

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**
 Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**
 Отделение **электронной инженерии**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка электродных структур микромеханических сенсоров

УДК 681.586.772'32-022.52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Хмелёв Владимир Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Нестеренко Т.Г.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Криницына З.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	Гуляев М.В.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Гормаков А.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	продукции
	<i>Универсальные компетенции</i>
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**

Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**

Уровень образования **бакалавриат**

Отделение **электронной инженерии**

Период выполнения _____ весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

Дата Контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
1.03.2019	<i>Обзор научной литературы по теме</i>	10
15.03.2019	<i>Разработка электродных структур микромеханических сенсоров</i>	5
30.03.2019	<i>Выполнение аналитических расчетов</i>	20
20.04.2019	<i>Выполнение расчетов методом конечных элементов</i>	20
10.05.2019	<i>Обработка полученных данных</i>	20
25.05.2019	<i>Составление доклада и оформление расчетно-пояснительной записки</i>	20
29.05.2019	<i>Корректировка ВКР по результатам обсуждения на защите</i>	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Нестеренко Т.Г.	к.т.н		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	А.Н. Гормаков	к.т.н.		

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**
 Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**
 Отделение **электронной инженерии**

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

_____ А.Н. Гормаков
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Хмелёву Владимиру Андреевичу

Тема работы:

Разработка электродных структур микромеханических сенсоров	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	От 27.02.2019 г. № 1548/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	- Разработать варианты электродных структур микромеханического сенсора. - Провести анализ и получить наиболее эффективную структуру.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Аналитический обзор литературных источников, патентов, журналов, статей, сайтов производителей. Цель ВКР – разработка электродных структур и определение варианта, обладающего наилучшими характеристиками. Дополнительные разделы: финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Чертежи общего вида разработанных электродных структур

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Криницина Зоя Васильевна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	27.02.2019
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Нестеренко Тамара Георгиевна	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Хмелёв Владимир Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Хмелёву Владимиру Андреевичу

Тема: Разработка электродных структур микромеханических сенсоров

Школа	Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.01 Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад руководителя – 33 664 руб. Оклад инженера – 26 300 руб. Дополнительной заработной платы 12%;
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент 30%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Потенциальные потребители результатов исследования - Анализ конкурентных технических решений; - SWOT-анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	- Определение трудоемкости выполнения работ; - Разработка графика проведения НИР; - Расчет материальных затрат НИР.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Оценка социальной и сравнительной эффективности исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка;
2. Матрица SWOT
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. График проведения и бюджет НИ

5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Криницына Зоя Васильевна	к.т.н. доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Хмелёв Владимир Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Хмелёву Владимиру Андреевичу

Школа	Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности	Подразделение	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	12.03.01 Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования.	Объектом разработки являются различные варианты электродных структур микромеханических сенсоров (4 корпус, 105 аудитория).
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность	Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов – повышенный уровень шума на рабочем месте; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень электромагнитных полей (ЭМП); – неудовлетворительный микроклимат – повышенный уровень напряженности электростатического поля – электроопасность –
2. Экологическая безопасность	– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств); – решение по обеспечению экологической безопасности.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. – Пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Хмелёв Владимир Андреевич		

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа 113 страниц, 16 рисунков, 25 - таблиц, 16 - источников, 1 - приложение.

Ключевые слова: микромеханические системы, электродные структуры, гребенчатые структуры, МЭМС – микроэлектромеханическая система, электрическая емкость, краевой эффект.

Объектом исследования являются электродные структуры микромеханических систем.

Цель работы – разработка электродных структур микромеханических систем.

В ходе работы были использованы аналитические методы расчета емкости и метод конечных элементов.

В ходе данной работы были разработаны варианты электродных структур электростатических микромеханических систем, для которых различными методами будут рассчитаны емкости, проведено их сравнение и будут даны рекомендации по применению оптимальных методов расчета.

В процессе работы были разработаны электродные структуры, рассчитаны электрические емкости и даны рекомендации по их применению, рассмотрены вопросы социальной ответственности и финансового менеджмента.

Область применения: предприятия, разрабатывающие и изготавливающие микромеханические системы.

Значимость работы состоит в том, что данные разработанные структуры и рекомендации по их применению будут применяться для разработки новых микромеханических систем.

Определения, обозначения, сокращения

В данной работе применены следующие сокращения:

МЭМС – микроэлектромеханическая система

ЧЭ – чувствительный элемент

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

РД – режим движения

РЧ – режим чувствительности

ПП – полоса пропускания

Оглавление

Введение.....	16
1 Обзор микроэлектромеханических систем	17
1.3 Области применения электродных структур.....	20
1.3.1 Микромеханические гироскопы.	20
1.3.2 Микромеханические приводы движения	22
1.3.3 Микромеханические акселерометры.....	24
1.4 Требования предъявляемые к микроэлектромеханическим системам	25
2 Конструкция электродных структур.....	27
2.1 Анализ современных электродных структур	27
2.2.1 Определение параметров разрабатываемых электродных структур	28
2.3 Методы определения электрической емкости электродных структур.....	28
2.3.1 Аналитический метод	29
2.3.2 Метод конечных элементов.....	31
3 Разработка и анализ электродных структур.....	33
3.1 Электродная структура первого типа.....	33
3.1.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов.....	34
3.1.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов.....	35
3.1.3 Метод конечных элементов	36
3.1.4 Выводы по электродной структуре первого типа.....	38
3.2 Электродная структура второго типа	40
3.2.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов.....	40
3.2.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов.....	41
3.2.3 Метод конечных элементов	42
3.2.4 Выводы по электродной структуре второго типа	44
3.3 Электродная структура третьего типа.....	46
3.3.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов.....	46
3.3.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов.....	47
3.3.3 Метод конечных элементов	48
3.3.4 Выводы по электродной структуре третьего типа.....	50
3.4 Электродная структура четвертого типа.....	52

3.4.1	Аналитический метод без учета краевых эффектов.....	53
3.4.2	Аналитический метод с учетом краевых эффектов.....	54
3.4.3	Метод конечных элементов	55
3.4.4	Выводы по электродной структуре четвертого типа.....	56
3.5	Заключение по разделу	58
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	60
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	60
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	60
4.1.2	SWOT-анализ.....	61
4.2	Планирование научно-исследовательских работ	66
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	66
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	68
4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	69
4.2.4	Построение графика работ	70
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НИР).....	72
4.3.1	Расчет материальных затрат НИР	72
4.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	73
4.3.3	Заработная плата исполнителей темы.....	74
4.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	76
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды	77
4.3.6	Накладные расходы.....	77
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	78
4.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	79
5.	Социальная ответственность	83
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	84
5.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	84
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	85

5.2	Производственная безопасность	86
5.2.1	Микроклимат	87
5.2.2	Электромагнитные поля	88
5.2.3	Производственное освещение.....	89
5.2.4	Электробезопасность	92
5.2.5	Производственный шум	96
5.3	Экологическая безопасность	97
5.3.1	Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	97
5.3.2	Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	99
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	99
5.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	99
5.4.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	100
	Заключение	104
	Список используемой литературы	105
	Приложение А	107

Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это системы, включающие в себя взаимосвязанные микромеханические и микроэлектрические компоненты.

Микроэлектромеханические системы состоят из различных элементов, таких как: датчики, механические устройства, приводы и устройств микроэлектроники, размещенных на общей кремниевой подложке.

Микромеханические системы применяются в бытовой, потребительской и специальной электронике, системах безопасности подвижных объектов, например в автомобилях, медицине, промышленности и многих других сферах жизни. Такое широкое применение датчиков обусловлено развитию МЭМС технологий, благодаря чему датчики стали массовым и дешевым товаром.

МЭМС реализуются на различных физических принципах: пьезоэлектрические, электростатические, пьезорезистивные, оптические и электромагнитные.

Однако наибольшее распространение (около 30% всех МЭМС) получили электростатические устройства благодаря ряду преимуществ.

В ходе данной работы будут разработаны варианты электродных структур электростатических микромеханических систем, для которых различными методами будут рассчитаны емкости, проведено их сравнение и будут даны рекомендации по применению оптимальных методов расчета.

1 Обзор микроэлектромеханических систем

Микроэлектромеханические системы – одно из самых быстро развивающихся и перспективных направлений в современной технике. Технология МЭМС позволяет получать системы с электрическими, электрохимическими, электронными, оптическими и механическими свойствами и размерами, сравнимыми с обычными интегральными схемами.

Общая структурная схема МЭМС приведена на рисунке 1 на примере электроемкостного МЭМС акселерометра. Чувствительным элементом является датчик, операционный усилитель аналогового сигнала и аналого-цифровой преобразователь - интегральная схема, обработка цифрового сигнала - микроконтроллер.

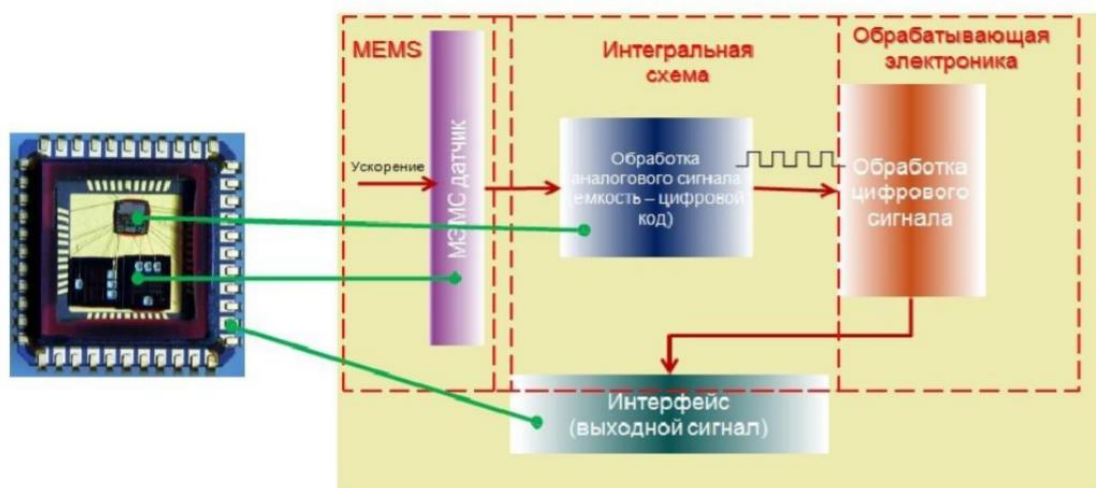


Рисунок 1 – Структурная схема МЭМС и приборная реализация МЭМС с указанием ее структурных элементов.

