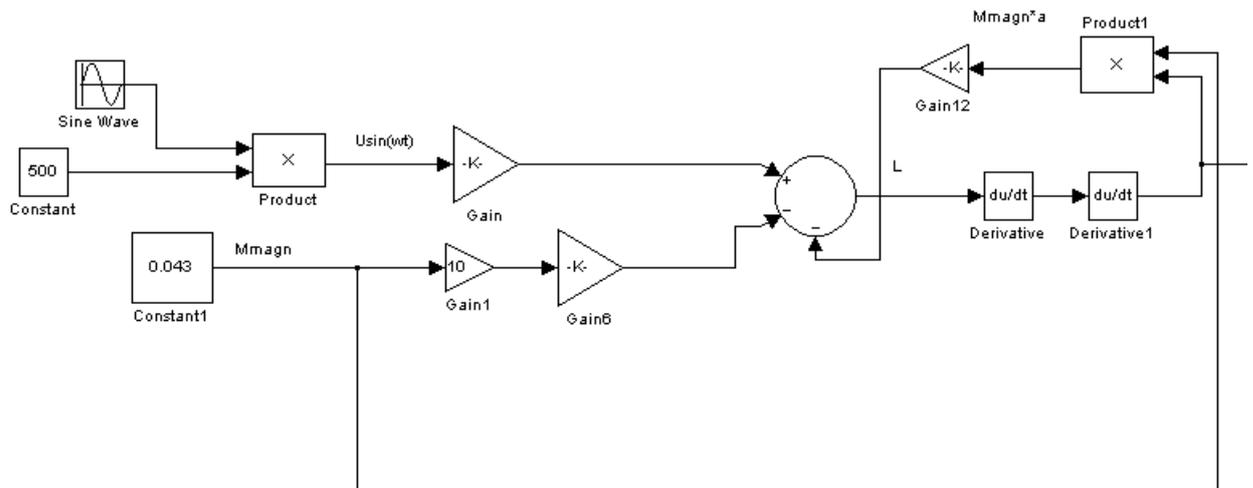


Рисунок 3.9. Модель уравнения состояния пьезопреобразователя с учетом динамической нагрузки

На рисунке 3.9 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:

$$P_g = (Iw)^2 2\pi 10^{-7} \cdot \frac{s_\delta}{\delta^2}$$

В этом уравнении w, s_δ, δ постоянные величины, поэтому мы можем переписать его в виде:

$$P_g = kI^2$$

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

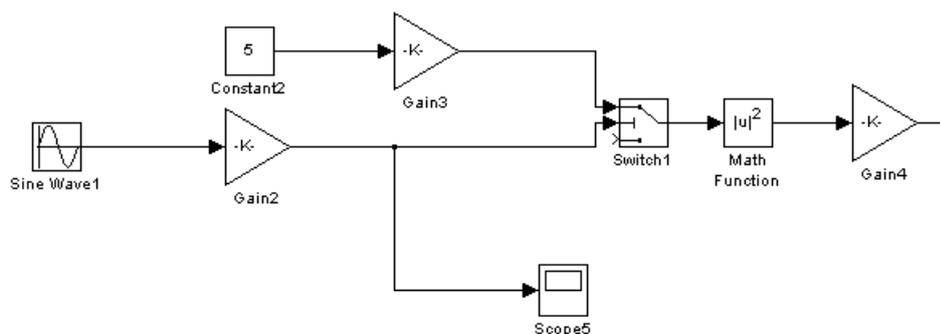


Рисунок 3.10. Модель, описывающая работу магнита

Модель, описывающая работу магнита, представлена на рисунке 3.10. 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:

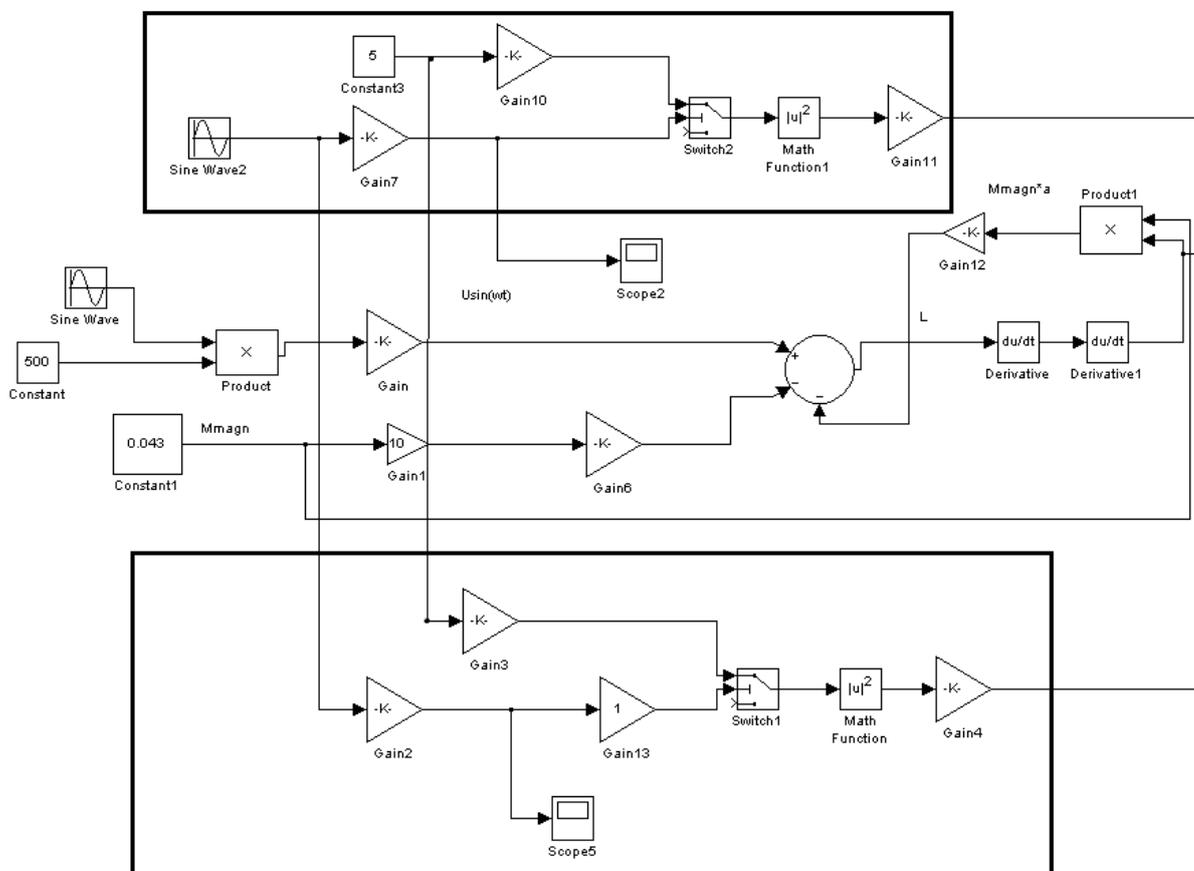


Рисунок 3.11. Модель системы с магнитами

На рисунке 3.11 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.

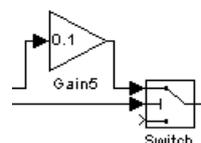


Рисунок 3.12. Модель внутреннего трения

Сила трения, создаваемая неподвижным магнитом, является внешней для системы и моделируется более наглядно. На рисунке 3.13 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.

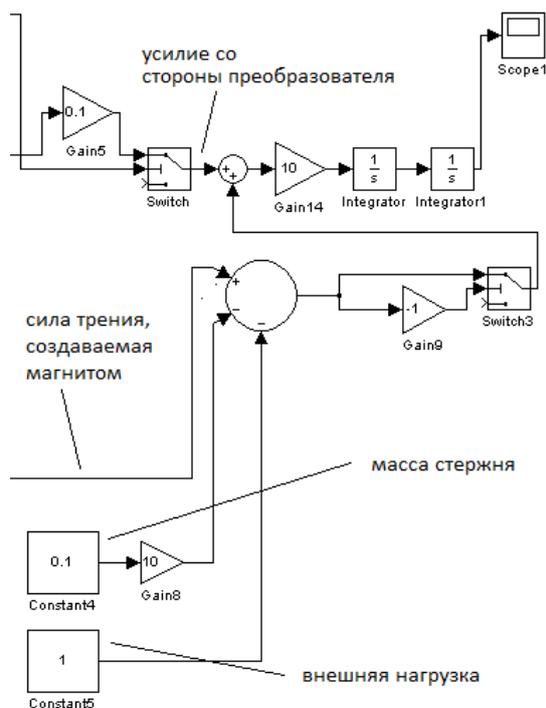


Рисунок 3.13. Модель работы неподвижного магнита

На рисунке 3.14 изображена модель мехатронного модуля движения в сборке.

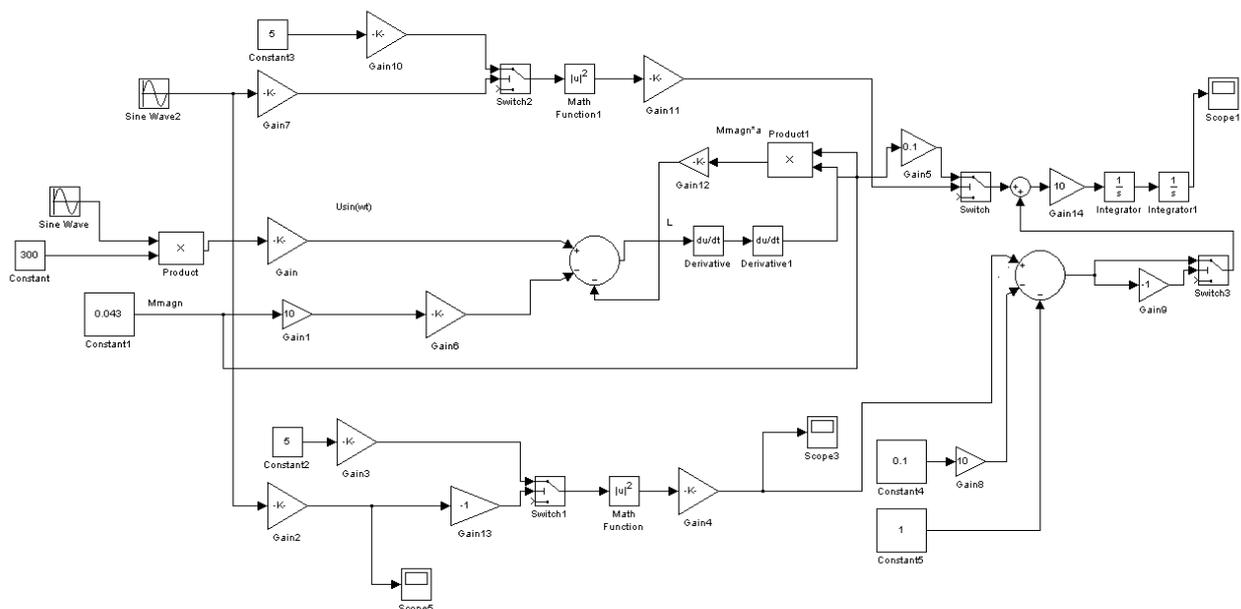


Рисунок 3.14. Модель пьезокерамического мехатронного модуля

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 3.15 приведен график перемещение выходного звена:

