

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт автоматики и информационных технологий

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

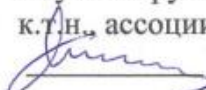
На правах рукописи

Советхан Дияр Диасұлы

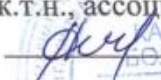
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)
На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических
модулей оптоэлектронных систем»

Направление подготовки: 7M07107 – Робототехника и мехатроника

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор
 Бактыбаев М. К.

«4» июня 2025 г.

Рецензент
к.т.н., ассоциированный профессор
 Сейдилдаева А.К.

«4» июня 2025 г.

Норм контроль
Преподаватель
 Игембай Е.А.
«5» июня 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой РТиТСА
Кандидат технических наук,
профессор

 К.А. Ожикенов

«10» июня 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматики

7М07107 – Робототехника и мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой РТиТСА
Кандидат технических наук,
профессор

К.А. Ожикенов

«10» _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Магистранту Советхан Дияр Диасұлы

Тема: Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей
оптоэлектронных систем

Утверждена приказом № ____ от «____» ____ 202 г.

Срок сдачи законченной диссертации : «____» ____ 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: внешние условия и возмущения, сравнительные эталоны, конструктивные характеристики актуатора, ЦТС-46, температурная зависимость, температура Кюри, механическая добротность.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Исследование и разработка методики учета влияния внешних и внутренних возмущений на динамику и точность позиционирования мехатронных пьезоэлектрических модулей;*
- б) Синтез системы автоматического управления пьезоэлектрическими мехатронными модулями для улучшения статических и динамических показателей качества;*
- в) Выработка рекомендации по оптимизации конструктивных решений мехатронных систем с пьезоактуаторами, работающими в условиях изменения параметров для увеличения хода и демпфирования собственных колебаний.*

Продолжение приложения И ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Выявление основных параметров пьезокерамики, на существенное изменение которых оказывает влияние температура окружающей среды	28.05.2024	Выполнено
Разработка модели с учетом изменения параметров пьезокерамики при воздействии температуры	13.10.2024	Выполнено
Исследование и разработка методики учета влияния внешних и внутренних возмущений на динамику и точность позиционирования	05.03.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Бактыбаев М. К. к.т.н., ассоциированный профессор	04.06.2025	
Расчётный раздел	Бактыбаев М. К. к.т.н., ассоциированный профессор	04.06.2025	
Норм контролер	Игембай Е.А. Преподаватель	05.06.2025	

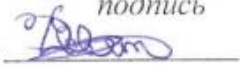
Научный руководитель


подпись

Бактыбаев М.К.

Ф.И.О.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Советхан Д. Д.

Ф.И.О.

Дата

«___» _____ 2025 г

Рекомендуемая основная литература:

1. Карев П. В. Пьезоактюаторы для микроперемещений в оптоэлектронике // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2018. — 2. — С. 152–153.
2. Заварзин В. И., Патин Г. А. Компенсация сдвига изображения пьезоэлектрическим актюатором // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — Т. 7.
3. Карев П. В. Обзор систем микросканирования и оптической стабилизации в инфракрасных камерах // Вопросы радиоэлектроники серия Техника телевидения. — 2018. — Т. 1. — С. 96–102.
4. Karev P. V. Optical stabilization and microscanning with piezo actuators and piezoelectric motors // Proceedings- International Conference Laser Optics, ICLO. — Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. — P. 192.
5. Контракт на сборку в России тепловизоров Catherine XP. — URL: <https://bmpd.livejournal.com/257817.html>
6. Официальный сайт Cedrat Technologies. — cedrat-technologies.com
7. Сергей Вэй. Thales UK представила новую термокамеру Catherine. — URL: <http://army-guide.com/rus/article/article.php?forumID=352> (дата обращения: 23.05.2020).
8. Кремис И. И., Толмачев Д. А. Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения // Прикладная физика. — 2016. — № 6. — С. 109–115.
9. Didace Habineza, Micky Rakotondrabe, Yann Le Correc. Simultaneous suppression of badly-damped vibrations and cross-couplings in 2-DoF piezoelectric actuator, by using feedforward standard H approach. — France: FEMTO-ST Institut

АНДАТПА

Диссертациялық жұмыста мехатроникалық пьезомодульдердің жұмысындағы жағымсыз факторларды автоматты басқару жүйелері арқылы өтеу және олардың құрылымдық сипаттамаларын жетілдіру әдістері қарастырылады. Атқарушы пьезо жетектерінің физикалық қасиеттерінің және модульдердің құрылымдық ерекшеліктерінің әсерін, сондай-ақ сыртқы кедергілердің, негізінен термиялық сипаттағы, оптоэлектрондық жүйелердің тиімділігіне әсерін талдауға ерекше назар аударылады. Өзірленген тәсілдерді практикалық іске асыру пьезомодульдердің пайдалану көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартуға және оптоэлектрондық кешендердің жалпы тиімділігін арттыруға бағытталған.

АННОТАЦИЯ

В диссертации рассматриваются методы компенсации негативных факторов в работе мехатронных пьезомодулей посредством систем автоматического управления и совершенствования их конструктивных характеристик. Особое внимание уделяется анализу влияния физических свойств исполнительных пьезопроводов и конструктивных особенностей модулей, а также воздействию внешних помех, преимущественно теплового характера, на эффективность функционирования оптоэлектронных систем. Практическая реализация разработанных подходов направлена на существенное улучшение эксплуатационных показателей пьезомодулей и повышение общей эффективности оптоэлектронных комплексов.

ANNOTATION

The dissertation discusses methods for compensating for negative factors in the operation of mechatronic piezomodules through automatic control systems and improving their design characteristics. Special attention is paid to the analysis of the influence of the physical properties of the piezo actuators and the design features of the modules, as well as the effects of external interference, mainly of a thermal nature, on the efficiency of optoelectronic systems. The practical implementation of the developed approaches is aimed at significantly improving the operational performance of piezomodules and increasing the overall efficiency of optoelectronic complexes.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из 64 страниц, содержит 29 рисунков, 4 таблиц. Список использованных источников - 27.

Ключевые слова: пьезокерамика, температурная нестабильность, мехатронные модули, пьезоактуатор, пьезоэлектрический эффект, четырехполюсники

Цель работы: повышение эффективности работы путем применения специализированных алгоритмов управления, компенсирующих влияние температурных эффектов и гистерезисных факторов, а также за счет оптимизации конструктивных решений пьезоактуаторов.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) Исследование и разработка методики учета влияния внешних и внутренних возмущений на динамику и точность позиционирования мехатронных пьезоэлектрических модулей.

2) Синтез системы автоматического управления пьезоэлектрическими мехатронными модулями для улучшения статических и динамических показателей качества.

3) Выработка рекомендации по оптимизации конструктивных решений мехатронных систем с пьезоактуаторами, работающими в условиях изменения параметров для увеличения хода и демпфирования собственных колебаний.

Результаты:

- Выявлены основные параметры пьезокерамики, на существенное изменение которых оказывает влияние температура окружающей среды, определены допустимые диапазоны их изменения.

- Разработаны модели с учетом изменения параметров пьезокерамики при воздействии температуры.

Научная новизна:

- Выработаны рекомендации по оптимизации геометрических характеристик конструктивных элементов модулей, способствующие повышению их эффективности путем применения демпферов в определенных точках пьезодвигателя с целью уменьшения колебательности механической системы.

- Разработана математическая модель пьезоэлектрического мехатронного модуля, произведен синтез последовательного компенсатора и проведено компьютерное моделирование, по результатам которого определен рабочий диапазон температур окружающей среды, в котором мехатронный модуль удовлетворяет требованиям технического задания к системе управления.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1. Технические средства микроперемещений в оптоэлектронных системах, возможности применения и проблематика	9
1.1 Обзор и классификация мехатронных модулей оптоэлектронных систем	9
1.2 Теоретические основы моделирования пьезоэлектрических актуаторов	12
1.3 Проблемы использования пьезоэлектрических устройств	19
2. Разработка математической модели многослойного пьезопакета мехатронного модуля в условиях изменения температуры	25
2.1 Анализ и методика расчета параметров пьезоматериалов с точки зрения влияния на них температуры	25
2.2 Вывод системы уравнений для построения математической модели тонкопленочного многослойного пьезоактуатора	30
2.3 Алгоритм расчета коэффициентов передаточных функций тонкопленочного многослойного пьезоактуатора в условиях изменения температуры.	35
3. Анализ и синтез алгоритмов управления мехатронными пьезомодулями	38
3.1 Методика синтеза системы управления пьезоэлектрического мехатронного модуля, функционирующего в условиях изменения температуры	38
3.2 Показатели эффективности разомкнутого пьезопривода при различных температурах	41
3.3 Показатели эффективности замкнутого пьезопривода	44
3.4 Оценка эффективности корректирующего звена последовательного включения на основе полинома Ньютона, настроенного под изменение температуры	48
Заключение	61
Список литературы	63

ВВЕДЕНИЕ

Современные оптоэлектронные системы постоянно совершенствуются и развиваются. Такие их характеристики как разрешающая способность, полоса пропускания, качество получаемого изображения и др. могут быть повышены при использовании в их составе систем коррекции волнового фронта излучения (наклон, фокусировка), компенсации aberrаций более высоких порядков (кома, астигматизм), а также устройств модуляции световых потоков. Все перечисленные системы и устройства выполняют свои задачи, перемещая в пространстве те или иные элементы оптических систем (зеркала, линзы, диафрагмы и др.). Диапазон таких перемещений лежит в пределах от единиц нанометров до десятков микрон.

Наряду с неоспоримыми достоинствами мехатронные пьезомодули обладают и некоторыми недостатками, которые снижают эффективность их применения в оптоэлектронных системах. В большинстве случаев это связано с физической природой исполнительных пьезопроводов мехатронных модулей, с их конструктивными особенностями, а также внешними возмущениями, особенно тепловыми.

Таким образом, актуальность темы определяется повышением эффективности мехатронных модулей, а в итоге оптоэлектронных систем, под которым понимается комплекс мероприятий направленных на стабилизацию основных характеристик пьезоактюаторов и компенсацию влияния внешних (тепловых) и внутренних (потери в пьезокерамике) возмущений путем применения специальных алгоритмов управления мехатронными модулями, а также оптимизацию конструктивных характеристик актюаторов и пьезомодулей в целом.

1. Технические средства микроперемещений в оптоэлектронных системах, возможности применения и проблематика

1.1 Обзор и классификация мехатронных модулей оптоэлектронных систем

Мехатронные модули оптоэлектронных систем представляют собой сложные устройства, которые объединяют элементы механики, электроники и оптики для решения различных задач в области автоматизации, измерений, обработки данных и управления. Такие системы находят широкое применение в промышленности, медицине, связи, а также в военной и научной сферах. Ключевым элементом таких систем является взаимодействие между механическими компонентами и оптическими/электронными системами, что позволяет обеспечивать высокую точность, скорость и эффективность работы.

1. Определение мехатронных модулей

Мехатронный модуль – это компонент или устройство, которое включает в себя несколько интегрированных технологий: механику, электронику, управление и, в случае оптоэлектронных систем, элементы оптики. Мехатронные системы могут выполнять функции преобразования, обработки и передачи информации с использованием электрических, механических и оптических сигналов.

2. Классификация мехатронных модулей в оптоэлектронных системах

2.1 По функциональному назначению

- Модули измерения и анализа: Эти модули предназначены для измерения физических величин (например, расстояния, температуры, давления) с использованием оптических сенсоров. Примеры включают лазерные дальномеры, оптические датчики, спектрометры.

- Модули обработки сигналов: включают в себя устройства для обработки и анализа данных, полученных от оптических датчиков. Примеры модули обработки изображений, системы для распознавания объектов, контурные и спектральные анализаторы.

- Модули связи и передачи информации: это устройства, использующие оптические технологии для передачи данных (например, волоконно-оптические системы передачи данных). Могут включать в себя лазерные диоды, фотодиоды, и другие компоненты оптоэлектронных систем для передачи сигналов на большие расстояния.

2.2 По типу взаимодействия компонентов

- Модули с прямым взаимодействием компонентов: В этих системах механические компоненты непосредственно взаимодействуют с оптическими элементами. Например, модули, в которых механическое движение связано с изменением положения оптического датчика или элемента.

- Модули с удалённым взаимодействием: В этих системах механические компоненты и оптические элементы могут взаимодействовать

на расстоянии с помощью специальных интерфейсов или передачи данных через беспроводные каналы.

2.3 По типу оптоэлектронных компонентов

- Лазерные модули: включают лазеры и фотодетекторы для создания и приёма оптических сигналов. Эти модули часто используются в системах измерений и коммуникаций.

- Фотодиодные модули: используют фотодиоды для получения оптических сигналов и их преобразования в электрические. Такие модули часто применяются в системах связи и обработки изображений.

- Сенсорные модули: используют различные типы оптических сенсоров, такие как оптические датчики положения, расстояния и яркости. Такие модули применяются в робототехнике, системах безопасности и контроля.

2.4 По типу управления

- Модули с аналоговым управлением: Эти модули используют аналоговые сигналы для управления процессами. Например, регулировка мощности лазера или положение сенсора в зависимости от внешних условий.

- Модули с цифровым управлением: здесь управление процессами происходит с использованием цифровых сигналов, часто через микроконтроллеры или цифровые интерфейсы, что позволяет обеспечивать более высокую точность и гибкость управления.

2.5 По степени интеграции

- Модули низкой интеграции: Эти модули включают минимальное количество компонентов, например, простой фотодиод и усилитель для обработки сигнала. Часто используются в простых измерительных и контрольных системах.

- Модули высокой интеграции: В таких модулях реализованы сложные системы, объединяющие различные технологии — механические, оптические и электронные компоненты. Например, роботы с оптическими сенсорами, системы автоматической регулировки и управления, а также высокоточные системы навигации.

3. Технологические особенности и перспективы развития

Мехатронные модули оптоэлектронных систем постоянно совершенствуются, благодаря развитию технологий. Основные направления развития включают:

- Уменьшение размеров и повышение точности: Современные микроэлектронные и наноэлектронные технологии позволяют создавать миниатюрные устройства с высокой точностью.

- Развитие технологий связи: Использование оптических технологий для передачи данных, включая волоконно-оптические технологии и беспроводные каналы, становится всё более актуальным.

- Интеграция с интеллектуальными системами: Современные мехатронные модули включают в себя элементы искусственного интеллекта

для автономного принятия решений, обработки данных и управления сложными процессами.

4. Применение мехатронных модулей оптоэлектронных систем

Мехатронные модули оптоэлектронных систем применяются в самых различных областях:

- Промышленность: В автоматических системах контроля качества, в роботах для сборки и монтажа, в системах мониторинга.
- Медицина: В медицинских приборах для диагностики (например, в системах МРТ, оптических сканерах).
- Автомобильная промышленность: В системах парковки, системах помощи водителю и навигации.
- Оборона: В системах наблюдения, навигации и дистанционного управления.

Мехатронные модули оптоэлектронных систем представляют собой ключевые элементы современной техники, которые находят применение в самых разных сферах. Совмещение механических, оптических и электронных технологий позволяет создавать устройства, которые обладают высокой эффективностью и возможностями для дальнейшего развития, особенно в условиях быстрого технологического прогресса.

Мехатронные модули являются неотъемлемой частью современных оптоэлектронных систем, обеспечивая высокоточную механо-оптическую интеграцию и взаимодействие между элементами управления, детектирования и преобразования сигналов. Их главная функция заключается в обеспечении точного позиционирования и стабилизации оптических компонентов, что критически важно для повышения разрешения, чувствительности и общей эффективности всей системы. Благодаря развитию технологий, мехатронные модули становятся всё более компактными, энергоэффективными и интеллектуально управляемыми, что открывает новые возможности для автоматизации и адаптивного функционирования оптоэлектронных установок.

Классификация таких модулей основывается на принципах их действия, конструктивных особенностях и функциональном назначении в составе системы. В зависимости от характера перемещения и способа приведения в действие, модули могут выполнять линейные или угловые перемещения, а также обеспечивать стабилизацию положения в условиях внешних воздействий. По уровню интеграции выделяют модули базового уровня, выполняющие отдельные задачи, и комплексные устройства, в которых сочетаются исполнительные, сенсорные и управляющие компоненты в едином корпусе.

С точки зрения применения в оптоэлектронных системах, мехатронные модули используются в различных направлениях — от автоматического выравнивания оптических осей до компенсации колебаний и температурных дрейфов. Их выбор определяется техническими требованиями конкретной задачи, включая диапазон перемещений, точность позиционирования,

быстродействие и устойчивость к внешним помехам. Таким образом, мехатронные модули играют ключевую роль в формировании высокоэффективных и надёжных оптоэлектронных комплексов, обеспечивая необходимую точность и гибкость работы в динамически меняющихся условиях.

1.2 Теоретические основы моделирования пьезоэлектрических актуаторов

В основу теории моделирования пьезоэлектрических устройств положены работы таких ученых как Навье, Коши, Пуассон, Грин и др.. В 20–40-х годах XIX века благодаря им завершается построение линейной теории упругости как математической модели. Эта теория была призвана описывать поля напряжений и деформаций твердых тел, возникающих под действием сил механической природы. [19].

Простейшая модель пьезоэлектрического преобразователя получена из описания феномена, описанного братьями Кюри. Они определили, что напряжение пропорционально удлинению пьезоэлектрического кристалла:

$$U = -kx, \quad (1)$$

где U - напряжение [В], k - пьезоэлектрическая постоянная [В/м], x - перемещение [м].

Одномерная модель Кристалл сульфида кадмия состоит из чередующихся ионов серы и кадмия. Представим, что ионы связаны между собой пружинами. Рассмотрим воздействие электрического поля вдоль оси шестого порядка. Так как по отношению к каждому иону соседние ионы расположены несимметрично, то и пружины имеют различную жесткость. Такая одномерная модель наглядно показывает взаимосвязь механических и электрических свойств пьезокристалла. Под действием механического напряжения цепочка деформируется. Изменение расстояний a и b приводит к изменению поляризации.

$$P = \Delta P_0 = \frac{n \times q}{2} \times (\Delta a - 2\Delta b) \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает прямой пьезоэлектрический эффект.

Если электрическое поле смещает в противоположные направления положительные и отрицательные ионы, то при неодинаковых жесткостях пружин возникает деформация. Таким образом одномерная модель описывает обратный пьезоэлектрический эффект.