МЭМС имеют малые размеры - от долей микрометра до единиц миллиметров. Кроме того, важно отметить, что существует совместимость технологий микросистемной техники и микроэлектроники. Изначально основным материалом для изготовления МЭМС был кремний, со временем стали использоваться другие полупроводниковые материалы, сегнетоэлектрики, керамика и полимерные материалы.

Обычно MEMS делят на два типа: актюаторы (исполнительные устройства) – системы, которые создают механические усилия пропорциональные входному электрическому сигналу, и сенсоры – измерительные устройства, которые решают обратную задачу, то есть воспроизводят сигнал, пропорциональный механическим усилиям.

1.2 Электростатические МЭМС системы

На сегодняшний день известен ряд физических принципов, на которых основано функционирование выпускаемых промышленно МЭМС устройств, различающихся способами создания сигнала или создания усилия устройства: пьезоэлектрические, электростатические, пьезорезистивные, оптические и электромагнитные. Однако наибольшее распространение получил электростатический метод благодаря ряду преимуществ.

В основе электростатического преобразователя энергии лежит конденсатор с переменной ёмкостью, которая зависит от изменения емкости конденсатора от изменения его геометрических параметров. Ёмкостная (электродная) структура приводится в движение механическими колебаниями системы, таким образом, изменяется электрическая емкость, а следовательно и энергия, накопленная конденсатором. Необходимым условием является постоянный заряд или напряжение на конденсаторе.

Электростатический (ёмкостной) метод преобразования энергии заключается в изменении электрической ёмкости переменного конденсатора вследствие перемещения его обкладок под действием механических усилий. Если заряд на обкладках конденсатора Q остаётся постоянным, напряжение $U = \frac{Q}{C}$ может быть увеличено уменьшением ёмкости $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$, а этого можно добиться увеличением расстояния d между обкладками конденсатора или уменьшать площадь перекрытия обкладок S . В случае постоянного напряжения на конденсаторе U , заряд Q может быть увеличен путём уменьшения d или

увеличения S . В обоих случаях энергия, запасённая в конденсаторе, будет увеличиваться [1].

Таким образом, электростатический преобразователь представляет собой электродную структуру, которая при воздействии механических колебаний изменяет свою электрическую ёмкость. Очень редко могут использоваться системы, в которых изменяется диэлектрическая проницаемость среды ε между обкладками.

Основным достоинством электростатических сенсоров перед электромагнитными и пьезоэлектрическими, является их совместимость с технологией микроэлектроники. Кроме того электростатические преобразователи позволяют получать большие выходные напряжения 2-10 В, в то время как, электромагнитные преобразователи 0-2 В. В таблице 1 представлены основные преимущества и недостатки электростатических преобразователей механической энергии в электрическую.

Таблица 1. Достоинства и недостатки электростатического метода в МЭМС устройствах.

Достоинства	Недостатки
1. Проще всех интегрировать с технологиями ИС и МЭМС.	1. Необходим первичный источник напряжения.
2. Не требуются дорогие материалы.	2. Необходимы механические ограничители движения.
3. Напряжение выхода 2 - 10 В.	

Из таблицы видно, что, несмотря на имеющиеся недостатки электростатических устройств, всё же данный способ преобразования механической энергии в электрическую является наиболее совместимым с современными технологиями ИС по сравнению с другими методами. Поэтому

данная работа сконцентрирована на исследовании электростатических (емкостных) электродных структур для МЭМС устройств.

1.3 Области применения электродных структур

Рассмотрим некоторые МЭМС устройства, в которых применяются электростатические электродные структуры.

1.3.1 Микромеханические гироскопы.

Микромеханические гироскопы (МГ) являются электромеханическими системами, в которых при появлении угловой скорости энергия первичных колебаний инерционной массы преобразуется в энергию вторичных колебаний, которая несет в себе информацию об измеряемой угловой скорости. Это преобразование осуществляется вследствие воздействия на резонатор сил (моментов) инерции Кориолиса при вращении резонатора с переносной угловой скоростью, вектор количества движения, или момента количества движения (кинетического момента), соответственно для поступательных или вращательных первичных колебаний ИМ [3]. Микромеханические гироскопы приходят на смену крупногабаритным гироскопам благодаря малой массе, миниатюрным размерам, дешевизне и удобству использования.

Простейший гироскоп основан на измерении влияния силы Кориолиса на тело во вращающейся раме, однако для МЭМС сложно обработать вращающиеся детали очень маленьких размеров, поэтому любые микромеханические гироскопы по принципу действия являются вибрационными.

Вибрационные микромеханические гироскопы достаточно сложно функционируют. Для того, чтобы появился выходной сигнал, необходимо создать механическое возбуждение (вибрацию) – угловое или линейное колебательное движение инерционной массы.

Существуют два вида МЭМС гироскопов: камертонные и кардановые.

На рисунке 2 представлен микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности компании Draper Laboratory (США).

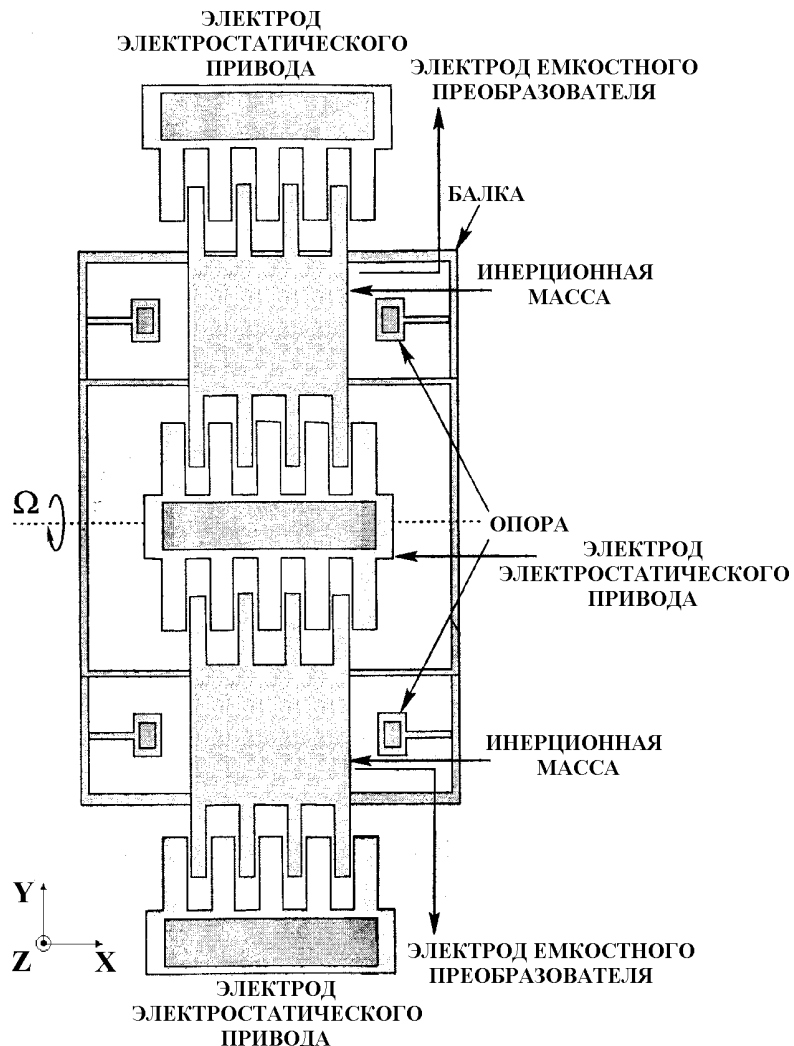


Рисунок 2 - микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности

Данный гироскоп является камертонным, с его помощью можно измерить величину угловой скорости при вращении его основания вокруг оси X, расположенной в плоскости подложки. Емкостные преобразователи, образуемых ИМ и неподвижными электродами, расположенными под ними, регистрируют колебания инерционных масс, которые двигаются под действием сил Кориолиса.

ИМ приводятся в колебательное движение в плоскости подложки при

помощи трех электростатических актюаторов (приводы движения). Векторы скоростей инерционных масс находятся в противофазе друг другу. При возникновении угловой скорости вокруг оси ОХ под действием сил Кориолиса одна ИМ поднимется над плоскостью подложки, а другая опустится. Таким образом, ИМ будут совершать движения в противоположных направлениях перпендикулярно плоскости подложки. Электродные структуры формируют выходное напряжение гироскопа, пропорциональное величине угловой скорости.

1.3.2 Микромеханические приводы движения

Микроактюатор – это механическое устройство, которое преобразовывает различные виды энергии (электрическая, химическая или термическая) в механическую работу.

В настоящее время разработаны микроактюаторы, основанные на различных физических принципах: термические, термопневматические, пьезоэлектрические, электростатические и магнитные актюаторы.

