

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,**  
**МЕХАНИКИ И ОПТИКИ”**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
**ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**«СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОМ»**

Автор Тишкевич Леонид Владимирович \_\_\_\_\_  
(Фамилия, Имя, Отчество) (Подпись)

Направление подготовки (специальность) 27.03.04 \_\_\_\_\_

Квалификация бакалавр \_\_\_\_\_  
(бакалавр, инженер, магистр)

Руководитель Бойков В.И., доцент, к.т.н \_\_\_\_\_  
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

**К защите допустить**

Зав. кафедрой Бобцов А.А., профессор, д.т.н. \_\_\_\_\_  
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

“ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Санкт-Петербург, 2017 г.

Студент Тишкевич Л. В. Группа Р3442 Кафедра СУиИ Факультет СУиР  
(ФИО)

Направленность (профиль), специализация Управление в технических системах

Консультант(ы):

а) \_\_\_\_\_  
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

б) \_\_\_\_\_  
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

Квалификационная работа выполнена с оценкой \_\_\_\_\_

Дата защиты “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Секретарь ГЭК \_\_\_\_\_

Листов хранения \_\_\_\_\_

Демонстрационных материалов/Чертежей хранения \_\_\_\_\_

## Содержание

Введение.....	5
1 Обзор существующих технических решений .....	7
2 Заключение по итогам обзора существующих решений. ....	18
3 Математическая модель пьезокерамического исполнительного устройства .....	21
4 Разработка функциональной электрической схемы системы управления силовым пьезоактюатором.....	27
5 Разработка структурной электрической схемы системы управления силовым пьезоактюатором.....	28
6 Синтез регулятора системы автоматического управления.....	29
6.1 Построение модели силового пьезоактюатора и показатели качества. .	29
6.2 Синтез регулятора перемещения силового пьезоактюатора .....	31
7 Учет особенностей цифровой реализации регулятора. Исследование динамики автоматической системы .....	37
8 Разработка элементов технической реализации системы управления.....	39
8.1 Высоковольтный усилитель напряжения .....	39
8.2 Преобразователь напряжения .....	39
8.3 Микроконтроллер .....	40
8.4 Датчик положения.....	41
8.5 Инструментальный усилитель .....	42
9 Разработка алгоритма управления системой .....	43
Заключение .....	45
Список использованных источников .....	46

Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.																											
<div style="font-size: 1.2em; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">КСУИ.107.РЗ442.001 ПЗ</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 60%;"> <p style="margin: 0;">Лит Изм. № докум. Подп. Дата</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Разраб.</td> <td style="width: 15%;">Тишкевич Л.В.</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> </tr> <tr> <td>Пров.</td> <td>Бойков В.И.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Н. контр.</td> <td>Ведяков А.А.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Утв.</td> <td>Бобцов А.А.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;"> <p style="margin: 0; font-size: 1.1em;">Система управления силовым пьезоактюатором</p> <p style="margin: 0; font-size: 1.1em;">Пояснительная записка</p> </div> <div style="width: 5%; text-align: center;"> <p style="margin: 0; font-size: 0.8em;">Лит</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td></td> <td>4</td> <td>47</td> </tr> </table> </div> </div> <div style="margin-top: 10px; font-size: 0.9em;"> <p style="margin: 0; text-align: right;">Университет ИТМО Кафедра СУиИ Группа РЗ442</p> </div>														Разраб.	Тишкевич Л.В.				Пров.	Бойков В.И.				Н. контр.	Ведяков А.А.				Утв.	Бобцов А.А.								4	47
Разраб.	Тишкевич Л.В.																																						
Пров.	Бойков В.И.																																						
Н. контр.	Ведяков А.А.																																						
Утв.	Бобцов А.А.																																						
	4	47																																					



## Введение

Главным преимуществом пьезоэлектрических актюаторов является беспрецедентная точность позиционирования – сотые и даже тысячные доли нанометра. Кроме того, они надежны, долговечны, обладают отличным быстродействием, развивают высокие ускорения и сочетают большое развиваемое усилие с компактностью. Очень важно и то, что пьезоактюаторы не имеют вращающихся и скользящих частей, не требуют смазывания и обслуживания, способны работать при низких температурах и в вакууме. Их недостатками являются небольшая длина хода, ограничивающая область их использования, и высокая цена. При выборе между различными типами пьезоэлектрических актюаторов следует обращать внимание на исполняемое движение и требуемые характеристики.

Пьезоактюаторы нашли применение в широком ряде областей, таких как медицинские инструменты, контроль промышленных процессов, системы производства полупроводников, бытовые электрические приборы, системы контроля связи, различные измерительные приборы, а также во многих других областях.

Коммерческие системы, которые используют пьезоэлектрические материалы – помпы, швейные машины, датчики (давления, обледенения, угловых скоростей и т.д.), оптические инструменты, лазерные принтеры, моторы для автофокусировки камер и другие. При этом область применения данных материалов постоянно растет. Применение пьезоэлементов обычно сводится к четырем категориям: сенсоры, генераторы, силовые приводы, и преобразователи.

В генераторах пьезоэлектрические материалы могут генерировать напряжение, которого достаточно для возникновения искры между электродами, и таким образом они могут быть использованы как электроды для воспламенения топлива, для газовых плит и для сварочного оборудования.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.РЗ442.001 ПЗ

Лист

5

С другой стороны, электрическая энергия, генерируемая пьезоэлектрическими элементами, может накапливаться. Такие генераторы являются превосходными твердыми аккумуляторными батареями для электронных схем.

В сенсорах пьезоэлектрические материалы преобразуют физические параметры, такие как ускорение, давление и вибрации, в электрический сигнал.

В силовых приводах пьезоэлектрические материалы преобразуют электрический сигнал в точно контролируемое физическое смещение, при этом четко устанавливая точность механических инструментов, линз и зеркал.

В преобразователях пьезоэлектрические материалы могут как генерировать ультразвуковой сигнал из электрической энергии, так и конвертировать приходящие механические колебания в электрические. Такие пьезоэлектрические приборы проектируются для измерения расстояний, скорости потока и уровня жидкости. Также преобразователи применяются для генерирования ультразвуковых вибраций, которые в дальнейшем используются для очистки, сверления, сварки, размельчения керамики и для проведения медицинской диагностики.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

6

## 1 Обзор существующих технических решений

### 1) Пьезоактюатор компании «Cedrat Technologies»

АРА300ML – преднагруженный пьезоэлектрический актюатор с самой высокой длиной хода из серии усиленного пьезопривода ML. Данный актюатор предназначен для получения жесткого воздействия и позволяет производить большие перемещения, чем актюаторы классической постройки. Также данный актюатор имеет высокую полосу пропускания и может нести высокую динамическую нагрузку.

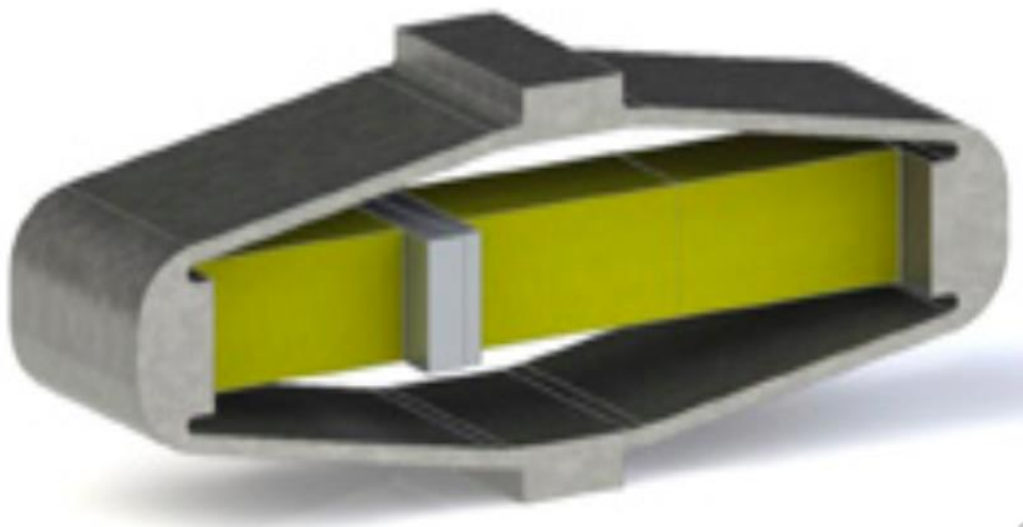


Рисунок 1 – Пьезоактюатор АРА300ML

Технические характеристики АРА300ML представлены в таблице 1. Механическое усиление достигается благодаря внешней эллиптической оболочке, изготовленной из нержавеющей стали. Актюатор снабжается встроенными датчиками перемещения, что позволяет регулировать его работу с высокой точностью.

Конструктивно актюатор выполнен с механическим усилителем перемещения, который позволяет увеличить диапазон перемещений актюатора, но уменьшает его силовые показатели.

Инв. № подл.	Подп. И. дата
Взам. инв. №	Инв. № дубл.
Подп. И. дата	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Таблица 1 – Технические характеристики пьезоактюатора АРА300ML

Перемещение	304 мкм
Коэффициент Стиффенса	1.79 Н/мкм
Толкающая сила	546 Н
Электрическая емкость	20 мкФ
Резонансная частота	2829 Гц
Масса	160 г
Длина	79 мм
Динамический коэффициент	

Данным двигателем можно управлять с помощью блока управления от этой же компании «Cedrat Technologies». Это устройство, связываясь с ЭВМ высшего уровня, управляет работой пьезопривода.