Пробел между рассмотрением пьезоэлектрических тел с использованием теории механики сплошных сред и использованием этой теории применительно к конкретным пьезоэлектрическим материалам

охватывается кристаллографией. Большинство пьезоэлектрических материалов являются кристаллическими телами. Теория линейного пьезоэлектричества описывается в основном тензорами. Понятие тензора возникает при установлении линейных соотношений между внешним воздействием и реакцией на него в анизотропных средах. Воздействие, приложенное на кристалл в одном направлении, вызывает ответную реакцию в другом направлении. Например, в диэлектрической среде электрическое поле создает поляризацию в направлении, не совпадающем с направлением поля.

Теория четырехполюсников применительно к пьезоэлектричеству существует теория электромеханических преобразователей [10], согласно которой любой электромеханический преобразователь может быть описан уравнениями из теории четырехполюсников, известной из электротехники. Удобной формой обобщенной модели пьезоэлемента является его модель как четырёхполюсника [11], в котором осуществляется однократное преобразование энергии.

Пусть энергия линейной механической системы описывается выражением (3) [10].

$$C = 1/2 (c_{11}y_1^2 + c_{22}y_2^2 + \dots) + c_{12}y_1y_2 + c_{23}y_2y_3 + \dots, \quad (3)$$

где коэффициенты c_{ik} имеют размерность и смысл упругости.

И пусть внешние силы уравновешиваются реакциями системы и выражаются частными производными от энергии по соответствующим перемещениям (4).

Таблица 1 – Соответствие переменных для различных видов энергии

Вид энергии	Обобщенная сила	Обобщенное перемещение	Обобщенная скорость
Механическая	F — механическая сила	u — смещение	V — скорость
Электрическая	U — напряжение	q — заряд	i — ток
Магнитная	Магнитодвижущая сила	Магнитный поток	Производная магнитного потока по времени
Тепловая	Температура	Энтропия	Производная энтропии по времени

$$x_i = \frac{dC}{dy_i} \quad (4)$$

При помощи соотношения (4) силы выражаются линейными функциями перемещений (система уравнений (5)).

$$\begin{cases} x_1 = c_{11}y_1 + c_{12}y_2 + \dots \\ x_2 = c_{21}y_1 + c_{22}y_2 + \dots \end{cases} \quad (5)$$

Если под C в выражении 3 понимать не механическую, а какую угодно (например, электрическую, магнитную и т.д.) потенциальную энергию, то все приведенные выражения сохраняют силу, но переменные x_i и y_i принимают размерность и смысл соответствующих физических величин. То же относится и к коэффициентам c_{ik} . Опираясь величинами x_i , y_i , c_{ik} и называя их по-прежнему силами, перемещениями и упругостями, им придается указанный обобщенный смысл. В областях механики, электричества, магнетизма и термодинамики установилась определенная традиция, приписывающая смысл обобщенных сил и обобщенных перемещений и скоростей вполне определенным величинам.

Метод электромеханических аналогий Данный метод позволяет перейти к схеме замещения электромеханической системы схемой замещения на радиоэлектронных компонентах. Появляется возможность исследовать пьезоэлектрический преобразователь с помощью такой схемы. При этом под «эквивалентной схемой» какой-либо электромеханической системы обычно понимают группу значений R , L , C , независимых от частоты и соединенных друг с другом так, что при их подстановке вместо действительной системы в какой-либо электрический контур их воздействие на контур будет таким же как воздействие самой электромеханической системы [12]. Главное достоинство электрических аналогий — это возможность применения методов расчёта и анализа электрических колебательных систем при рассмотрении механических систем, так как эти системы описываются схожими дифференциальными уравнениями [13] и имеются прямые аналогии в законах колебания механических систем и электрических контуров. Электрические аналогии особенно полезны при определении свойств сложных механических систем с несколькими степенями свободы, аналитическое исследование которых решением дифференциальных уравнений весьма трудоёмко. В работе, например, приводятся уточненные эквивалентные схемы для ненагруженных пьезоэлектрических устройств. От системы уравнений с помощью метода электромеханических аналогий можно перейти к схемам замещения пьезоэлемента и путем их преобразования определить в конечном итоге характеристики и параметры пьезоэлемента. [14-15]

Можно отметить, что практически во всех случаях при расчетах работы пьезоактуатора, его импеданс принимается емкостным, а сам элемент — электрической емкостной нагрузкой. Тем не менее, в области резонанса необходим переход к LRC эквивалентной схеме. При этом необходимо учитывать саморазогрев пьезоактуатора при работе с высокой мощностью, так как высокая температура может привести к деполяризации изделия.

Следует отметить, что результаты расчета характеристик пьезоэлемента по схемам замещения являются весьма приближёнными. Это связано с тем, что пьезоэлемент является системой с распределёнными параметрами, и его представление в виде эквивалентной системы с конечным числом сосредоточенных параметров R, L, C , не зависящих от частоты приближенно допустимо только в области окolorезонансной частоты. [1]

Теория упругости в пьезоэлектричестве и уравнения пьезоэлектрической среды. Теория упругости определяет напряжения и деформации в твердых телах и вводит коэффициенты, определяющие их упругие свойства. Описание процессов в пьезосреде проводят методами тензорного и матричного анализов. Например, связь между индукцией и напряженностью электрического поля определяет тензор диэлектрической проницаемости ϵ_{ij} .

В современной литературе присутствует множество исследований на тему моделирования пьезокерамических устройств, описывающих различные связи пьезоэлемента. Учет или неучет прямого пьезоэффекта, распределенности параметров ведет к синтезу моделей различной сложности и достоверности. На практике распространено описание динамических свойств пьезосистем с помощью эквивалентных схем замещения, матричных систем дифференциальных уравнений и передаточных функций. Среди прочих можно выделить, например, работу [17], отличающуюся многообразием вариаций описываемых моделей. В исследовании [18] приводится исследование одновременного применения ПИД-регулятора и обратной связи по силе (ускорению). Решается задача компенсации вибраций, где отрицательно влияет запаздывание, вносимое гистерезисом. Показано, что обратная связь по силе и использование ПИД-регулятора позволяет уменьшить вибрацию на 97,7%, в то время как обычный ПИД-регулятор позволил уменьшить вибрацию на 89,3%. В [19] рассмотрены вопросы организации программно-аппаратного комплекса для прототипирования цифровых систем управления мехатронными модулями на основе тонкопленочных пьезоактуаторов. Экспериментально показано, что данный комплекс позволяет произвести исследования динамических характеристик объекта управления. В [20] также приводятся результаты исследования статических и динамических характеристик многослойного пьезопакета. В [21] рассматривается система управления с компенсацией гистерезиса, при которой учитывается изменение емкости пьезоактуатора на примере АРА-120ML. В результатах указывается на уменьшение гистерезиса на 30-40% в задачах активной компенсации вибрации. Модели поляризации сегнетокерамических элементов рассмотрены в [22]. В [23] приводится структурная схема поворотного пьезодвигателя на основе пьезоактуатора и приводится синтез его регулятора.

Пьезоэлектрический эффект заключается в возникновении электрического заряда на поверхности материала при его механическом деформировании и, наоборот, в механической деформации при приложении

электрического поля. Этот эффект возможен в кристаллических материалах, не обладающих центром симметрии. Основными веществами, обладающими ярко выраженными пьезоэлектрическими свойствами, являются титанат цирконат свинца (PZT), ниобат лития и кварц.

Пьезоэлектрические актуаторы используют обратный пьезоэффект, когда при подаче напряжения на материал возникает управляемое механическое перемещение. В зависимости от конфигурации, различают продольный, поперечный и сдвиговой режимы деформации пьезоэлемента.

Основу работы пьезоактуаторов составляет физическое явление, известное как обратный пьезоэлектрический эффект, при котором кристаллические материалы деформируются под действием внешнего электрического поля. Это свойство позволяет преобразовывать электрическую энергию в механическую с высокой точностью и эффективностью.

Моделирование пьезоэлектрических актуаторов — это теоретическое обоснование и математическое представление всех процессов, происходящих в активных элементах конструкции. Такое моделирование необходимо как на этапе проектирования устройств, так и при анализе их поведения в различных эксплуатационных условиях. Основная задача теоретического моделирования заключается в построении адекватной физической модели, описывающей взаимодействие электрических и механических полей внутри пьезоэлектрического материала, а также учёт внешних факторов, таких как температура, граничные условия и особенности нагрузки.

Физическая природа пьезоэффекта требует совместного рассмотрения уравнений электростатики и механики сплошной среды. Электрическое поле, приложенное к кристаллу, вызывает его механическую деформацию, и наоборот — механические напряжения могут порождать электрические заряды на поверхности материала. Такая взаимосвязь обуславливает необходимость работы с системами связанных уравнений, которые описывают электромеханическое поведение материала. С математической точки зрения моделирование включает в себя систему тензорных уравнений, содержащих упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры, характерные для конкретного вещества.

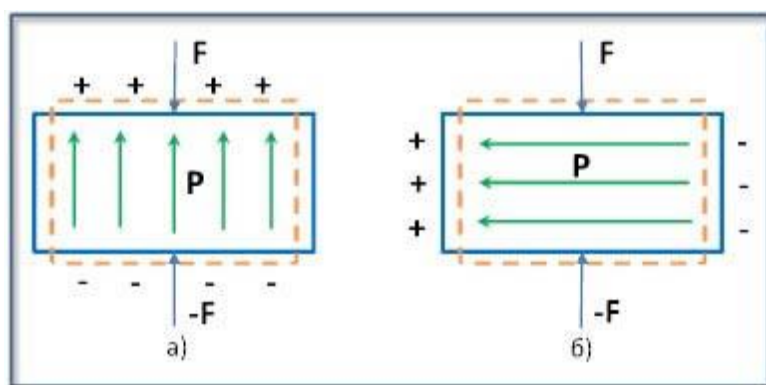


Рисунок 1.1 – Пьезоэлектрический эффект

Особое внимание при построении моделей уделяется постановке граничных условий. Это одна из ключевых составляющих любой задачи моделирования, поскольку неправильное определение закреплений, внешних воздействий или электрических условий может привести к некорректным результатам. В реальных системах пьезоактуаторы могут быть частично закреплены, свободно вибрировать или взаимодействовать с другими элементами конструкции, что требует сложного и точного описания взаимодействия на границах модели. Также важно учитывать начальные условия, если речь идёт о динамическом моделировании, например, при исследовании вибраций или резонансных явлений.

Дополнительную сложность при моделировании представляют температурные зависимости параметров. Многие пьезоэлектрические материалы изменяют свои свойства при изменении температуры: упругие характеристики, диэлектрическая проницаемость и пьезоэлектрические коэффициенты могут значительно варьироваться, особенно вблизи точки фазового перехода. Это требует от исследователя включения температурных поправок в модель, что нередко приводит к необходимости численного моделирования. Также на практике часто наблюдаются нелинейные эффекты, такие как гистерезис и остаточные деформации. Их влияние особенно заметно при больших амплитудах возбуждения, а значит, для точного моделирования требуется использование специальных моделей, описывающих эти нелинейные явления.

Современные задачи моделирования решаются преимущественно с применением численных методов. Наиболее распространённым и эффективным методом является метод конечных элементов, позволяющий разбить исследуемую область на дискретные ячейки и решать уравнения в каждом из них, учитывая как геометрию, так и физические свойства. С помощью специализированного программного обеспечения можно построить трёхмерную модель пьезоактуатора, задать граничные и начальные условия, определить материал и провести серию симуляций для различных режимов работы. Это позволяет заранее предсказать резонансные частоты, форму деформации, распределение напряжений и другие параметры, не прибегая к дорогостоящим экспериментам.

Однако даже самое совершенное моделирование должно быть подтверждено на практике. Сопоставление результатов численного анализа с экспериментальными данными позволяет оценить точность модели, выявить слабые места в теоретических предположениях и при необходимости скорректировать параметры. Такая валидация особенно важна при разработке новых типов актуаторов, где отсутствует накопленный опыт или существуют нетипичные условия эксплуатации. Кроме того, сравнение теории и практики способствует дальнейшему развитию самих моделей — включению новых физических эффектов, уточнению параметров, улучшению точности расчётов.

Таким образом, теоретические основы моделирования пьезоэлектрических актуаторов представляют собой совокупность физики

твёрдого тела, электростатики и вычислительной математики. Глубокое понимание этих основ позволяет инженеру и исследователю создавать устройства, обладающие высокой точностью и надёжностью, при этом снижая затраты на разработку и испытания. Благодаря быстрому развитию программных средств и совершенствованию математических моделей, возможности моделирования становятся всё шире, открывая путь к созданию всё более совершенных устройств для науки, техники и медицины.

Получение скорректированных пьезоп приводов осложнено с одной стороны техническими трудностями получения корректирующих сигналов при малом диапазоне перемещения. С другой стороны, описание пьезоэлектрических преобразователей осложнено тем, что их механическая жесткость и диэлектрическая проницаемость зависят от вида электрических граничных условий. В режимах управляемого движения фиксированные или стационарные граничные условия обычно отсутствуют. Поэтому требуются модели с переменными параметрами со всеми вытекающими трудностями их синтеза на их основе простых корректирующих воздействий. Анализ, однако, показывает, что необходимость введения переменных параметров является следствием рассмотрения прямого и обратного преобразования энергии в отрыве друг от друга. В [21] были получены модели, основанные на уравнениях одного обратного пьезоэффекта и уравнениях механического движения. Подобные модели сходны с попытками описания электродвигателя без учета его ЭДС. В [1] описываются модели с учетом одновременного действия прямого и обратного пьезоэффектов. Такие модели не требуют введения переменных параметров и одинаково хорошо работают как при медленных, так и при весьма быстрых движениях. Выполненные в форме структур такие модели допускают расчленение на блоки и связи, описывающие отдельно электрические и механические процессы. В [1] рассматриваются скорректированные системы, используемые в динамике, незначительно превышающей диапазон управляемых статических перемещений и не используются для работы в резонансных режимах. Рабочим в таких режимах является движение по какой-либо одной геометрической оси, причем основные статические и динамические усилия в пьезоматериале развиваются, как правило, в направлении этой же оси. При этом появляется возможность пренебрежения всеми компонентами тензора, кроме действующих в направлении рабочего движения. В простейшем случае пьезопреобразователи описываются как объекты второго или третьего порядка, динамические свойства которых изучены.

На основании проведенного анализа за основу для дальнейшего исследования предлагается принять модель пьезокерамики, представленную в [1], как наиболее полно отражающую исследуемые параметры пьезокерамического материала. Данная модель получила свое развитие в публикации по моделированию пьезопривода на основе тонкопленочных пьезоактуаторов [24] и в последующих главах она исследуется для различных температур.

1.3 Проблемы использования пьезоэлектрических устройств

Нестабильность параметров пьезоматериала, возникающая под воздействием температуры, влияет в итоге и на характеристики пьезоэлектрических мехатронных модулей оптоэлектронных систем. Например, в подвесных оптоэлектронных системах, несмотря на прогресс в области производства датчиков изображения с высоким изображением, может снижаться четкость изображения в том числе при применении на БПЛА.

Таким образом, влияние температуры на параметры пьезокерамики является важным фактором и различным образом учитывается производителями прецизионных пьезоэлектрических мехатронных модулей.

Исследование и разработка методики оценки меняющихся под воздействием температуры параметров пьезокерамики является актуальной задачей с точки зрения повышения эффективности оптоэлектронных систем.

Физические свойства твердого тела могут изменяться в широких пределах при неизменной химической формуле. Например, титанат бария кристаллизуется в кубической структуре при температуре более $+120$ $^{\circ}\text{C}$. При уменьшении температуры кристаллическая ячейка переходит последовательно в тетрагональную, ромбическую, а затем в ромбоэдрическую [25]. Такие изменения под воздействием температуры безусловно приводят к изменению параметров пьезокерамики. Это влияет в свою очередь на характеристики пьезопроводов мехатронных модулей.

Пьезоматериалы делятся на сегнетомягкие, сегнетожесткие и бессвинцовые пьезоматериалы. Для сегнетомягких материалов характерна высокая подвижность диполей (доменов), что даёт им преимущество — лёгкость в поляризации, высокое значение пьезомодуля, коэффициента электромеханической связи, а также умеренное значение диэлектрической проницаемости. Для сегнетожестких пьезоматериалов характерны большая устойчивость к высоким электрическим и механическим воздействиям, низкие диэлектрические потери. Отличительной особенностью бессвинцовых материалов является высокая температура Кюри (>500 $^{\circ}\text{C}$), что позволяет использовать их длительное время на резонансной моде, и высокая линейность, которая используется в актуаторах с высокой повторяемостью позиционирования. Однако такие имеют низкое значение пьезомодуля, что в дальнейшем ограничивает ход пьезоэлемента на их основе. Пьезоактуаторы, как правило, изготавливаются из сегнетомягких пьезокерамических материалов, т. к. они имеют наибольший пьезомодуль, что положительно сказывается на генерируемой деформации элемента [13].

Выбор нужного вида пьезоматериала обычно осуществляется по следующим параметрам: пьезомодуль в направлении рабочих деформаций; модуль Юнга; коэффициент электромеханической связи; механическая добротность. Именно эти параметры определяют диапазон перемещений, упругие и резонансные свойства, эффективность преобразования

электрической энергии в механическую, а также степень затухания колебательных процессов.

Особое внимание уделяется стабильности параметров пьезопреобразователей. Основным требованием при разработке новых пьезокерамических материалов является улучшение коэффициента электромеханической связи, который напрямую зависит от пьезоэлектрического модуля и диэлектрической проницаемости материала, а также увеличение надёжности и долговечности пьезоматериалов. Основной причиной нестабильности пьезокерамики служат остаточные механические напряжения и связанные с ними процессы доменной реориентации, а основными дестабилизирующими факторами являются: разброс технологических параметров при изготовлении, температура, электрическое поле и временные факторы (естественное старение).

Для реализации робастных алгоритмов, необходимо знать, какие параметры пьезокерамики подвержены наибольшему изменению под действием дестабилизирующих факторов, таких как изменение температуры, и как изменение таких параметров повлияет на характеристики пьезопривода [26].