В общем виде, как и любое электростатическое МЭМС устройство, емкостной актюатор содержит подвижную и неподвижную обкладку конденсатора, которые формируют электродную структуру. Принцип действия электростатических актюаторов основан на создании электростатической силы между подвижным и неподвижным электродами.

При подаче управляющего напряжения на неподвижный электрод, на подвижный начинает действовать электростатическая сила, которая определяется выражением (3):

$$dF_{эл} = E \cdot dq, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля;

q – заряд электрона.

Поскольку

$$dq = C \cdot dU; \quad (4)$$

$$E = \frac{U}{d}, \quad (5)$$

выражение (3) примет вид

$$dF_{\text{эл}} = \frac{C}{d} \cdot U \cdot dU, \quad (6)$$

тогда электростатическая сила, действующая на подвижный электрод будет определяться следующим выражением:

$$dF_{\text{эл}} = \frac{C}{d} \cdot \int_0^U U \cdot dU = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot d}, \quad (7)$$

где U – отклоняющее напряжение;

d – расстояние между подвижным и неподвижным электродами;

C – емкость, создаваемая подвижным и неподвижным электродами, определяемая выражением:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (8)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора;

ε_0 – электрическая постоянная ($8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

S – площадь подвижного электрода.

Подставив (8) в (7), получим выражение для определения силы, действующей на подвижный электрод:

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d^2} \cdot U^2. \quad (9)$$

При подаче управляющего напряжения U между подвижным и неподвижным электродами появляется электростатическая сила и подвижный электрод притягивается к неподвижному. По мере отклонения подвижного электрода от начального положения расстояние между электродами d будет уменьшаться, что, согласно выражению (9), приводит к увеличению электростатической силы F . Отсюда следует, что при расчете электростатической силы, действующей на подвижный электрод относительно неподвижного, необходимо учитывать уже совершенное отклонение [2]:

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{(d-y)^2} \cdot U^2. \quad (10)$$

1.3.3 Микромеханические акселерометры

Акселерометр - это электромеханическое устройство, которое измеряет как статическое (сила тяжести), так и динамическое (движение или вибрация) ускорения.

Самый распространенный метод преобразования параметров движения в электрический сигнал является ёмкостной метод. Электростатический датчик ускорения в простейшем случае состоит из подвижной (инерционная масса) и неподвижной частей, представляющих собой обкладки конденсатора. При ускорении инерционная масса за счет сил инерции отклоняется от первоначального положения, изменяя зазор между обкладками, в следствие чего меняется и емкость конденсатора.

На рисунке 3 изображён ёмкостной акселерометр, изготовленный с использованием методов микротехнологий.

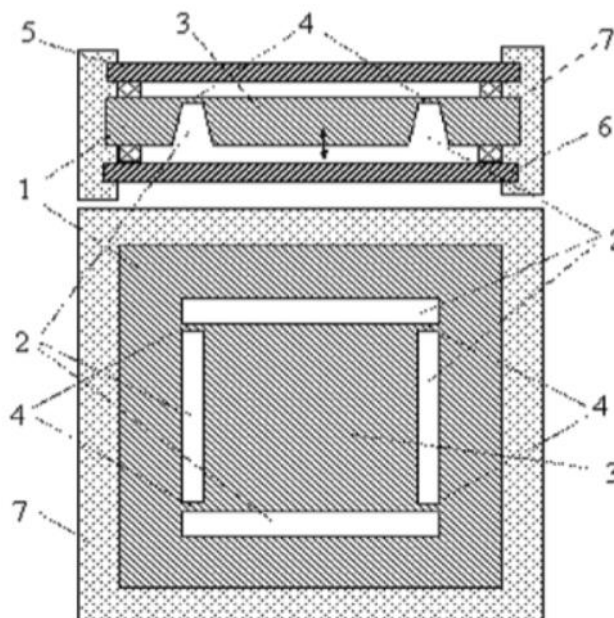


Рисунок 3 – емкостный акселерометр

1 - кристалл кремния, 2 – вытравленные участки , 3 – инерционная масса,

4 – упругие элементы, 5 и 6 – электроды.

Инертная масса 3 в такой конструкции может перемещаться только по вертикали. Электрические ёмкости между ней и верхним (нижним) электродами включены в противоположные плечи электрической мостовой схемы переменного тока. Её балансируют так, чтобы при отсутствии ускорения сигнал на выходе равнялся нулю. Когда объект, на котором установлен акселерометр, движется с ускорением, направленным вдоль оси сенсора, инертная масса 3 смещается из положения равновесия, вследствие чего одна из емкостей возрастает, а другая уменьшается. Из-за нарушения баланса на выходе мостовой схемы появляется напряжение соответствующего знака и тем большее, чем больше ускорение. Мостовую электрическую схему, необходимые электронные ключи, усилители, элементы термокомпенсации, – все, что требуется для обработки сигналов и калибровки акселерометра, – формируют ныне методами МСТ на том же кристалле кремния.

1.4 Требования предъявляемые к микроэлектромеханическим системам

В связи с быстрым развитием микроэлектромеханических систем к ним прилагаются все более строгие требования:

1) Малый разброс параметров в пределах изделия. Изготовление компонентов в едином технологическом цикле позволяет получать практически неотличимые параметры у одинаковых компонентов.

2) Размер. Применение технологии микросхем позволяет получить микромеханические и оптические узлы значительно меньших размеров, чем это возможно по традиционным технологиям. Физические размеры МЭМС-устройств могут варьироваться от одного микрона до нескольких миллиметров. Кроме того, стоит отметить, что в составе МЭМС устройств могут быть как простейшие конструкции с малым числом подвижных деталей,

так и сложнейшие конструкции, двигающихся и измеряющих по нескольким осям

3) Высокая функциональность. Миниатюрность изделия и возможность изготовления датчиков, обрабатывающих схем и исполнительных механизмов в одном устройстве позволяет создавать законченные системы достаточно большой сложности в миниатюрном корпусе.

4) Улучшенные характеристики функционирования. Электронная часть, а также электрические каналы связи с датчиками и механизмами, выполненные по интегральной технологии и имеющие малые размеры, позволяют улучшить такие характеристики как рабочие частоты, соотношение сигнал/шум и т.д.

5) Низкая стоимость. Применение МЭМС уменьшает стоимость как механической, так и электронной частей устройства, поскольку обрабатывающая электроника интегрирована в МЭМС-компонент, что позволяет избежать дополнительных соединений и, в некоторых случаях, согласующих схем. Кроме того, одним из актуальнейших направлений развития микромеханических датчиков является измерение по нескольким осям.

6) Высокая точность, повторяемость чувствительных элементов и их интегральное исполнение совместно с обрабатывающей схемой позволяют значительно повысить точность измерений.

7) Высокая надежность и стойкость к внешним воздействиям. Факторов, приводящих к повышению надежности и стойкости к внешним воздействиям изделий при применении МЭМС, достаточно много, и они зависят от конкретного типа изделия и его применения.

2 Конструкция электродных структур

2.1 Анализ современных электродных структур

Поскольку основным достоинством электростатических МЭМС является их совместимость с технологиями ИС, то для их изготовления обычно используется кремниевая технология. Как уже отмечалось, максимальная ёмкость устройства является ключевым параметром электростатических преобразователей. Для достижения наибольшей ёмкости желательно использовать структуры с большой толщиной (до 500 мкм) и использовать глубокое реактивное ионное травление (ГРИТ).

На рисунке 4 изображены три основных вида конструкций переменных конденсаторов, изготавливаемых в +рамках технологии МЭМС. Тёмные области являются неподвижными, направление движения подвижных элементов отмечено стрелками.

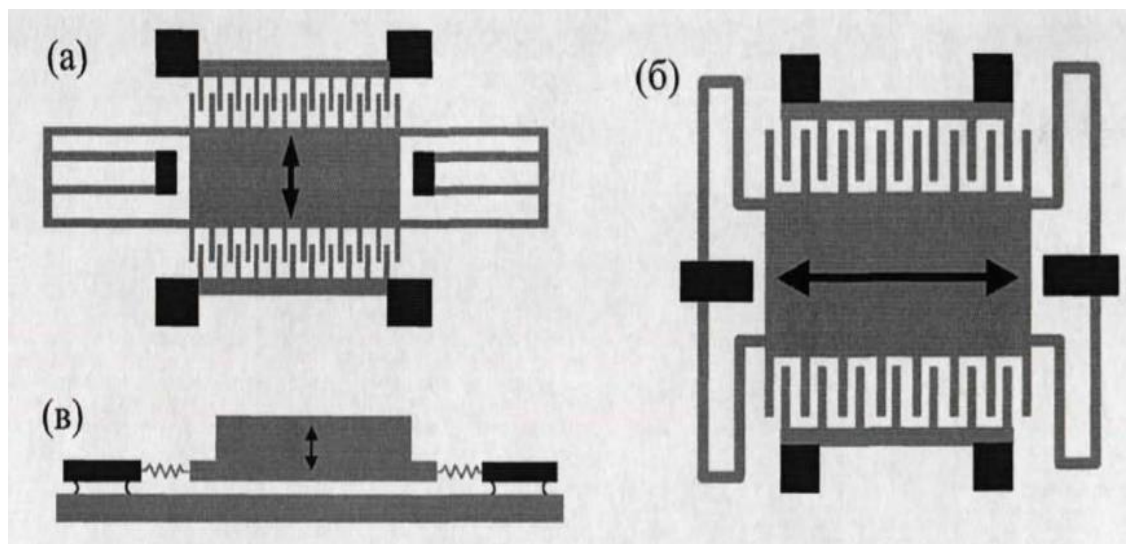


Рисунок 4 – три вида электростатических датчика: а) с изменением площади перекрытия электродов, б) с изменением межэлектродного зазора, в) с изменением зазора между двумя пластинами.