Рисунок 2 – Система управления пьезоактюатором LA75C

Инв. № подл.	Подп. И дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. И дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



Данная система управления обладает высокой точностью позиционирования и высокой частотой приложения.

Ключевые особенности блока управления:

- диапазон выходного напряжения [-20; 150];
- низкий уровень шума – 85 дБ;
- высокая точность – величина ошибки не превышает 0,1%;
- полностью защищенный усилитель пьезо;
- многоканальная конфигурация.

Блок управления обладает высокой частотой регулирования, также в системе осуществляется обратная связь по перемещению при помощи тензометрического датчика, встроенного в конструкцию пьезоактюатора. Использование актюаторов вместе с таким блоком управления позволяет получить нелинейность системы равным всего 0.1%.

Изделия компании «Cedrat Technologies» находят применение в прецизионных исполнительных механизмах, точность перемещения которых определяется нанометрами. Высокая точность позиционирования при относительно небольшом быстродействии востребована в таких изделиях, как космические интерферометры, системы оптического обнаружения (лидары), магнитометры, телескопы, камеры и т.п. Стойкость к вибрационным нагрузкам и высокая прочность изделий этой компании сочетаются с высокой плотностью мощности.

Типовые функции исполнительных механизмов для точного позиционирования следующие: управление зондом сканирующего атомно-силового микроскопа, перефокусировка оптических систем, настройка оптических резонаторов в метеорологических спутниках Meteosat, управление диаграммой направленности антенн, управление потоком топлива маневровых реактивных двигателей и другие.

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.РЗ442.001 ПЗ

Лист

9

## 2) Электрический пьезоактюатор компании «Элпа»

Многослойные пьезоэлектрические преобразователи МПП 6х6 конструктивно выполнены в виде многослойных блоков, собранных с помощью клеевого соединения из многослойных пьезокерамических элементов. Они предназначены для преобразования электрической энергии в механическую, например, в перемещение или усилие, с использованием пьезоэлектрического продольного эффекта.

Многослойные пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются на базе уникальной элементно-структурной технологии с использованием разработанного АО "НИИ "Элпа" специального пьезокерамического материала – ЦТС-46, обладающего высокими электрострикционными характеристиками и низкой температурой спекания.



Рисунок 3 – Многослойные актюаторы МПП 6х6

Инв. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

## Отличительные особенности актюаторов МПП 6х6:

- большие перемещения до 10 мкм/см при низких значениях напряжения (100 В);
- большое развиваемое усилие на единицу площади рабочей поверхности – 3500 Н/см<sup>2</sup>;
- малая потребляемая мощность (устройство способно работать на уровне тока утечки – 100 мкА и менее);
- высокое быстродействие (возможна работа на частотах до 1/3 от частоты собственного резонанса – несколько десятков килогерц);
- высокая разрешающая способность перемещения ( $1 \div 10$  нм);
- малые размеры (меньше 0,1% от стандартных размеров пакетированных преобразователей);
- отсутствие электромагнитных шумов;
- высокая надежность (до 210<sup>9</sup> импульсов).

## Области применения преобразователей:

- пьезоэлектрические приводы клапанов насоса-форсунки впрыска топлива;
- подстройка положения головки принтера или магнитной головки;
- системы виброгашения и шумоподавления;
- оптико-механические устройства с системами стабилизации;
- системы автоюстировки и подстройки лазеров, оптических устройств, включая интерферометры;
- приводы адаптивных оптических систем и оптических фазовых модуляторов;
- юстировка и подстройка волоконно-оптических систем передачи и приёма информации;
- линейные пьезоэлектрические двигатели.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.РЗ442.001 ПЗ

Лист

11

Таблица 2 – Параметры пьезоактюаторов МПП 6х6

Параметр	Тип актюатора		
	МПП 6X6X20	МПП 6X6X30	МПП 6X6X40
Кол-во элементов, N	7	11	15
Длина, мм	20	30	40
Амплитуда перемещения при номинальном напряжении 100 В, мкм	15	24	32
Амплитуда перемещения при максимальном напряжении 150 В, мкм	23	36	48
Статическая ёмкость, мкФ	4	5,5	7,5
Блокирующее усилие при максимальном напряжении, Н	>1500	>1500	>1500
Входное сопротивление, МОм	15	10	5
Воздействие внешних факторов			
Рабочий диапазон температур, °С	от -50 до +85		
Срок службы, годы	20		
Наработка на отказ (в номинальном режиме эксплуатации), циклы	>2 * 10 <sup>9</sup>		

Подп. И. дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И. дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

12

Данным пьезоактюаторами можно управлять с помощью системы управления PAD-120 от Российской компании «Визионика».



Рисунок 4 – Блок управления пьезоприводом PAD-120

Описание и характеристики блока управления:

- многоканальный блок управления пьезоприводом PAD-120 предназначен для формирования заданных программой ПК уровней напряжения на пьезоприводах деформируемых зеркал, систем коррекции наклонов и т.п.;
- блок состоит из набора (до 12 шт) модулей 8-ми канального ЦАП, преобразующего цифровой сигнал в ШИМ-модуляцию с усилительным каскадом на выходе, работающем в классе «Д»;
- блок выполнен в корпусе стандарта «Евромеханика» с легко заменяемыми платами-модулями и имеет возможность быть встроенным в 19-дюймовую телекоммуникационную стойку;
- на каждом канале работает реализованная на FPGA, независимая цифровая обратная связь по напряжению и току;

Инф. № подл.	Подп. И дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

— на базе интерфейсного модуля возможна реализация схемы измерения внешних сигналов с тензодатчиков для построения внешней обратной связи, либо для преобразования входных аналоговых сигналов.

Таблица 3 – Технические данные блока управления

Максимальное количество каналов в блоке	96
Выходное напряжение	от 3 до 120 В
Скорость нарастания сигнала (программируется)	до 30 кВ/с
Ток отключения питания (защита от КЗ)	280 мА, в течение 1 мс
Генерация напряжения	Синус (интерфейсным модулем)
	Синус, меандр, пила, шум (программно)
Интерфейс к ПК	Ethernet 10/100, LVDS, FIBER
Напряжение питания	220 В
Потребляемая мощность	250 Вт
Размер	482x170x450 мм

Система управления PAD-120 не обеспечивает обратную связь по положению, в блоке управления лишь поддерживается заданное выходное напряжение, система такого рода не позволяет полностью раскрыть потенциал современных пьезоактюаторов.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

## 3) Электрический пьезоактюатор PICA Stack Piezo Actuators

P-007-P-056 PICA Stack Piezo Actuators – серия стержневых пьезоэлектрических актюаторов немецкой компании «Physik Instrumente». Данный актюатор предназначен для создания мощных усилий, а также обладает высокой грузоподъемностью.



Рисунок 5 – Электрический пьезоактюатор PICA Stack Piezo

Рабочее напряжение данного актюатора варьируется от 0 до 1000 В. Устройство обладает длительным сроком службы без ухудшения его качественных характеристик. В качестве обратной связи по перемещению выступает тензометрический датчик положения.

Инв. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Таблица 4 – Характеристики PICA Stack Piezo P-007-P-056

Перемещение	5-180 мкм
Тип датчика	тензо
Диаметр	7-56 мм
Длина	8-154 мм
Блокирующее усилие при максимальном напряжении	650-78000 Н
Коэффициент Стиффенса	19-2000 Н/мкм
Электрическая ёмкость	11-27000 мкФ
Резонансная частота	5-126 кГц

Компания «Physik Instrumente» для управления данным актюатором предлагает использовать блок E-464 PICA Piezo Driver / Amplifier.



Рисунок 6 – Блок управления E-464 PICA Piezo Driver / Amplifier

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



Данный блок управления имеет три мощных канала связи, компьютерный интерфейс и дисплейные модули. Выходное напряжение принимает значение от -30 до 130 В. Также возможен контроль положения.

Таблица 5 – Характеристики E-464 PICA Piezo Driver / Amplifier

Диапазон входного напряжения	от -2 до +12 В
Выходное напряжение	от -30 до +130 В
Максимальный ток для каждого канала	140 мА
Номинальное значение тока для каждого канала	40 мА
Коэффициент усиления по напряжению	10
Входное сопротивление	100 кОм
Максимальная потребляемая мощность	40 Вт
Масса	0.9 кг

Подп. И дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. И дата

Инв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

17

## 2 Заключение по итогам обзора существующих решений

Зарубежные компании, такие как «Cedrat Technologies» и «Physik Instrumente» непрерывно обновляют и пополняют собственные линейки пьезоактюаторов и сопутствующей к ним электроники. Для того, чтобы идти в ногу с требованиями и ожиданиями своих заказчиков в области эффективных и надежных мехатронных систем, специалисты компании «Cedrat Technologies» разрабатывают компактные, динамичные и точные компоненты устройств. Вся разработанная техническая продукция обеспечена качественными и надежными системами управления, для каждой из которых есть свое программное обеспечение.

Российская компания «Эпла» является ведущим в России разработчиком и производителем специфической наукоемкой пьезотехнической продукции – пьезокерамических материалов, приборов на их основе, изделий акустоэлектроники и т.п. Однако разработку и производство блоков управления для них компания не ведет.