Механические ограничения. При работе пьезопривода на повышенных частотах следует учитывать ограничения, связанные с пределами механического напряжения пьезоматериала. Пьезокерамика вообще является хрупким материалом, а многослойная пьезокерамика в частности особенно чувствительна к воздействию силы растяжения. Многослойная пьезокерамика может выдерживать силу сжатия примерно в пять раз больше силы растяжения. Чрезмерные растягивающие механические силы могут возникать в динамических режимах работы, особенно с учетом инерционности массы полезной нагрузки пьезоактуатора. Особенно критичен будет выход пьезокерамики из максимально сжатого состояния с большой скоростью и при наличии массы полезной нагрузки, что приведет к появлению дополнительной силы инерции в момент растяжения пьезокерамики. Такой режим приведет к механической поломке пьезоактуатора и таких режимов стоит избегать. Существует способ обеспечить силу сжатия равной силе растяжения. Он заключается в предварительном сжатии пьезокерамики внешней пружиной. Предварительное механическое напряжение (преднагрузка) пьезокерамики, поддерживает пьезокерамику в сжатом состоянии. Сжатая пьезокерамика будет способна выдержать большие растягивающие усилия. Это существенное преимущество для работы в динамических режимах. Второй причиной, которая может вывести пьезоактуатор из строя является прямоугольный фронт напряжения, подаваемого на пьезоактуатор на высоких частотах. Резкий рост напряжения будет приводить к дополнительным вибрациям конструкции пьезокерамики и может повлиять на работоспособность пьезоактуатора. Также стоит избегать изгибающих или крутящих моментов даже в процессе монтажа пьезоактуатора.

Ограничения по температуре. Пьезоэлектрический привод нагревается при непрерывной работе под влиянием диэлектрических и механических потерь. Потери носят нелинейный характер и зависят от частоты возбуждения, амплитуды напряжения и уровня влажности. Безусловно, при изменении температуры изменяются параметры пьезокерамики и исследованию изменений таких параметров пьезокерамики посвящена существенная часть данной работы. Но также при нагреве требуется избежать эффекта деполяризации пьезокерамики, при котором пьезоактуатор выйдет из строя и это является существенным ограничением. Для этого требуется контролировать, чтобы температура привода не повышалась выше точки Кюри пьезокерамики. При этом в настоящее время ведется много исследований материалов, которые предназначены для производства высокотемпературной многослойной пьезокерамики (до 200 °С).

С другой стороны, многослойная пьезокерамика работает и при низких температурах и уже была испытана в жидком азоте при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но при криогенных температурах обеспечивается только треть деформации от получаемой при комнатной температуре.

Ввиду изменения параметров пьезокерамики под влиянием температуры, производители заявляют параметры пьезоактуаторов для определенного диапазона температур. Обычно параметры приводятся для комнатной температуры. При этом стандартные пьезоактуаторы способны работать в диапазоне температур $-40 \dots + 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, но их характеристики будут меняться с температурой. Для обеспечения номинальных параметров пьезоактуатора, заданных при комнатной температуре, производители рекомендуют использовать более легкий режим работы пьезоактуатора или обеспечить дополнительное охлаждение.

Ограничения системы управления. Повышение эффективности оптоэлектронных систем может достигаться с учетом основных критериев синтеза устойчивой и чувствительной системы управления. Любая замкнутая система автоматического управления имеет такие характеристики как устойчивость и быстродействие. Компромиссные значения этих характеристик позволяют получить быстродействующую систему, не склонную к самовозбуждению.

Переходная характеристика – переходная функция является важнейшей характеристикой любой системы автоматического управления. Она несет информацию о времени переходного процесса, времени его нарастания, амплитуде первого выброса и перерегулировании. Переходную характеристику можно снять экспериментально и она будет получена для всех далее синтезируемых моделей.

Время нарастания – это время, которое требуется сигналу, как правило, для перехода от 10% к 90% заданной величины. Обычно во время калибровки замкнутого контура существует зависимость между «временем нарастания» и «временем установления».

Величина перерегулирования или амплитуда первого выброса – это максимальное значение, выше заданной позиции. Уменьшение такого выброса, т.е. уменьшение перерегулировки, - может быть важной задачей для ряда применений из-за механических жестких остановок или других физических ограничений. Величина перерегулирования также будет задаваться далее в техническом задании к синтезируемым системам и оцениваться для различных алгоритмов управления. Также стандартной практикой снижения выбросов является демпфирование. Необходимость применения демпфирования при моделировании пьезоактуаторов также будет рассмотрена далее в разделе 4.1, посвященной методике оптимизации конструктивных решений пьезоэлектрических модулей с механической редукцией с целью расширения диапазона перемещений и максимального демпфирования.

Время установления (или время переходного процесса) - это время, прошедшее с момента идеальной мгновенной подачи «единичного скачка» до момента, при котором выходная реакция системы вошла и осталась в пределах заданного диапазона погрешности. Как правило, диапазон погрешности устанавливается в пределах $100 \pm 5\%$. Этот параметр также является существенным, поэтому он приведен далее в таблице 9 и также будет учитываться далее при формировании технического задания на синтезируемую систему.

Динамическая ошибка – это разница между желаемым и фактическим состоянием системы на выходе, когда система достигает устойчивого состояния. Одной из наиболее распространенных задач управления с обратной связью является задача свести эту ошибку к нулю. При отсутствии интегратора, установившееся положение находится далеко от желаемой позиции. Эта ошибка компенсируется, когда к контроллеру добавляется интегратор (интегральный элемент имеет эффект устранения статической ошибки). Тем не менее, такой контроллер может вводить выбросы на фронте импульса.

Запасы устойчивости. Стабильность контура управления является одной из главных задач специалистов, разрабатывающих алгоритм управления. Для количественной оценки стабильности системы было введено понятие запаса устойчивости. Запасы устойчивости выражаются в терминах «запас устойчивости по амплитуде» и «запас устойчивости по фазе». Обе эти характеристики могут быть получены из «ЛАФЧХ - логарифмическая амплитудно-частотная характеристика» (диаграмма Боде (в иностранной литературе)). Детали оценки устойчивости не описываются в этой работе, их можно найти. В данной работе диаграммы Боде будут использоваться для поиска резонансных частот синтезируемых систем.

Запас устойчивости по усилению. Возрастание коэффициента усиления обычно позволяет достичь конечной позиции быстрее. При этом запас устойчивости по усилению характеризует возможность увеличить

коэффициент усиления в системе с замкнутой обратной связью до перехода системы в нестабильное состояние.

Электро-механический резонанс пьезоэлектрического мехатронного модуля. При разработке пьезоэлектрического мехатронного модуля электро-механический резонанс системы стремятся получить как можно выше. При этом механический резонанс вызван элементами корпуса и механических связей. Рекомендуются, например, для рабочей полосы до 100 Гц, электро-механический резонанс находился на уровне 1000 Гц. В последующих исследованиях диаграммы Бode будут использоваться для поиска электрического резонанса проектируемой системы управления.

С другой стороны, добротность пьезоэлектрического модуля зачастую приходится занижать при помощи демпферов. Это делается для снижения колебательности переходных процессов, особенно при крутом фронте управляющего напряжения.

Увеличение частоты механического резонанса также обычно сопровождается снижением диапазона перемещений из-за увеличения жесткости системы.

Нагрузки, направленные перпендикулярно к слоям многослойной пьезокерамики. При работе пьезоактуаторов в некоторых системах микросканирования возникают силы, действующие перпендикулярно рабочему ходу пьезоактуатора. То, что многослойная пьезокерамика хорошо выдерживает воздействие сжимающих сил, но плохо выдерживает воздействие растягивающих сил и перпендикулярных нагрузок, учитывается и при разработке высокочастотных механизмов на пьезоактуаторах. Для уменьшения паразитных перпендикулярных сил в системах микросканирования используются в том числе флексеры, которые являются частью механической конструкции для достаточно жесткой передачи динамического движения от пьезоактуатора к полезной нагрузке (к линзе), но при этом достаточно гибкой для уменьшения паразитных сил, передаваемых от механической конструкции к пьезоактуатору.

Пьезоэлектрические исполнительные устройства, несмотря на их высокую точность, быстродействие и компактность, сталкиваются с рядом проблем, ограничивающих их применение в определённых условиях. Одной из ключевых трудностей является нелинейность их работы, выражающаяся в гистерезисе, запаздывании и зависимости выходного перемещения от предшествующих воздействий. Это затрудняет точное управление устройством в разомкнутых системах и требует использования замкнутых контуров с обратной связью, что повышает сложность и стоимость всей системы.

Существенным фактором, влияющим на стабильность и надёжность работы пьезоактуаторов, является температурная зависимость их характеристик. Изменения температуры окружающей среды или самонагрев при длительной работе могут приводить к смещению рабочих точек, дрейфу положения и снижению точности. Такие эффекты особенно критичны в

прецизионных оптических и измерительных системах, где даже микронные отклонения считаются недопустимыми. Решение этих проблем требует внедрения температурной компенсации, что увеличивает требования к системе управления и конструкции актуатора.

Кроме того, пьезоэлектрические материалы подвержены эффекту старения и деградации, особенно при работе под высокими напряжениями или в агрессивных внешних условиях. Это может привести к снижению амплитуды перемещений, росту утечек и изменению электрических параметров. Надёжность таких устройств напрямую зависит от качества материалов, точности сборки и условий эксплуатации. Также ограничения по ходу перемещения, обычно составляющему всего десятки микрон, могут быть недостаточны для ряда задач, требующих более значительных линейных или угловых перемещений.

Таким образом, несмотря на очевидные достоинства, пьезоэлектрические исполнительные устройства требуют внимательного подхода к проектированию, компенсации их физических особенностей и тщательной настройки систем управления. Только при соблюдении этих условий возможно их эффективное и долговечное использование в составе высокоточных и чувствительных мехатронных и оптоэлектронных систем.

В работе рассматриваются ключевые характеристики пьезоэлектрических модулей, такие как быстродействие, точность и компактность, которые недостижимы при использовании электромагнитных двигателей. Подчеркивается, что эксплуатационные параметры пьезокерамики зависят от температуры, что вынуждает производителей разрабатывать методы компенсации этих изменений. Таким образом, влияние температурных колебаний на свойства пьезоматериалов остается важной проблемой при создании мехатронных модулей для оптоэлектронных систем. В данном исследовании предлагается подход к учету и минимизации температурного воздействия на пьезокерамику, что позволит повысить эффективность таких модулей.



Рисунок 1.2 – Пьезоактуатор

2. Разработка математической модели многослойного пьезопакета мехатронного модуля в условиях изменения температуры

2.1 Анализ и методика расчета параметров пьезоматериалов с точки зрения влияния на них температуры

В следующей подсекции описывается влияние температуры на параметры пьезокерамики. Для дальнейших исследований производится выбор марки отечественного пьезоматериала с указанием его параметров, таких как: модуль Юнга, механическая добротность и др. Параллельно с этим приводятся параметры реального пакета многослойной пьезокерамики с описанием его характеристик, таких как: емкость, величина хода и пр. Далее осуществляется синтез многослойного пьезоактуатора, подобного существующему, на основе выбранного отечественного пьезоматериала. Характеристики реально существующего многослойного пьезоактуатора (такие как величина хода, емкость и др.) и пьезопакета, который рассчитывается по приведенным формулам, на основе пьезокерамики ЦТС-46 оказываются схожими. Это в целом подтверждает возможность дальнейшего использования параметров пьезоматериала ЦТС-46 при исследовании предлагаемых в последующих главах алгоритмов управления.

Далее приводятся результаты исследования влияния температуры на перечисляемые параметры пьезокерамики. Определяются параметры пьезокерамики, наиболее подверженные влиянию температуры. Для параметров, наиболее подверженных воздействию температуры, определяются диапазоны их изменения в % для крайних значений температур.

1. ϵ_{33} — диэлектрическая проницаемость

– На рисунке приводится график позволяющий оценить изменение величины диэлектрической проницаемости пьезокерамики ТВ-2 в том числе и в диапазоне температур $-60 \dots + 80$ градусов Цельсия. Из рисунка определяется, что ϵ_{33} изменяется примерно на $\pm 15\%$ в диапазоне температур ± 60 градусов Цельсия.

– В таблице, приведенной в работе, приводятся данные, определяющие величину изменения диэлектрической проницаемости в диапазоне $-60 \dots + 60$ градусов Цельсия для ряда типов пьезокерамики изменяется на 10–20%.

– Для разрабатываемых далее в рамках данной работы моделей, на основании выше изложенного, принимается, что изменение диэлектрической проницаемости в диапазоне температур $-60 \dots + 80$ [°C] составит $\pm 20\%$. Диапазон изменения $\epsilon_{33} \pm 20\%$ будет использоваться и далее при определении изменения параметров пьезокерамики исследуемой марки ЦТС-46. Это в свою очередь повлияет на коэффициенты модели пьезопакета на основе многослойной пьезокерамики и при исследовании разрабатываемых алгоритмов управления в заданном диапазоне температур (рисунки 2.2).

2. d_{33} — пьезомодуль а) На рисунке 1 приводится зависимость пьезомодуля от температуры для разных типов пьезокерамики ЦТС:

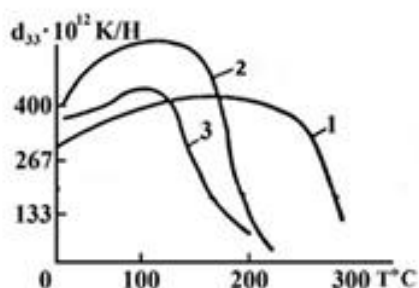


Рисунок 2.1 – Температурная зависимость d_{33} пьезокерамики

– Дополнительно определено, что при нормальных условиях величина пьезомодуля d_{33} пьезокерамики ТВ-2 составляет $(157 \pm 2) \times 10^{12}$ [Кл/Н].

– На основании данных приведенных в таблице 4 для разрабатываемой далее модели пьезомодуль принимается равным $d_{33} = 450 \times 10^{12}$ для условий комнатной (далее по тексту — «нормальной») температуры.

– На основании приведенных зависимостей для последующих расчетов принимается, что коэффициент d_{33} меняется в диапазоне температур от минимальной до максимальной меняется на 10%.

– θ добротность а) В рисунке 2.2 приводится диаграмма, позволяющая оценить, что с ростом температуры добротность возрастает (рисунок 2.3).

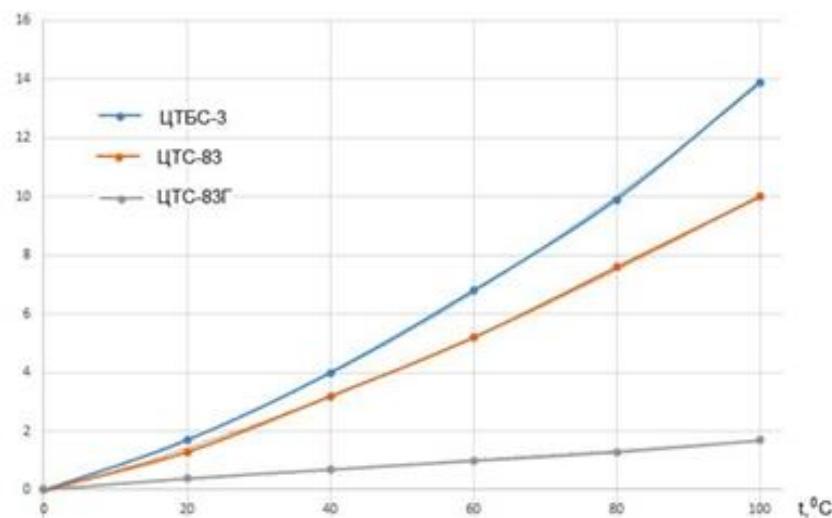


Рисунок 2.2 – Диаграмма относительных изменений θ

– Известно, что с ростом температуры добротность пьезоматериала возрастает. Для различных материалов системы ЦТС она изменяется от 17 до 14%. Например, для пьезокерамики ЦТС-83, её изменение при 100 °C

составляет 97%, у ЦТС-83Г — 17%, у ЦТБС-3 — 139%, у ЦТС-19 — около 14%.

4. КТР — коэффициент теплового расширения:

- в результате теплового расширения изменится и толщина слоя многослойной пьезокерамики. Возможно это повлияет на емкость пьезокерамики;

- в указанной КТР пьезокерамики, применяемой для производства пьезоактуаторов. Его величина 001 [мкм/градус];

- в общем приводится мнение, что характеристики пьезоке рамики (d_{33} ϵ_{33}) предлагается учитывать как функции темпера туры 40, а температурными изменениями плотности материалов, геометрических размеров деталей, а также параметров усилителя и кабеля можно пренебречь. Приводится мнение, что эти предположе ния являются вполне оправданными, т.к. коэффициенты линейного теплового расширения материалов составляет около 10–5 на градус Цельсия, а усилитель, как правило, находится вне зоны влияющих факторов;

- на основании вышеизложенного в данной работе принимается, что КТР пьезокерамики составляет 10–5 при изменении температуры на один градус Цельсия. В данной работе приводятся расчеты и дана численная оценка влияния КТР на основные параметры пьезокерамики.

Y_{33} – по результатам исследования литературных источников определено, что модуль Юнга существенно не меняется при изменении температуры.

Ниже приводится сжатое исследование, показывающее каким образом из меняется, например, емкость пьезоэлектрического пакета многослойной пьезокерамики вследствие изменения параметров пьезоматериала под влиянием температуры (рисунок 2.4).

C_0 - емкость рассчитывается по формуле

$$C_0 = \epsilon_{33} \times \epsilon_0 \times (1 - K_{33}^2) \times \frac{N_0 \times S_0}{l_0} \quad (6)$$

где

N - количество слоев пьезокерамики

S_0 - площадь слоя

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума

ϵ_{33} - диэлектрическая проницаемость

l_0 - толщина одного слоя пьезокерамики

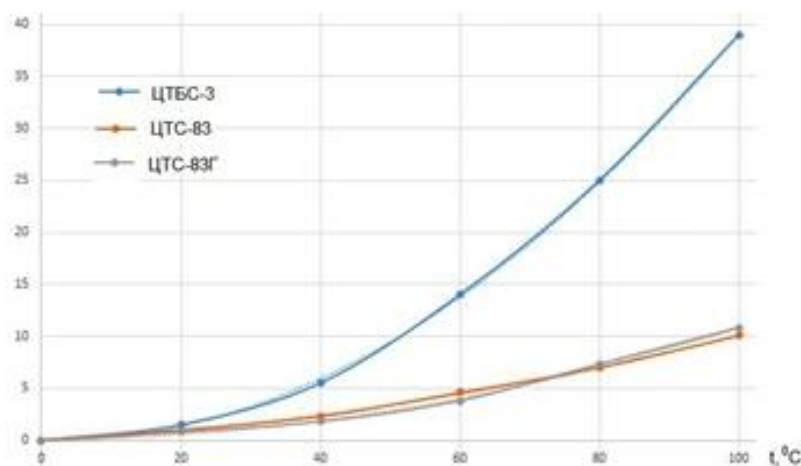


Рисунок 2.3 – Диаграмма относительных изменений емкости

Анализ диаграммы на рисунке 3 показывает, что емкость пьезокерамики ЦТС существенно меньше зависит от температуры, чем емкость пьезокерамики ЦТЭС. Поэтому пьезокерамику системы ЦТС имеет смысл применять для дальнейших исследований.