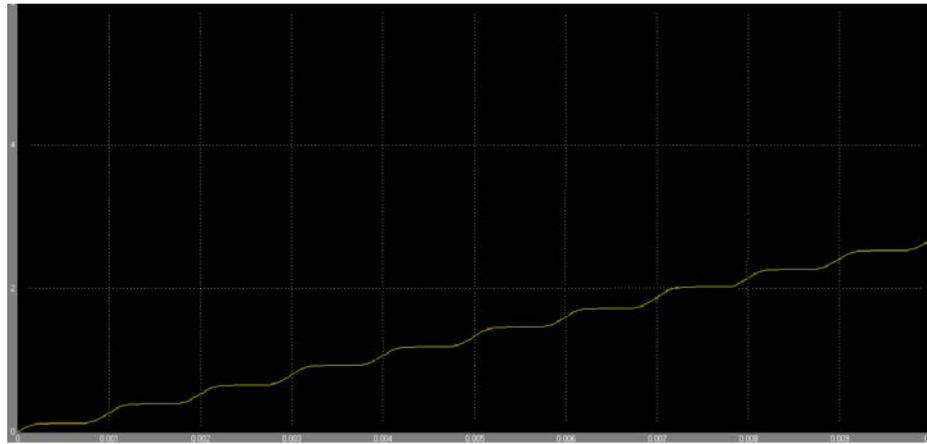


Рисунок 3.15. График перемещения выходного звена (амплитуда напряжения 300 В, частоту питания 1000 Гц)

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

График перемещения торца преобразователя представлен на рисунке 3.16.

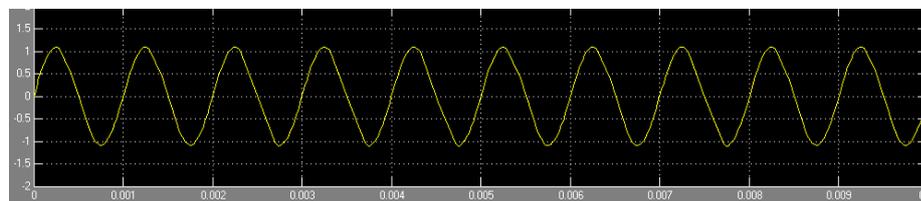


Рисунок 3.16. График перемещения торца преобразователя

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 3.17.

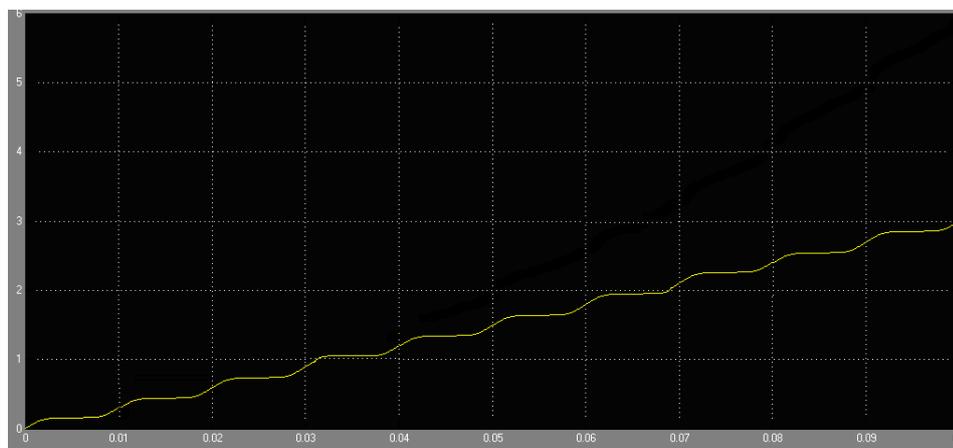


Рисунок 3.17. График перемещения выходного звена (амплитуда напряжения 500 В, частоту питания 1000 Гц)

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 3.18:

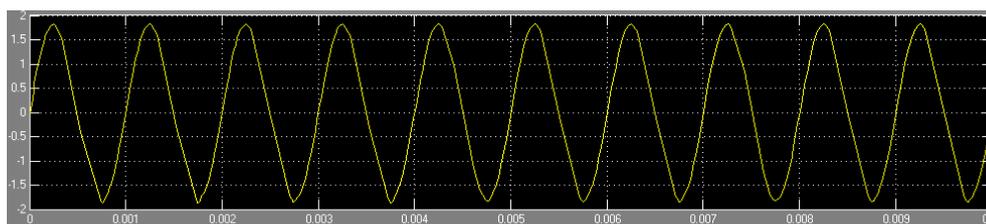


Рисунок 3.18. График перемещения торца преобразователя

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 3.19 изображены графики перемещения торца преобразователя (показания Score 4) и временные диаграммы работы подвижного и неподвижного магнитов

(показания Scope 2 и Scope 3 соответственно). Показания полностью согласуются с требуемыми, приведенными на рисунке 3.16.

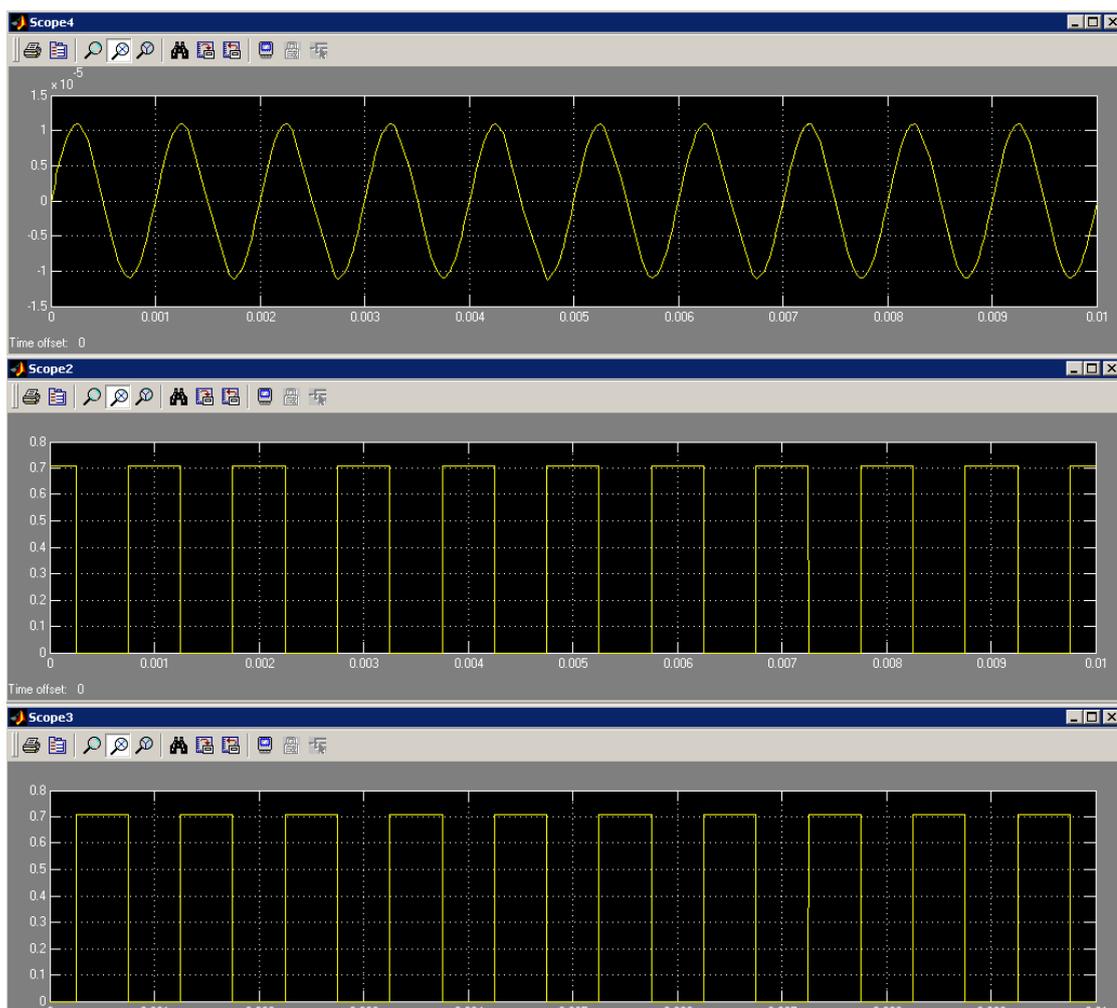


Рисунок 3.19. График перемещения торца преобразователя и временные диаграммы работы магнитов

РАЗДЕЛ 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данной работы является определение перспективности и успешности технического проекта, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретными решениями на этапе реализации экономических показателей проектирования пьезопривода. Для этого необходимо провести анализ конкурентных технических решений, определить трудоемкость проводимых работ, создать график проведения работ, а также сформировать бюджет затрат.

4.1. Предпроектный анализ

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. В настоящее время существует большой сектор различных задач, в котором необходимо обеспечить перемещение микрообъектов в микрометровом и нано метровом диапазонах с высокой точностью позиционирования, например, космическая отрасль, где разработки определяются коммерческой ценностью. Оценка коммерческой ценности является необходимым условием при поиске источника финансирования для исследования рынка, разработки технологии и коммерциализации результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять перспективы проводимых исследований.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих

современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Задачами раздела являются:

- оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ;
- разработка устава научно-технического проекта; планирование процесса управления НТИ;
- структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок;
- определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

Областью применения является промышленная отрасль (электрохимическое оборудование), а также производители различных преобразователей.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Цель данной работы – получить готовый продукт, а конкретно оптимизированный пьезокерамический актюатор для электрохимического травления металла.