На рисунке 8а расположена встречно-штыревая электродная структура, емкость изменяется за счет изменения площади перекрытия электродов. На рисунке 8б представлена структура, в которой изменение емкости происходит из-за изменения межэлектродного зазора. Движение подвижной части в обеих конструкциях происходит в плоскости устройства (направление отмечено стрелками). На рисунке 8б изображена плоскопараллельная структура, где емкость изменяется за счет изменения зазора между двумя массивными параллельными обкладками, а движение происходит перпендикулярно плоскости устройства.

2.2.1 Определение параметров разрабатываемых электродных структур

Разработаны следующие варианты электродных структур:

- 1) с изменением площади перекрытия электродов;
- 2) с изменением межэлектродного зазора;
- 3) с изменением зазора между двумя пластинами;
- 4) с изменением расстояния между двумя пластинами.

Для анализа данных структур выберем геометрические параметры, которые будут одинаковыми для каждого вида гребенок.

Впишем каждую из структур в квадрат с длиной стороны равной 200 мкм, толщиной 40 мкм. Толщина одного электрода 5 мкм.

Для каждой из структур будет найдена емкость, а так же сделан вывод о том, какая структура при заданных параметрах чувствительнее.

2.3 Методы определения электрической емкости электродных структур

При разработке и проектировании электростатических микроэлектромеханических систем необходимо произвести расчет емкости

для сенсоров и электростатических сил для исполнительных устройств. Зачастую такие расчеты проводятся при помощи аналитических выражений, которые описывают определенную структуру. Однако такие выражения всегда имеют границы применимости. Например, находит широкое применение формула идеального плоского конденсатора, однако она не учитывает влияния краевого эффекта на значение емкости.

Краевые эффекты – явление искажения однородного поля вблизи краев пластин конденсатора, что объясняется отталкиванием одноимённых зарядов на одном электроде и взаимным притяжением разноимённых зарядов на соседних электродах, в результате чего происходит перераспределение зарядов в те области электродов, где они перекрываются.

2.3.1 Аналитический метод

В литературе имеются аналитические выражения для расчёта ёмкостей с учётом краевых эффектов, однако все они являются узконаправленными, то есть имеют достаточно ограниченный (часто неопределённый) интервал применимости.

Без учета краевых эффектов распределение зарядов по пластинам считается равномерным, а электрическое поле между пластинами однородным (Рисунок 5).

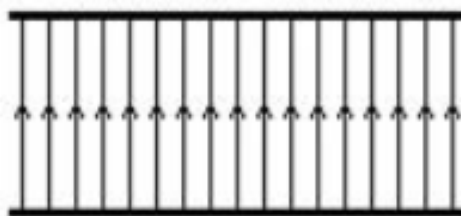


Рисунок 5 – поле плоского конденсатора без учета краевых эффектов

В этом случае емкость идеального плоского конденсатора (Рисунок 6) рассчитываются по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d},$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a, b - размеры обкладок конденсатора (электродов);

d - расстояние между пластинами.

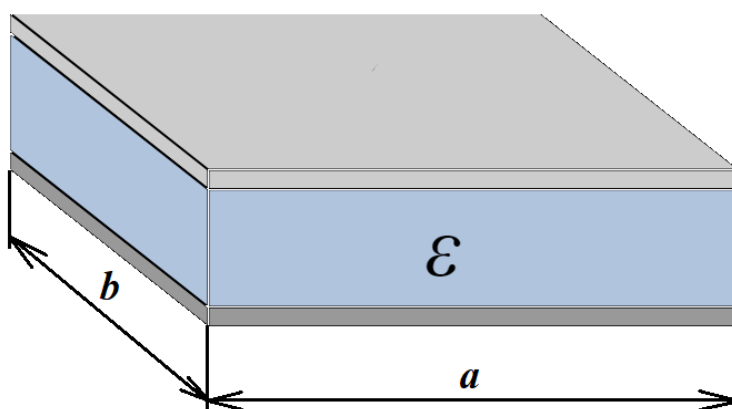


Рисунок 6 – Идеальный плоский конденсатор

Заметим, что поверхностная плотность заряда не является постоянной по всей поверхности пластины, а увеличивается вблизи ее краев (Рисунок 7). Вблизи краев нарушается также предположение об однородности электрического поля, поэтому формула является приближенной.

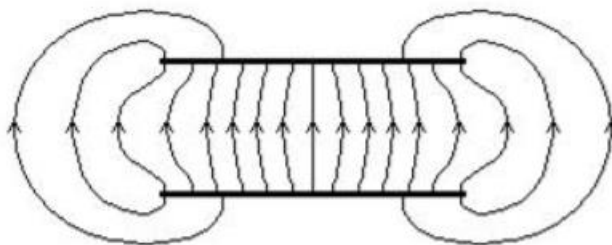


Рисунок 7 – поле плоского конденсатора с учетом краевых эффектов

Для более точного определения емкостей необходимо учесть, что ёмкость создают не только боковые поверхности гребёнок, но также их торцевые поверхности:

$$C = C_s + C_d,$$

где C_s – ёмкость, зависящая от площади перекрытия электродов;

C_d – торцевая ёмкость, создаваемая торцевыми поверхностями электродов.

Для определения емкости с учетом краевых эффектов можно использовать следующую формулу, представленную Х.Б. Пальмером [4]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln(2\pi) \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{a} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln(2\pi) \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{b} \right) \right],$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

a – длинна обкладки;

b – ширина обкладки;

d – расстояние между обкладками.

2.3.2 Метод конечных элементов

Существуют численные методы решений с использованием САПР, основанных на методах конечных (МКЭ) позволяют оценить электростатические взаимодействия в МЭМС с учётом краевых эффектов. Данные методы, однако, требуют больших затрат времени и мощной вычислительной техники, что существенно усложняет дальнейшие процессы оптимизации и проектирования МЭМС с одновременным учётом электрических и механических взаимодействий.

Краевые задачи (системы уравнений с начальными и граничными условиями), описывающие те или иные процессы в любой области науки и техники, в силу своей сложности, как правило, не позволяют получать решение

аналитически. Речь здесь идет, конечно же, о математических моделях сложных процессов и объектов, а не о типовых ситуациях или частных случаях. В случае невозможности получить аналитическое решение на помощь исследователям приходят численные методы.

Современное представление о численных методах решения краевых задач может быть сформулировано рядом простых тезисов.

Во-первых, следует сказать о том, что все формализуемые процессы могут быть описаны математической моделью, которая в общем случае представляет собой систему дифференциальных уравнений, дополненную краевыми условиями. Во-вторых, большинство процессов и явлений, происходящих в природе, требуют описания сложными моделями, часто трехмерными и нелинейными. Поэтому исследователи вынуждены применять численные методы для получения решения поставленных задач. В-третьих, все численные методы условно можно разделить следующим образом: методы конечных разностей и методы конечных элементов. В основе метода конечных элементов (МКЭ) лежит принцип деления исследуемой области на совокупность подобластей – отсюда метод и получил свое название.

Основное преимущество МКЭ состоит в его универсальности, то есть возможности решать практически любые краевые задачи. С его помощью можно описать любую область, так как, например, треугольники и тетраэдры легко покрывают объекты, имеющие сложную геометрическую форму. В нужных подобластях можно легко увеличить плотность вычислительной сетки, чтобы повысить точность вычислений. В МКЭ точность расчетов повышается за счет измельчения элементов вычислительной сетки.

Для расчетов методом конечно-элементного анализа используется программа ANSYS.

Для работы в ANSYS была написана программа – макрос (приложение А), с помощью которой выполняются последовательно шаг за шагом команды для расчета электрической емкости электродных структур.

3 Разработка и анализ электродных структур

Были разработаны электродные структуры МЭМС сенсоров и заданы одинаковые для всех геометрические параметры – структуры вписаны в параллелепипед с размерами 200х200х40 мкм.

Структура первого типа – представляет собой гребенчатую структуру с изменением площади перекрытия обкладок.

Структура второго типа - представляет собой гребенчатую структуру с изменением расстояния между электродами.

Структура третьего типа - представляет собой две пластины – электрода, изменяется расстояние между пластинами.

Структура четвертого типа - представляет собой две неподвижных гребенки и одну подвижную, изменяется расстояние между электродами гребенок.

3.1 Электродная структура первого типа

Электродная структура первого типа представляет собой гребенчатую структуру с длиной электродов 150 мкм, шириной электрода 5 мкм, толщиной 40 мкм, при этом расстояние между соседними электродами составляет 8 мкм. Перемещение подвижной гребенки происходит вдоль оси X на ± 5 мкм в результате чего изменяется площадь перекрытия обкладок. Таким образом, электродная структура первого типа является гребенчатой структурой, в которой изменяется площадь перекрытия обкладок (рисунок 8).