Обзор существующих технических решений позволяет сделать несколько выводов о развитии систем управления пьезоактюаторами:

- усовершенствуются способы управления актюаторами (постройка систем управления с обратной связью по перемещению позволяет более продуктивно и точно управлять процессами регулирования положения двигателя и помогает добиться его максимально точного позиционирования);
- разрабатываются новые качественные усилители, выполненные на микросхемах, благодаря чему происходит уменьшение габаритных показателей блоков управления, также уменьшается потребляемая энергия, т.е. система становится энергосберегательной;
- улучшается качество аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей, что позволяет увеличить быстродействие системы в целом;

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.РЗ442.001 ПЗ

Лист

18

— разрабатываемые новые, наиболее точные оптические, тензометрические и емкостные датчики позволяют свести ошибку работы устройств к минимуму.

Для разработки системы управления силовым пьезоактюатором мной был выбран актюатор Р-088 от компании «Physik Instrumente». Данный актюатор из серии PICMA изготавливается из типа керамики PIC252. Выбранный двигатель отличается превосходным сроком службы и идеально подходит для динамической работы. Р-088 представляет собой гибкий многослойный привод с адаптируемой общей высотой.

Масштабирование привода осуществляется благодаря его штабелированной конструкции. Возможна гибкая адаптация диапазона хода. Кольцевое поперечное сечение обеспечивает легкую интеграцию.

Данный пьезоактюатор позволяет совершать перемещение до 14 мкм при напряжении 150 В, что удовлетворяет требованиям технического задания.

Внешний вид серии актюаторов Р-088 представлен на рисунке 7.

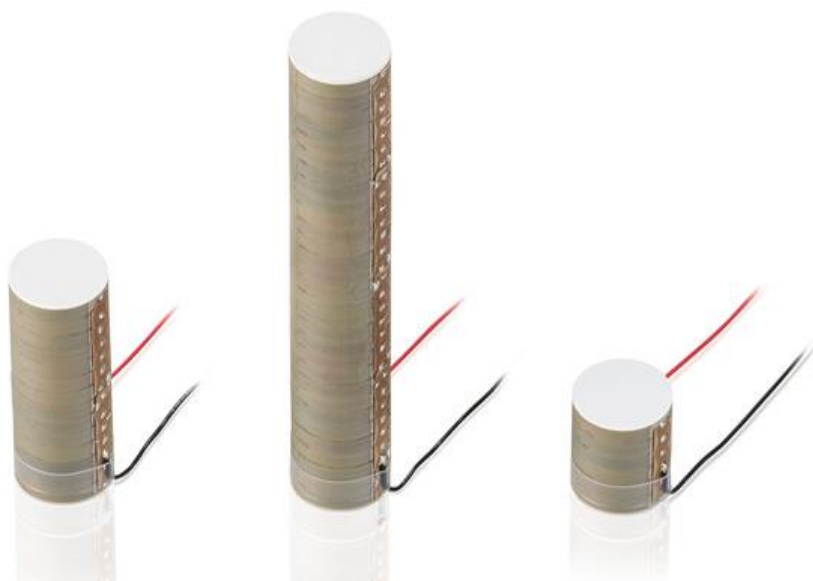


Рисунок 7 – Внешний вид актюаторов Р-088

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

На пьезоактюатор будет закреплен датчик положения для организации обратной связи и регулирования положения штока.

Характеристики выбранного актюатора приведены в таблице 4, представленной в разделе 3.

В разрабатываемой системе управления должен присутствовать микроконтроллер для хранения коэффициентов регулятора и датчик перемещения для контролирования позиционирования объекта управления. Помимо этого, важно предусмотреть связь с ЭВМ высшего уровня, чтобы пользователь имел возможность программирования микроконтроллера и выставления нужных параметров системы.

Модель пьезоактюатора будет являться линейной, поэтому при замене двигателя на какой-либо другой будет необходимо поменять лишь соответствующие коэффициенты.

Инф. № подл.	Подп. И дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

20

### 3 Математическая модель пьезокерамического исполнительного устройства

Для расчета математической модели устройства необходимо знать параметры пьезоактюатора, которые возьмем из его технической документации.

Технические характеристики актюатора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики пьезоактюатора Р-088

Масса	21 г
Перемещение штока	14 мкм
Длина	16 мм
Управляющее напряжение	От -20 до 100 В
Толщина слоя пьезокерамики	60 мкм
Количество слоев	241
Усилие выталкивания	7500 Н
Резонансная частота	68 кГц
Электрическая емкость	13 мкФ
Пьезомодуль	$55 * 10^{-11} \text{ м\В}$
Площадь поперечного сечения	$2.01 * 10^{-4} \text{ м}^2$

На основе данных таблицы составим математическую модель пьезоактюатора.

Инв. № подл.	Подп. И дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. И дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Воспользовавшись описанием и математическими выкладками из пособия [4], можно рассчитать параметры выбранного актюатора.

Рассмотрим актюатор поперечного сечения  $S_0$ , закрепленный одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер  $l_0$  которого изменяется под действием электрического поля  $E$  в направлении действия поля на значение  $\Delta l$ , и перемещающий объект управления массой  $m_0$ , сочлененный с его свободным концом.

Кроме объекта управления перемещаются также элементы объема активной части пьезоэлемента, масса которого  $m_k$  чаще всего меньше, чем масса исполнительного органа. При этом инерционность перемещающихся элементарных объемов актюатора будет учтена при расчете суммарной приведенной подвижной массы  $m_\Sigma$ , которая будет равна сумме массы  $m_0$  и части массы пьезокерамики  $m_k$ , так как пьезоэлемент закреплен одним концом и эта его часть не принимает участия в движении.

Влиянием внутренних электродов и припоя на упругие свойства актюатора можно пренебречь, учитывая то, что толщина их слоя в 20-30 раз меньше слоя керамики, а возможные межэлектродные зазоры были выбраны начальным сжатием актюатора в ходе технологического процесса его изготовления. Т.е., с точки зрения упругих характеристик, актюатор рассматривается как монолитный блок.

Будем считать, что никаких заметных перемещений, за исключением перемещений по толщине, не существует в силу того, что керамика поляризована по толщине и внешнее поле приложено вдоль направления предварительной поляризации. Деформации во всем объеме будем считать однородными, а в целом, весь актюатор рассматривать как электроупругую систему с одной степенью свободы. В этом случае нижние индексы параметров в уравнениях пьезоэффекта и пьезосреды можно опустить.

Кроме того, чтобы остаться в рамках линейных представлений модели устройства, будем считать, что напряженность управляющего поля

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

22

существенно меньше поля предварительной поляризации (когда напряженности данных полей сравнимы возникают значительные нелинейные искажения, которыми пренебрегать нельзя), а рабочий частотный диапазон находится вдали от первого электромеханического резонанса (верхняя граница диапазона отличается от частоты резонанса не менее чем на порядок).

При соблюдении всех перечисленных условий представляется возможным использование хорошо известной математической модели Никольского А.А. [5] для монолитного пьезоэлемента, который рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами.

Основное динамическое усилие в рассматриваемом случае действует на пьезоактюатор в направлении приложенного поля. Для описания пьезоэффектов воспользуемся уравнениями, где в качестве независимых переменных используются  $T$  (механическое напряжение) и  $E$  (напряженность электрического поля).

Уравнения пьезоэффектов:

$$S = s^E T + d_n E, \quad (1)$$

$$D = d_t T + \varepsilon^T E. \quad (2)$$

Запишем уравнение обратного пьезоэффекта (1) с учетом того, что механическое напряжение материала препятствует деформации из-за пьезоэффекта:

$$S = -s^E T + d_n E. \quad (3)$$

Теперь запишем уравнение (3) с учетом принятых обозначений, умножив все члены уравнения на  $YS_0$ :

$$\frac{\Delta l}{l_0} Y S_0 = d_n Y S_0 E - S_0 T, \quad (4)$$

где  $S = \frac{\Delta l}{l}$ ,  $s^E = \frac{1}{Y}$ , а  $Y$  – модуль Юнга.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Левая часть выражения (4) описывает усилие упругой деформации:

$$F_y = \frac{YS_0}{l_0} \Delta l = K_y \Delta l. \quad (5)$$

Из выражения (5) коэффициент упругости элемента  $K_y$ , Н/м:

$$K_y = \frac{YS_0}{l_0 N}, \quad (6)$$

где  $S_0$  – площадь поверхности элемента перпендикулярной направлению перемещения (оси 3).

Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов  $K_{\Pi}$  и  $K_o$ , Кл/м:

$$K_{\Pi} = K_y d_n N, \quad (7)$$

$$K_o = \frac{YS_0 d_n U}{N l_3}, \quad (8)$$

где  $d_n$  – пьезоэлектрический модуль.

Электрическая емкость элемента  $C_o$ , Ф:

$$C_o = \frac{NS_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 (1 - K_{ЭМ}^2)}{l_3}, \quad (9)$$

где  $K_{ЭМ}$  – коэффициент электромеханической связи.

Воспользуемся выражением для тока смещения в диэлектрике:

$$I_{см} = \frac{C_o dU}{dt} + K_{\Pi} V, \quad (10)$$

где  $U = El_3$  – напряжение, приложенное к электродам актюатора,

$V = \frac{d\Delta l}{dt}$  – скорость смещения объекта управления.