К задачам работы относится – анализ готовый продуктов на рынке, разработка технической документация и сборка изделия.

Что бы провести анализ потребителей результатов данного исследования, необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, **сегмент рынка** – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Сегментируем рынок двигателей по следующим критериям: отрасль применения, вид электропривода (таблица 4).

Для сравнения возьмем две фирмы производителей преобразователей: ведущая в области рассматриваемой работы «Physick Instrumente», и аналог «Элпа» (г. Зеленоград).

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка преобразователей энергии

	Преобразователь на основе пьезоэлектрического привода	Преобразователь на основе электромагнитного привода	Преобразователь на основе магнитострикционного привода
Проектирование и производство			
Установка			
Обслуживание и ремонт			
Преобразователи фирмы «Physick instrumente»	Преобразователь фирмы «Physick instrumente»		Преобразователь фирмы «Элпа»

На основании показанной карты, делаем вывод, что целевым сегментом рынка является преобразователь на основе пьезоэлектрического привода.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Целью данного раздела является применение оценочной карты для выбора привода.

Объектом анализа будет являться пьезокерамический актюатор. Для того, чтобы наиболее точно провести анализ нужно использовать всю информацию, которая доступна о конкурентных разработках.

Для сравнения возьмем основные фирмы производителей преобразователей энергии: «Physick instrumente» (Германия) и «Элпа» (г.

Зеленоград), а также пьезокерамический актюатор, разрабатываемый в ВКР. Для сравнения были выбраны следующие технические критерии: энергопотребление, вибрационные показатели, диапазон регулирования скорости, удобство в эксплуатации, надежность и такие экономические критерии как: цена, послегарантийное обслуживание, заявленный срок эксплуатации. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели оценки качества проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Разработка ВКР	Разработка «Physic instrumente»	Разработка «Элпа»	Разработка ВКР	Разработка «Physic instrumente»	Разработка «Элпа»
1	2	4	5	6	7	8	9
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Удобство в эксплуатации	0,1	5	3	3	0,45	0,4	0,4
2. Энергопотребление	0,1	5	5	5	0,06	0,06	0,06
3. Надежность	0,12	5	5	5	0,06	0,06	0,06
4. Допустимый уровень вибрации	0,12	5	5	5	0,06	0,06	0,06
5. Безопасность	0,094	5	4	4	0,5	0,4	0,4
6. Функциональная мощность	0,09	5	5	5	0,4	0,4	0,4

7. Простота эксплуатации	0,08	4	4	2	0,32	0,32	0,16
8. Возможность подключения к ПК	0	0	0	0	0	0	0
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
2. Цена	0,08	4	5	4	0,304	0,38	0,304
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
4. Наличие сертификации разработки	0,076	5	5	5	0,4	0,4	0,4
Итого	1	53	50	47	3,254	3,13	2,85

Существует формула, при помощи которой мы сможем провести анализ конкурентных технических решений:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

В ходе данного анализа было определено превосходство разрабатываемого проекта относительно конкурентных компаний. Наиболее выгодно и эффективно при разработке системы микроперемещений будет использование разрабатываемого устройства.

4.1.3. FAST – анализ

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат. Затраты возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

Проведение FAST-анализа предполагает шесть стадий:

1. Выбор объекта FAST-анализа;
2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
3. Определение значимости выполняемых функций объектом;
4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа. В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает установка электрохимического травления металла на основе пьезокерамического актюатора.

Стадия 2. Описание главной, основной и вспомогательной функций, выполняемых объектом (таблица б).

Таблица 6 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количе ство детале й на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Гла вна я	Осно вная	Вспом огател ьная
Пьезокерамическ ий двигатель	1	Приводит в движение исполнительный механизм	X		
Актюатор	1	Производит поддержание необходимого уровня зазора согласно техпроцессу, а также выполняет функцию контроля выходящих данных.	X		
Рабочий орган	1	Поддержания характеристик, необходимых для измерений	X		
Блок выключателей и датчики состояния	1	Сигнализирует о текущей состоянии привода, отключает питание при каких – либо неисправностях			X
Ручной механизм изменения уровня зазора	1	Обеспечивает ручной контроль поступаемых сигналов			X
Персональный компьютер	1	Служит непосредственно для работы оператора с измерительным оборудованием		X	

Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

На данной стадии, для оценки значимости функций, используем метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф.

На первом этапе построим матрицу смежности функции (таблица 7).

Таблица 7 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	<	>	>	>	>
Функция 2	>	=	>	>	>	>
Функция 3	<	<	=	>	>	>
Функция 4	<	<	<	=	=	<
Функция 5	<	<	<	>	=	<
Функция 6	<	<	=	>	>	=

На втором этапе преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 8).

Таблица 8 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	ИТОГО
Функция 1	1	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 2	1,5	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 4	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	4,0
Функция 5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	0,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	1	1,5	1,5	1	6,0
							$\Sigma = 37$

Стадия 4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования. С помощью применения нормативного метода оценим уровень затрат на выполнение каждой функции (таблица 9).

Таблица 9 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наим-е детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормочасы	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Пьезокерамический двигатель	1	Приводит в движение исполнительный механизм	-	2,0	5023,0	1050,0	6073,0
Актуатор	1	Производит поддержание необходимого уровня зазора согласно техпроцессу, а также выполняет функцию контроля выходящих данных.	-	2,5	8945,2	1500,5	8045,2
Рабочий орган	1	Поддержания характеристик, необходимых для измерений	-	1,0	1323,0	2120,5	3443,5
Блок выключателей и датчики состояния	1	Сигнализирует о текущей состоянии привода, отключает питание при каких – либо неисправностях	-	0,5	213,5	105,0	818,5
Ручной механизм изменения уровня зазора	1	Обеспечивает ручной контроль поступаемых сигналов	-	1,0	1437,2	640,4	2077,6
Персональный компьютер	1	Служит непосредственно для работы оператора с измерительным оборудованием	-	2,0	10234,7	1800,6	12035,3

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ. Отообразим информацию об объекте исследования в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 1).

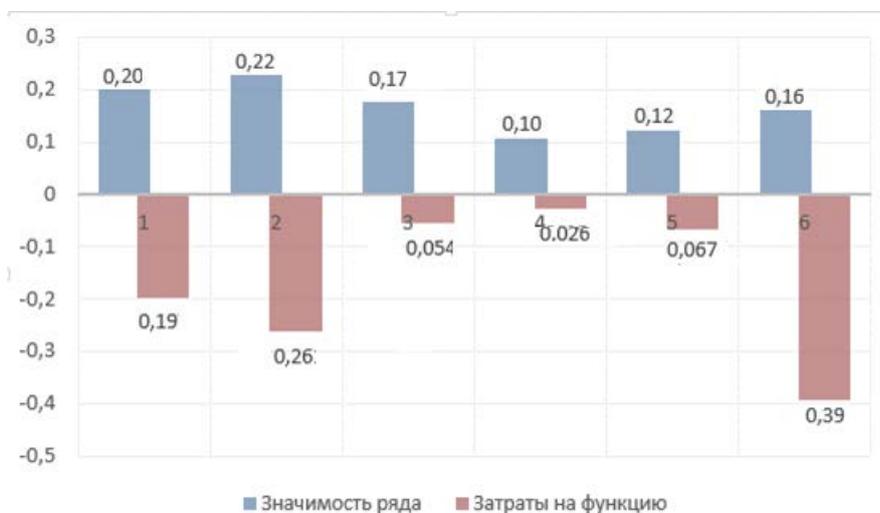


Рисунок 4.1. Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них. Анализ приведенной выше ФСД показывает явное наличие рассогласования по функциям 1, 2, 6. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

Стадия 6. Оптимизация функций, выполняемых объектом. Список мероприятий для снижения затрат на единицу полезного эффекта:

- применение новых конструкторских решений;
- оптимизация технических параметров;
- оптимизация параметров надежности;
- повышение ремонтпригодности;
- применение новых процессоров, заготовок, материалов и т.д.

4.1.4. Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия Исикавы – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления. Данная диаграмма применяется для выявления причин возникновения проблемы, анализа и структурирования процессов на предприятии, оценки причинно-следственных связей.

Отобразим причинно-следственную диаграмму на рисунке 4.2.

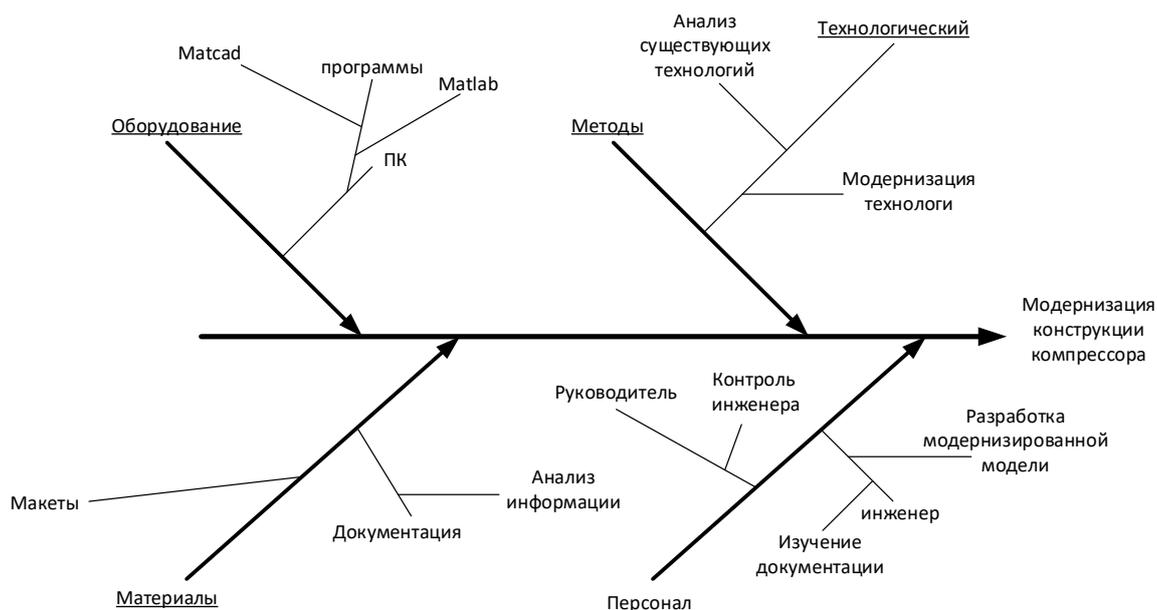


Рисунок 4.2. Причинно-следственная диаграмма

4.1.5. SWOT – анализ

SWOT – анализ является инструментом стратегического менеджмента и представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT – анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Применительно к проекту электропривода холодильной установки, SWOT – анализ позволит оценить положительные и отрицательные стороны проекта.