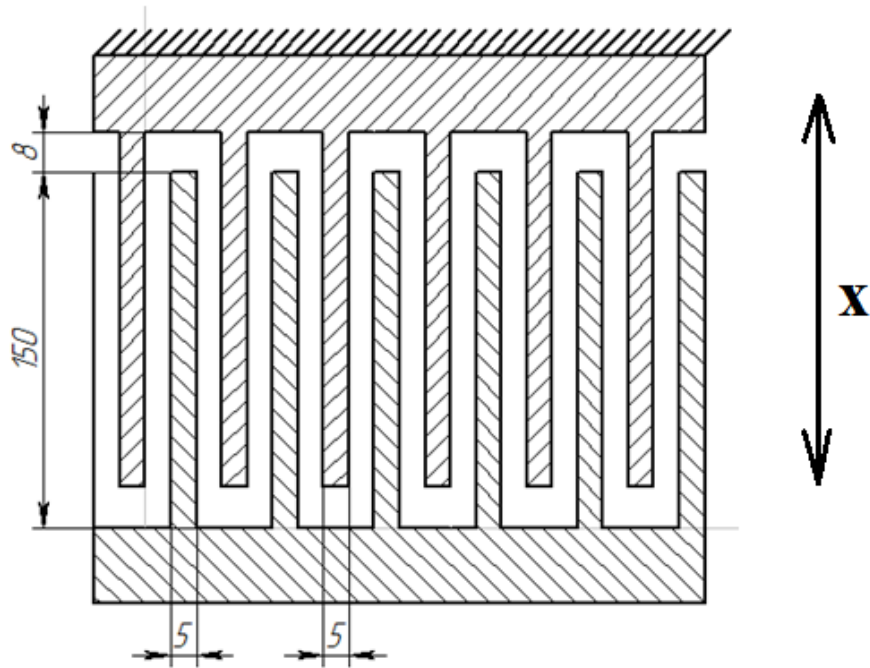


Рисунок 8 – электродная структура с изменением площади перекрытия обкладок

3.1.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов

Для расчета электрической емкости без учета краевых эффектов воспользуемся формулой идеального плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a, b - размеры обкладок конденсатора (электродов);

d - расстояние между пластинами.

В результате расчета электрической емкости без учета краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 1).

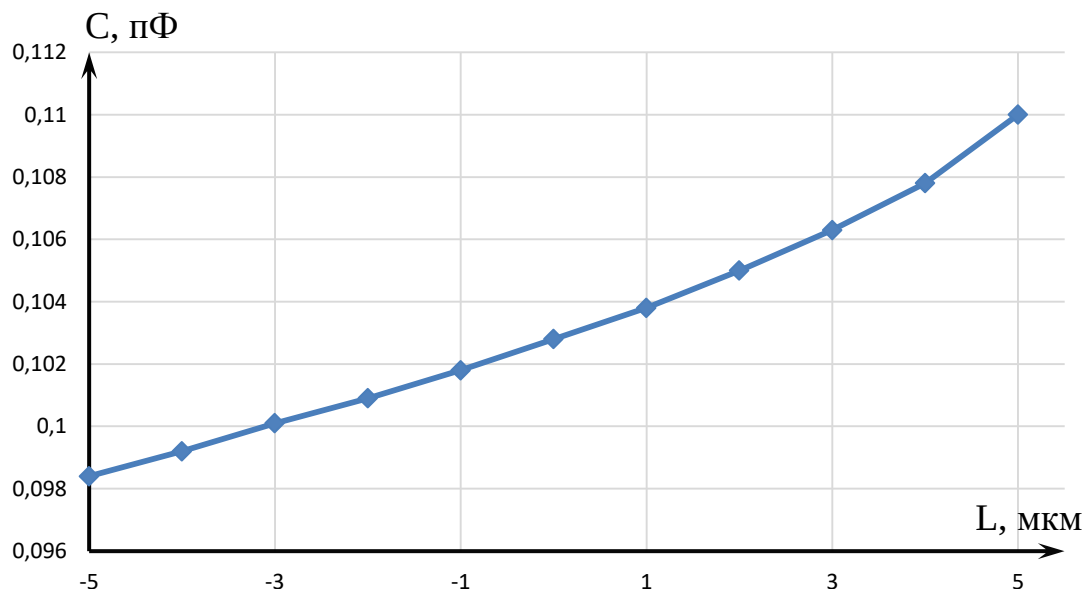


График 1 - Зависимость емкости от изменения площади перекрытия обкладок без учета краевых эффектов.

3.1.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов

Для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов воспользуемся формулой представленной Х.Б. Пальмером [4]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln(2\pi) \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{a} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln(2\pi) \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{b} \right) \right],$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 — электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a — длина обкладки;

b — ширина обкладки;

d — расстояние между обкладками.

В результате расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 2).

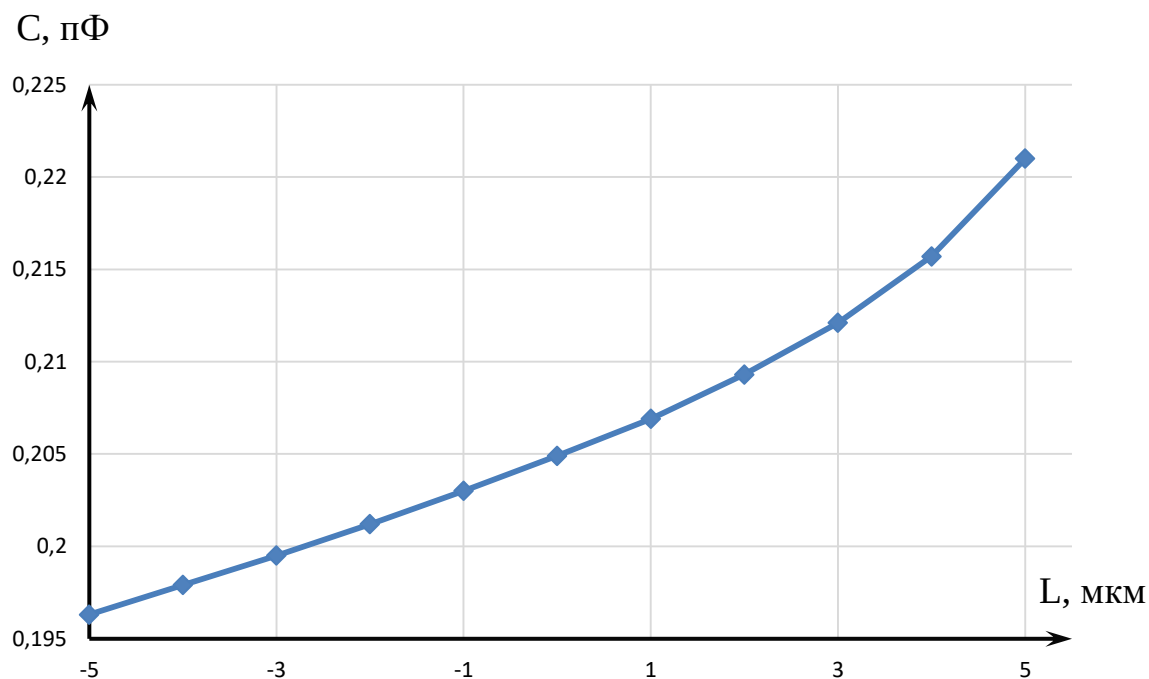


График 2 – Зависимость емкости от изменения площади перекрытия обкладок с учетом краевых эффектов.

3.1.3 Метод конечных элементов

Была определена электрическая емкость методом конечных элементов при помощи математического моделирования в программе ANSYS. В результате построен график зависимости электрической емкости от перемещения с учетом краевых эффектов (график 3).

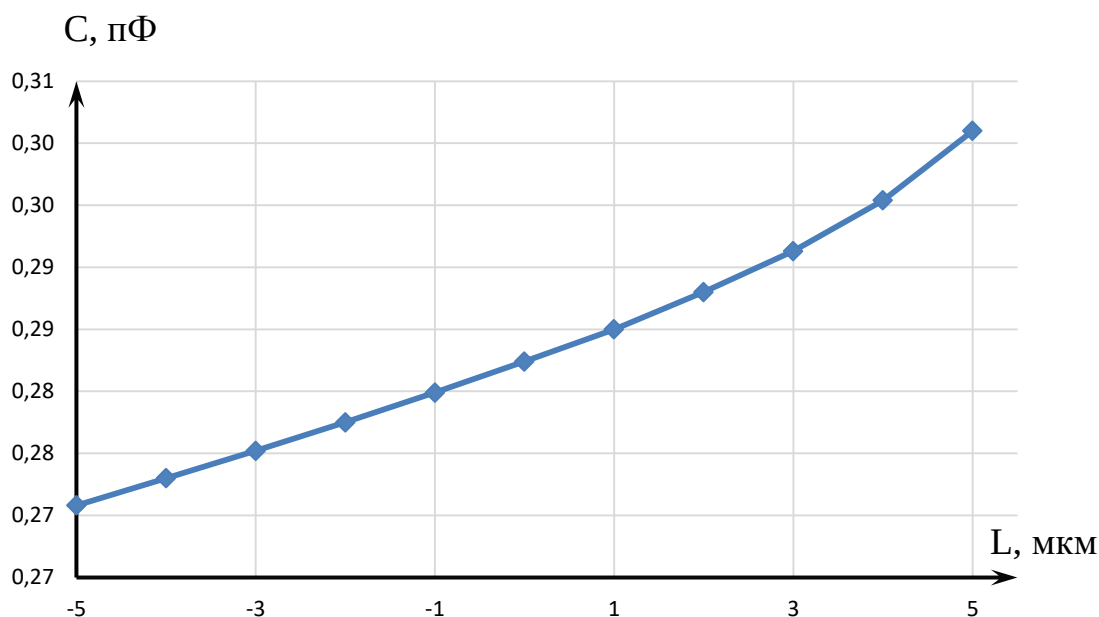


График 3 – Зависимость емкости от изменения площади перекрытия обкладок
рассчитанной методом конечных элементов

Кроме того в процессе расчета методом конечных элементов был получен рисунок распределения электрического потенциала электродной структуры с изменением площади перекрытия обкладок (рисунок 9). На данном рисунке наглядно представлено искажение распределения электрического потенциала вблизи краев электродов, особенно это заметно на краях электродных структур, то есть на краях электродов происходит перераспределение потенциала.