Основной задачей анализа температурного влияния является определение количественных и качественных изменений параметров пьезоэлектриков в зависимости от температуры, а также разработка методов коррекции или компенсации этих изменений. Поскольку пьезоэлектрические свойства, такие как диэлектрическая проницаемость, пьезомодули, упругие постоянные и коэффициенты теплового расширения, являются термозависимыми, любое отклонение температуры от номинального значения может повлечь за собой нежелательные изменения в функционировании прибора. Кроме того, термические напряжения, возникающие вследствие неоднородного нагрева или различий в коэффициентах теплового расширения между элементами конструкции, могут вызывать микротрещины и деградацию структуры. Вопрос корректного учета температурных факторов при расчете характеристик пьезоматериалов является весьма сложным. Это связано с тем, что поведение материала при изменении температуры носит нелинейный характер, причем отклонения могут проявляться не только на макро-, но и на микроуровне, включая изменения в доменной структуре, появление фазовых переходов и перераспределение зарядов. Именно поэтому необходим комплексный подход, сочетающий экспериментальные исследования, численное моделирование и аналитические методы. Особую актуальность приобретает учет температурных эффектов при использовании пьезоматериалов в условиях переменной среды, например, при работе в космосе, на авиационных двигателях или в условиях интенсивного нагрева в медицине и промышленности.

Расчет параметров пьезоэлектрических материалов с учетом температуры включает в себя несколько ключевых этапов. Прежде всего

необходимо получение температурных зависимостей всех основных свойств материала — диэлектрической проницаемости, коэффициента пьезоэлектрической связи, упругих модулей, тангенса угла диэлектрических потерь, а также температурного коэффициента линейного расширения. Эти зависимости могут быть получены экспериментально, с помощью диэлектрических измерений, механических испытаний и термоанализов. Например, температурная зависимость диэлектрической проницаемости может быть определена с использованием измерений ёмкости при различных температурах, что позволяет составить точную карту изменений электрической восприимчивости материала. Аналогично, изменение упругих свойств может быть оценено через анализ резонансных частот пьезоэлементов или с помощью метода ультразвуковой рефлектометрии. После получения температурных зависимостей необходимо интегрировать их в математические модели, описывающие поведение устройства на основе ПЭМ. Это может быть реализовано как в рамках аналитического описания на основе обобщённой теории электромеханических взаимодействий, так и через численное моделирование, например, методом конечных элементов. В этих моделях температурные зависимости параметров вводятся в виде функций от температуры, что позволяет оценить поведение материала и устройства при различных тепловых воздействиях. Такой подход позволяет прогнозировать нежелательные эффекты, оптимизировать конструкцию, выбрать наиболее стабильные материалы и разработать температурные компенсационные схемы.

Немаловажной задачей является определение температурных границ стабильной работы материала. Многие пьезоэлектрические материалы, в частности на основе титаната бария или цирконата-титаната свинца, имеют характерную температуру Кюри, при которой происходит фазовый переход из ферроэлектрического в параэлектрическое состояние. При этом резко падают все ключевые параметры, такие как пьезомодули и диэлектрическая проницаемость. Приближение рабочей температуры к температуре Кюри требует особого внимания, так как в этом случае может наблюдаться как снижение эффективности, так и полное разрушение функциональности устройства. Следовательно, при проектировании и расчёте необходимо учитывать не только текущие значения параметров, но и безопасный температурный диапазон работы. Ещё одним важным аспектом анализа температурных эффектов является учет остаточных напряжений, возникающих в многослойных структурах и композиционных материалах. В таких системах изменение температуры может привести к неоднородному распределению напряжений, особенно если различные слои обладают различными коэффициентами теплового расширения. Это в свою очередь влияет на эффективность электромеханического преобразования, может вызывать изгиб или даже разрушение конструкции. Поэтому расчет температурных деформаций и напряжений становится неотъемлемой частью методики оценки параметров.

В рамках численного моделирования такие расчеты позволяют выявить критические зоны и предложить методы усиления конструкции или снижения термического воздействия. Современные подходы к расчету параметров также включают в себя использование эмпирических моделей, в которых температурные зависимости описываются с помощью аппроксимаций на основе экспериментальных данных. Такие модели, хотя и не дают полного физического понимания происходящих процессов, позволяют достаточно точно предсказывать поведение материала в заданном диапазоне температур. В сочетании с машинным обучением и методами статистического анализа они дают возможность автоматизированного прогнозирования деградации свойств, оценки надежности и оптимизации режимов работы пьезоэлектрических устройств. С практической точки зрения, температурные расчеты применяются как на этапе проектирования, так и при калибровке уже изготовленных устройств. На этапе производства это позволяет провести отбор и сортировку по температурной стабильности, а также ввести температурные коэффициенты в схемы управления. При эксплуатации важно учитывать, что температура может изменяться динамически, в зависимости от времени, нагрузки, внешних условий. Поэтому часто используется активный температурный контроль, реализуемый за счет дополнительных датчиков, компенсаторов и систем охлаждения. Однако даже при наличии такой системы основным условием остается точность расчета температурных зависимостей.

2.2 Вывод системы уравнений для построения математической модели тонкопленочного многослойного пьезоактуатора

В данной секции приводится вывод системы уравнений, которая принимается за основу построения модели пьезопакета на основе тонкопленочной пьезокерамики. По результатам литературного обзора, приведенного в разделе 1.2, за основу берется модель, предложенная в [1], как наиболее соответствующая целям исследования. В [1] передаточная функция исследуемой модели приводится без вывода. В этой секции приводится вывод передаточной функции, так как она является математической основой для дальнейших исследований. При этом также широко используются основы моделирования пьезокерамики, приведенные в секции 1.2 данной работы. Усовершенствованная модель более удобна для целей исследования. Такие параметры пьезопакета многослойной керамики и системы управления, как: емкость, внутреннее сопротивление усилителя, коэффициенты прямой и обратной связи, коэффициенты упругости и демпфирования и масса, – вынесены в отдельные блоки.

Для математического описания пьезоактуатора необходимо учесть его конструктивные особенности, условия работы и принять некоторые допущения [8].

Приводится алгоритм вывода системы уравнений, на основе которых строится блок-схема, позволяющая производить исследования в Simulink для условий воздействия различных температур: 1. Предлагается рассмотреть пакет многослойной пьезокерамики, закрепленной одной стороной на идеально жестком основании (рисунок 2.4)

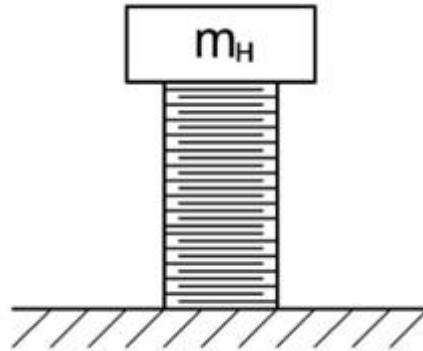


Рисунок 2.4 – Воздействие внешней нагрузки массой m_n на пакет многослойной пьезокерамики

2. Пусть на пакет пьезокерамики воздействует внешняя сила (рисунок 2.5). Внешняя сила будет являться причиной сжатия, другими словами полезного хода пьезокерамики, который обозначается Δx .

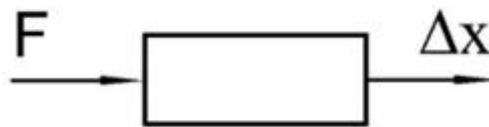


Рисунок 2.5 – Полезный ход пьезоэлектрического пакета многослойной пьезокерамики Δx под воздействием силы F

3. В процессе движения системы под действием переменной во времени внешней силы F возникают внутренние усилия, которые являются функциями времени. Движение системы характеризуется четырьмя основными свойствами: масса, диссипация энергии, жесткость системы и внешние нагрузки (рисунок 2.6).

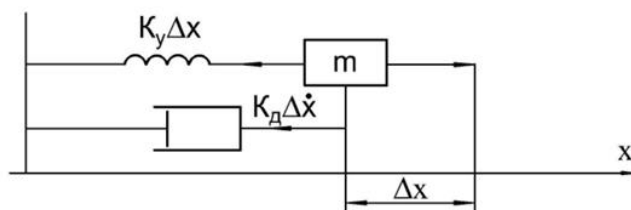


Рисунок 2.6 – Одномерная механическая модель пьезокерамики

Уравнение, характеризующее состояние равновесия системы в каждый момент времени, называется уравнением движения [53]. Для системы с одной степенью свободы оно имеет вид:

$$m \times \Delta x + K_d \times \Delta x + K_y \times \Delta x = F_{\text{воздейств}} \quad (7)$$

где m — масса, K_d — коэффициент демпфирования, K_y — коэффициент упругости, Δx — перемещение, $F_{\text{возд}}$ — внешняя сила. Левая часть данного уравнения представляет собой возникающие внутренние усилия динамической системы: $m \times \Delta'' x$ — сила инерции; $K_d \times \Delta' x$ — сила вязкого демпфирования, которая является функцией коэффициента демпфирования и скорости движения, характеризует процесс диссипации энергии за счет перехода кинетической энергии в тепловую; $K_y \times \Delta x$ — сила упругого сопротивления, являющаяся функцией жесткости и перемещения системы.

Уравнение (43) используется в пункте 10 при переопределении воздействующей силы.

3. До пункта 7 данной методики приводится описание только механических параметров пьезопривода (см. рис. 6). При этом производятся некоторые элементарные математические выкладки. Уравнение переписывается в производных по времени:

$$m \frac{d^2 x}{dt} + K_d \frac{dx}{dt} + K_y x = F_{\text{возд}} \quad (8)$$

Уравнение приводится к виду:

$$\frac{d^2 x}{dt} + \frac{K_d dx}{mdt} + \frac{K_y}{m} x = \frac{F_{\text{возд}}}{m} \quad (9)$$

5. Для уравнения используется преобразование Лапласа

$$m\zeta \left(\frac{d^2 x}{dt} \right) + K_d \zeta \left(\frac{dx}{dt} \right) + K_y \zeta(x) = F_{\text{возд}}(S) \quad (10)$$

Уравнение с помощью теории операционного исчисления переписывается в виде:

$$X(S)(mS^2 + K_d S + K_y) = F_{\text{возд}}(S) \quad (11)$$

Осуществляется переход к передаточным функциям. Передаточная функция системы — это отношение изображения Лапласа на выходе системы к изображению Лапласа на входе системы.

$$\frac{X(S)}{F_{\text{возд}}(S)} = \frac{1}{(mS^2 + K_d S + K_y)} \quad (12)$$

Получена передаточная функция только механической части пьезопривода (рисунок 2.8). Полученная функция представляет собой полином второй степени. Между тем полученное уравнение не описывает электрические свойства пьезопривода, а модель пьезокерамики должна связывать между собой механические и электрические свойства пьезопривода. Полином Ньютона третьей степени — это способ построить приближающую функцию по четырём известным точкам. Представьте, что у Вас есть значения функции в четырёх точках — полином Ньютона позволяет найти промежуточные значения между ними, построив кривую, проходящую через все эти точки.

Принцип его работы основан на пошаговом добавлении новых членов, которые уточняют приближение: сначала берётся значение в первой точке, потом добавляется поправка с учётом второй, затем третьей, и, наконец, четвёртой точки. Каждый следующий шаг делает аппроксимацию всё точнее.

Преимущество этого метода — его гибкость: можно легко добавлять новые точки и пересчитывать только часть полинома. Это особенно удобно при работе с табличными данными или при численном моделировании.

Построение модели продолжается с точки зрения электрических цепей. Пусть первоначальный размер пьезоэлектрического элемента изменяется под действием электрического поля E на значение Δx :

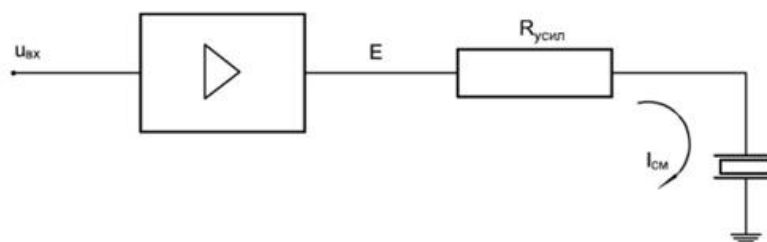


Рисунок 2.7 — Модель пьезокерамики с точки зрения электрических цепей

$$I_{\text{см}} = C_0 \frac{du}{dt} + K_{\text{п}} \Delta x \quad (13)$$

Где C_0 - емкость пьезоэлемента, $K_{\text{п}}$ - коэффициент прямого пьезоэффекта, Δx - скорость.

Связь между усилием и электрическим напряжением выражается через коэффициент обратной связи K_0 :

$$F_{\Xi} = K_0 u \quad (14)$$

По приведенной на рисунке 7 электрической схеме с помощью второго закона Кирхгофа составляется уравнение

$$u = E - R_{\text{усил}} \times I_{\text{см}} \quad (15)$$

Выражение для тока смещения подставляется из выражения в уравнение и раскрываются скобки. Влево переносятся слагаемые, выраженные через функции напряжения.

$$u + R_{\text{усил}} \times C_0 \frac{du}{dt} = E - R_{\text{усил}} \times K_{\text{п}} \Delta x \quad (16)$$

Из уравнений составляется система уравнений, при этом слагаемые в первом уравнении переставляются:

$$\begin{cases} R_{\text{усил}} \times C_0 \frac{du}{dt} + u = -R_{\text{усил}} \times K_{\text{п}} \Delta x + E \\ F_{\text{Э}} = K_0 u \end{cases} \quad (17)$$

Для осуществления связи электрических параметров модели пьезопривода с механическими выражение используется для переопределения электрической действующей силы $F_{\text{Э}}$ в механическую силу:

$$\begin{cases} R_{\text{усил}} \times C_0 \frac{du}{dt} + u = -R_{\text{усил}} \times K_{\text{п}} \Delta x + E \\ m \times \Delta x + K_{\text{д}} \times \Delta x + K_{\text{у}} \times \Delta x = K_0 u \end{cases} \quad (18)$$

Над системой продельвается ряд простейших математических операций. Для начала первое уравнение системы переписывается относительно du / dt , а второе относительно старшей производной. Далее первое уравнение делится на $R_{\text{усил}} \times C_0$, а второе уравнение на m . После чего коэффициенты в числителе и знаменателе сокращаются:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{K_{\text{п}} \Delta x}{C_0} + \frac{E}{R_{\text{усил}} \times C_0} - \frac{u}{R_{\text{усил}} \times C_0} \\ \Delta x = \frac{K_0 u}{m} - \frac{K_{\text{д}} \times \Delta x}{m} - \frac{K_{\text{у}} \times \Delta x}{m} \end{cases} \quad (19)$$

В правой части первого уравнения $1/C_0$ выносятся за скобки, а в правой части второго уравнения за скобки выносятся $1/m$. Затем в первом уравнении за внутренние скобки выносятся $1/R_{\text{усил}}$.

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{1}{C_0} (-K_{\text{у}} \Delta x + \frac{1}{R_0} (E - u)) \\ \Delta x = \frac{1}{m} (K_0 u - K_{\text{д}} \times \Delta x - K_{\text{у}} \times \Delta x) \end{cases} \quad (20)$$

Полученная система уравнений связывает электрические и механические свойства пьезопакета многослойной керамики. Эта система уравнений используется в этой работе для составления структурной схемы модели пьезоэлектрического пакета многослойной пьезокерамики.

Модификация этой модели для открытого контура управления приведена на рисунке 6. Эта модель исследуется для условий действия различных температур, для закрытого контура и при использовании различных алгоритмов управления. Передаточные функции модели принятой за основу и построенной по данной системе уравнений, – совпадают. Но разработанная структурная схема является более подходящей для целей исследования. При построении усовершенствованной структурной схемы применялись структурные преобразования. В полученной доработанной модели все основные параметры вынесены в отдельные блоки. Такой подход значительно повышает наглядность исследований и ускоряет процесс вычислений в программе Simulink.

В последующих секциях приводится исследование моделей с учетом влияния температуры на параметры пьезокерамики. Для этого коэффициенты системы уравнений выражаются в виде функции от температуры T :

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{1}{C_0(T)} (-K_p(T)\Delta x + \frac{1}{R_0} (E - u)) \\ \Delta x = \frac{1}{m} (K_0(T)u - K_d(T) \times \Delta x - K_y(T) \times x) \end{cases} \quad (21)$$

Система уравнений используется в последующих главах. На ее основе рассчитываются коэффициенты моделей пьезопакета для крайних значений исследуемого диапазона температур.

2.3 Алгоритм расчета коэффициентов передаточных функций тонкопленочного многослойного пьезоактуатора в условиях изменения температуры.

В этой секции приводится ряд математических расчетов, которые позволяют упростить дальнейшие исследования предлагаемых моделей. В пункте 11 раздела 2.2, посвященного выводу системы уравнений исследуемых далее моделей, было отмечено, что передаточные функции модели, принятой за основу, и модели, полученной по системе уравнений модели – совпадают.

Для численного определения коэффициентов передаточных функций пьезоэлектрического пакета, находящегося под воздействием меняющейся температуры окружающей среды, воспользуемся параметрами, определенными в предыдущей части работы. Уравнение представляется в виде.

$$W(S) = \frac{K_i}{a_{3i} \times S^3 + a_{2i} \times S^2 + a_{1i} \times S + 1} \quad (22)$$

при этом:

$$a_{3i} = R_{\text{BT}} C_{0i} \frac{M_p}{K_y} \quad (23)$$

$$a_{2i} = \frac{M_p}{K_{yi}} + R_{\text{BT}} C_{0i} \frac{K_d}{K_y} \quad (24)$$

$$A_{1i} = R_{\text{BT}} C_{0i} + \frac{K_d}{K_y} + R_{\text{BT}} \frac{K_{0i}^2}{K_{yi}} \quad (25)$$

$$K_i = \frac{K_{0i}}{K_y} \quad (26)$$

Таблица 2 – Численные значения коэффициентов передаточной функции пьезопакета для T_1 T_2 T_3 .