Для проведения SWOT – анализа составляется матрица SWOT (таблица 7), которая помогает выявить соответствия слабых и сильных сторон проекта, а также их возможности и угрозы.

При составлении матрицы использованы следующие обозначения: **С** – сильные стороны проекта, **Сл** – слабые стороны проекта, **В** – возможности, **У** – угрозы.

Одним из инструментов, позволяющим оценить потенциал проекта, является SWOT – Анализ. SWOT – анализ заключается в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: strengths – сильные стороны, weaknesses – слабые стороны, opportunities – возможности, threats – угрозы.

Результаты проведенного анализа сведем в таблицу 10.

Таблица 10 – Матрица решений

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Высокое качество питающего напряжения	Сл1. Аварийные ситуации
	С2. Надежность систем защиты и аварийной сигнализации	Сл2. Повышенная точность характеристик совместимости оборудования
	С3. Экономия потребляемой электроэнергии	
	С4. Квалифицированный персонал	
	С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования	

	С6. Высокоточная автоматизация режима работы пьезопривода	
<p>Возможности:</p> <p>В1. Экономия электроэнергии за счет использования ИБП</p> <p>В2. Повышение износостойкости элементов, деталей электропривода</p> <p>В3. Резервное питание привода</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>В1 - С1, С2, С3, С4. С6</p> <p>В2 – С2, С4, С5, С6</p> <p>В3 – С1, С2, С4, С5, С6</p> <p>В4 – С1, С3, С5, С6</p>	<p>В1 – Сл1</p> <p>В3 – Сл1</p> <p>В4 – Сл2</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологии производства</p> <p>У2. Риск несвоевременной поставки и ремонта оборудования</p>	<p>У1 – С5</p> <p>У2 – С6</p>	<p>У1 – Сл2</p> <p>У2 – Сл2</p>

После проведения SWOT-анализа можно сделать вывод, что успех нашего проекта зависит, что сможем ли мы заинтересовать потребителей в переходе на более современное оборудование, и выйдя на рынок, можем создать конкуренцию зарубежным аналогам, а также отбить желание покупать

устаревшее оборудование. Также угрозы нашего проекта имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

4.2. Инициация проекта

В рамках процессов инициации проекта определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав научного проекта имеет следующую структуру:

1) **Цели и результат поиска.** Приведём информацию о заинтересованных сторонах объекта (таблица 11), иерархии целей проекта и критериях достижения целей (таблица 12).

Таблица 11 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель	Получение готового продукта и его разработки в целях дальнейшего пользования
Инженер	Достижение поставленных задач и премирование
Общественность	Увеличение срока служб металлических труб для водоснабжения

Таблица 12 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Оптимизация конструкции пьезокерамического актюатора
Ожидаемые результаты проекта:	Готовый продукт
Критерии приемки результата проекта:	Соответствие требованиям технического задания
Требования к результату проекта:	Требование:

	Снижение уровня ржавления металла
	Совершенствование конструкции актюатора
	Минимизация основных конструктивных элементов
	Наличие ПО для работы с изделием

2) Организационная структура проекта. Перечислим в таблице 13 рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, функции и трудозатраты в проекте.

Таблица 13 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Качин Олег Сергеевич	Руководитель (доцент, к.т.н., ТПУ)	Контроль за выполнением проекта, координатор деятельности по проекту	312
2	Дронов Даниил Владимирович	Инженер	Специалист, выполняющий работы по проекту	1680
ИТОГО:				1992

Таблица 14 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/Допущения
2.1. Бюджет проекта	300000 рублей
2.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ

2.2. Сроки проекта:	380 дней со дня утверждения плана управления проектом
2.2.1 Дата утверждения плана управления проектом	08.02.2020
2.2.2. Дата завершения проекта	08.05.2020
2.3. Прочие ограничения и допущения	Допускается задержка выполнения по разработке в связи с ограничениями, которые могут возникнуть при использовании научного оборудования или программным обеспечением)

4.3. Планирование научно – исследовательских работ

Планирование работ является важным аспектом при проектировании. Он позволяет выполнять проект точно в срок, а также позволяет довольно точно рассчитать заработную плату работников, занимающихся проектированием. Над данным проектом работает команда из двух человек – руководитель проекта и проектировщик. Каждый из них выполняет свои обязанности, но некоторую часть работы они выполняют вместе.

Этапы работ представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Этапы работ

№	Описание работы	Исполнитель
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер-проектировщик

3	Определение способа работы пьезокерамического актюатора	Руководитель проекта и инженер-проектировщик
4	Календарное планирование по теме	Руководитель проекта
5	Выбор и подбор оборудования	Инженер-проектировщик
6	Технические расчёты актюатора	Инженер-проектировщик
7	Проверка работы пьезопривода с помощью матемической модели	Инженер-проектировщик
8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель проекта
9	Технико-экономические расчёты	Инженер-проектировщик
10	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер-проектировщик
11	Составление отчета	Инженер-проектировщик
12	Проверка ВКР руководителем	Руководитель проекта
13	Подготовка к защите ВКР	Инженер-проектировщик

В ходе данного раздела работы был составлен перечень работ, необходимый для успешной реализации проекта. Как можно заметить, работа будет содержать 13 основных этапов работ, разделенных между двумя исполнителями – инженером-проектировщиком и руководителем проекта. Данное планирование позволяет эффективно распределить трудовые ресурсы и практически полностью избежать растрат времени на согласование работ.

Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения работ оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, потому что зависит от многих факторов, которые очень трудно учесть. Для того, чтобы определить ожидаемое значение трудоемкости $t_{ожі}$ воспользуемся формулой:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5},$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дней;

$t_{\text{мин}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дней.;

$t_{\text{макс}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дней.

Результаты расчетов продолжительности выполнения работы сведены в таблицу 16.

Таблица 16 - Временные показатели проведения научного исследования

Номер работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожгi}$, чел-дни			
	Руковод.	Инж.-	Руковод.	Инж.-	Руковод.	Инж.-проект.	Руковод.	Инж.-проект.
1	1	-	1	-	1	-	1	-
2	1	10	1	20	1	14	1	14
3	1	3	1	4	1	4	1	4
4	1	-	1	-	1	-	1	-
5	1	10	1	20	1	14	1	14
6	1	11	1	21	1	15	1	15
7	1	4	1	8	1	6	1	6
8	1	-	1	-	1	-	1	-
9	1	5	1	8	1	7	1	7
10	1	3	1	7	1	5	1	5
11	-	1	-	2	-	2	-	2
12	1	-	1	-	1	-	1	-
13	1	2	2	3	2	3	2	3

Таблица 17 – Итоги планирования работ

Общее количество рабочих дней для выполнения работы	83
Общее количество рабочих дней, в течение которых работал инженер-проектировщик	70
Общее количество рабочих дней, в течение которых работал руководитель проекта	13

В качестве графика инженерных работ используем диаграмму Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ (рисунок 4.3).

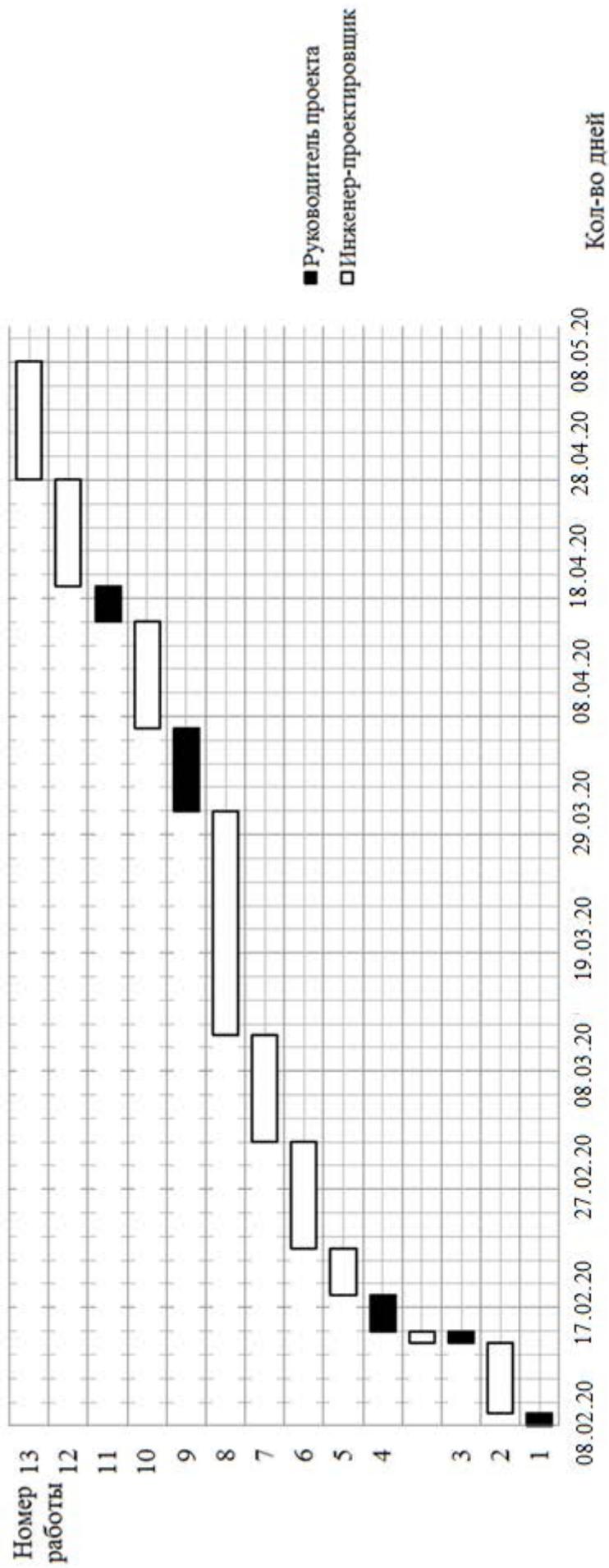


Рисунок 4.3. График Ганта

4.4. Бюджет научно – технического исследования (НТИ)

Для того, чтобы запланировать бюджет НТИ необходимо рассмотреть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. При формировании бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) Материальные расходы;
- 2) Амортизация;
- 3) Заработная плата;
- 4) Отчисления во внебюджетные фонды;
- 5) Накладные расходы.