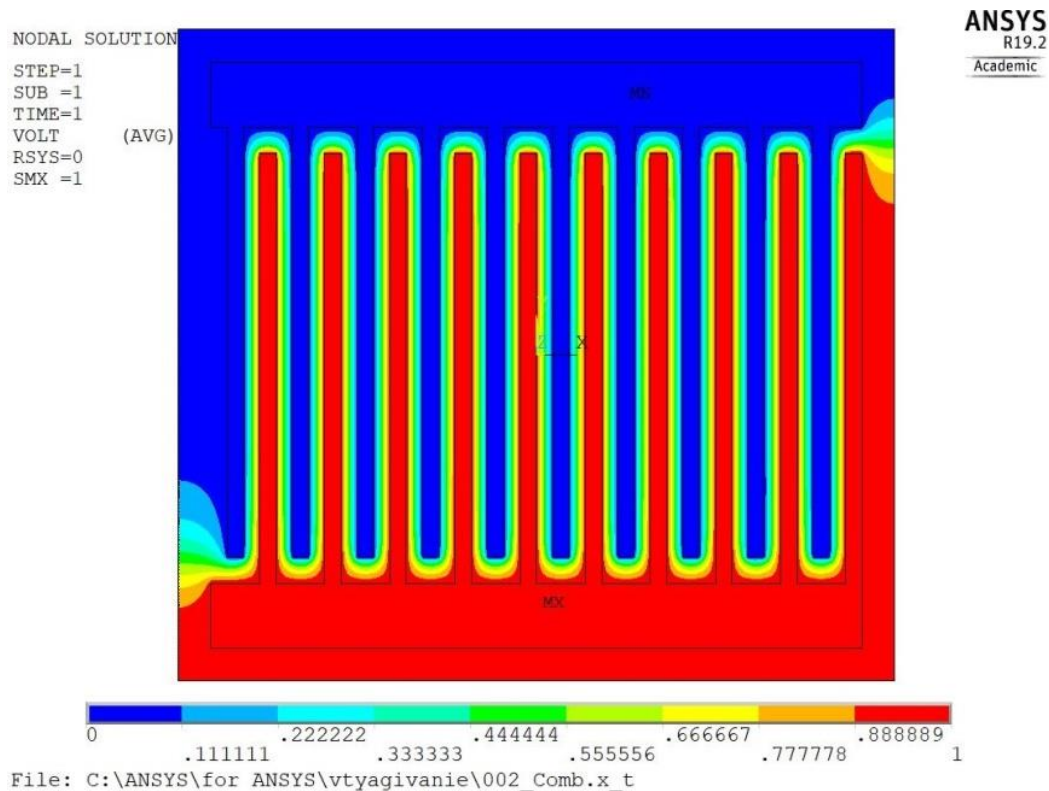


Рисунок 9 – распределение электрического потенциала электродной структуры с изменение площади перекрытия обкладок

3.1.4 Выводы по электродной структуре первого типа

Для сравнения трех методов расчета электрической емкости электродной структуры первого типа построен график зависимости емкости от перемещения электродной структуры (график 4).

По графику 4 можно увидеть, что зависимость электрической емкости от перемещения для электродной структуры первого типа является линейной. Каждый из методов дал разные результаты, однако графики метода конечных элементов и аналитического метода с учетом краевых эффектов находятся ближе друг к другу чем график аналитического метода без учета краевых эффектов. Кроме того, учитывая рисунок 12, можно сказать о том, что краевые эффекты необходимо учитывать в определении электрической емкости электродных структур микромеханических сенсоров, потому что без их учета погрешность измерения емкости будет высокой. Кроме того метод конечных

элементов позволяет наглядно увидеть изменение электрического поля вблизи краев электродной структуры.

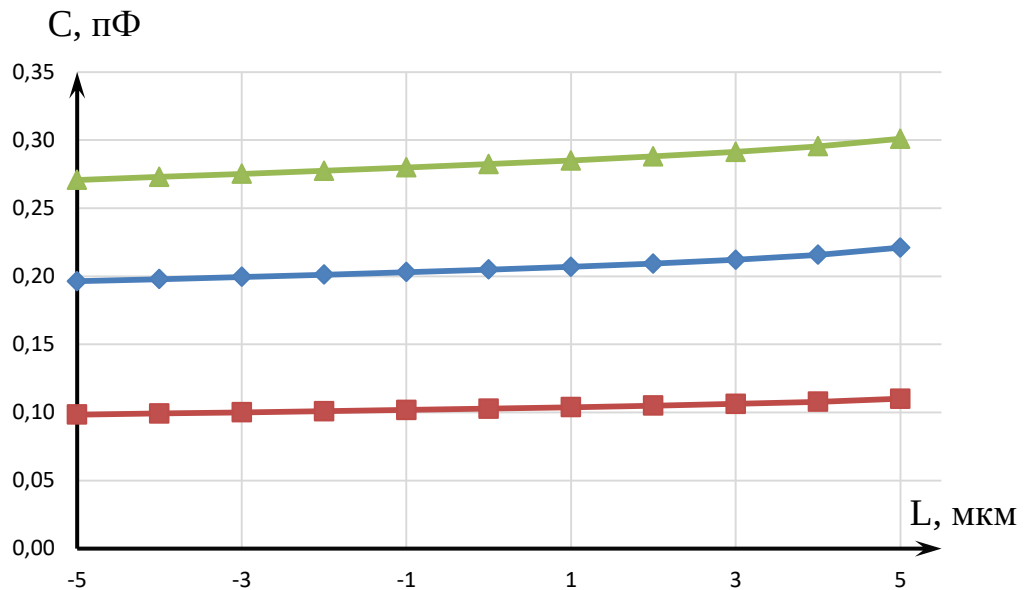


График 4 – Зависимость емкости от изменения площади перекрытия обкладок рассчитанной различными методами. Треугольники – МКЭ, ромбы – аналитический с учетом краевых эффектов, квадраты – аналитический без учета краевых эффектов

Чувствительность электродной структуры с изменением площади перекрытия обкладок по методу конечных элементов будет равна

$$S1 = \frac{dC}{dL} = \frac{0.1463 \text{ пФ}}{10 \text{ мкм}} = 0.003 \frac{\text{пФ}}{\text{мкм}}$$

Учитывая низкую чувствительность, можно сказать, что данная электродная структура с изменением площади перекрытия обкладок будет не эффективна в качестве сенсора, однако начальная емкость в точке равновесия (не смещенные гребенки) $C=0.2824$ пФ позволяет использовать такую структуру для создания усилия в микроэлектромеханических исполнительных устройствах.

3.2 Электродная структура второго типа

Электродная структура второго типа представляет собой гребенчатую структуру с длиной электродов 150 мкм, шириной электрода 5 мкм, толщиной 40 мкм, расстояние между соседними электродами составляет 8 и 15 мкм соответственно, изменяется расстояние между электродами, движение происходит вдоль оси X на ± 5 мкм (Рисунок 10).

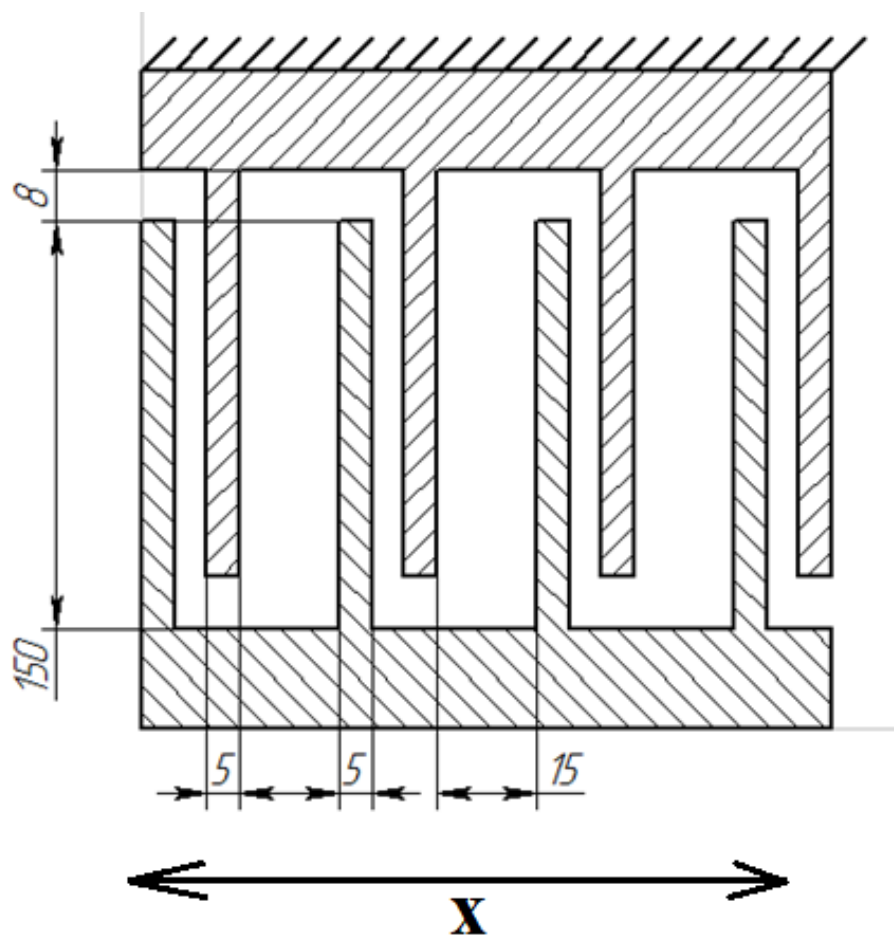


Рисунок 10 – электродная структура с изменением расстояния между обкладками

3.2.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов

Для расчета электрической емкости без учета краевых эффектов воспользуемся формулой идеального плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a, b - размеры обкладок конденсатора (электродов);

d - расстояние между пластинами.