Температура Коэффициенты	T_1	T_2	T_3
a_{3i}	$4.5 \cdot 10^{-14}$	$3.56 \cdot 10^{-14}$	$5.3 \cdot 10^{-14}$
a_{2i}	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
a_{1i}	$4.39 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$5.28 \cdot 10^{-5}$
K_i	$1.06 \cdot 10^{-7}$	$9.5 \cdot 10^{-8}$	$1.15 \cdot 10^{-7}$

Коэффициент a_{1i} упрощается за счет равенства $K_{\pi i} = K_{0i}$, доказательство приводится в [1].

Определяются коэффициенты передаточной функции пакета многослойной пьезокерамики при T_1 и T_2 . Результаты сводятся в таблицу 8.

Данным разделом заканчивается основное математическое описание проводимых исследований. Рассчитанные коэффициенты будут использованы в Simulink при исследовании структурных схем пьезоэлектрических пакетов многослойной пьезокерамики при различных температурах. Также эти коэффициенты будут использованы при расчете корректирующего звена после довательного включения.

Выводы по главе. В данной главе приведены результаты моделирования пакета тонкопленочной многослойной пьезокерамики с габаритами и техническими характеристиками, соответствующими современным зарубежным аналогам, но на основе пьезокерамики российского производства ЦТС-46, функционирующего в условиях изменения температуры окружающей среды. Предложена методика (подраздел 2.1) расчета параметров пьезоматериалов, которая будет полезна разработчикам новых пьезомодулей для обоснованного выбора типа пьезокерамики на заданный температурный диапазон. На основании этой методики разработан пошаговый алгоритм расчета параметров пакета многослойной пьезокерамики в условиях изменения температуры (раздел 2.3). Проведены исследования, связанные с выявлением параметров пьезокерамики, наиболее подверженных изменению под влиянием

температуры (подраздел 2.1). Определено, что предлагаемый алгоритм позволяет до 20% повысить точность расчета ряда параметров пьезокерамики, с учетом их изменений, происходящих под воздействием температуры. Учет таких изменений позволит производить пьезоэлектрические мехатронные модули более стабильные к воздействию температуры. Исследованы различные модели пьезоактуаторов. За основу выбрана модель, наиболее соответствующая целям исследования и приведено её модернизированное математическое описание, которое дает возможность проводить исследование влияния изменений температуры на основные статические и динамические характеристики. При построении усовершенствованной модели были применены структурные преобразования. Разработанная модель представлена системой уравнений. Определены параметры передаточных функций исследуемой модели для различных температур (раздел 2.4). Рассчитаны основные характеристики пакета многослойной пьезокерамики с учетом коэффициента температурного расширения и меняющихся под влиянием температуры параметров пьезокерамики. Разработанная модель соответствует основным характеристикам современного пакета пьезокерамики, работающего при различных температурах и может быть полезна для разработчиков пьезоэлектрических мехатронных модулей оптоэлектронных систем при проектировании регуляторов с целью повышения эффективности их работы.

3. Анализ и синтез алгоритмов управления мехатронными пьезомодулями

3.1 Методика синтеза системы управления пьезоэлектрического мехатронного модуля, функционирующего в условиях изменения температуры

В данной секции приводится методика, которая включена в состав положений, выносимых на защиту. Применение этой методики обеспечивает повышение показателей качества замкнутого пьезопривода, функционирующего в условиях изменения температуры окружающей среды, что обеспечивает повышение эффективности оптоэлектронных систем.

Сформулировать техническое задание на проектирование мехатронного пьезоэлектрического модуля (в дальнейшем пьезопривода), функционирующего в условиях изменения температуры. При формировании технического задания предлагается учесть следующие тезисы:

- а) пьезопривод представляет собой замкнутую по положению высокоточную систему позиционирования оптических элементов;
- б) пьезопривод может выполнять как основную функцию перемещения элементов оптоэлектронной системы, так и вспомогательную, в качестве привода, обеспечивающего юстировку системы, стабилизацию положения отдельных элементов;
- в) основными характеристиками подобных пьезопроводов являются: диапазон перемещений, показатели качества переходного процесса (время переходного процесса, перерегулирование) и динамическая ошибка;
- г) с учетом специфики проектируемой оптоэлектронной системы предлагается определить диапазон рабочих температур пьезопривода;
- д) осуществить предварительный выбор аппаратной части пьезопривода;
- е) Предлагается ограничиться выбором исполнительного устройства, датчика положения (перемещения) и драйвера (усилителя), так как они в первую очередь определяют все характеристики пьезопривода.
- ж) в качестве исполнительного устройства для решения поставленных задач рекомендуется использовать пьезоэлектрический актуатор, который моделируется в разделе;
- з) в качестве датчика положения предлагается использовать тензометрический датчик, так как он является компактным и обеспечивает высокую точность;
- и) выбрать усилитель (драйвер) для пьезоактуатора;
- к) по результатам выбора аппаратной части зафиксировать необходимые параметры;
- л) для усилителя определить: коэффициент усиления, выходное сопротивление, диапазоны входных и выходных сигналов;

м) для пьезоактуатора определить: диапазон перемещений, коэффициент передачи, собственную частоту, допустимый диапазон сигналов управления, диапазон рабочих температур;

н) для датчика положения определить: диапазоны входных и выходных сигналов, погрешность измерения перемещения, диапазон рабочих температур.

Выбрать метод математического описания пьезопривода:

- рекомендуется использовать линейную непрерывную математическую модель третьего порядка, полученную на основе модели приведенной в [1]. Вывод системы уравнений соответствующих предлагаемой модели приводится в разделе 2.2;

- рассчитать параметры пьезокерамики, зависящие от температуры.

- расчет произвести при T_1 T_2 T_3 ;

- в качестве основы для разных типов пьезопакетов использовать методику, приведенную в подразделе 2.1;

- для расчета пакета многослойной пьезокерамики использовать алгоритм, приведенный в разделе 2.3;

- рассчитать коэффициенты передаточных функций пьезопривода в трех точках заданного температурного диапазона;

- расчет произвести с применением алгоритма, предлагаемого в указанном разделе 2.2;

- произвести моделирование разомкнутого пьезопривода при T_1 T_2 T_3 и оценить влияние изменения температуры на показатели качества переходного процесса;

- в качестве примера предлагается использовать алгоритм, приведенный в разделе 3.3;

- произвести моделирование замкнутого по положению пьезопривода при заданных температурах и оценить влияние изменения температуры на показатели качества переходного процесса;

- в качестве примера предлагается использовать алгоритм, приведенный в разделе 3.4;

- рассчитать коэффициент передачи системы, необходимый для получения заданной динамической точности системы;

- при замыкании обратной связи обратить внимание на возможное самовозбуждение системы. При самовозбуждении системы рассмотреть возможность получения устойчивого состояния системы путем регулировки коэффициентов усиления;

- при отсутствии возможности получить устойчивое состояние системы с заданными показателями качества перейти к вопросу синтеза регулятора.

- произвести синтез регулятора (корректирующего устройства) с целью реализации заданных показателей качества;

- регулировка по состояниям привода является сложно реализуемой в практическом плане ввиду отсутствия возможности непосредственного измерения всех состояний пьезопривода;
- оценить возможность и достаточность применения широко используемых регуляторов, таких как ПИД-, ПИ- и П-регуляторы. Пример исследования ПИД-регулятора приводится в разделе 3.1;
- рекомендуется построение регуляторов на основе последовательных корректирующих звеньев. В качестве алгоритма моделирования регулятора с корректирующим звеном последовательно включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени рекомендуется использовать пример, приведенный в разделе 3.4;
- произвести моделирование скорректированного под влияние температуры замкнутого по положению пьезопривода;
- произвести сравнительный анализ показателей качества переходных процессов для заданных температур для нескорректированного и скорректированного под изменение температур корректирующего звена последовательного включения. Пример полученных результатов можно найти в таблице 15;
- выбрать лучший результат и оценить его робастность к изменениям температуры (определить диапазон температур, в котором показатели качества переходного процесса еще удовлетворяют требованиям технического задания). Для температур, при которых показатели качества уже перестают удовлетворять требованиям технического задания составить таблицу поправочных коэффициентов регулятора;
- оценить влияние гистерезиса на показатели качества переходного процесса и динамическую ошибку;
- рекомендуется использовать арктангенсную модель гистерезиса. Пример моделирования приведен в разделе 3.1;
- определить диапазон возможного изменения величины гистерезиса, при котором его влияние не будет оказывать существенного влияния на показатели качества переходных процессов. Если гистерезис оказывает существенное влияние на показатели качества, то применить известные способы его компенсации;
- произвести окончательный выбор аппаратной части пьезопривода, включая микроконтроллер, который будет выполнять функции управления (на нем реализуется элемент сравнения системы и последовательное корректирующее устройство);
- перейти к дискретной модели пьезопривода, проверить показатели качества переходного процесса. Разработанная методика будет полезна для разработчиков систем автоматического управления пьезоэлектрическими мехатронными модулями при синтезе регуляторов, что позволит повысить эффективность оптоэлектронных систем на их основе.

Результаты исследования разомкнутого привода при T_3 приводятся на рисунке. Техническое задание определено в таблице. Полученные результаты, приведенные в таблице 10, примерно устраивают только с точки зрения обеспечения времени переходного процесса. Для обеспечения заданной точности 1 700.

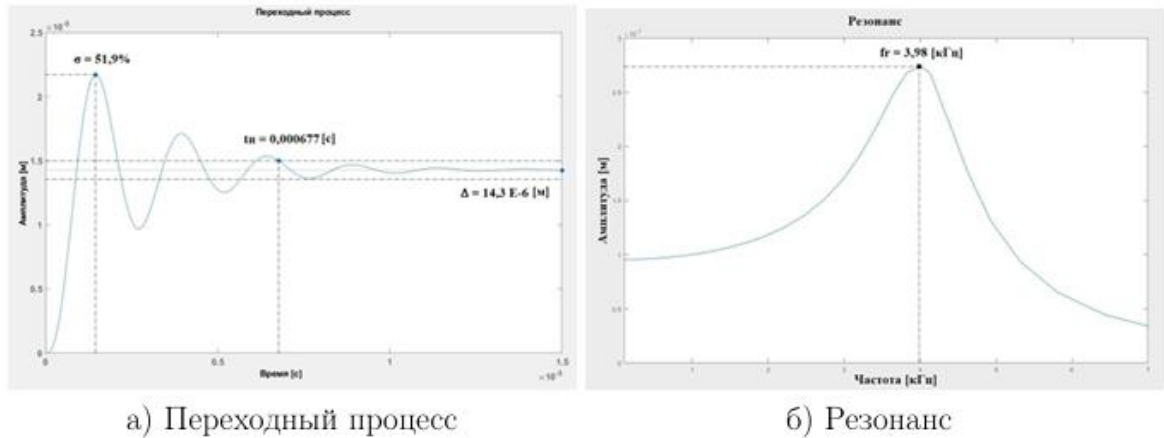


Рисунок 3.3 – Реакция разомкнутого пьезопривода при T_2

Реакция разомкнутого пьезопривода — это его отклик на управляющее воздействие в отсутствии обратной связи. Другими словами, это то, как сам по себе пьезоактуатор будет двигаться или деформироваться при подаче сигнала, если система не следит за результатом и не корректирует поведение привода в процессе работы.

Разомкнутая система управления означает, что на выходе привода нет датчика, который бы измерял реальное перемещение или усилие и возвращал информацию обратно в контроллер. В результате реакция пьезоактуатора полностью определяется его внутренними свойствами и характеристиками управляющего сигнала: амплитудой, частотой, формой импульса. В такой системе привод "слеп", он просто выполняет команду без проверки, получилось ли достичь нужного результата.

Типичная реакция разомкнутого пьезоактуатора может проявляться как достаточно быстрое и точное перемещение при небольших напряжениях и низких частотах, но при этом она нередко сопровождается рядом нежелательных эффектов. Среди них — гистерезис, остаточная деформация (ползучесть), нелинейность отклика, а также ограниченный диапазон перемещений. Все эти факторы влияют на точность и стабильность реакции привода.

Например, при подаче ступенчатого напряжения пьезоэлемент сначала резко перемещается, затем медленно "доползает" до нового положения — это и есть эффект ползучести. При возврате напряжения к начальному значению привод может не вернуться точно в прежнюю точку из-за гистерезиса — это тоже типичная реакция разомкнутой системы.

Таким образом, реакция разомкнутого пьезопривода зависит от физики самого материала, геометрии конструкции, скорости изменения управляющего сигнала и внешних условий, таких как температура и механическая нагрузка. Чтобы повысить точность и стабильность работы, в реальных системах часто используют замкнутый контур управления — с датчиками, регуляторами и коррекцией ошибок, но базовое понимание поведения разомкнутого привода необходимо как фундамент для проектирования таких сложных систем.

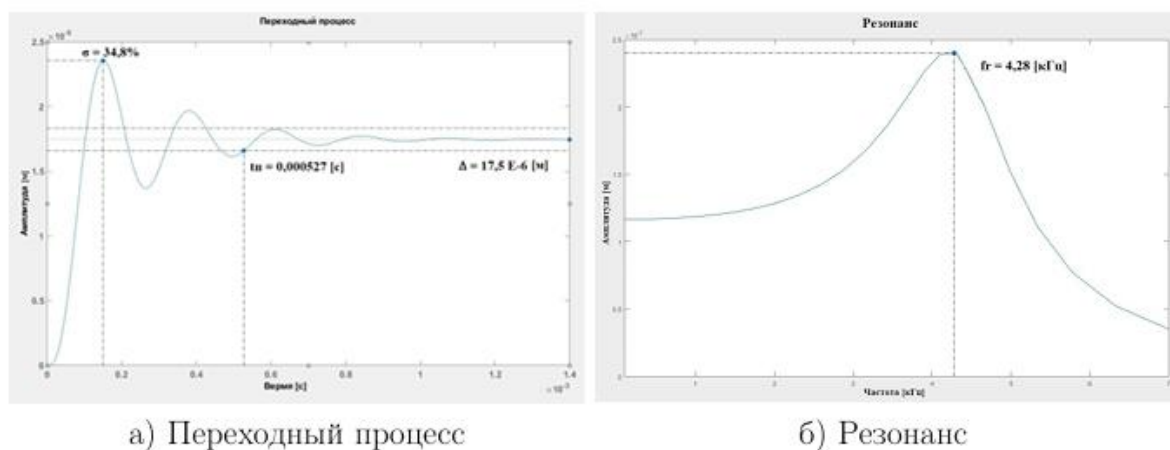


Рисунок 3.4 – Показатели модели разомкнутого пьезопривода при T_3

От длины хода пьезоактуатора должна обеспечиваться динамическая ошибка ка $\varepsilon_m = 1929 \times 10^{-8}$ [м], что не соответствует полученному результату. Величина перерегулирования также очень значительная. Для уменьшения перерегулирования в системе будет использоваться регулятор. В [26] приводятся рекомендации относительно постановки задачи выбора регуляторов. В этой работе тип регулятора выбирается по результатам экспериментов, определяющих показатели переходных процессов и величины динамической ошибки. Эксперименты проводятся с помощью блока Simulink Design Optimization, описание которого присутствует в работе [27].

Таблица 3 – Показатели эффективности статических и динамических характеристик разомкнутого пьезопривода для T_1 T_2 T_3 .

Температура	T_2	T_1	T_3
Величина перерегулирования [%]	51,9	43,2	34,8
Время переходного процесса [с]	0,000677	0,000643	0,000527
Установившееся значение [м]	$14.3 \cdot 10^{-6}$	$15.9 \cdot 10^{-6}$	$17.5 \cdot 10^{-6}$
Величина хода [м]	$12.15 \cdot 10^{-6}$	$13.5 \cdot 10^{-6}$	$14.85 \cdot 10^{-6}$

Продолжение таблицы 3

Статическая ошибка [м]	$2.15 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$	$2.65 \cdot 10^{-6}$
Резонанс [Гц]	$3,98 \cdot 10^3$		$4.28 \cdot 10^3$

3.3 Показатели эффективности замкнутого пьезопривода

Проектируемая модель замыкается обратной связью. Для построения замкнутой модели потребуется определить минимальный коэффициент передачи системы K_{sys} , который обеспечит заданную точность $\varepsilon_m = 1/700$ от длины хода пьезопривода.

$$K_{sys} = \frac{\Delta}{\varepsilon_m} = 700 \quad (27)$$

$$K_{sys} = K_{усил} \times K_{АРА} \times K_{дат} = 700 \quad (28)$$

$$K_{дат} = \frac{K_{sys}}{K_{усил} \times K_{АРА}} = 1.087 \times 10^7 [\text{В/м}] \quad (29)$$

Полученное значение коэффициента передачи датчика $K_{дат}$ используется в модели, представленной на рисунке 12.

Производится оценка показателей замкнутой системы с $K_{дат} = 1087 \times 10^7$.

При $K_y = 150$ получен неустойчивый процесс (рисунок 13а).

Для получения устойчивого процесса настройка системы управления производится путем регулировки коэффициента передачи усилителя $K_y = 150$.