Материальные затраты

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, информационные носители, картриджи и т.п. Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (3)$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Значения цен на материальные ресурсы установлены по данным, размещенным на сайте канцелярского магазина «Канцелярский мир».

Привлечение сторонней организации «Grafex» для типографических работ.

Стоимость используемых материалов приведена в таблице 18.

Таблица 18 – Материальные затраты на выполнение научного исследования

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Бумага для принтера	упаковка	1	300	250
Ручка	штук	5	15	75
Брошюровка	штук	1	25	25
USB накопитель	штук	1	850	850
Линейка	штук	1	50	50
Распечатка файлов	лист	150	2	300
Итого:				1550

Таким образом материальные затраты на выполнение данного научно-технического исследования составляют 1550 рублей.

Амортизация

В данном пункте будет рассчитана амортизация ноутбука, необходимого в работе над проектом.

Пусть срок эксплуатации ноутбука 5 лет. Отсюда следует, что норма амортизации за месяц равна:

$$K = \frac{1}{n} \cdot 100\%$$

$$K = \frac{1}{5} \cdot 100\% = 20\%$$

где n – срок полезного использования в годах.

Найдем амортизацию:

$$A = \frac{K \cdot I}{12 \cdot 30} \cdot m \text{ р}$$

$$A = \frac{0,20 \cdot 30000}{12 \cdot 30} \cdot 83 = 1383,3 \text{ руб.}$$

где I – итоговая сумма в тыс. руб.;

m – время использования в днях.

Основная заработная плата исполнителей

В этом разделе нам необходимо рассчитать основную заработную плату руководителя и проектировщика. Зарплата работников в первую очередь зависит от трудоемкости выполняемых работ, а также системы окладов и тарифных ставок. Также в зарплату включается премия, которая выплачивается ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада. В нашем же случае премиальный коэффициент составляет 30% от зарплаты.

Статья включает основную заработную плату работников и дополнительную зарплату.

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

где $Z_{\text{осн}}$ - основная зарплата;

$Z_{\text{доп}}$ - дополнительная зарплата (15% от $Z_{\text{осн}}$).

По формуле рассчитаем основную зарплату руководителя проекта:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

где T_p - продолжительность работ, выполняемых научно – техническим работником, раб.дн.

$Z_{\text{дн}}$ - среднедневная заработная плата работника, руб.

Рассчитаем среднедневную заработную плату по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

Для 5 – дневной недели (инженер-проектировщик):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{29250 \cdot 11,2}{213} = 1538 \text{ руб.},$$

Для 6 – дневной недели (руководитель проекта):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{65665 \cdot 10,4}{247} = 2764,8 \text{ руб.}$$

где Z_M - месячный должностной оклад работника, руб.:

$$Z_M = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{np}} + k_{\text{д}}) \cdot k_p$$

Для руководителя проекта:

$$Z_M = 33664 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 65665 \text{ руб.}$$

Для инженера-проектировщика:

$$Z_M = 15000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 29250 \text{ руб.}$$

где $Z_{\text{мс}}$ - зарплата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} - премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{д}}$ - коэффициент доплат и надбавок составляет 0,2;

k_p - районный коэффициент, равный 1,3 (для города Томска);

M – количество месяцев работы без отпуска в течении года.

$F_{\text{д}}$ - действительный годовой фонд рабочего времени научно – технического персонала, раб.дн.

Сведем расчет основной заработной платы в таблицу 19.

Таблица 19 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{mc} , руб.	k_{np}	k_{δ}	k_p	Z_M , руб.	$Z_{\text{он}}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель проекта	33664	0,3	0,2	1,3	65665	2764,8	13	35942,4
Проектировщик	15000	0,3	0,2	1,3	29250	1538	70	107660
Итого:								143602,4

Дополнительная заработная плата исполнителей

По формуле найдем дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

Руководитель проекта: $Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 35942,4 = 5391,36$ руб.,

Проектировщик: $Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 107660 = 16149$ руб.,

где $k_{\text{доп}}$ - коэффициент дополнительной заработной платы.

Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством РФ нормам, органами государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда и медицинского страхования, страхования от несчастных случаев

Отчисления во внебюджетные фонды определим по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

Руководитель проекта: $Z_{внеб.рук} = 0,3 \cdot (35942,4 + 5391,36) = 12400,13 \text{ руб.}$,

Инженер-проектировщик: $Z_{внеб.инж} = 0,3 \cdot (107660 + 16149) = 31147,7 \text{ руб.}$,

где $k_{внеб}$ - коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Суммарные отчисления: $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 12400,13 + 31147,7 = 43547,83 \text{ руб.}$

Накладные расходы

Накладные расходы – это прочие затраты организации. По формуле определим накладные расходы руководителя проекта и инженера-проектировщика:

$$Z_{накл} = k_{нр} \cdot (\text{сумма статей } 1 \div 4)$$

$$Z_{накл} = 0,16 \cdot 204947,58 = 32791,6 \text{ руб.}$$

где $k_{нр}$ - коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Формирование бюджета затрат научно – технического исследования

В основу формирования бюджета входит величина НТИ. При заключении договора с заказчиком, этот бюджет затрат проекта должен защищаться научной организацией. Он является нижним пределом затрат на разработку научно – технической продукции.

Таблица 20 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб	%
Материальные затраты	1550	0.63
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	143602,4	58.7

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	21540,36	8,8
Амортизация	1383,3	0,5
Отчисления во внебюджетные фонды	43547,83	17,8
Накладные расходы	32791,6	13,4
Бюджет затрат НИИ	244415,49	100

Сформировав таблицу результатов, делаем вывод, что бюджет затрат НИИ равен 244415,49 руб. Как и упоминалось ранее, основной процент бюджета затрат НИИ составляет основная заработная плата – 58,7%, а самый малый процент занимает амортизация – 0,5%.

4.5. Определение ресурсоэффективности исследования

Определим эффективности на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение основано на определении двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (12)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Максимальные затраты на покупку комплектующих для создания прототипа актюатора были приняты равными 40000 рублей.

На основании 2окомплекующих варианта исполнения текущей разработки равна 32493,1 рублей. Итоговая стоимость данного варианта исполнения составляет 276908,6 рубля, включая бюджет затрат НТИ (таблица 20).

Аналог разрабатываемого устройства является электромагнитный привод. Он отличается от разрабатываемого проекта дороговизной, сложной конструкцией и сравнительно низкой рентабельностью в данной отрасли.

Исходя из таблицы 6, за изменением пьезокерамического актюатора на электромагнитный привод, цена соответственно увеличиться - 24761 рублей. Стоимость варианта исполнения аналога на классическом приводе составляет 49208,9 рублей. Итоговая стоимость данного варианта исполнения составляет 293624,4 рубля, включая бюджет затрат НТИ (таблица 24).

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{276908,6}{300000} = 0,923$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{293624,4}{300000} = 0,979$$

Следовательно, исходя из этого, можно сделать вывод, что интегральный показатель разработки текущего проекта показывает удешевление стоимости разработки в 0,923 раз (около 7,7%), а интегральный показатель разработки аналога на электромагнитном приводе показывает удешевление стоимости разработки в 0,979 раз (около 2,1%), т.е. удорожание на 5,6% относительно стоимости разрабатываемого электропривода на пьезокерамическом приводе.

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (13)$$

где I_{pi} - интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i - весовой коэффициент разработки;

b_i - банальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Для определения ресурсоэффективности проекта рекомендуется рассмотреть следующие критерии:

Надежность разрабатываемой модели – это длительный эксплуатационный ресурс (в частности, в условиях атмосферы с содержанием агрессивных реагентов, не стабильным напряжением и высокой влажностью).

Энергосбережение привода – это экономия электрической энергии. Энергосбережение достигается за счет оптимального подбора мощности двигателей, и в случае также использование ПЧ.

Помехоустойчивость – это показатель, который показывает стабильность работы оборудования.

Быстродействие привода, а именно как быстро происходит выход на необходимый уровень воздействия для реализации электрохимического травления металла.

Удобство – это возможность лёгкой настройки, монтажа и демонтажа привода. Удобство монтажа и демонтажа осуществляется в отсутствие большого количества резьбовых соединений.

Производительности труда – это показатель, характеризующий результативность труда, обеспечивается в проекте благодаря автоматизации, но при этом капиталовложения возрастают. Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Пьезокерамический актюатор	Электромеханический привод	Магнитострикционный привод
Безопасность	0,25	5	5	5
Удобство эксплуатации	0,2	5	5	4
Производительность	0,10	5	4	3
Энергосбережение	0,10	5	4	5
Надежность	0,25	5	4	4
Помехоустойчивость	0,10	5	4	3
Итого:	1.00	5	4,45	4,15

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{mn} = 0,25 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 5$$

$$I_{аналог1} = 0,25 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,10 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 = 4,45$$

$$I_{аналог2} = 0,25 \cdot 5 + 0,20 \cdot 4 + 0,10 \cdot 3 + 0,10 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,10 \cdot 3 = 4,15$$

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} \quad (14)$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{5}{0,923} = 5,417$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{4,45}{0,979} = 4,54$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (15)$$

где - $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{тэ}}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{тэ}}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{5,417}{4,54} = 1,193$$

Отразим сравнительную эффективность разработки в таблице 22.

Таблица 22 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,979	0,923
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,45	5
3	Интегральный показатель эффективности	4,54	5,417
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,193	

Интегральный показатель эффективности проекта имеет достаточно высокое значение по отношению к аналогу, что говорит об эффективности использования технического решения данного проекта.

В результате выполнения задания данного раздела был проведен анализ конкурентных технических решений относительно существующих компаний.

Также были проведены исследования в области ресурсоэффективности, произведён FAST анализ, SWOT – анализ, который помог нам оценить различные факторы и явления, влияющие на проект. С помощью данного анализа были выявлены положительные и отрицательные стороны нашего проекта.

Был составлен план – график выполнения работ каждого из участников: руководителя проекта и инженера-проектировщика. В итоге получили следующие данные: общее количество дней на выполнение проекта – 83 дня, общее количество дней работы инженера-проектировщика – 70 дня, а количество рабочих дней руководителя проекта – 13 дней.