В результате расчета электрической емкости без учета краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 5).

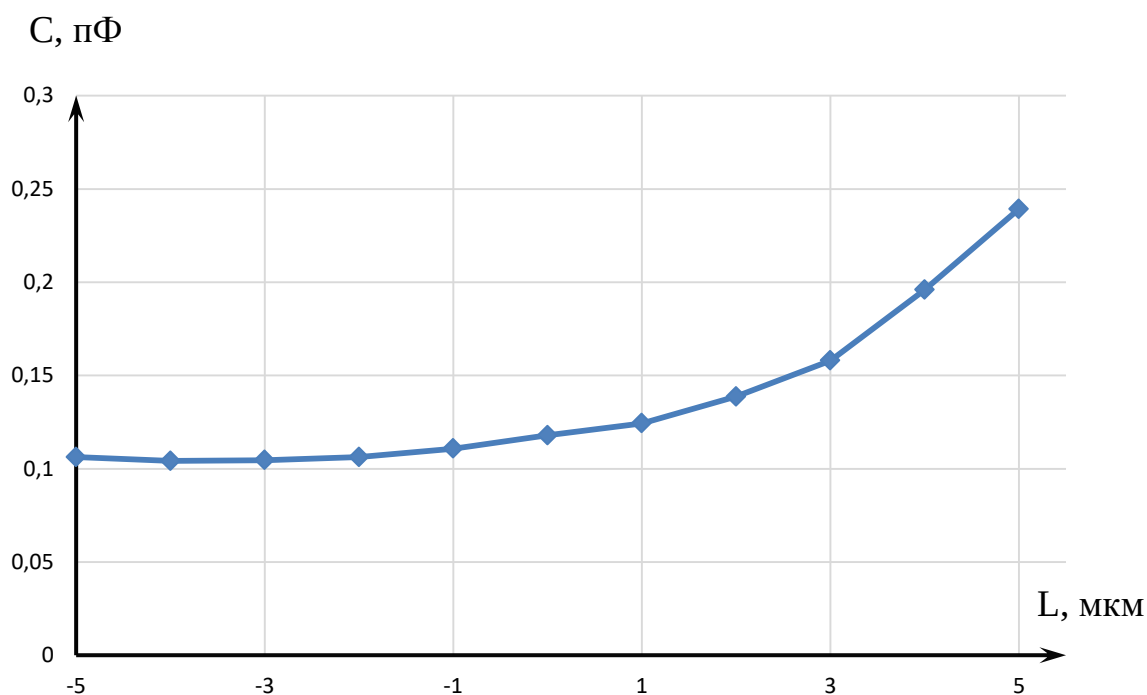


График 5 - Зависимость емкости от изменения расстояния между обкладками без учета краевых эффектов

3.2.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов

Для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов воспользуемся формулой представленной [4]:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(\frac{2\pi b}{d} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(\frac{2\pi a}{d} \right) \right],$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a – длина обкладки;

b – ширина обкладки;

d – расстояние между обкладками.

В результате расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 6).

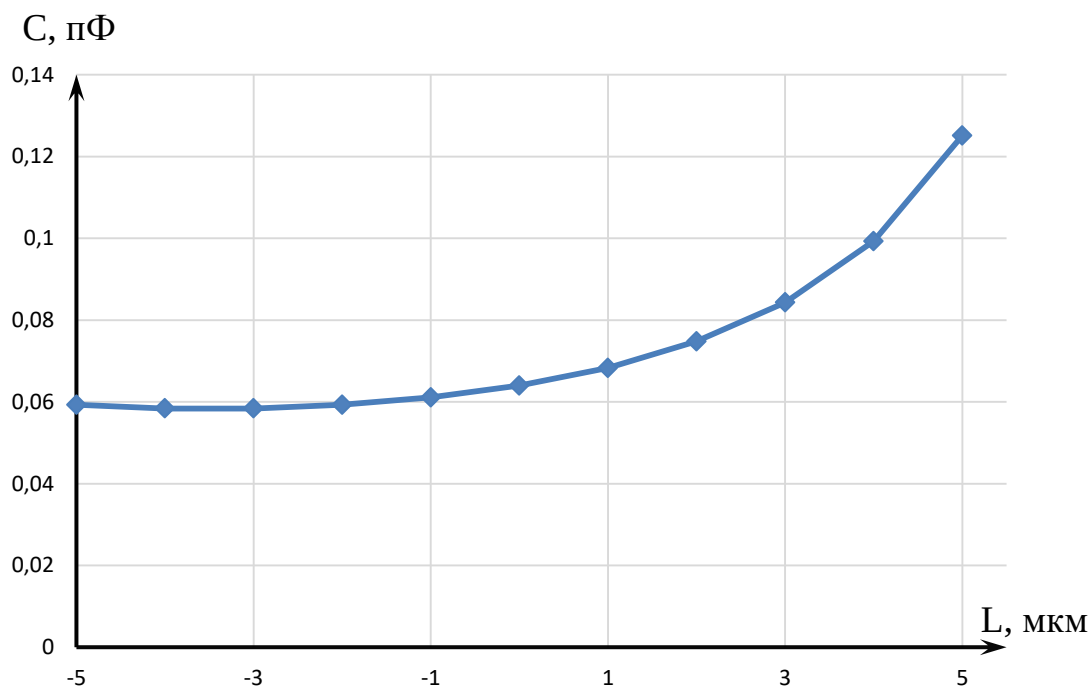


График 6 – Зависимость емкости от изменения расстояния между обкладками с учетом краевых эффектов

3.2.3 Метод конечных элементов

Была определена электрическая емкость методом конечных элементов при помощи математического моделирования в программе ANSYS. В

результате построен график зависимости электрической емкости от перемещения с учетом краевых эффектов (график 7).

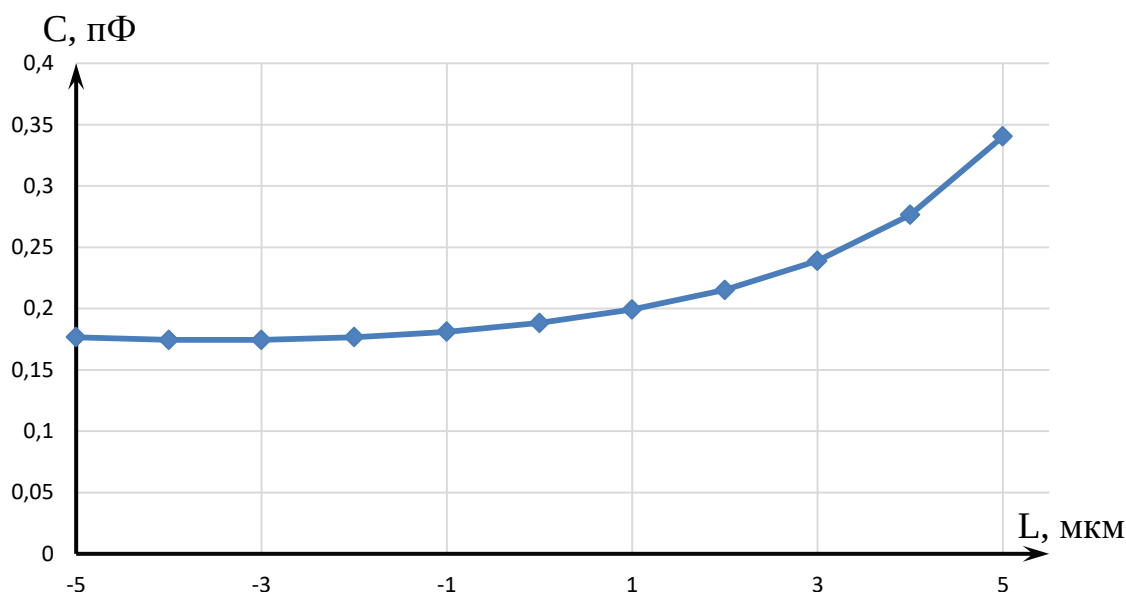


График 7 – Зависимость емкости от изменения расстояния между обкладками рассчитанной методом конечных элементов

Кроме того в процессе расчета методом конечных элементов был получен рисунок распределения электрического потенциала электродной структуры с изменением расстояния между обкладками (рисунок 11). На данном рисунке наглядно представлено искажение распределения электрического потенциала вблизи краев электродов, особенно это заметно на краях электродных структур, то есть на краях электродов происходит перераспределение потенциала.