Если заряд актюатора осуществляется от источника ЭДС (усилителя)  $e_n$  через его эквивалентное внутреннее сопротивление  $R_B$ , то для такой цепи справедливо уравнение:

$$I_{см} = \frac{(e_n - U)}{R_B}. \quad (11)$$

После совмещения уравнений (10) и (11), преобразовав их, получим:

$$e_n = C_o R_B \frac{dU}{dt} + U + K_{\Pi} R_B V, \quad (12)$$

где  $C_o R_B = T_{\varepsilon}$  – электростатическая постоянная времени.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



Следовательно:

$$e_n = T_3 \frac{dU}{dt} + U + K_{\Pi} R_B V. \quad (13)$$

Определим связь между усилием  $F_3$  и электрическим напряжением управления:

$$F_3 = \frac{NYS_0 d_n U}{l_3} = N^2 U K_0. \quad (14)$$

Определив все действующие силы, можно составить уравнение равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части актюатора:

$$F_y = F_3 + F_c + F_d + F_{\text{дин}}, \quad (15)$$

где  $F_y = K_y \Delta l$  – усилие упругой деформации,  $F_c$  – статическое усилие, приложенное к объекту управления и действующее на актюатор,  $F_d = \frac{-K_d d\Delta l}{dt}$ ,  $K_d$  – коэффициент внутреннего демпфирования,  $F_{\text{дин}} = -\frac{m_{\Sigma} d^2 \Delta l}{dt^2}$ .

Включим все основные уравнения (13-15) в систему и запишем их в операторной форме:

$$T_3(p+1)U(p) + K_{\Pi} R_B V(p) = e_n(p), \quad (16)$$

$$F_3(p) = U(p)K_0, \quad (17)$$

$$F_{\text{дин}}(p) = F_3(p) + F_c(p) - F_d(p) - F_y(p), \quad (18)$$

где  $V(p) = p \Delta l(p)$ ,  $F_d(p) = K_d p \Delta l(p)$ ,  $F_y(p) = K_y p \Delta l(p)$ .

Используя полученные уравнения (16-18) можно составить структурную схему модели актюатора (рисунок 10). [4]

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

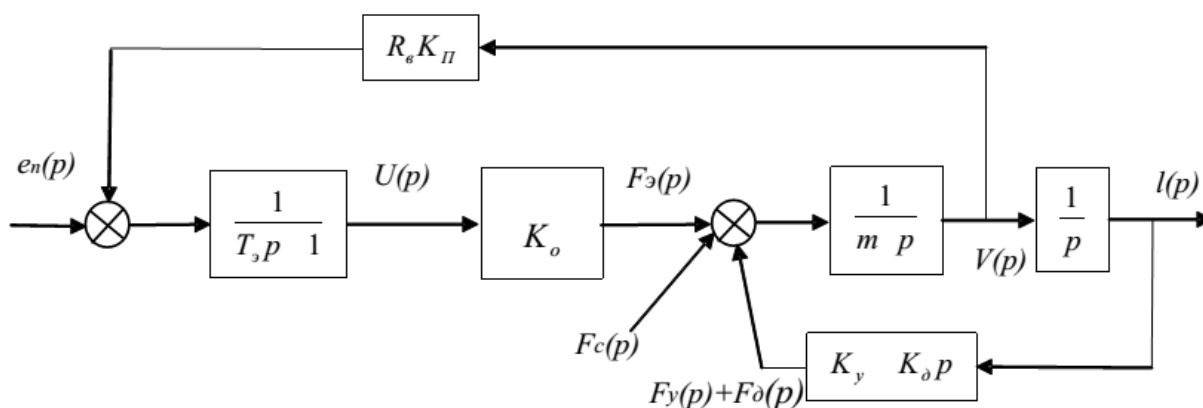


Рисунок 8 – Структурная схема моделирования актюатора ЭДС

Выбранный пьезоактюатор Р-088.721 использует материал РІС 252 согласно информации из каталога [7]. Характеристики данного материала берутся из каталога [6].

Для выбранного актюатора модуль юнга  $Y = 11.663 * 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

Площадь поперечного сечения  $S_0 = 2.01 * 10^{-4} \text{м}^2$ .

Длина слоя пьезокерамики  $l_0 = 60 * 10^{-6}$ .

Количество слоев  $N = 241$ .

Исходя из данных, представленных выше, коэффициент упругости  $K_y = 1.61 * 10^9 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Подставив в полученную передаточную функцию (18) рассчитанные прежде значения, получим:

$$W_A(p) = \frac{\Delta l}{e_n} = \frac{13.3 * 10^{-8}}{0.421 * 10^{-12} * p^3 + 0.338 * 10^{-9} * p^3 + 15.8 * 10^{-4} * p + 1}. \quad (19)$$

Передаточная функция (19) характеризует работу выбранного пьезоактюатора.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

#### 4 Разработка функциональной электрической схемы системы управления силовым пьезоактюатором

Функциональная электрическая схема системы управления силовым пьезоактюатором представлена на рисунке 9.

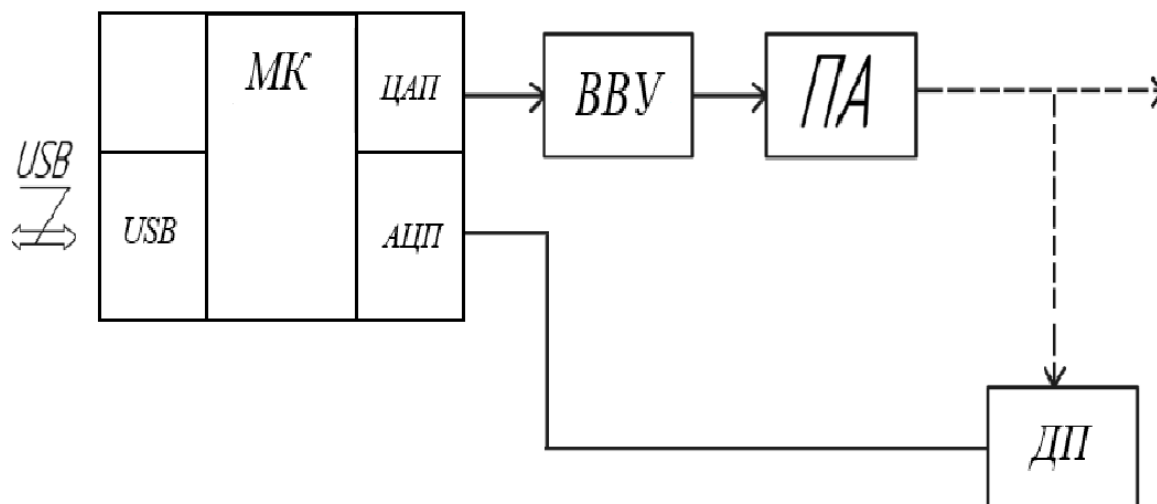


Рисунок 9 – Функциональная электрическая схема системы управления (МК – микроконтроллер, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ВВУ – высоковольтный усилитель, ПА – пьезоактюатор, ДП – датчик перемещения, АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

На вход микроконтроллера подается управляющий сигнал для перемещения штока пьезоактюатора, микроконтроллер обрабатывает сигнал и через встроенный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) подает сигнал на высоковольтный усилитель, который усиливает этот сигнал и подает его на пьезоактюатор. Пьезоактюатор, в свою очередь, совершает перемещение и через датчик перемещения подает сигнал на микроконтроллер, где он обрабатывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Далее микроконтроллер обрабатывает сигнал с АЦП в соответствии с заданной программой регулирования и вновь подает управляющий сигнал на пьезоактюатор.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

## 5 Разработка структурной электрической схемы системы управления силовым пьезоактюатором

Структурная электрическая схема системы управления силовым пьезоактюатором представлена на рисунке 10.

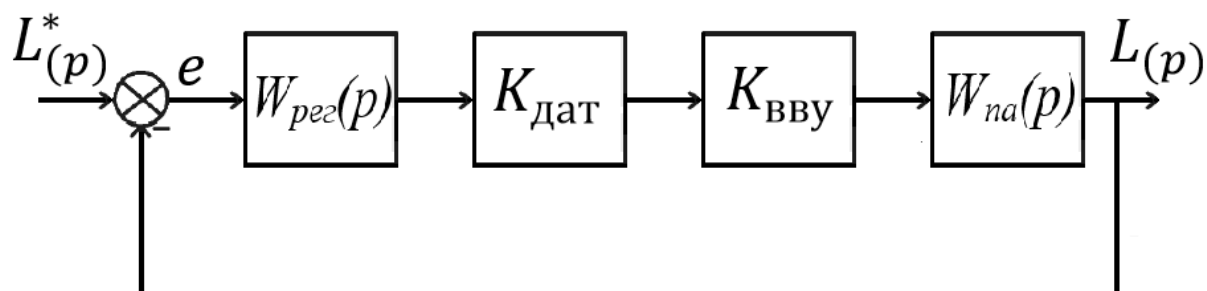


Рисунок 10 – Структурная электрическая схема системы управления ( $W_{\text{рег}}$  – передаточная функция регулятора,  $K_{\text{ВВУ}}$  – коэффициент высоковольтного усилителя,  $K_{\text{дат}}$  – коэффициент передачи датчика перемещения,  $W_{\text{па}}$  – передаточная функция пьезоактюатора)

Для увеличения точности работы устройства в системе применена обратная связь по перемещению.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

## 6 Синтез регулятора системы автоматического управления

### 6.1 Построение модели силового пьезоактюатора и показатели качества

В соответствии с заданием требуется рассчитать регулятор, с которым система управления имела бы следующие показатели качества:

- диапазон перемещений 0 – 10 мкм;
- допустимая погрешность – не более 0.5%;
- перерегулирование – не более 10%.

Сначала необходимо составить модель самого пьезоактюатора.

Схема моделирования двигателя представлена на рисунке 11, а график его переходного процесса представлен на рисунке 12.