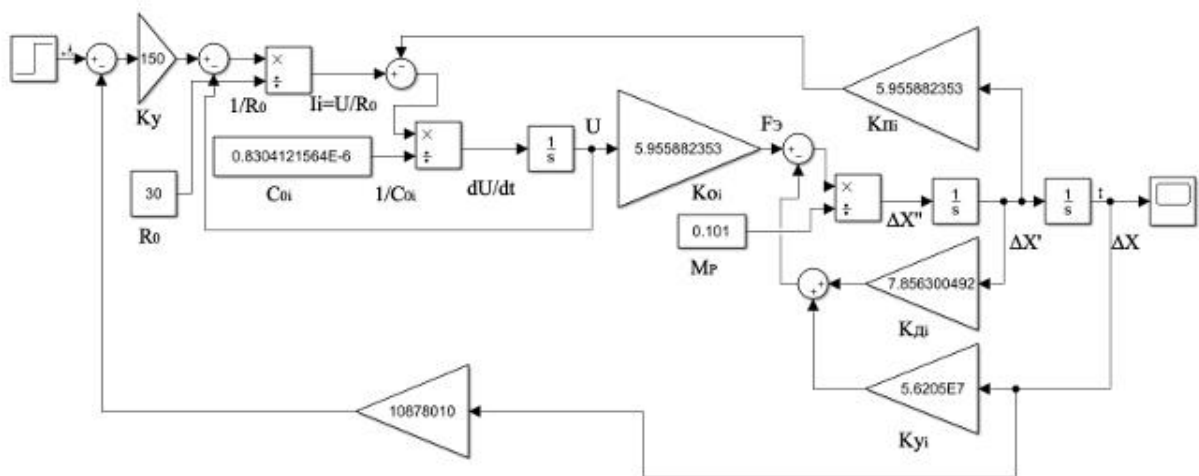


Рисунок 3.5 – Модель замкнутого пьезопривода при K_1 , $K_y = 150$

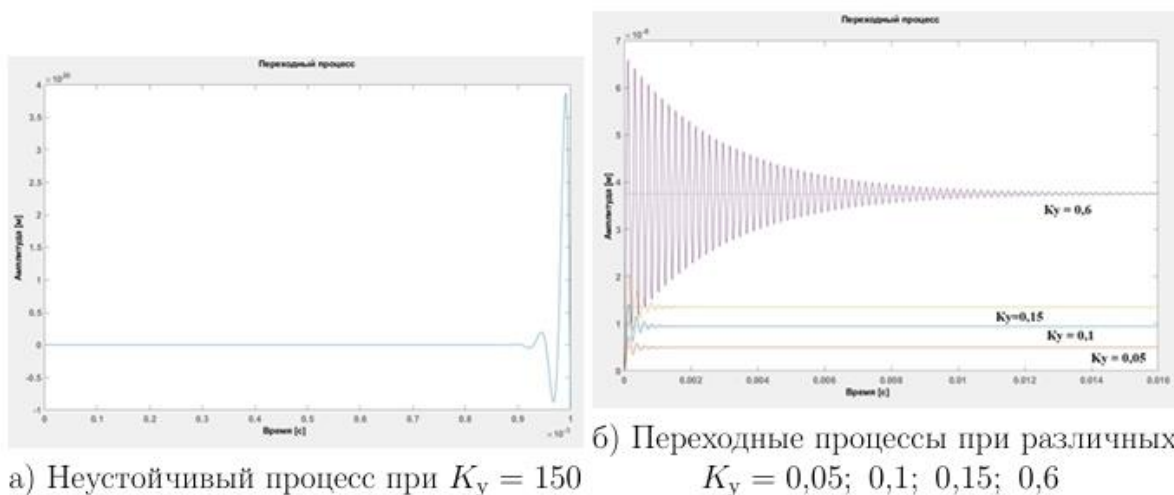


Рисунок 3.6 – Получение устойчивого процесса в замкнутом приводе путем подстройки K_y

Из рисунка видно, что устойчивый процесс получен только при малых значениях коэффициента усилителя K_y . Малые значения K_y не позволяют обеспечить ожидаемую величину хода привода. На рисунке 13б приводится семейство кривых для $K_y = 0,05; 0,1; 0,15; 0,6$. Из приведенных графиков также следует, что с увеличением K_y возрастает колебательность переходного процесса. По результатам эксперимента определено, что при $K_y > 7$ процесс становится неустойчивым. Дальнейшие исследования данной замкнутой системы при T_1, T_2 не имеют смысла, так как данная замкнутая система устойчива только при малых значениях K_y . Требуется синтезировать регулятор. В данной работе рассматриваются 3 варианта: ПИД регулятор, корректирующее звено последовательного включения на основе полинома Баттерворта и корректирующее звено последовательного включения на основе полинома Ньютона.

Нормальная температура путем подстройки $K_{дат}$ обеспечивается получение коэффициента передачи модели, который обеспечит получение ранее рассчитанного по уравнению (38) полезного хода 135×10^{-6} [м] пакета пьезо электрической керамики при T_1 .

Величина коэффициента передачи датчика замкнутой системы управления определяется равной $K_{дат} = 74000$ [в/м].

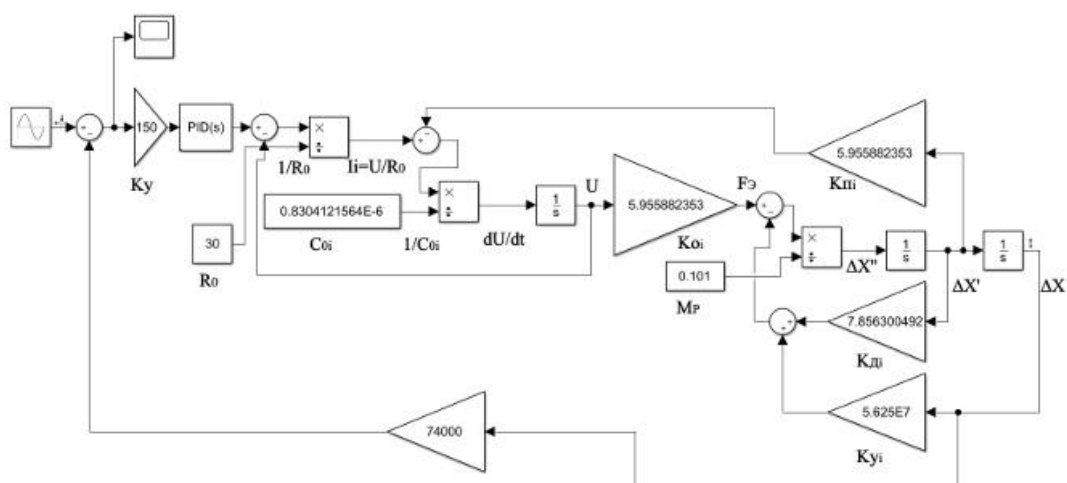
Оптимальные параметры ПИД-регулятора: $P = 0$; $I = 4835$; $D = 0$ определяются в Simulink путем автоматической настройки.

Полученная модель с ПИД-регулятором (рисунок 14а) исследуется на ступенчатое воздействие, с целью определения ее переходной характеристики, которая приводится на рисунке 14б.

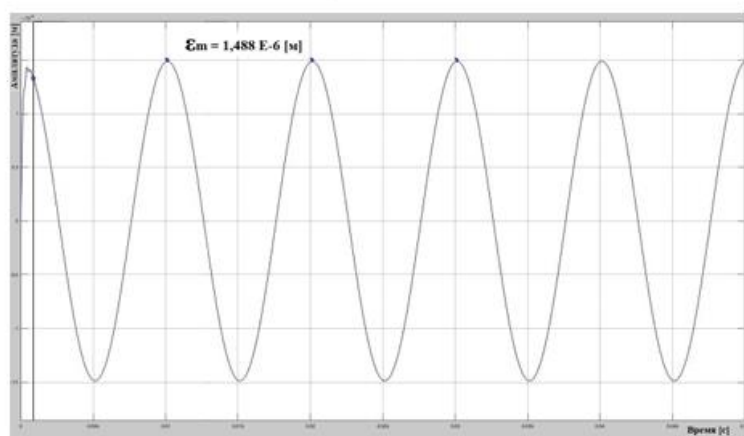
Для оценки динамической ошибки в модели переподключается осциллограф. Навход модели, представленной на рисунке 15а подается управляющее синусоидальное воздействие с частотой 100 [Гц] вида $u_{вх} =$

$(135 \times 10^{-6}) \sin(628319 \times t)$. График динамической ошибки приведен на рисунке 156.

Минимальная температура с целью оценки эффективности работы пьезопривода с ПИД-регулятором производится оценка качества переходных процессов и оценка динамической ошибки для условий T_2 . Для этого строится модель с коэффициентами пьезокерамики при T_2 . Переходный процесс для T_2 можно оценить на рисунке 166. Настройки ПИД-регулятора, произведенные для T_1 , были сохранены в ходе эксперимента для T_2 .



а) Модель



б) Динамическая ошибка

Рисунок 3.7 – Динамическая ошибка пьезопривода с ПИД-регулятором и $K_{дат} = 74000$ [в/м] при T_1

Максимальная температура для условий T_3 производятся аналогичные испытания. Ранее произведенные настройки ПИД-регулятора также остались без изменений в ходе эксперимента для T_3 . С целью оценки эффективности работы мехатронного модуля с ПИД регулятором, производится оценка качества переходных процессов и оценка динамической ошибки для условий T_3 . Для этого строится модель с коэффициентами пьезокерамики при T_3

[illegible]

Переходный процесс

Амплитуда [м] $\times 10^{-6}$

$\sigma = 4,76 \%$

$t_n = 884 \text{ E-}6 \text{ [с]}$

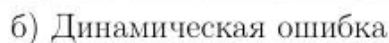
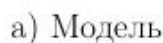
$\Delta = 13,5 \text{ E-}6 \text{ [м]}$

Время [с] $\times 10^{-3}$

Рисунок 3.8 – Переходный процесс пьезопривода с ПИД-регулятором при T_2

Результаты моделирования с ПИД-регулятором. Очевидно, что полученные результаты не соответствуют по всем параметрам техническому заданию к моделируемой системе управления, которое было представлено в разделе 3.2. Соответственно потребуются испытания других регуляторов.

Рисунок 3.9 – Динамическая ошибка пьезопривода с ПИД-регулятором при T_2



Далее моделируется корректирующее звено последовательного включения, настроенное под влияние T_2 и T_3 соответственно. Для моделирования настроенного под влияние температур корректирующего

звена потребуется рассчитать коэффициенты его полинома. Результаты проведенных расчетов по определению, подстраиваемых под влияние температуры, коэффициентов полиномов переходных функций сведены в таблицу 14.

Минимальная температура, настроенное звено в модели, приведенной на рисунке 19а параметры пьезокерамики приведены для T_2 . Кроме того, само корректирующее звено настроено под параметры для T_2 . Переходный процесс корректирующего звена последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени приводится на рисунке 19б.

Строится модель для оценки динамической ошибки. Определяется динамическая ошибка.

Таблица 4 – Сводная таблица качества переходных процессов и динамической ошибки системы с корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени при T_1 T_2 T_3 .

Температура	Величина перерегулирования, [%]	Время переходного процесса, [с]	Динамическая ошибка, [м]
Техническое задание	0	$7.2 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-14}$
T_2	0	$4.15 \cdot 10^{-14}$	$2.143 \cdot 10^{-14}$
T_1	0	$4.74 \cdot 10^{-14}$	$1.929 \cdot 10^{-14}$
T_3	1.13	$5.1 \cdot 10^{-14}$	$1.754 \cdot 10^{-14}$

Максимальная температура, настроенное звено далее предлагается провести аналогичные настройки параметров регулятора, но для условий T_1 . В модели, приведенной на рисунке 21а параметры пьезокерамики установлены для T_2 и сам регулятор настроен под воздействие T_3 .

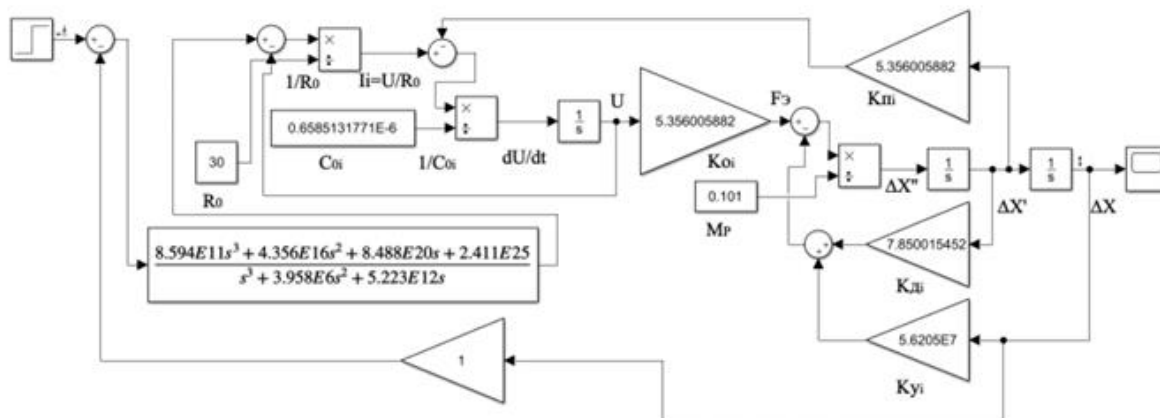
Строится модель для оценки динамической ошибки (рисунок 3.9 а). Определяется динамическая ошибка (рисунок 3.9б).

Результаты экспериментов сводятся в таблицу 15 для наглядного сравнения показателей переходных процессов и динамической ошибки при настроенном и ненастроенном под изменение температуры корректирующем звене последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени.

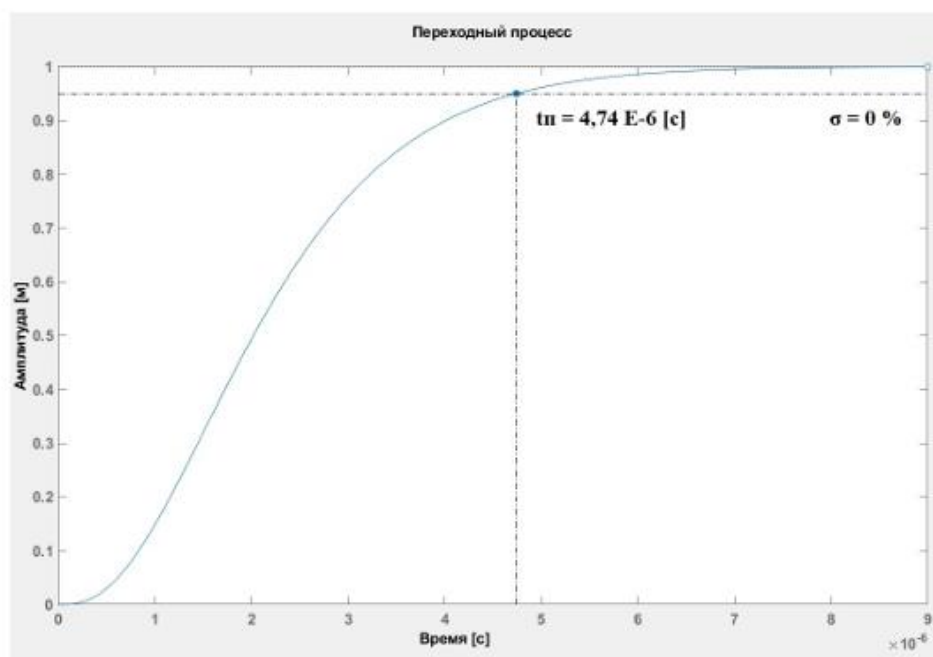
Таким образом, на основании данных, приведенных на рисунке 3.10 делается вывод о том, что показатели качества пьезоэлектрических модулей оптоэлектронных систем возможно повысить путем настройки параметров корректирующего звена.

		$T_1, [^{\circ}\text{C}]$	$T_2, [^{\circ}\text{C}]$	$T_3, [^{\circ}\text{C}]$
Требования к показателям системы				
σ	Перерегулиров., [%]	0		
$t_{\text{п}}$	Длительность переходного процесса, [с]	$7,2 \times 10^{-6}$		
ε_m	Максимально допустимая ошибка, [м]	$1,928 \times 10^{-8}$	$1,736 \times 10^{-8}$	$2,121 \times 10^{-8}$
$D1$	Добротность по скорости	100		
$W_{\text{ж}}$	Передаточная функция	$\frac{\omega_0^3}{S^3 + 3 \times \omega_0 \times S^2 + 3 \times \omega_0^2 \times S}$		
Параметры задающего воздействия				
g_m	Эквивалентное воздействие	$(1,35 \times 10^{-5}) \times \sin(628,319t)$	$(1,215 \times 10^{-5}) \times \cos(628,319t)$	$(1,485 \times 10^{-5}) \times \sin(628,319t)$
$\dot{g}_m(t)$	Максимальная скорость	$(8,482 \times 10^{-3}) \times \sin(628,319t)$	$(7,634 \times 10^{-3}) \times \sin(628,319t)$	$(9,331 \times 10^{-3}) \times \sin(628,319t)$
$\ddot{g}_m(t)$	Максимальное ускорение	$5,330 \times \sin(628,319t)$	$4,797 \times \sin(628,319t)$	$5,863 \times \sin(628,319t)$
$\omega_{\text{з}}$	Частота	628,319		
$\sigma_{\omega_{\text{з}}}$	Относительная частот. ошибка системы $= \varepsilon_m / g_{m\text{з}}$	$1,429 \times 10^{-3}$ (показатель не изменился для всех трех значений ε_m и g_m , значит и значение характеристической частоты будет одинаковым для всех трех случаев)		
ω_0	Характеристическая частота	$1,319 \times 10^6$		
Передаточные функции объекта управления для T_1, T_2, T_3 , см. (79):				
T_1	$W_{\text{oy}} =$	$\frac{1,059 \times 10^{-7}}{(4,492 \times 10^{-14})S^3 + (1,807 \times 10^{-9})S^2 + (4,397 \times 10^{-5})S + 1}$		
T_2	$W_{\text{oy}} =$	$\frac{9,529 \times 10^{-8}}{(3,565 \times 10^{-14})S^3 + (1,807 \times 10^{-9})S^2 + (3,521 \times 10^{-5})S + 1}$		
T_3	$W_{\text{oy}} =$	$\frac{1,156 \times 10^{-7}}{5,362 \times 10^{-14} \times S^3 + 1,806 \times 10^{-9} \times S^2 + 5,28 \times 10^{-5} \times S + 1}$		
Передаточные функции корректирующих звеньев на полиноме Ньютона для T_1, T_2, T_3 :				
T_1	$W_{\text{пк}} =$	$\frac{(9,745 \times 10^{11})S^3 + (3,92 \times 10^{16})S^2 + (9,538 \times 10^{20})S + (9,538 \times 10^{20})}{S^3 + (3,958 \times 10^6)S^2 + (5,223 \times 10^{12})S}$		
T_2	$W_{\text{пк}} =$	$\frac{(8,594 \times 10^{11})S^3 + (4,356 \times 10^{16})S^2 + (8,488 \times 10^{20})S + (2,411 \times 10^{20})}{S^3 + (3,958 \times 10^6)S^2 + (5,223 \times 10^{12})S}$		
T_3	$W_{\text{пк}} =$	$\frac{(1,057 \times 10^{11})S^3 + (3,562 \times 10^{16})S^2 + (9,538 \times 10^{20})S + (1,041 \times 10^{21})}{S^3 + (3,959 \times 10^6)S^2 + (5,224 \times 10^{12})S}$		