Рассчитали бюджет НИИ, который необходим для осуществления данного проекта. Он составил 244415,49 руб.

Реализация оптимизированного пьезокерамического актюатора является очень актуальной для многих электрохимических предприятий из-за уменьшения энергозатрат на ремонт магистральных систем и улучшения сопротивляемости металла на различные химические воздействия.

РАЗДЕЛ 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность и охрана труда являются важнейшими составляющими любой деятельности, в особенности производственной, т.к. непосредственно связаны со здоровьем и жизнью человека.

Социальная ответственность - это сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач и, норм и ценностей, понимание осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

Охрана труда – совокупность нормативных, технических и правовых актов, мероприятий и правил, целью которых является сохранение здоровья и жизни работника в процессе трудовой деятельности. Данные мероприятия могут быть организационно-технического, санитарно-гигиенического, социально–экономического, лечебно-профилактического, реабилитационного характера.

Индивидуальная ответственность может проявляться во внутренней и внешней среде. Она является основой дисциплины и своеобразным предохранителем от ошибочных решений.

Научно-исследовательская работа направлена на расчёт параметров имитационной модели актюатора на пьезокерамической основе, а также на оценку конкурентоспособности и планирование проектных работ; исследование рабочего места инженера с целью выявления вредных и опасных производственных и экологических факторов и средств защиты от них.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Согласно ТК РФ, N 197 - ФЗ работник аудитории 253, 8 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен

также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см.

Рабочее место сотрудника аудитории 253, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78. А именно площадь рабочего помещения составляет 50 м^2 (длина $A = 8,5 \text{ м}$, ширина $B = 5,8 \text{ м}$), объем составляет 148 м^3 (высота $C = 3 \text{ м}$). помещение рассчитано на 8 человек, на каждое одно рабочее место приходится в среднем 6 м^2 общей площади и 20.5 м^3 объема.

5.2. Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в аудитории. Исследования подразумевают использование персонального компьютера - ПК и рабочим оборудованием.

5.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Таблица 23 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изгото вление	Эксплу атация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96
2. Превышение уровня шума		+	+	СанПиН
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	СП 52.13330.2011
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96

5.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При использовании оборудования в аудитории 253 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально опасных факторов является ПК и возможность поражения электрическим током. Использование данного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы":

ПК должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [26].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ПК) в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ [27], создаваемых ПК, не должны превышать значений [27], представленных в таблице 24:

Таблица 24 - Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК

Наименование параметров	Диапазон	ДУ 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	25нТл
Напряженность электростатического поля		15кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице 24, соответствуют нормам. [39]

5.2.3. Электробезопасность

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ПК в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ, оборудование оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [38]. Напряжение для питания ПК - 220 В, для серверного оборудования - 380 В. По опасности поражения электрическим током помещение 253, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности [38].

Основными непосредственными причинами электротравматизма являются:

- 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением в случае пробоя изоляции;
- 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением;
- 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала;
- 4) поражение шаговым напряжением.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ [24], являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Указанные средства защиты обеспечивают защиты от поражения электрическим током в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ.

5.2.4. Освещение

Неудовлетворительное освещение может исказить информацию, кроме того, оно вызывает утомление всего организма в целом. Освещение должно обеспечивать выполнение работы без напряжения зрения. Применяют два вида освещения: естественное и искусственное. Для искусственного освещения применяют электрические люминесцентные лампы [33]. Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных

условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиНом 2.2.1/2.1.1.1278-03. Нормируемый показатель искусственного и естественного освещения по п.191 составляет 150 лк

При выборе системы освещения для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования.

Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается.

Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. По спектральному составу видимого света различают лампы 42 дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тёпло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ).

Наиболее широко применяются лампы типа ЛБ. При повышенных требованиях к передаче цветов освещением применяются лампы типа ЛХБ, ЛД. Лампа типа ЛТБ применяется для правильной цветопередачи человеческого лица. Характеристики люминесцентных ламп приведены в таблице №25.

Таблица №25 - Основные характеристики люминесцентных ламп

Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Световой поток			
		ЛД	ЛХБ	ЛБ	ЛТБ
15	127	700	820	835	850

20	127	880	1020	1060	1060
30	220	1650	1940	2020	2020
40	220	2300	2700	2800	2850
65	220	3750	4400	4600	4600
80	220	4250	5000	5200	5200
125	220	-	8000	-	8150

Основные требования и значения нормируемой освещённости рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95. Выбор освещённости осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона.

5.2.5. Шум

При работе с ПК в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

Таблица 26. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука [30]

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	

вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных.										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Согласно [17] уровень шума в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам.

5.2.6 Микроклимат

Микроклимат – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда.

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 253, 8 корпуса ТПУ оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха.

Аудитория 253, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. [29] Таблица 27 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0,1

Таблица 28 - Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ПК.

Согласно [39] микроклимат аудитории 253, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

5.3. Экологическая безопасность

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях. При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014): бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцево-кислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцево-кислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртути материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия.

- Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию).
- Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

Наиболее характерными являются ЧС техногенного и экологического характера. Возможными ЧС техногенного характера являются пожары и взрывы на используемом газовом оборудовании. Экологического характера – загрязнение атмосферы, происходящие при сжигании попутного газа факельным методом.

Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией, которая может произойти на объекте газодобычи является пожар, возникающий вследствие неисправности газового оборудования является пожар. Категория помещений по пожаровзрывоопасности по СП 12.13130.2009.

В качестве мер по предупреждению пожаров и взрывов на объекте будут использованы следующие меры: проведение противопожарных инструктажей со всеми работниками, с периодичностью не менее одного раза в полугодие; обучение персонала правилам противопожарной безопасности; внедрение инструктивных материалов наглядной агитации, регламентов и норм ведения технологического процесса; периодическая организация

противоаварийных работ и установление порядка ведения работ в аварийных условиях [38].

Для повышения устойчивости к возникновению пожара: периодический осмотр состояния оборудования газового оборудования, при необходимости вывод его в ремонт; содержание в исправном состоянии токоведущих проводников, обеспечение беспрепятственного подхода, подъезда и отхода от оборудования; благоустройство территории, скашивание травы.

В помещениях для оповещения рабочего персонала о наличии ЧС предусмотрено звуковое оповещение, происходящее при срабатывании датчиков на задымление в помещениях. На дверях помещений устанавливаются планы по эвакуации людей из здания и памятка в случае пожара.

В случае возникновения пожара в зданиях необходимо срочно покинуть их, используя основной и запасные пожарные выходы. Необходимо позвонить в пожарную охрану, сообщить свои Ф.И.О., адрес и о месте пожара, оповестить руководство. В случае если пожар находится в начальной стадии, можно попытаться потушить его, используя первичные средства пожаротушения (огнетушители, пожарные рукава, песок, воду и др.). При тушении электроприборов, изначально необходимо их обесточить. Для их тушения предпочтительно использовать огнетушители углекислотного или порошкового типа. [39]. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 253, 8 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и

противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

- 1) Неисправное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.
- 2) Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.
- 3) Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Аудитория 253, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 29 - Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 30 - Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе №8 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.

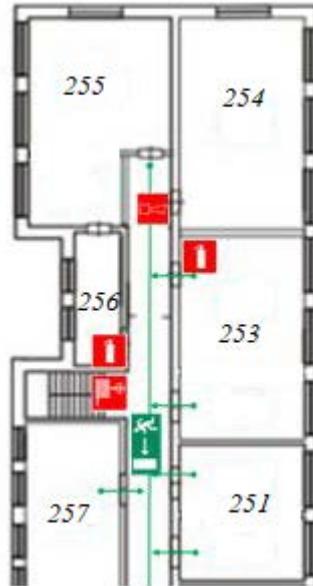


Рисунок 5.1. План эвакуации людей на случай пожара

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан модуль микроперемещений на основе пьезоэлектрического преобразователя напряжения, удовлетворяющий поставленным требованиям точности и динамики.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Были изучены существующие типы приводов микроперемещений и преобразователи энергии, используемые в них;
2. на основании анализа был выбран и рассчитан пьезокерамический актюатор, способный удовлетворить заданным динамическим требованиям;
3. изучены существующие типы преобразователей в поступательные однонаправленные;
4. исходя из сложности реализации существующих преобразователей движения, был разработан и рассчитан оригинальный механизм преобразования, основанный на поочередной работе магнитов;
5. произведен расчет модернизированного преобразователя движения;
6. разработаны функциональные схемы;
7. создана модель привода с магнитным преобразователем в пакете Matlab Simulink;
8. на основании созданной модели были опытным путем получены графики перемещений торца преобразователя и выходного звена при различных значениях подаваемого напряжения.

Разработанный модуль 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.

Примененный в работе принцип перемещения выходного звена легко реализуемый, не требующий больших материальных затрат на производство.

Такое техническое решение имеет свои сильные стороны:

- высокий КПД;
- относительную простоту реализации;
- универсальность применения;
- низкая стоимость материалов.

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на научного сотрудника, в момент выполнения его работы, согласно действующей нормативно – технической документации. Рассмотрены правовые и организационные моменты по обеспечению безопасности труда. Так же

предложены основные меры по профилактике и ликвидации воздействий пагубных факторов на организм человека, таких как шум, микроклимат, освещение и т.д. В данном разделе были проанализированы такие вопросы как экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях. Для этого рассмотрены возможные случаи их возникновения и проработаны методы по их предотвращению.

Отталкиваясь от всего вышесказанного, можно прийти к выводу, что, с точки зрения эффективности трудовой деятельности работника, правильная организация рабочего места играет колоссальную роль. Правильные условия труда способствуют повышению эффективности и производительности работ научного сотрудника. При соблюдении всех выше перечисленных мер безопасности, научный сотрудник будет полностью защищен от влияния опасных и вредных факторов, чрезвычайных ситуаций, несчастных случаев. Так же будут соблюдаться экологические нормы безопасности.

Данный раздел имеет большую значимость в практическом применении, так как предоставленный материал соответствует нормативным документам, которые регламентируют влияние на человека, каждого выявленного опасного или вредного фактора.

Список публикации

1. Доклад на международных конференциях.

Чурилов Д.В., Дронов Д.В. Исследование отдающих устройств линий производства изолированных жил и кабеля // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием : в 2 т, Иркутск, 24-28 Апреля 2018. – Irkutsk: ИРНТУ, 2018 – Т. 1 – С.90-95.