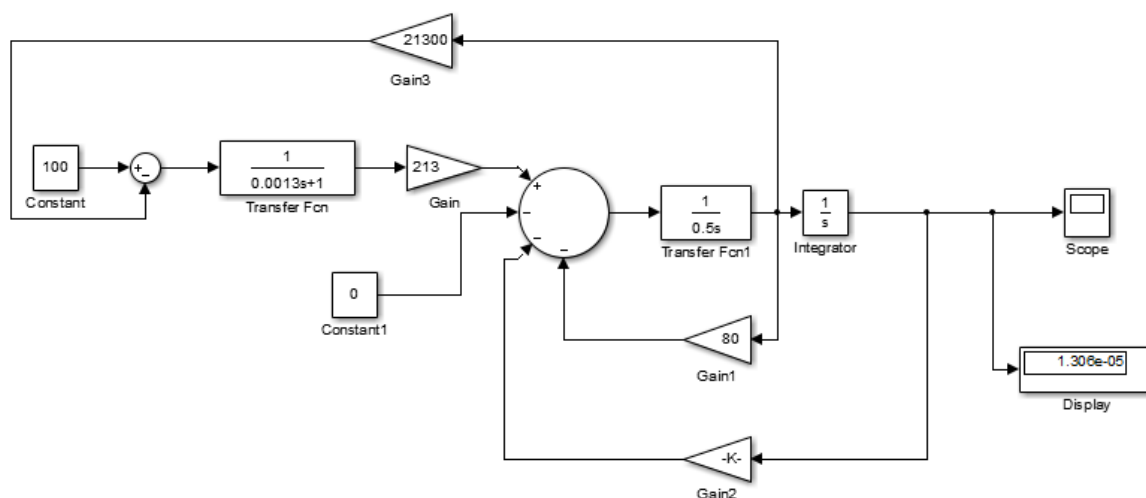


Рисунок 11 – Схема моделирования пьезоактюатора

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

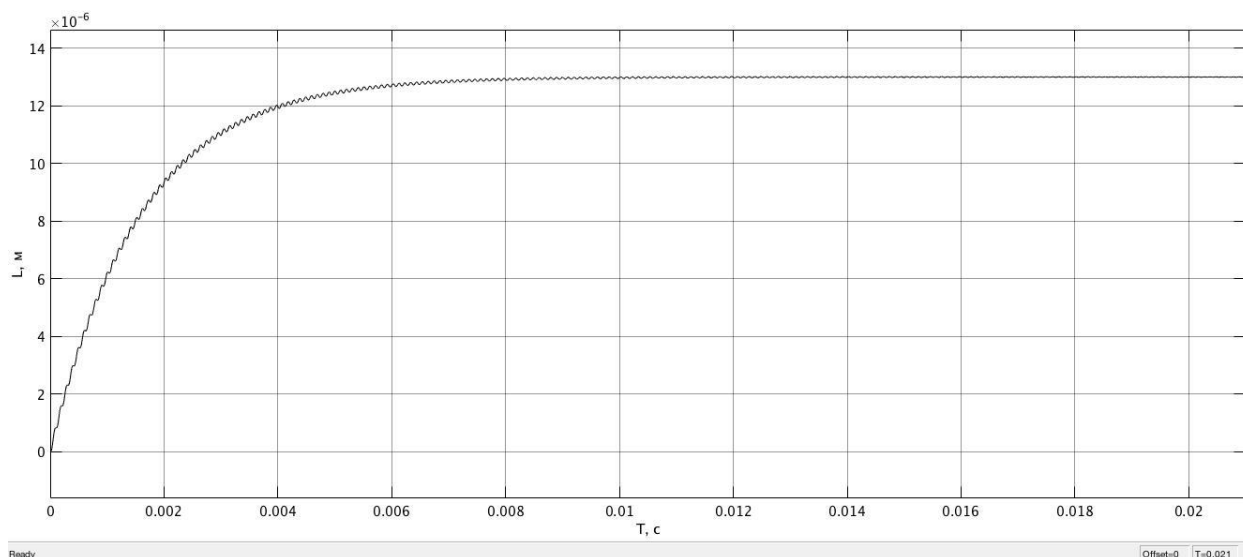


Рисунок – 12 График переходного процесса пьезоактюатора

Установившееся значение переходного процесса  $X_{уст} = 13.05 * 10^{-6}$  м. Полученного значения вполне хватает для выполнения поставленной задачи. По виду переходного процесса можно сделать вывод, что модель пьезоактюатора содержит две составляющие – аperiodическую и колебательную.

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

30

## 6.2 Синтез регулятора перемещения силового пьезоактюатора

Синтез регулятора системы необходимо начать с определения неизменяемой части системы. Передаточная функция неизменяемой части будет состоять из передаточной функции актюатора (19) и коэффициента сигнала  $K_c$ , который, исходя из математической модели и структурной электрической схемы системы управления, будет равен:

$$K_c = K_{\text{дат}} * K_{\text{АЦП}} * K_{\text{ЦАП}} * K_{\text{ВВУ}}, \quad (20)$$

$$W(p) = K_c * W_A(p). \quad (21)$$

$$K_c = 10^3 * 1 * 20 = 2 * 10^4, \quad (22)$$

$$W_{\text{нч}}(p) = \frac{2,66 \cdot 10^{-3}}{0,421 \cdot 10^{-12} p^3 + 0,338 \cdot 10^{-8} p^2 + 1,58 \cdot 10^{-3} p + 1}. \quad (23)$$

Построим график расположения нулей и полюсов передаточной функции неизменяемой части системы (23).

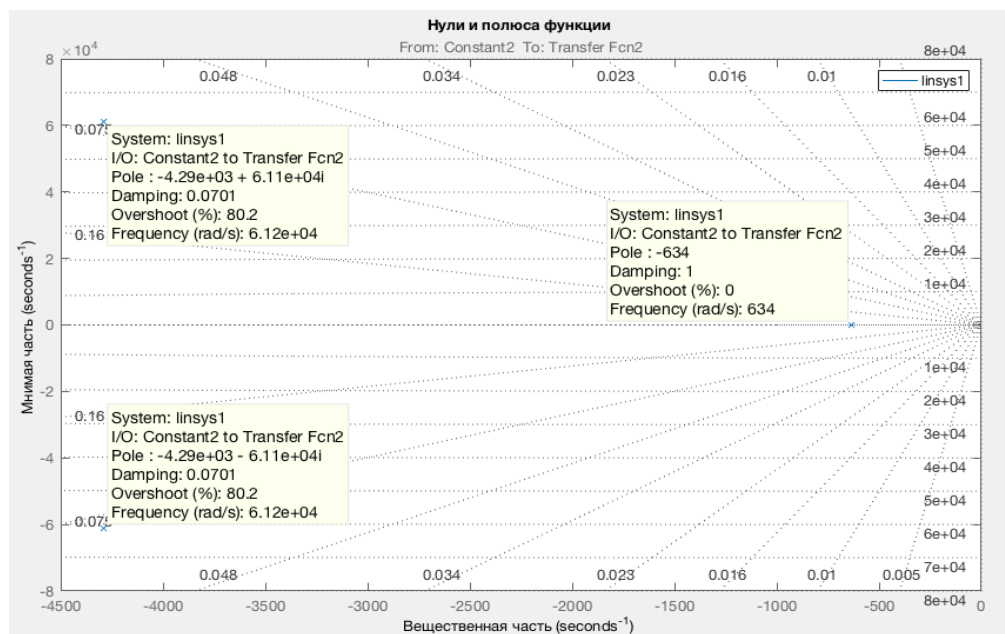


Рисунок 13 – Расположение нулей и полюсов передаточной функции неизменяемой части системы управления

Подп. И дата	Инф. № дубл.	Взам. инф. №	Подп. И дата	Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ) передаточной функции неизменяемой части системы представлена на рисунке 14.