Рисунок 3.10 – Параметры настройки последовательного компенсатора на основе полинома Ньютона 3-ей степени при различных температурах



а) Модель



б) Переходный процесс

Рисунок 3.11 – Переходный процесс системы с настроенным для T_2 корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени

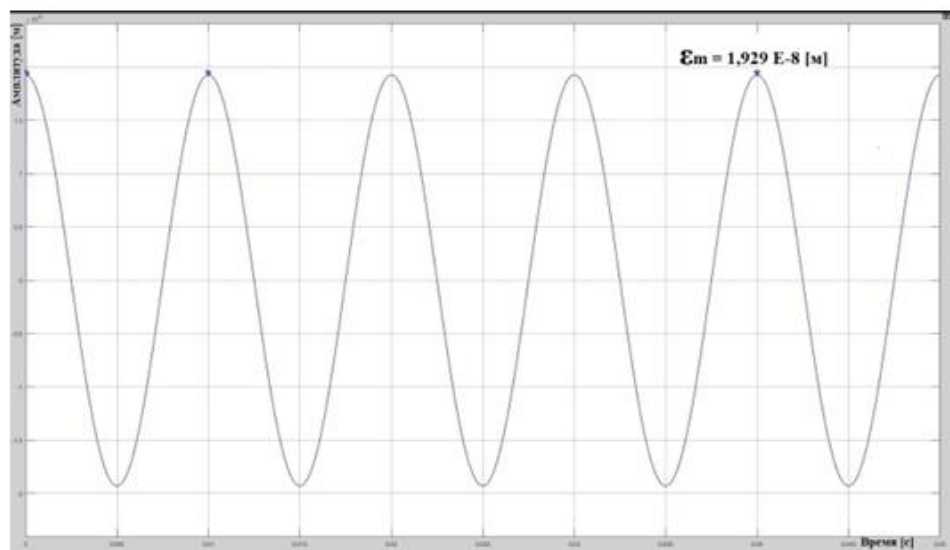
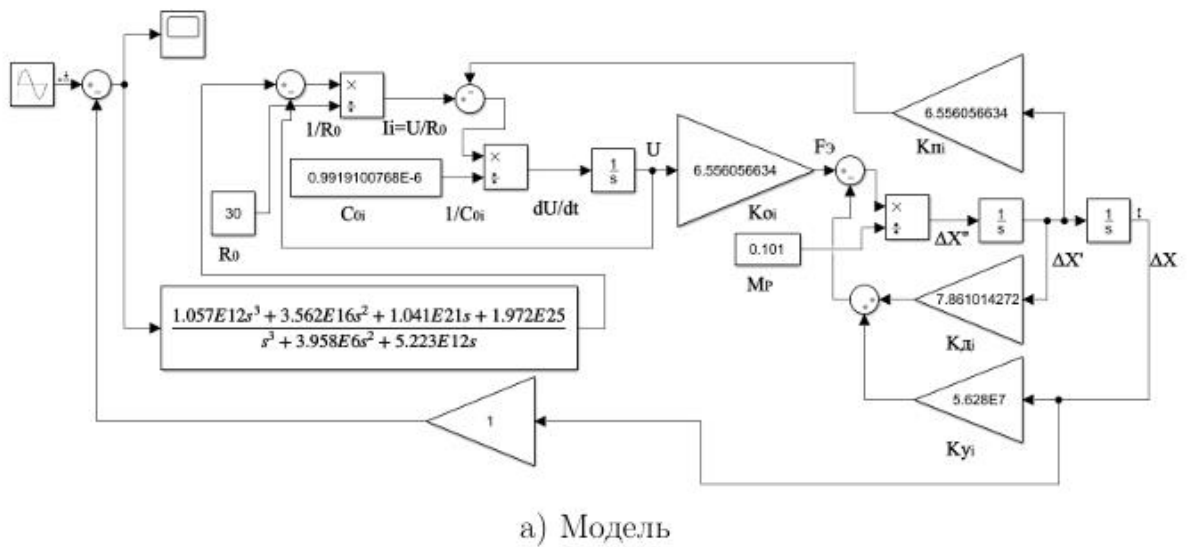


Рисунок 3.12 – Динамическая ошибка пьезопривода с настроенным корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-ей степени для T_3 .

Определенные коэффициенты передаточной функции арктангенсной модели гистерезиса будут использоваться для задания нужной величины гистерезиса в % при определении влияния гистерезиса на динамическую ошибку синтезируемой системы. По результатам проведенного моделирования определяется возможность компенсации гистерезиса с помощью предлагаемого алгоритма управления.

		$T_2, [^{\circ}\text{C}]$	$T_3, [^{\circ}\text{C}]$
Величина перерегули- рования, %	До настройки кор- ректирующего звена	0	1,13
	После настройки кор- ректирующего звена	0	0
Время переходного процесса, [с]	До настройки кор- ректирующего звена	$4,15 \times 10^{-6}$	$5,11 \times 10^{-6}$
	После настройки кор- ректирующего звена	$4,74 \times 10^{-6}$	$4,74 \times 10^{-6}$
Динамическая ошибка, [м]	До настройки кор- ректирующего звена	$2,143 \times 10^{-8}$	$1,754 \times 10^{-8}$
	После настройки кор- ректирующего звена	$1,928 \times 10^{-8}$	$1,929 \times 10^{-8}$

Рисунок 3.13 – Сравнение переходных процессов и динамической ошибки

Арктангенсная модель гистерезиса с одним из наборов коэффициентов передаточной функции приведена на рисунке 20. На рисунке 22 приводятся графики с осциллографа данной модели. По этим графикам определяется фазовый сдвиг в радианах, вносимый передаточной функцией арктангенсной модели гистерезиса с данными коэффициентами. Для нахождения величины гистерезиса в процентах на основе величины фазового сдвига используется формула.

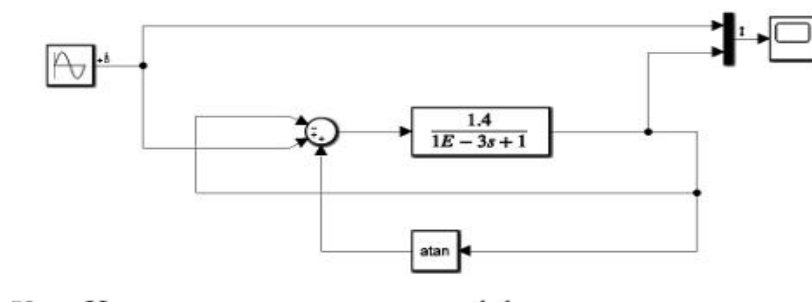


Рисунок 3.14 – Исследование влияния коэффициентов передаточной функции арктангенсной модели гистерезиса



Рисунок 3.15 – Фазовый сдвиг, вносимый гистерезисом

По графикам, приведенным на рисунке определяется, что коэффициентам передаточной функции арктангенсной модели гистерезиса, приведенным на рисунке 21 соответствует фазовый сдвиг $\chi = 0,506$ радиан. Для определения величины гистерезиса в % используется формула, которая приводится к виду:

$$\gamma = 100 \times \sin \varphi_{\text{зап}} \quad (30)$$

Таким образом определено, что фазовый сдвиг $\chi = 0,506$ радиан соответствует величине гистерезиса 48,5 градусов.

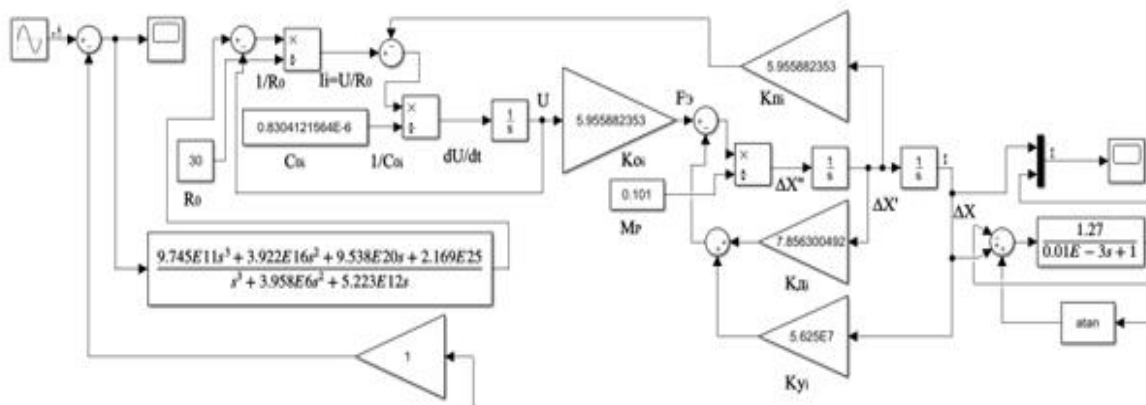
Производится несколько таких итераций для нахождения коэффициентов передаточной функции с получением шага гистерезиса примерно 5%. При этом коэффициенты передаточной функции арктангенсной модели изначально определяются путем подбора. Полученные результаты сводятся в рисунке, показывающую соответствие коэффициентов передаточной функции, величины фазового запаздывания в радианах и величины гистерезиса в процентах.

Определяется динамическая ошибка исследуемой модели для крайних значений гистерезиса. Строится модель замкнутой системы с корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона третьей степени с арктангенсной моделью гистерезиса. Эксперимент проводится при T_1 . В первом эксперименте устанавливается минимальная определенная в таблице 16 величина гистерезиса на уровне 0,8%. Модель приводится на рисунке 75а. Во второй эксперимент проводится для величины гистерезиса 44,5% и также при T_1 .

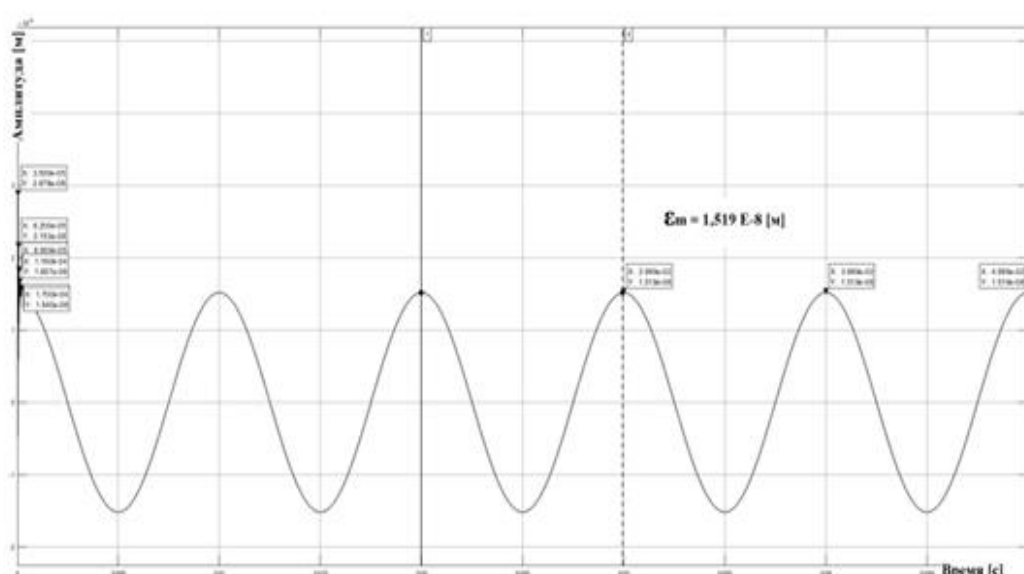
По результатам, приведенным на рисунке 22 видно, что при появлении гистерезиса на уровне 0,8% величина динамической ошибки составит 1519×10^{-8} [м]. Таким образом, при появлении гистерезиса для условий T_1 динамическая ошибка незначительно снижается с допустимой по техническому заданию 1929×10^{-8} [м] до 1519×10^{-8} [м], что также соответствует требованиям к проектируемой системе.

Передаточная функция	Фазовая задержка, [рад]	Величина гистерезиса, %
$\frac{1,27}{0,01 \times 10^{-3}s + 1}$	0,008	0,8
$\frac{1,27}{0,05 \times 10^{-3}s + 1}$	0,048	4,8
$\frac{1,27}{0,1 \times 10^{-3}s + 1}$	0,081	8,1
$\frac{1,27}{0,2 \times 10^{-3}s + 1}$	0,127	12,7
$\frac{1,28}{0,3 \times 10^{-3}s + 1}$	0,175	17,4
$\frac{1,29}{0,4 \times 10^{-3}s + 1}$	0,223	22
$\frac{1,31}{0,5 \times 10^{-3}s + 1}$	0,286	29,8
$\frac{1,33}{0,6 \times 10^{-3}s + 1}$	0,326	32,0
$\frac{1,345}{0,7 \times 10^{-3}s + 1}$	0,366	35,8
$\frac{1,36}{0,8 \times 10^{-3}s + 1}$	0,413	40,2
$\frac{1,38}{0,9 \times 10^{-3}s + 1}$	0,461	44,5

Рисунок 3.16 – Соответствия величины гистерезиса передаточным функциям арктангенсной модели гистерезиса



а) Модель



б) Динамическая ошибка

Рисунок 3.17 – Модель и динамическая ошибка замкнутой системы при T_1 с корректирующим звеном последовательного включения

Второй эксперимент проведен для значения гистерезиса 44,5 %. Определено, что при увеличении гистерезиса до 44,5% существенно возрастает колебательность при старте процесса, а величина динамической ошибки возрастет незначительно и составит 1607×10^{-8} [м], что также соответствует требованиям к проектируемой системе.

Определяется динамическая ошибка для условий T_1 с корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона T_1 с корректирующим звеном последовательного включения на основе полинома Ньютона $T_1 T_2 T_3$ при использовании выбранного регулятора на основе полинома Ньютона третьей степени. Исследуется изменение величины динамической ошибки при настройке регуляторов для $T_1 T_2$.

Величина гистерезиса, %	Динамическая ошибка [м]				
	T1	T2	T2, настроенный	T3	T3 настроенный
0,8	1,519 E-8	1,688 E-8	1,519 E-8	1,381 E-8	1,519 E-8
4,8	1,520 E-8	1,688 E-8	1,519 E-8	1,382 E-8	1,519 E-8
8,1	1,522 E-8	1,691 E-8	1,521 E-8	1,385 E-8	1,522 E-8
12,7	1,531 E-8	1,701 E-8	1,530 E-8	неустойчивый процесс	1,531 E-8
17,4	1,543 E-8	1,704 E-8	1,533 E-8	неустойчивый процесс	1,534 E-8
22	1,542 E-8	1,714 E-8	1,542 E-8	неустойчивый процесс	1,542 E-8
29,8	1,554 E-8	1,715 E-8	1,543 E-8	неустойчивый процесс	1,544 E-8
32,0	1,551 E-8	1,724 E-8	1,550 E-8	неустойчивый процесс	1,550 E-8
35,8	1,568 E-8	неустойчивый процесс	1,567 E-8	неустойчивый процесс	1,567 E-8
40,2	1,593 E-8	неустойчивый процесс	1,588 E-8	неустойчивый процесс	1,588 E-8
44,5	1,608 E-8	неустойчивый процесс	1,606 E-8	неустойчивый процесс	1,607 E-8

Рисунок 3.18 – Динамическая ошибка при различном гистерезисе для T_1 , T_2 , T_3 при ненастроенном и настроенном корректирующем звене на основе полинома Ньютона 3-го порядка.

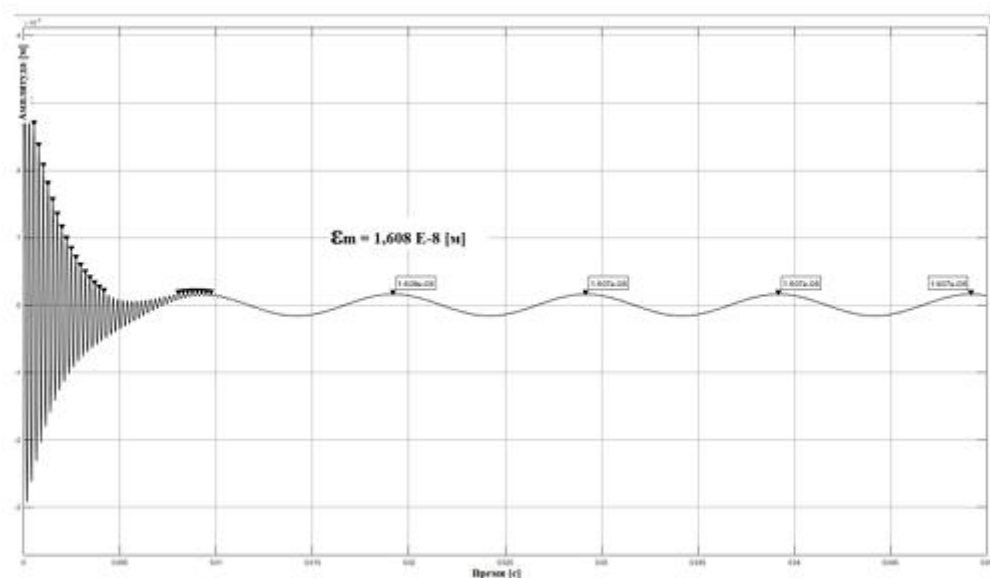


Рисунок 3.19 – Динамическая ошибка замкнутой системы при T_1 с корректирующим звеном последовательного включения

Проведенное моделирование показало возможность обеспечения заданной по техническому заданию (раздел 3.2) динамической ошибки при наличии гистерезиса величиной до 44,5% путем использования корректирующего звена последовательного включения на основе полинома Ньютона 3-го порядка. Результаты исследований сведены в таблицу 17.

В результате проведенных экспериментов по оценке изменения величины динамической ошибки при изменении температуры определено, что при наличии гистерезиса величиной от 0,8% до 44,5% при T_1 динамическая ошибка остается в заданных пределах. Проведены исследования по работе регулятора на основе полинома Ньютона 3-го порядка для низких и высоких температур. Выявлено, что при T_2 образуется неустойчивый процесс при гистерезисе выше 35,8%. Так же выявлено, что неустойчивый процесс образуется и при T_3 при гистерезисе выше 12,7%. В то же время настроенный под изменение температуры полином Ньютона обеспечивает заданную динамическую ошибку системы при изменении гистерезиса в диапазоне до 44,5 % и при T_2 и при T_3 . Определено, что предлагаемый способ настройки полинома позволяет повысить допустимую величину гистерезиса пьезоматериалов на 87% при T_2 и на 31,8% при T_3 и обеспечить заданную динамическую ошибку. Таким образом, путем математического моделирования определено, что предложенным способом настройки регулятора на основе полинома Ньютона для низких и высоких температур можно получить устойчивый процесс во всем исследованном диапазоне температур.