Список используемой литературы:

1. Бансявичус Р.Ю., Рагульскис К.М. Вибродвигатели. Вильнюс: Мокслас. 1981.- 193 с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа. 1990. - 400 с.
3. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние. 1990. - 272 с.
4. Гордиенко И.Е., Чутко В.М. Конечно-элементный расчет связанных электроупругих колебаний составного преобразователя. Киев: Наукова думка. 1986.-208 с.
5. Бараускас Р.А. и др. Расчет биморфных пьезокерамических элементов. //Вибротехника. 1983. Вып 46 №2 С 118-127.
6. Архитектурная бионика/ Под ред. Ю.С. Лебедева. М.: Стройиздат. 1990. -269 с.
7. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Т. 6. 2-е изд./ Ред. совет К.В. Фролов М.: Машиностроение. 1995. - 456 с.
8. Электронный ресурс -- https://www.kite.ru/articles/powerel/2006_10_36.php
9. Онлайн энциклопедия--<https://cyberleninka.ru/article/n/piezoprivod-na-osnove-tonkoplenochnyh-piezoaktyuatorov/viewer>
10. Сайт Инструментального колледжа лондонского университета: <http://www.ucl.ac.uk/g23istruments/>
11. Балкаров О.М., Леонов А.М. Биморфный пьезокерамический элемент для сканирования лазерного луча // Труды МВТУ. 1974. № 199. С. 101-105.
12. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Т. 6. 2-е изд./ Ред. совет К.В. Фролов М.: Машиностроение. 1995. - 456 с.

13. Даринцев О.В. Алгоритмы адаптивного и интеллектуального управления мобильным микроманипуляционным роботом. Автореферат дисс. канд. тех. наук. Уфа: УГАТУ, 1999. 24 с.
14. Домаркас В.И., Кажис Р.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974, - 220 с.
15. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические устройства мехатроники // Мехатроника. 2002. № 2. С. 38 -46.
16. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. №5. С. 40-44.
17. 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.
18. Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. Л.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
19. Иванов А. А. Проектирование систем автоматического манипулирования миниатюрными изделиями. М.: Машиностроение, 1981.-271 с.
20. 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.
21. Сайт журнала «Микросистемная техника», <http://www.microsystems.ru>.
22. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 110 с.
23. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019.
24. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015.

25. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003.
26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003.
27. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003.
28. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011
29. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996.
30. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996.
31. ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011.
32. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984.
33. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс] URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Системы противопожарной защиты установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические, 2009.
34. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003.
35. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018).
36. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017.
37. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. Седьмое издание, 2002.
38. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.

39. Дашковский А.Г. Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, 2010. – 8 с.
40. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
41. СТО 70238424.29.240.10.003-2011 Стандарт организации НП «ИНВЭЛ». Подстанции напряжением 35 кВ и выше. Условия создания. Нормы и требования.
42. СТО 70238424.29.240.10.009-2011 Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования.
43. СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
44. Kenji Unchino. Advanced piezoelectric materials. University Park: Penn State University, 2010 – 696 p.
45. Hyunuk Kim. Piezoelectric energy harvesting. Virginia: Center for Energy harvesting materials and systems, 2009 – 236 p.
46. Daniel J. Inman. Energy harvesting technologies. Berlin: Springer, 2008. – 544 p.
47. Jonh B. Wachman. Ceramic innovation in the 20th century. New Jersey: Rutgers University, 1999. – 307 p.

Приложение А

Microdisplacement systems

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Дронов Даниил Владимирович		

Консультант школы отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пташкин А.С.	к.ф.н		

Introduction

Miniature microdisplacement systems (MDP) have been used in the manufacture devices for many years, tied to optical-mechanical units, and clock movement. An impressive breakthrough of the end of the 20th and early 21st century in the formation of technologies conjugated with the production of computer technologies, presented with the aim of developing consciously new mechanisms with microsystem technology. Instead of the inventions of electrical parts in the 60s and 80s of the last century, the inventions of electrical parts emerged and clearly established ways of further miniaturization, the possibilities of miniaturization of electromechanical products were unclear.

The mechanics came close to its "physical" limit. Mechanized micro-movement concepts based on the automatic creation of small objects did not inspire confidence and required constant stay 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 high requirements for military equipment, health and safety of nuclear power plants have influenced the emergence of miniature and microelectromechanical systems (MEMs). Miniature devices can be called devices, the size of which is from 10x10x10 mm to 50x50x50 mm, they are microsystems. Systems of microdisplacements 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.

The infusion of huge sums into the production of microelectronic technologies, especially for the manufacture of large-scale integrated circuits based on silicon, allowed the production of micromechanical devices and systems. Mass creation of micromachines from semiconductor materials based on photo and X-ray lithography (LIGA-technology); it 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 creating connections in an array of semiconductor material makes it possible to produce bulky mechanical structures. They have significant reliability, as well as the strength required to transfer power and even torque in micromechanical transmissions. It follows that the basis for the formation of meMS microelectronics is the technology that are used in almost all volumes of silicon-based products. It affects the entire production process of components and mechanical elements. [48]

Since the last years of the 20th century, there has been an active increase in the number of experimental and implemented projects. 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 huge amounts of the elements of automated systems are combined in a relatively small volume.

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. [45]

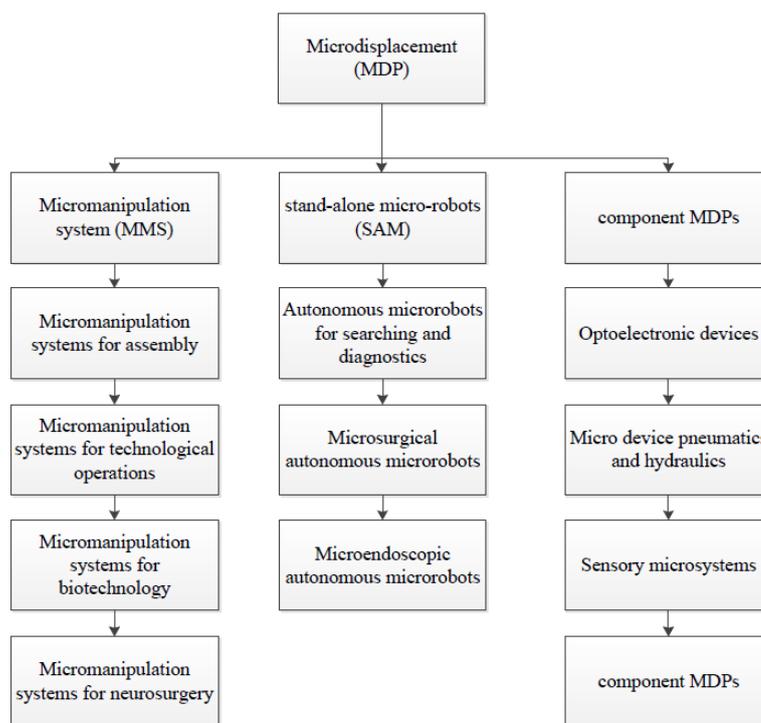


Figure 1. The main perspective directions of the development of the MDP

MMS is an automated electromechanical system used to process or move mini and micro-size measurements. They include a mechanical monicity of micromechanical MMS devices. These systems are similar to the robotic installation of precision hand engineering, which has the highest positioning accuracy, also 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 data processing is designed for microwelding, rationing, bonding, including monitoring and testing parameters. Their parameters are comparable to the past case, but there is a problem that the working body must control the applied pressure in the range from 103 N to 0.1 N.

These days, MMS is widely used for experiments and technologies. 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 only implemented if there are highly reliable communication systems and measuring equipment. As a result, opportunities 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. The task of this work is therefore 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.

Piezoceramics origins

Piezoceramics is a material showing the piezoelectric effect.

Piezoelectricity is a connection between two concepts – electrical and mechanical systems. The direct piezoelectric effect causes electric charge to be produced because of mechanical stress, whereas the converse effect causes mechanical strain to be generated because of an applied electric field (Figure 2).

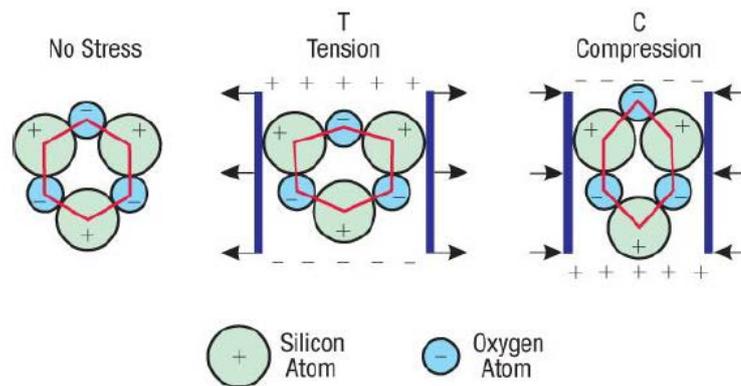


Figure 2. Piezoelectric effect in a quartz crystal

Curie brothers first demonstrated the principle of piezoelectricity and direct piezoelectric effect in the late 19th century. 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 that are suitable for electroacoustic transducers. [46]

The phenomenon of pseudo-effect explains the displacement of ions, awakening the electrical polarization of the structural nodes of the crystal. When using an electric field, ions are replaced by electrostatic forces, it leads to mechanical deformation of the whole crystal. Piezoelectric crystals are used in structures as a converter that carries elements of a 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. Therefore,

as they are ceramics (piezoceramics), they have the ability to be formed for many shapes and sizes (Figure 3).