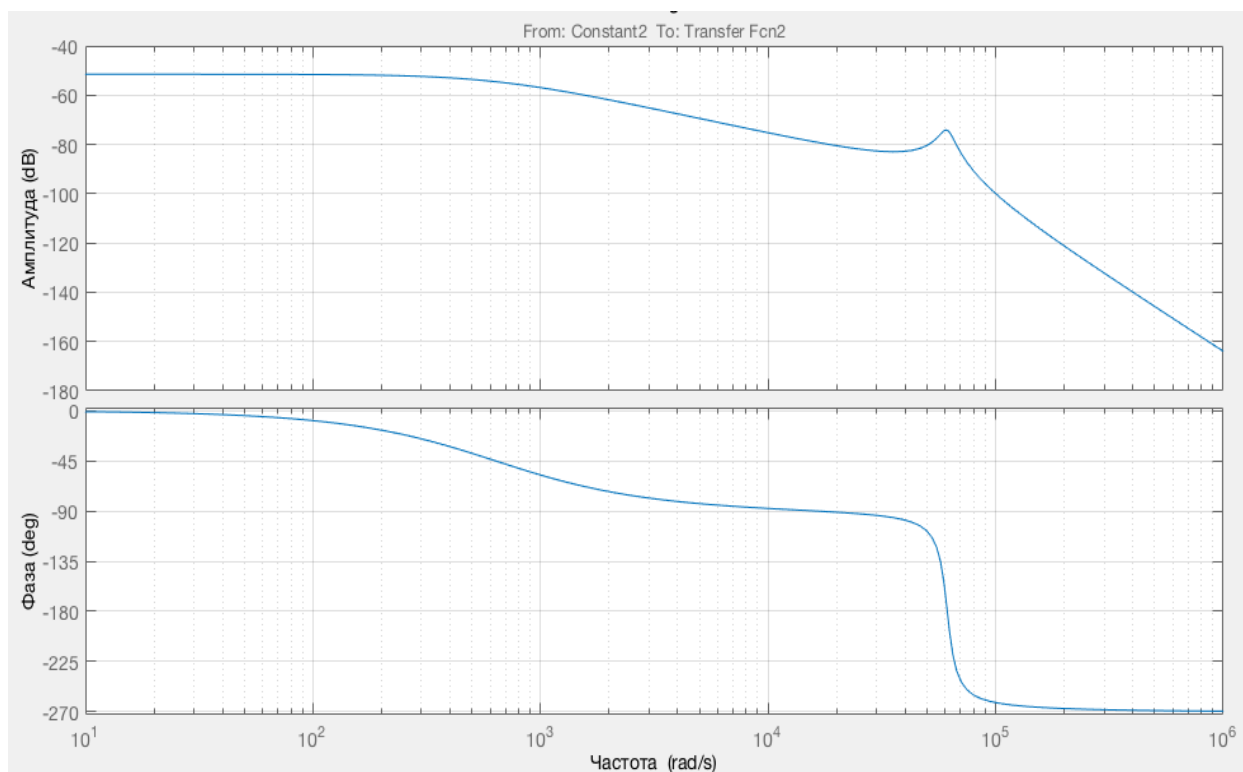


Рисунок 14 – ЛАФЧХ неизменяемой части системы

Далее, преобразуем передаточную функцию неизменяемой части системы (22) к виду, необходимому для построения желаемой ЛАЧХ:

$$W_{\text{нч}}(p) = \frac{6.318 \cdot 10^9}{(p+633.7)(p^2+7395p+3.748 \cdot 10^9)}. \quad (24)$$

Из полученной передаточной функции (24) и рисунков (11, 12) видно, что перегиб логарифмической амплитудной частотной характеристики происходит в точке  $\omega_0 = 633.7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , а резонансная частота принимает значение  $\omega_p = 61200 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Используя пособие [9] построим желаемую логарифмическую амплитудную частотную характеристику.

Подп. И. дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И. дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



Время переходного процесса в техническом задании не указано, но, чтобы обеспечить быстродействие системы, примем его за 0.014 с.

По кривым Солодовникова определяем:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{0,014} = 698 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\omega_{ср} = 558 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

В области низких частот желаемая ЛАЧХ должна иметь наклон -20 дБ/дек, чтобы тем самым обеспечить себе минимальную установившуюся ошибку. Для того чтобы переходный процесс был качественным и отвечал заданным параметрам, наклон около частоты среза должен быть -20 дБ/дек, поэтому нужно добавить положительный сдвиг +20 дБ/дек.

В качестве регулятора будем использовать передаточную функцию классического ПИ регулятора.

Для обеспечения наименьших отличий желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ неизменяемой части оставим остальную часть желаемой ЛАЧХ без изменений.

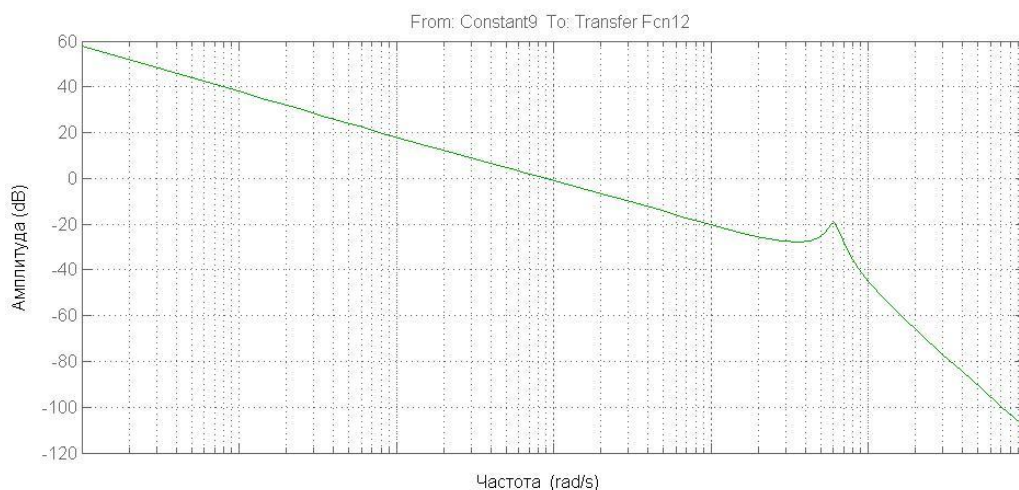


Рисунок 15 – Желаемая ЛАЧХ системы управления

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

По графику ЛАЧХ неизменяемой части системы определим:

$$T_{\text{рег}} = \frac{1}{526} = 1.9 * 10^{-3} \text{ с.}$$

Теперь определим передаточную функцию регулятора, которая примет вид:

$$W_p(p) = K_{\text{рег}} * \frac{T_1 p + 1}{p}. \quad (25)$$

Подставив в выражение (25) найденное значение  $T_{\text{рег}}$ , получим:

$$W_p(p) = K_{\text{рег}} * \frac{1.9 * 10^{-3} p + 1}{p}. \quad (26)$$

Далее следует рассчитать коэффициент передачи регулятора по формуле:

$$K_{\text{рег}} = \frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{нч}}}. \quad (27)$$

По рисунку 15 найдем:

$$20 \lg(K_{\text{ж}}) = 58,$$

$$K_{\text{ж}} = 794.$$

По формуле (27) найдем:

$$K_{\text{рег}} = \frac{794}{2.66 * 10^{-3}} = 2.98 * 10^5.$$

По полученным значениям и формуле (26) составим передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = 2.98 * 10^5 * \frac{1.9 * 10^{-3} p + 1}{p}. \quad (28)$$

На рисунке 16 представлена ЛАФЧХ системы с регулятором и ЛАФЧХ неизменяемой части системы.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

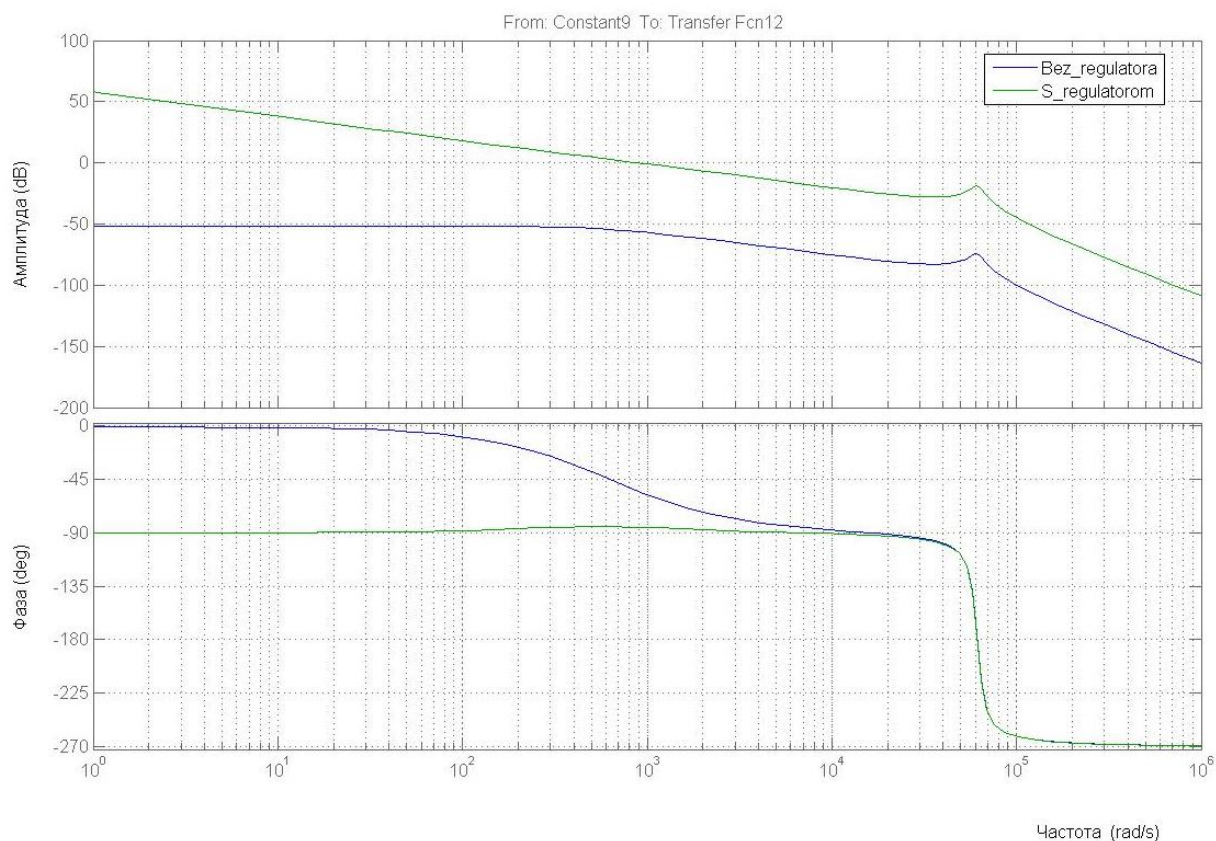


Рисунок 16 – ЛАФЧХ системы и с регулятором и ЛАФЧХ неизменяемой части системы

По рисунку 16 можно установить, что запас устойчивости системы управления с регулятором будет составлять:

- по фазе –  $84^\circ$ ;
- по амплитуде – 23 дБ.