Пьезопроводы – это устройства, которые используют пьезоэлектрический эффект для выполнения механических перемещений при подаче электрического напряжения. Благодаря высокой точности,

быстродействию и компактности, такие актуаторы широко применяются в научных, медицинских, оптических и промышленных системах. В зависимости от способа управления и контроля, различают разомкнутые и замкнутые пьезоп приводы. Понимание различий между этими режимами важно для правильного выбора актуатора под конкретную задачу.

Разомкнутый пьезоп привод — это система, в которой отсутствует обратная связь. Управление основано только на подаче напряжения на пьезоэлемент, без контроля за фактическим перемещением. Предполагается, что перемещение пропорционально приложенному напряжению. Однако на практике такое поведение часто искажается из-за нелинейности, гистерезиса и температурных дрейфов.

Основные характеристики разомкнутого пьезоп привода:

- а) простота конструкции и управления;
- б) невысокая стоимость;
- в) быстрый отклик без задержек, связанных с измерением обратной связи.

Замкнутый пьезоп привод — это система, в которой используется обратная связь: перемещение, создаваемое пьезоэлементом, измеряется датчиком (например, емкостным, индуктивным или оптическим), и сравнивается с заданным значением. Если фактическое положение отклоняется от требуемого, система автоматически вносит коррекцию в управляющий сигнал.

Такой подход позволяет существенно повысить точность и надёжность работы устройства, особенно при использовании в прецизионных задачах.

Преимущества замкнутых пьезоп приводов:

- а) очень высокая точность позиционирования — вплоть до нанометров;
- б) компенсация гистерезиса, нелинейностей и температурных изменений;
- в) стабильность при длительной работе;
- г) поддержание точного положения даже при внешних возмущениях.

Выбор между разомкнутым и замкнутым пьезоп приводом зависит от требований к точности, стабильности и стоимости системы. Если задача требует высокой точности и повторяемости, особенно в научных или медицинских приборах, предпочтение стоит отдать замкнутым системам с обратной связью. В более простых и недорогих устройствах, где погрешности допустимы, подойдёт разомкнутый привод.

Таким образом, грамотное понимание особенностей каждого типа управления позволяет более эффективно использовать возможности пьезоактуаторов в самых разных областях техники и науки.

В данной главе приведены результаты синтеза регулятора для замкнутого пьезоэлектрического модуля, который обеспечивает ему заданные статические и динамические характеристики в условиях изменения температур и с учетом влияния гистерезиса. Применение такого регулятора позволит повысить эффективность работы как самого пьезомодуля, так всей оптоэлектронной системы в целом. Приводится анализ алгоритмов управления мехатронным пьезоэлектрическим модулем. На основе

технического задания проведено моделирование системы в разомкнутом и замкнутом виде, синтезированы регуляторы различных типов (ПИД-регулятор и последовательные корректирующие устройства на основе полиномов Баттерворта и Ньютона третьей степени). Дана сравнительная оценка показателей качества переходных процессов при включении их в контур управления в условиях воздействия различных температур. Показано, что лучшие результаты дает применение полинома Ньютона третьей степени. При его использовании в условиях номинальной, минимальной и максимальной температур наилучшим образом обеспечиваются заданные показатели качества переходных процессов. Разработанный регулятор снижает перерегулирование системы примерно на 4% по сравнению с ПИД-регулятором. Для улучшения статических и динамических характеристик в условиях изменения температуры в модели полинома предусмотрена возможность коррекции его коэффициентов. Результаты исследований сведены в таблицу 15. Дополнительная настройка разработанного регулятора под влияние температуры позволяет снизить перерегулирование при T_3 с 113% до 0%. Исследована модель с гистерезисом. Определено, что настроенный полином Ньютона обеспечивает заданную динамическую ошибку системы при изменении гистерезиса в диапазоне до 44,5% при T_1 , но при температурах T_2 и T_3 система становится нестабильной при рассчитанных значениях гистерезиса. Определено, что предлагаемый способ настройки полинома позволяет повысить допустимую величину гистерезиса пьезоматериалов на 87% при T_2 и на 31,8% при T_3 и обеспечить заданную динамическую ошибку во всем исследованном диапазоне температур. Разработанная методика синтеза регуляторов для управления пьезоэлектрическими мехатронными модулями может быть полезна для разработчиков оптоэлектронных систем автоматического управления для повышения эффективности их функционирования в жестких температурных условиях.

Заключение

В диссертационной работе предлагаются подходы к повышению эффективности оптоэлектронных систем путем: учета параметров пьезоматериала, который подвержен влиянию температуры; выбора регулятора и его параметров; учета конструктивных решений. В диссертационной работе предлагается метод повышения эффективности оптоэлектронных систем путем учета в регуляторе параметров пьезокерамики, изменяющихся под воздействием температуры. На основе проведенных исследований предлагается алгоритм определения параметров пьезокерамики, наиболее подверженных влиянию температуры и определяющих характеристики мехатронных пьезоэлектрических модулей (раздел 2.3). Полученные параметры пьезокерамики применяются при исследовании разработанной математической модели пьезопривода для различных температур. В разработанной модели все параметры, изменяющиеся под воздействием температуры. В завершение диссертационной работы предлагается методика оптимизации конструктивных решений пьезоэлектрических модулей с механической редукцией для расширения диапазона перемещений и максимального демпфирования колебаний.

В первой главе рассмотрены примеры применения пьезоэлектрических мехатронных модулей в оптоэлектронных системах. Отмечаются параметры таких модулей в части быстродействия, точности и малых габаритов. Акцентируется внимание на том, что подобные параметры не достижимы при применении электромагнитных двигателей. Также отмечается, что параметры пьезоэлектрических модулей меняются в зависимости от температуры, а производители вынуждены искать способы компенсации таких изменений. Другими словами – вопрос воздействия температуры на параметры пьезокерамики является актуальным для производителей пьезоэлектрических мехатронных модулей оптоэлектронных систем. В данной работе предлагается учесть и компенсировать влияние температуры на параметры пьезокерамики, что приведет к повышению эффективности мехатронных модулей оптоэлектронных систем.

Во второй главе приведены результаты моделирования пакета тонко пленочной многослойной пьезокерамики с габаритами и техническими характеристиками, соответствующими современным зарубежным аналогам, но на основе пьезокерамики ЦТС-46, функционирующего в условиях изменения температуры окружающей среды. Предложена методика (подраздел 2.1) расчета параметров пьезоматериалов, которая будет полезна разработчикам новых пьезомодулей для обоснованного выбора типа пьезокерамики на заданный температурный диапазон. На основании этой методики разработан пошаговый алгоритм расчета параметров пакета многослойной пьезокерамики в условиях изменения температуры. Учет таких изменений позволит производить пьезоэлектрические мехатронные модули более стабильные к воздействию температуры. Разработана модель,

соответствующая основным характеристикам современного пакета пьезокерамики, работающего при различных температурах, которая может быть полезна для разработчиков пьезоэлектрических мехатронных модулей оптоэлектронных систем при проектировании регуляторов с целью повышения эффективности их работы.

В третьей главе приведены результаты синтеза регулятора для замкнутого пьезоэлектрического модуля, который обеспечивает ему заданные статические и динамические характеристики в условиях изменения температур. Применение такого регулятора позволит повысить эффективность работы как самого пьезомодуля, так всей оптоэлектронной системы в целом. При его использовании в условиях номинальной, минимальной и максимальной температур наилучшим образом обеспечиваются заданные показатели качества переходных процессов. Для улучшения статических и динамических характеристик в условиях изменения температуры в модели полинома предусмотрена возможность коррекции его коэффициентов. Разработанная методика синтеза регуляторов для управления пьезоэлектрическими мехатронными модулями может быть полезна для разработчиков оптоэлектронных систем автоматического управления для повышения эффективности их функционирования в жестких температурных условиях.

Список литературы

1. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. — Москва: Энергоатомиздат, 1988. — С. 160.
2. Жавнер В. Л, Смирнов А. Б. Мехатронные системы: учебное пособие. — Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2011.
3. Признаки и состав мехатронных систем. — URL: <https://emkelektron.webnode.com/news/priznaki-i-sostav-mekhatronnykh-sistem/>
4. Мехатроника. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D2%A%CYRM%D2%A%cyre%D2%A%cyrh%D2%A%cyra%D2%A%cyrt%D2%A%cyrr%D2%A%cyro%D2%A%cyrn%D2%A%cyri%D2%A%cyrk%D2%A%cyra>
5. Пьезоэлектричество / Брянцев А., Рогов А., Терехин А. и др. — Саранск: МОУ «Лицей № 43», 2010.
6. Классификация мехатронных систем. — URL: <https://helpiks.org/6-26826.html>
8. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений : учебное пособие / Карев П. В., Бобцов А. А., Бойков В. И. и др. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017. — 134 с.
9. Cedrat Technologies applications. — URL: <https://www.cedrat-technologies.com/en/applications.html> (online; accessed: 22.05.2020).
10. Параметры ОЭС СОН-530. — URL: <http://www.uomz.ru/ru/production/optical-observation-system/son-530>
11. Piezo-based miniature high resolution stabilized gimbals / Karasikov Nir, Peled Gal, Yasinov Roman, Rita Yetkariov // Proc. of SPIE. — 2016. — Vol. 982809. — Pp. 1–11.
12. Карев П.В. Ультразвуковые двигатели Nanomotion для оптико-электронных приборов и комплексов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Оптико-электронные приборы и комплексы». — АО «Швабе» ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева», 2017. — С. 44–49.
13. Карев П. В. Оптическая стабилизация и микросканирование на пьезоактюаторах и пьезодвигателях // Материалы 15-й международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. — С. 82–83.
14. Оптико-электронный комплекс детального наблюдения / Карев П. В., Денисов А. В., Попов В. В., Логунов С. В. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 24–31.
15. Карев П.В. Миниатюрные пьезоэлектрические механизмы для электрооптических и космических применений // Контенант. — 2016. — Т. 32, № 10. — С. 67–72.
16. Карев П. В. Пьезоактюаторы для микроперемещений в оптоэлектронике // VII Международная конференция по фотонике и

информационной оптике: Сборник научных трудов. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2018. — 2. — С. 152–153.

17. Заварзин В. И., Патин Г. А. Компенсация сдвига изображения пьезоэлек трическим актюатором // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — Т. 7.

18. Карев П. В. Обзор систем микросканирования и оптической стабилизации в инфракрасных камерах // Вопросы радиоэлектроники серия Техника телевидения. — 2018. — Т. 1. — С. 96–102.

19. Karev P. V. Optical stabilization and microscanning with piezo actuators and piezoelectric motors // Proceedings- International Conference Laser Optics, ICLO. — Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. — P. 192.

20. Контракт на сборку в России тепловизоров Catherine XP. — URL: <https://bmpd.livejournal.com/257817.html>

21. Официальный сайт Cedrat Technologies. — cedrat-technologies.com

22. Сергей Вэй. Thales UK представила новую термокамеру Catherine. — URL: <http://army-guide.com/rus/article/article.php?forumID=352>

23. Кремис И. И., Толмачев Д. А. Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения // Прикладная физика. — 2016. — № 6. — С. 109–115.

24. Didace Habineza, Micky Rakotondrabe, Yann Le Correc. Simultaneous sup pression of badly-damped vibrations and cross-couplings in 2-DoF piezoelectric actuator, by using feedforward standard H approach. — France: FEMTO-ST Institute.

25. Miki Rakotondrabe, Cedric Clevy, Philippe Lutz. Hysteresis and Vibration Compensation in a NonLinear Unimorph Piezocantilever // IEEE/RSJ Inter national Conference on Intelligent Robots and Systems / FEMTO-ST Institute. — France: 2008.

26. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации / Цы цулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцветов А. А., Зубакин И. А. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С. 234. 27. Хромов Л. И., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Видеоинформатика. Пере дача и компьютерная обработка видеоинформации. — Москва: Радио и связь, 1991

27. Хромов Л. И., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Видеоинформатика. Пере дача и компьютерная обработка видеоинформации. — Москва: Радио и связь, 1991.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на магистерскую диссертацию

магистранту специальности 7М07107 – Робототехника и мехатроника

Советхан Дияр Диасұлы

Тема: «Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей
оптоэлектронных систем»

Магистерская диссертация Советхана Дияра Диасұлы на тему «Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей оптоэлектронных систем» посвящена актуальной научно-технической задаче повышения надёжности и точности работы пьезоэлектрических приводов в составе высокоточных оптоэлектронных устройств. Актуальность работы определяется необходимостью учёта температурных факторов, влияющих на параметры пьезокерамики, что имеет большое значение для стабильного функционирования систем позиционирования.

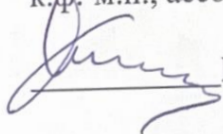
В процессе выполнения диссертации магистрант проявил высокий уровень теоретической подготовки, самостоятельности и системного подхода. Им проведён глубокий анализ свойств пьезоматериалов, построена математическая модель многослойного пьезоактуатора с учётом температурных зависимостей, выполнено моделирование и синтез алгоритмов автоматического управления.

Особо следует отметить практическую значимость предложенных подходов — результаты могут быть использованы при проектировании и разработке прецизионных мехатронных систем. Работа выполнена в полном объёме, оформлена в соответствии с требованиями и свидетельствует о сформировавшихся компетенциях научного исследователя.

Диссертация заслуживает оценки отл, а автор — присуждения степени магистра.

Научный руководитель

к.ф.-м.н., ассоциированный профессор

 Бактыбаев М.К.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Студент образовательной программы 7М07107 – «Робототехника и мехатроника»

Магистерская диссертация

Советхан Диар Диасұлы

**Тема: «Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей
оптоэлектронных систем»**

Разработан:

а) графическая часть _____ листов

б) пояснительная записка _____ страниц

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Тематика диссертационной работы является актуальной в условиях интенсивного развития высокоточных мехатронных систем, применяемых в оптоэлектронике, микронаномеханике, медицинской робототехнике, а также в системах активной стабилизации и прецизионного управления.

Особую значимость приобретают пьезоэлектрические актуаторы, способные обеспечивать микрометровые и субмикрометровые перемещения с высокой динамической точностью. Однако их поведение существенно зависит от внешних и внутренних факторов, в частности – температуры, которая влияет на ключевые физико-технические параметры: пьезомодуль, диэлектрическую проницаемость, механическую добротность и гистерезис.

Проблема температурной стабильности пьезоактуаторов является одной из наиболее слабо формализованных и изученных в инженерной практике, особенно в отношении пьезоматериалов, таких как ЦТС-46. Это делает исследование обоснованным и значимым.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

Диссертационная работа представляет собой завершённое научно-инженерное исследование, содержащее элементы новизны, методическую проработку и инженерную применимость.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям магистерского уровня, а её автор заслуживает присуждения соответствующей квалификации.

Рекомендую оценить работу на 85–89 баллов (хорошо) и допустить автора к защите с присуждением академической степени магистра.

Рецензент

Заведующая кафедрой общеобразовательных дисциплин,
к.т.н., ассоциированный профессор Академии гражданской Авиации



Сейдилдаева А.К

« 4 » 2025 ж

Ф КазҰТЗУ 704-22 Рецензия

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Советхан Дияр Диасұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей оптоэлектронных систем

Научный руководитель: Мурат Бактыбаев

Коэффициент Подобия 1: 3.5

Коэффициент Подобия 2: 1.9

Микропробелы: 2

Знаки из здругих алфавитов: 22

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-06-05

Дата

Заведующий кафедрой



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Повышение эффективности мехатронных пьезоэлектрических модулей оптоэлектронных систем

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Советхан Дияр ДиасұлыМурат Бактыбаев

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подобиий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

12439

Количество слов



КЦ

106447

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв	Б	22
Интервалы	A→	0
Микропробелы	·	2
Белые знаки	Б	0
Парафразы (SmartMarks)	a	23

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://pandia.ru/text/80/351/62650.php	44 0.35 %
2	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	37 0.30 %
3	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	36 0.29 %

4	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	34 0.27 %
5	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	34 0.27 %
6	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	29 0.23 %
7	https://pandia.ru/text/80/351/62650.php	27 0.22 %
8	https://pandia.ru/text/80/351/62650.php	21 0.17 %
9	http://e-libra.su/read/184393-bol-shaya-sovetskaya-enciklopediya-el.html	20 0.16 %
10	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	18 0.14 %

из базы данных RefBooks (0.29 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
Источник: Paperity		
1	Fuzzy logic controller algorithm for placing files in a data storage system Tatiana M. Tatarnikova, Evgeny D. Arkhiptsev;	18 (2) 0.14 %
2	Evaluation and development of a method for compensating the positioning error of computer numeric control equipment Muhamad Albani Rizki, Yuri V. Fedosov;	18 (1) 0.14 %

из домашней базы данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из программы обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из интернета (3.75 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://metrology-spb.ru/upload-files/CEDRAT_TECHNOLOGIES/Users_manual/AN_Position_Control_of_Piezo_Actuators_v1.0.pdf	278 (14) 2.23 %
2	https://pandia.ru/text/80/351/62650.php	92 (3) 0.74 %
3	https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-teoreticheskikh-osnov-sinteza-kosmicheskikh-adaptivnyh-videoinformatsionnyh-sistem	33 (3) 0.27 %
4	http://e-libra.su/read/184393-bol-shaya-sovetskaya-enciklopediya-el.html	31 (2) 0.25 %
5	https://cyberleninka.ru/article/n/prototipirovanie-tsifrovyyh-sistem-upravleniya-paketnymi-piezoaktyuatorami	21 (2) 0.17 %
6	https://cyberleninka.ru/article/n/modellirovanie-gazodinamicheskikh-protsessov-v-dizelnom-dvigatеле-sovremennye-podhody-i-metody-issledovaniya	9 (1) 0.07 %
7	https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-avtomaticheskoy-ustanovki-v-neytralnoe-polozenie-chuvstvitelnogo-elementa-datchika-magnitnogo-polya	2 (1) 0.02 %

Список принятых фрагментов

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
	https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-teore... 	33 (0.27%)
	Fuzzy logic controller algorithm for placing fil... 	18 (0.14%)
	Evaluation and development of a method for compe... 	18 (0.14%)
	https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sis... 	2 (0.02%)