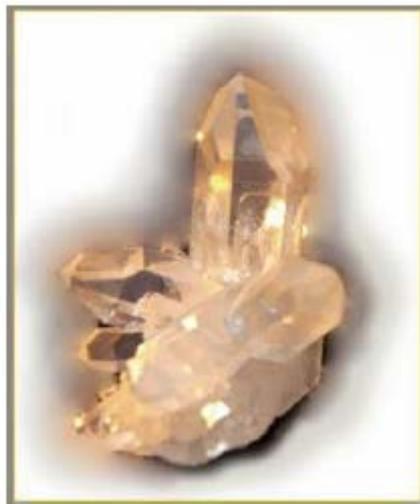


Figure 3. Natural piezoelectric crystal of quartz

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 4). 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. Curie's temperature is the temperature when intrinsic dipoles of a material change direction, and the material's spontaneous electric polarization changes to induced electric polarization, or vice versa. When the ceramics is cooled, the ions "remember" this survey and act accordingly. [45]

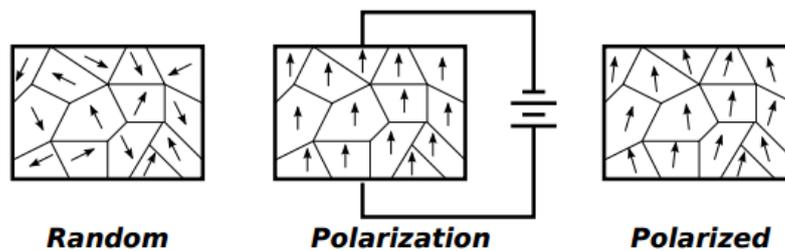


Figure 4. Polarization process to generate piezoelectric effect

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 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.

The piezoelectric effect ensures that these materials are both used as a meter and a drive. The strain, for example, is able to be measured as a result of voltage capture formed through the material to which the voltage is applied. As a meter, these materials are used to detect damage in the structures into which they are integrated. Piezoceramics is used as an electric drive, as it can strain or replace when electrical voltage is applied through the polishing axis. This creates Piezoceramics analogue for activating valve or active control systems. Piezoceramics is also used to reverse the effect, as it is able to effectively change mechanical energy into electrical energy and vice versa.

For example, it has been confirmed that the use of piezoelectric components for passive electronic damping effectively functions in commercial products such as K2 (Smart Ski Technology) (Figure 5).

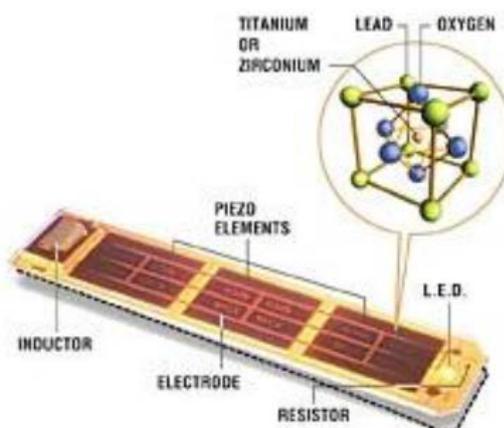


Figure 5. Smart Ski Technology

Active Control eXperts, Inc. created the Copperhead ACX bat, which shunts piezoceramic materials to convert mechanical vibration 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. The created method of damping essentially reduces the sting during impact and gives the bat more of a sweet spot (Figure 6).

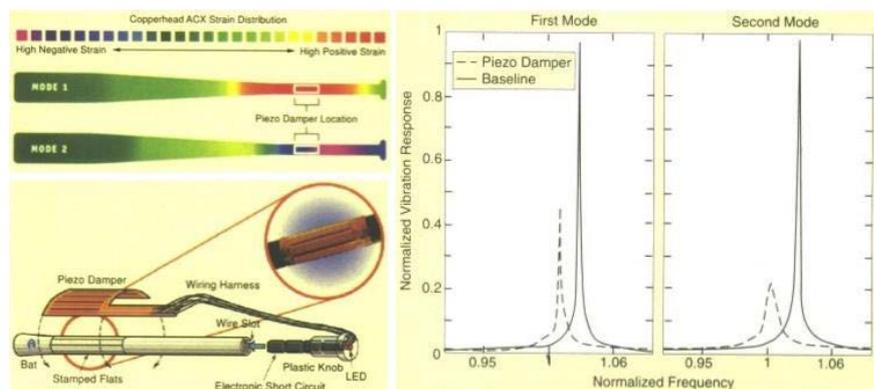


Figure 6. ACX Piezoelectric Damper

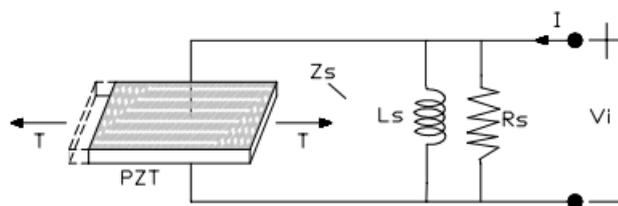
Structural controls have recently been used as a diversion of acoustic radiation from vibrating structures, namely noise. All experiments were associated with the Sun Et Al active control system. Use of piezo to reduce vibrations and internal noise of the homogeneous cylindrical shell that simulated the fuselage section. Two equivalent drives were invented based on the idea of structural and acoustic connected properties of the system.

Varadan et al. showed working sound control that radiates from the plate on a thin square metal plate. Piezoelectric sensors as well as drives controlled structural vibrations of the plate responsible for sound/noise squishing. This highly effective method of active noise cancellation was introduced to reduce the inner hum of the Varadan cabin. They used discrete piezoelectric drives and sensors to actively control the pulsation from the walls of the hull. They have managed to achieve a

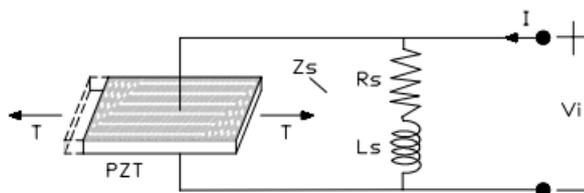
global reduction in noise. Acoustic regulation was achieved by integrating piezoceramic materials as sensors and drives in some elements of the car.

Active control with the use of piezoceramics was invented to change the sound flow through the panel. Henriouille et al added a flexible cellular structure with a piezoelectric PVDF layer in the double panel partition. With active pvDF control, they increased loss of transmission by 10 dB in frequencies below 400 Hz. Xiaoqi et al. used intensive control with piezoelectric drives and measurements to increase transmission loss through a thin dural plate. The plate was used effectively, where the effectiveness of isolation was poor quality. With the support of the sensor and one composite sensor in the 1st three frequencies, a global reduction of sound by 15-22 dB was conquered.

In addition to K2 ski designers, numerous experts have studied the use of passive electric shunts as a possible method of suppressing vibration. In 1979 Forward was the first to propose the use of passive electric shunts with piezoelectric components to dampen vibration as well as control. Hagood and von Flotow created the first quantitative analytical modifications of piezoelectrics, shunted by 2 types of circuits, a resistor circuit (RC) and a resistor and inductor circuit (RLC) (Figure 7).



(a) Shunt Circuit Concept Used by Wu



(b) Concept Shunt Circuit by Hagood and von Flotow

Figure 7. Design concept

They demonstrated that when PTT was attached to the resistor chain, the frequency relationship between PTS was similar to visco-elastic damping materials. THE STA is shunted with a inducer, as well as a resistor, has an electrical resonance similar to the vibration absorber. Hagood and von Flotow tested both models on a cantilevered beam and created methods analyzed by bypass systems. In the further piezoelectric theory was improved by Davis and Lesiutre on damping simulation of performance, shunted piezoceramics. They have created a way in which damping is predicted from an effective energy fraction of the modal strain stored in the HRT, the effective piezoelectric factor of material loss and the frequency formation factor. They established the energy deformation factor through the end element method, the loss factor associated with the electromechanical compound factor, and the frequency formation factor from the dynamic interactions of the bypass chain.

The initial study stage of Hajud and von Flotou showed that most of them have worked to understand, improve the methods of bypass surgery. Edberg, for example, replaced the heavy trading inductor used by Hagood with a simple electrical circuit. Hollkamp also increased the piezoelectric theory in order to demonstrate that it was possible to suppress a number of modes with the support of the 1st PTT. [47]

The dynamic properties of the piezo motor, specialized for positioning activities, are represented by a system of differential equations:

$$\begin{cases} T_1 \dot{x}(t) + x(t) = u(t); \\ T_2^2 \ddot{y}_1(t) + 2\xi T_2 \dot{y}_1(t) + y_1(t) = \Phi[x(t)]; \\ T_3 \dot{y}(t) + y(t) = \mu T_3 \dot{y}_1(t) + y_1(t), \quad \mu < 1, \end{cases}$$

where $u(t)$ - input from the source of the control voltage, $x(t)$ - electrical voltage on the linings of the piezoelements, caused by the deformation of the piezoelements, $y_1(t)$ - primary movement, $y(t)$ - the resulting process of moving the mobile link of the piezomotor, taking into account the polarizing effect of the control electric field.

The first equality of the system reflects the inertial properties of the piezomotor as a capacitive load in combination with the output voltage control key, where the T1-RC, R-resistance source, c-capacity piezoelements. Second equality

assumes the vibrating qualities of the piezomotor as a single-mass system with one stage of freedom. At the same time, given the low damping, the constant T_2 is conditioned by a simple formula $T_2/1/2f_p$, where f_p is a resonant frequency. 3rd Equality describes the micro-creep of piezoceramics. The unchanged T_3 sets for about a minute, but the auxiliary movement caused by the creep of piezoceramics reaches 10% of the original movement.

Performance, control system automation, combined control structures, including the way to control the set up and the error-matching channel between the impact set and the recreated micromotion, are synthesized in order to increase accuracy. At the same time, an approach is proposed to build a structure of compensatory principle of action.

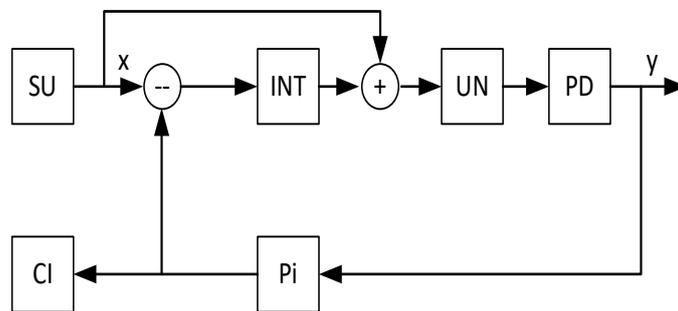


Fig. 8. Functional scheme with compensation for entry error: SU - a rearing device; INT is an integrator; UN is a voltage amplifier; PD - piezomotor; Pi is a measuring converter; CI is a digital indicator; x-inading effect; y - moving the mobile link, the error signal.

All in all, this chapter provides background information on the use of piezoelectric drives, including the introduction of piezoelectric effects and the permissible use of piezoelectric materials.

Literature was analyzed and the study was shown in the process, and the study was presented with the aim of providing additional reference data on piezoelectric materials. As a result, the chain shunt used for this study is explained in detail.