Следовательно, система устойчива и обладает некоторым запасом устойчивости.

График переходного процесса разрабатываемой системы управления представлен на рисунке 17.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

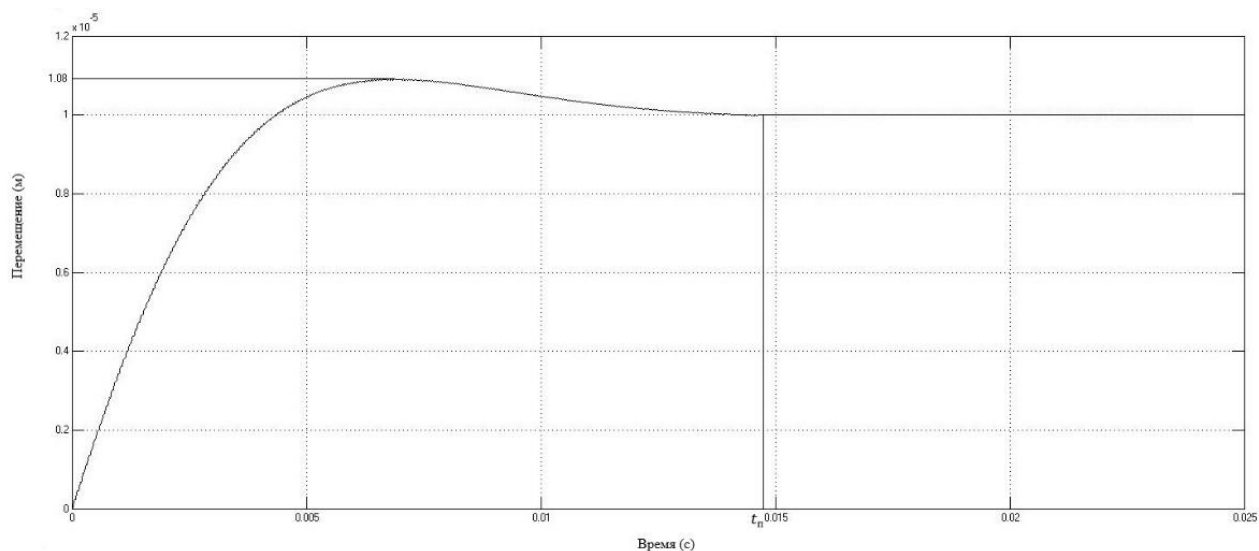


Рисунок 17 – График переходного процесса разрабатываемой системы управления

По графику видно, что перерегулирование составляет 4%, что удовлетворяет требованиям технического задания, время переходного процесса  $t_n = 0.014$  с. Колебания системы управления сведены к нулю, поэтому значение установившейся ошибки не будет превышать 0.5%.

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

36

## 7 Учет особенностей цифровой реализации регулятора.

### Исследование динамики автоматической системы

В разрабатываемой системе управления сигнал с компьютера будет поступать на микроконтроллер, а для того чтобы реализовать регулятор на микроконтроллере нужно перейти от непрерывной функции регулятора к дискретной. Для этого воспользуемся функцией c2d пакета Matlab. Примем период дискретизации за 0.00005 с, соответственно частота дискретизации будет равна 20 кГц.

После преобразований получим регулятор в дискретной форме:

$$W_{\text{per}}(z) = \frac{566.2z - 551.3}{z - 1}. \quad (29)$$

Результирующая схема моделирования системы управления силовым пьезоактюатором с дискретным регулятором положения представлена на рисунке 18.

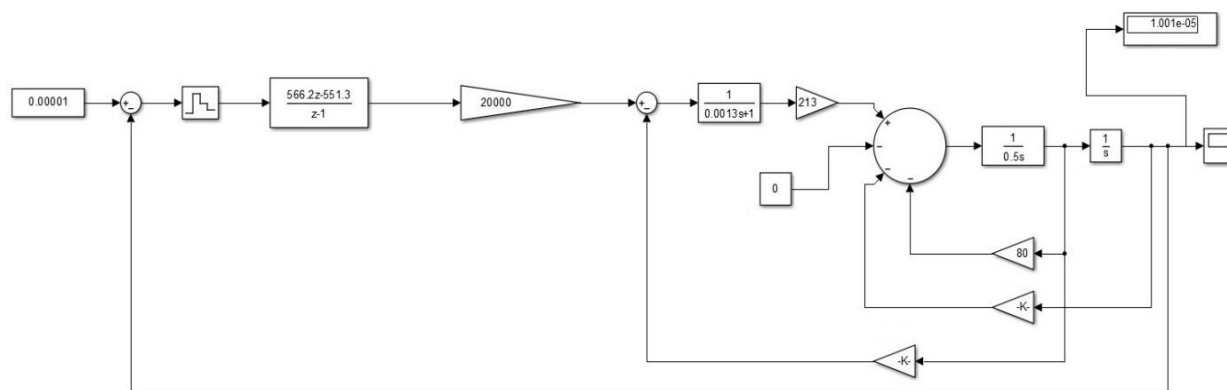


Рисунок 18 – Схема моделирования системы управления силовым пьезоактюатором с дискретным регулятором положения

Переходный процесс системы управления силовым пьезоактюатором с дискретным регулятором положения представлен на рисунке 19.

Инф. № подл.	Подп. И дата
Взам. инф. №	Инф. № дубл.
Подп. И дата	
Инф. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

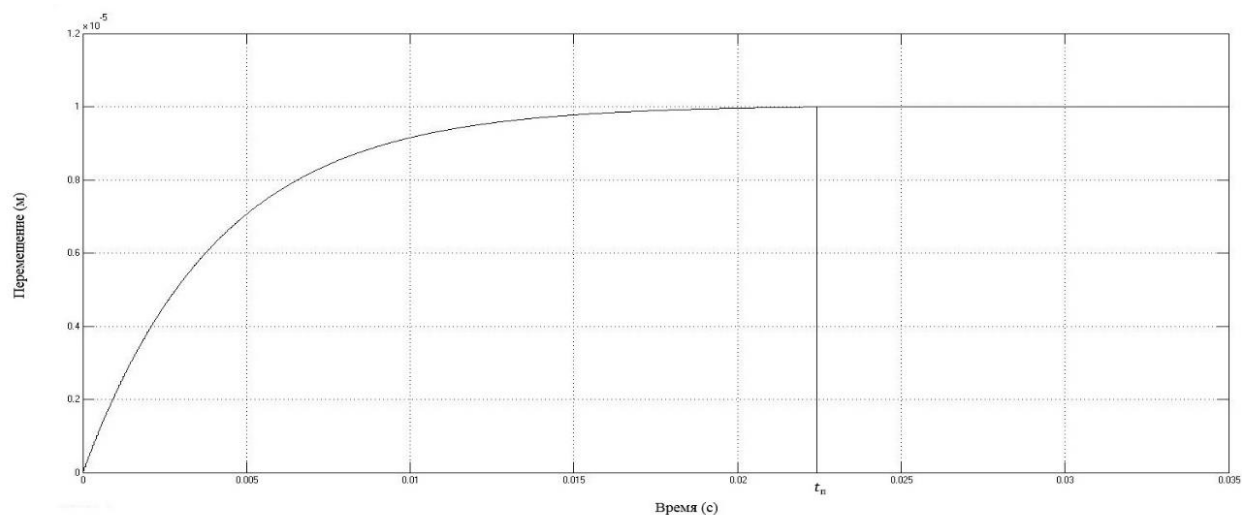


Рисунок 19 – График переходного процесса системы управления силовым пьезоактюатором с дискретным регулятором положения

По полученному графику переходного процесса видно, что время переходного процесса = 0.014 с. Установившееся значение перемещения стало равным  $1 * 10^{-5}$  м.

Система обладает астатизмом первого порядка, следовательно, погрешность работы данной системы равна 0.

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

38

## 8 Разработка элементов технической реализации системы управления

### 8.1 Высоковольтный усилитель напряжения

Преобразователь напряжения используется для преобразования напряжения на выходе микроконтроллера от 0 до 5 В в управляющее напряжение на пьезоактюаторе от 0 до 100 В. Мной был выбран высоковольтный усилитель от компании «Texas Instruments» - ОРА454 [10].

Технические характеристики ОРА454:

- широкий диапазон питающих напряжений: от  $\pm 5$  В (10 В в случае однополярного питания) до  $\pm 50$  В (100 В);
- большой максимальный выходной ток – более  $\pm 50$  мА;
- широкий диапазон выходных напряжений – от напряжения питания до 1 В.

### 8.2 Преобразователя напряжения

Для питания микроконтроллера и некоторых микросхем потребуется преобразователь напряжения с 12 В постоянного тока на 5 В постоянного тока. Мной был выбран преобразователь The LM2575S-5.0 [11] фирмы «Texas Instruments».

Монолитная интегральная схема обеспечивает все активные функции понижающего переключающего регулятора, способного управлять нагрузкой 1А с отличным регулированием. Требуя минимального количества внешних компонентов, эти регуляторы просты в использовании и включают внутреннюю частотную компенсацию, а также генератор с фиксированной частотой.

Инф. № подл.	Подп. И. дата
Взам. инф. №	Инф. № дубл.
Подп. И. дата	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

### 8.3 Микроконтроллер

Выбранный микроконтроллер должен содержать в себе цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Также должно быть наличие USB-порта для передачи данных с ЭВМ высшего уровня.

Данным критериям отвечает выбранный мной микроконтроллер LPC2364FBD100.551 [12] от компании «NXP Semiconductor». Микроконтроллер обладает памятью в 128 кБайт, также присутствует шесть 10-ти разрядных АЦП и один 10-ти разрядный ЦАП.

Технические характеристики микроконтроллера:

- ширина шины данных – 32-бит;
- тактовая частота – 72 МГц;
- количество входов/выходов – 70;
- объем памяти программ – 128 кБайт (128k x 8);
- объем RAM – 34k x 8;
- наличие АЦП/ЦАП – ацп 6х10b/цап 1х10b;
- встроенные интерфейсы: can, eth, i2c, micr, spi, ssi, ssp, uart, usb.



Рисунок 20 – Микроконтроллер LPC2364FBD100.551

Инф. № подл.	Подп. И. дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И. дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



#### 8.4 Датчик положения

Для организации обратной связи по перемещению пьезоактюатора необходимо внедрить в систему датчик положения. Для данной цели отлично подходит тензометрический датчик построенный по мостовой схеме. Основным элементом данного датчика будет являться тензорезистор на 120 Ом от компании «RS Pro» [3] Внешний вид выбранного тензорезистора представлен на рисунке 21.

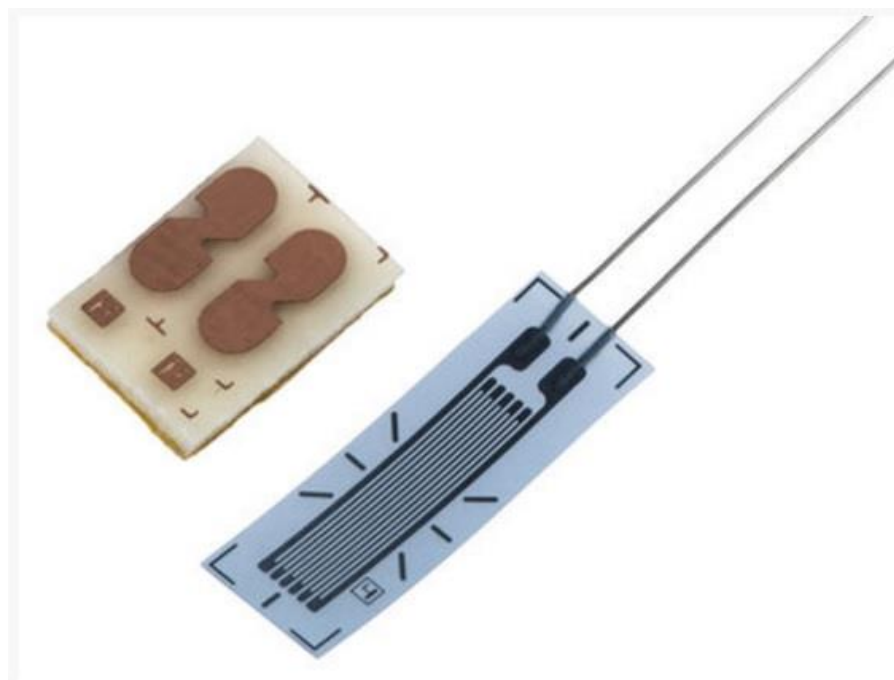


Рисунок 21 – Тензодатчик RS Pro 8mm Wire Lead Strain Gauge

Технические характеристики тензодатчика:

- длина: 13 мм;
- длина датчика: 8 мм;
- рабочая температура – максимальная: +180 °С;
- рабочая температура - минимальная: -30 °С;
- сопротивление датчика: 120 Ом;
- погрешность не более 0.5%.

Инф. № подл.	Подп. И дата	Взам. инф. №	Инф. № дубл.	Подп. И дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

### 8.5 Инструментальный усилитель

Инструментальный усилитель нужен для усиления сигнала от тензодатчика. Для данной работы выберем усилитель INA333 [13] производства «Texas Instruments».

Данный усилитель является маломощным, прецизионным (очень точным) с регулируемым коэффициентом усиления.

Напряжение питания: от 1.8 В до 5.5 В.

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

42

## 9 Разработка алгоритма управления системой

Для работы системы управления силовым пьезоактюатором необходимо разработать алгоритм управления системой. Разработанная блок-схема программы микроконтроллера представлена на рисунках 22 и 23.



Рисунок 22 – Блок-схема основной программы микроконтроллера

Микроконтроллер начинает свою работу с запуска аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Потом происходит инициализация портов (входов/выходов устройства) и их дальнейшая конфигурация. Затем разрешаются прерывания (приходит в работу программа прерываний микроконтроллера).

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата



Рисунок 23 – Блок-схема программы обработки прерываний контроллера

Через USB порт поступает число, на величину которого нужно совершить перемещение двигателем, далее идет вычисление ошибки от уже имеющегося положения двигателя, чтобы установить на сколько нужно сместить положение штока. Затем вычисляется вектор управления и формируется выходное напряжение, которое подается на выходе микроконтроллера.

Подп. И дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

## Заключение

В данной работе было произведено проектирование системы управления силовым пьезоактюатором. На основе технических характеристик пьезоактюатора была получена и смоделирована передаточная функция пьезоактюатора в программной среде Matlab пакете Simulink.

Управления актюатором производится с частотой квантования 20 кГц, управляющее воздействие изменяется от 0 до 100. Это значение частоты технически реализуемо при помощи микроконтроллера LPC2364FBD100.551. Также, благодаря выбранному микроконтроллеру, обновление значения перемещения и изменение значений регулирования можно производить с ЭВМ высшего уровня. В процессе работы при помощи метода желаемой ЛАЧХ был синтезирован пропорционально-интегральный регулятор перемещения. Так как управление производится средствами цифровой техники, регулятор приведен к дискретному виду.

По результатам моделирования пьезопривода в программной среде Matlab пакете Simulink полученные характеристики синтезированного регулятора удовлетворяют условиям технического задания. Время переходного процесса  $T_{пп} = 0.014$  с. Перерегулирование  $\sigma = 8\%$ . Колебания системы минимальны, так как используется пропорционально-интегральный регулятор. Данная система не имеет аналогов, произведенных в нашей стране, так как имеет обратную связь по перемещению при помощи тензодатчика. Зарубежные аналоги в основном работают на частоте 10 кГц, что вдвое меньше чем у разработанной системы.

Так же были разработаны и представлены отдельными документами:

- функциональная электрическая схема КСУИ.108.Р3442.002 Э1;
- структурная электрическая схема КСУИ.108.Р3442.003 Э2.

Подп. И. дата

Инф. № дубл.

Взам. инф. №

Подп. И. дата

Инф. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

45

## Список использованных источников

- 1 <http://www.cedrat-technologies.com> [Электронный ресурс] Каталог компании «CEDRAT TECHNOLOGIES» (Франция). URL: [http://www.cedrat-technologies.com/download/CEDRAT\\_TEC\\_Catalogue.pdf](http://www.cedrat-technologies.com/download/CEDRAT_TEC_Catalogue.pdf)/ (дата обращения: 08.04.2017).
- 2 <http://www.physikinstrumente.com> [Электронный ресурс] Каталог компании PHYSIK INSTRUMENTE (Германия). URL : [http://www.physikinstrumente.com/download/PI\\_Piezo\\_Nano\\_Positioning\\_2014\\_2015\\_CAT130E.pdf](http://www.physikinstrumente.com/download/PI_Piezo_Nano_Positioning_2014_2015_CAT130E.pdf) (дата обращения: 08.04.2017).
- 3 <http://rs-catalog.ru/8656226.html> Каталог [Электронный ресурс]. URL: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/13c2/0900766b813c283d.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).
- 4 Бобцов, А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А.А. Бобцов, В.И.Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев - СПб.: НИУ ИТМО, 2011. - 131с.
- 5 Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
- 6 <http://www.physikinstrumente.com> [Электронный ресурс] Каталог пьезоматериалов компании PHYSIK INSTRUMENTE (Германия). URL: <https://www.piceramic.com/en/products/piezoelectric-materials/?type=5600&downloadUid=1385&downloadFileUid=1255&cHash=a059477e1b7e1966ac5b3f6151d60af6>.
- 7 <http://www.physikinstrumente.com> [Электронный ресурс] Характеристики двигателя URL: <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-actuators/linear-actuators/p-088-round-picma-stack-multilayer-piezo-actuator-100821/>.

Инф. № подл.	Подп. И дата
Взам. инф. №	Инф. № дубл.
Подп. И дата	
Инф. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

8 Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления. Бесекерский В. А., Попов Е. П. - Спб.; Профессия, 2003 - 752 с.

9 www.compel.com Компэл – электронные компоненты [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa454.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).

10 <https://www.chipdip.ru/product/lm2575s-5.0-norb> ЧИП и ДИП – приборы и электронные компоненты [Электронный ресурс]. URL: <https://lib.chipdip.ru/142/DOC000142722.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).

11 <https://www.chipdip.ru/product/lpc2364fbd100.551> ЧИП и ДИП – приборы и электронные компоненты [Электронный ресурс]. URL: <https://lib.chipdip.ru/224/DOC000224291.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).

12 www.ti.com Сайт компании Texas Instruments [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/product/ina333?qgpn=ina333> (дата обращения: 24.04.2017).

Подп. И дата

Инб. № дубл.

Взам. инб. №

Подп. И дата

Инб. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

КСУИ.107.Р3442.001 ПЗ

Лист

47