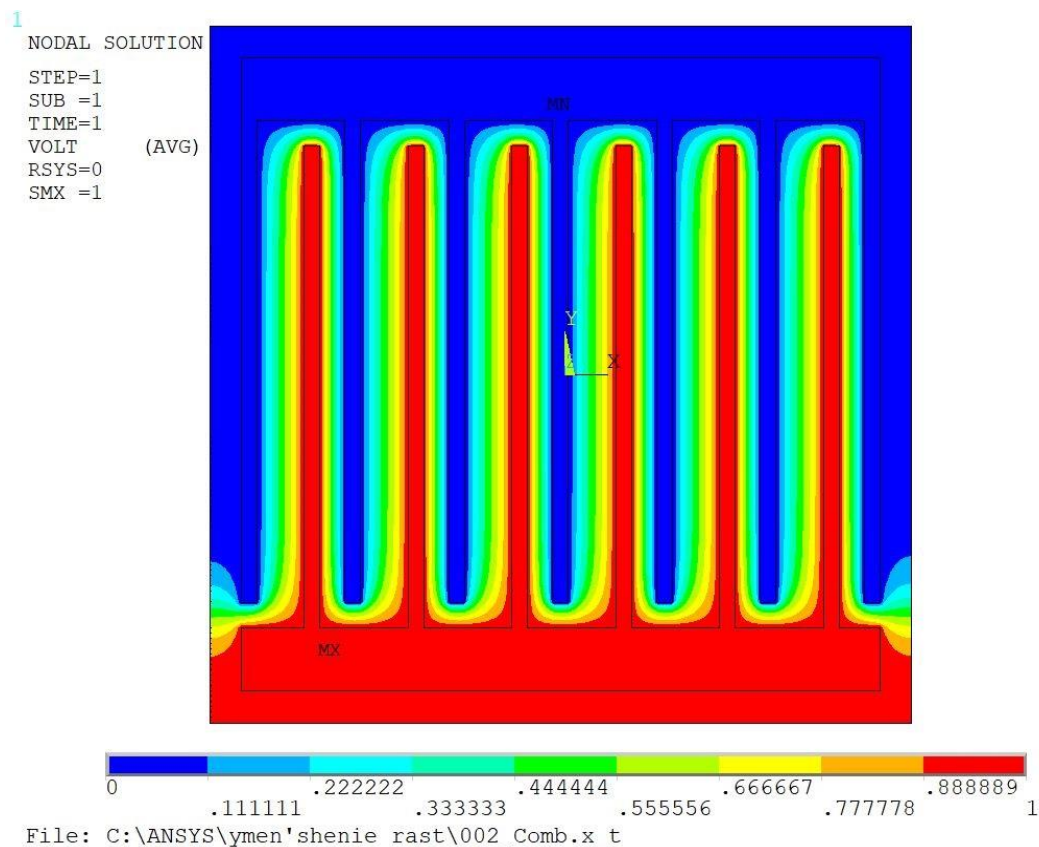


Рисунок 11 – распределение электрического потенциала электродной структуры с изменением расстояния между обкладками

3.2.4 Выводы по электродной структуре второго типа

Для сравнения трех методов расчета электрической емкости электродной структуры второго типа построен график зависимости емкости от перемещения электродной структуры (график 8).

По графику 8 можно увидеть, что зависимость электрической емкости от перемещения для электродной структуры второго типа является нелинейной. Каждый из методов дал разные результаты, однако графики метода конечных элементов и аналитического метода с учетом краевых эффектов находятся ближе друг к другу чем график аналитического метода без учета краевых эффектов. Кроме того, учитывая рисунок 13, можно сказать о том, что краевые эффекты необходимо учитывать в определении электрической емкости

электродных структур микромеханических сенсоров, потому что без их учета погрешность измерения емкости будет высокой.

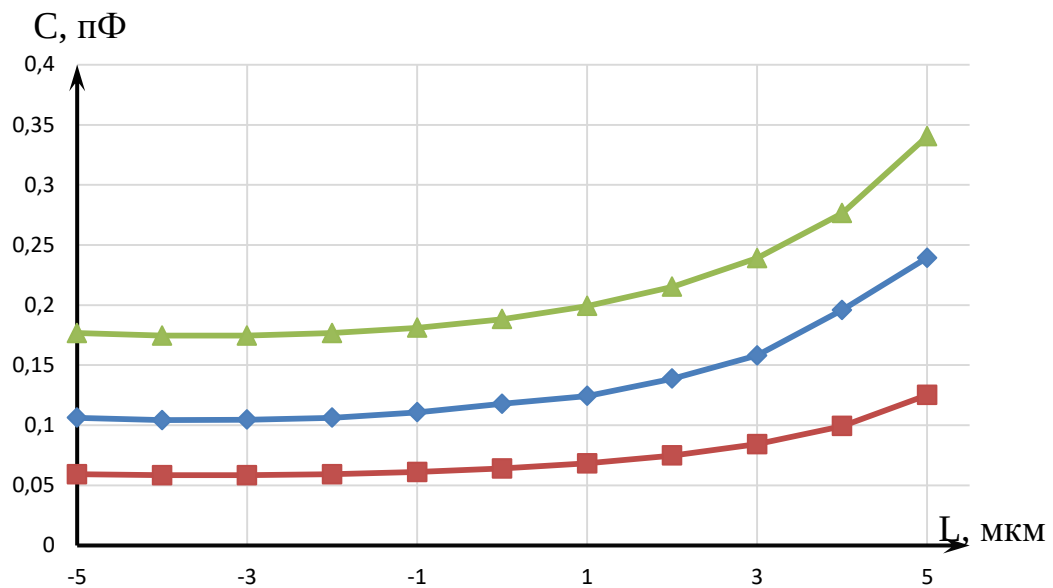


График 8 – Зависимость емкости изменения расстояния между обкладками рассчитанной различными методами. Треугольники – МКЭ, ромбы – аналитический с учетом краевых эффектов, квадраты – аналитический без учета краевых эффектов

Чувствительность электродной структуры с изменением расстояния между обкладками будет равна:

$$S2 = \frac{dC}{dL} = \frac{(0.3404 - 0.1767) \text{ пФ}}{10 \text{ мкм}} = 0.0164 \frac{\text{пФ}}{\text{мкм}}$$

Учитывая среднюю чувствительность, можно сказать, что данная электродная структура с расстояния между гребенками будет достаточно эффективна в качестве сенсора, кроме того, начальная емкость в точке равновесия (не смещенные гребенки) $C=0.1883$ пФ позволяет использовать

такую структуру для создания усилия в микроэлектромеханических исполнительных устройствах.

3.3 Электродная структура третьего типа

Электродная структура третьего типа представляет собой две пластины - электрода, длина и ширина которых равна 200 мкм, толщина 16 мкм, а расстояние между пластинами составляет 8 мкм. В данной структуре изменяется расстояние между пластинами - электродами, движение происходит вдоль оси X на ± 5 мкм (Рисунок 12).

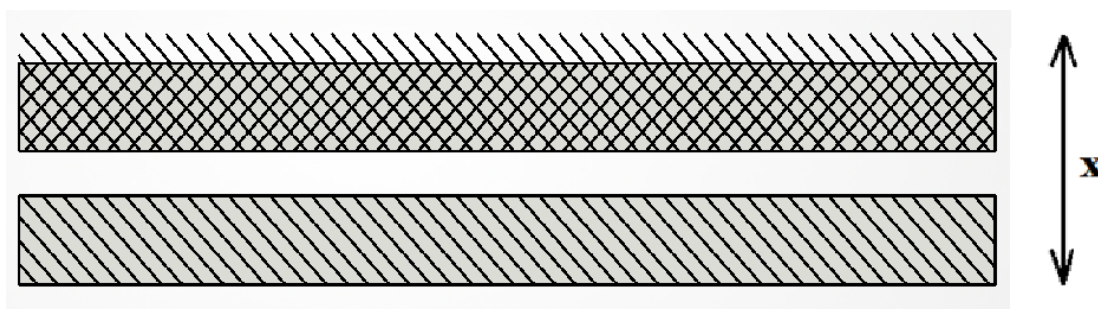


Рисунок 12 – электродная структура с изменением зазора между двумя пластинами

3.3.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов

Для расчета электрической емкости без учета краевых эффектов воспользуемся формулой идеального плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b}{d}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a, b - размеры обкладок конденсатора (электродов);

d - расстояние между пластинами.

В результате расчета электрической емкости без учета краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 9).

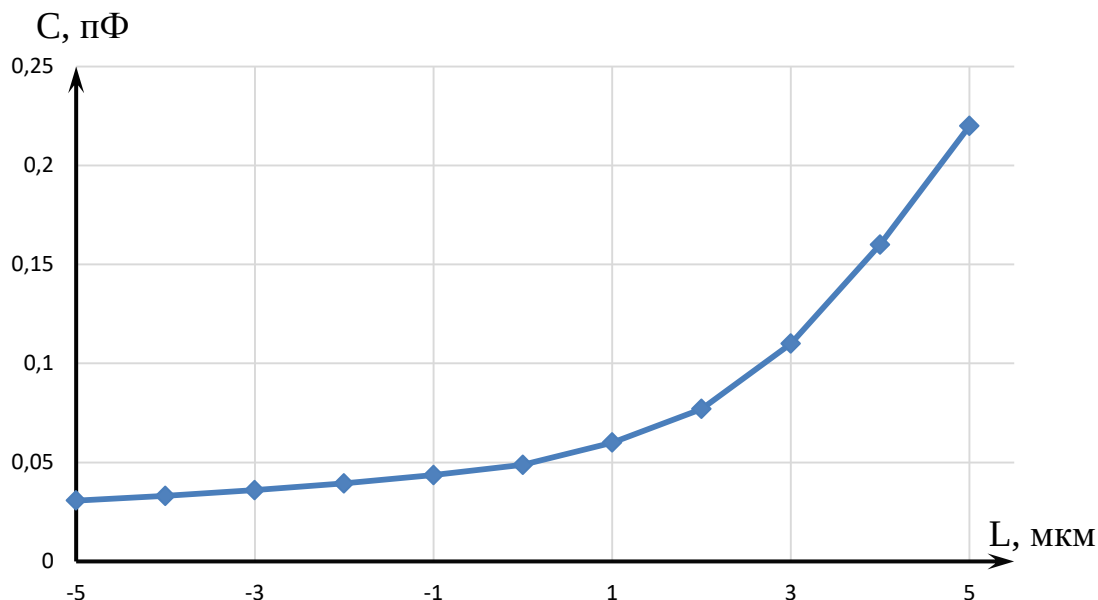


График 9 - Зависимость емкости от изменения зазора между двумя пластинами без учета краевых эффектов

3.3.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов

Для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов воспользуемся формулой представленной [4]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(\frac{2\pi b}{d} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(\frac{2\pi a}{d} \right) \right],$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 — электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a — длина обкладки;

b — ширина обкладки;

d — расстояние между обкладками.

В результате расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 10).

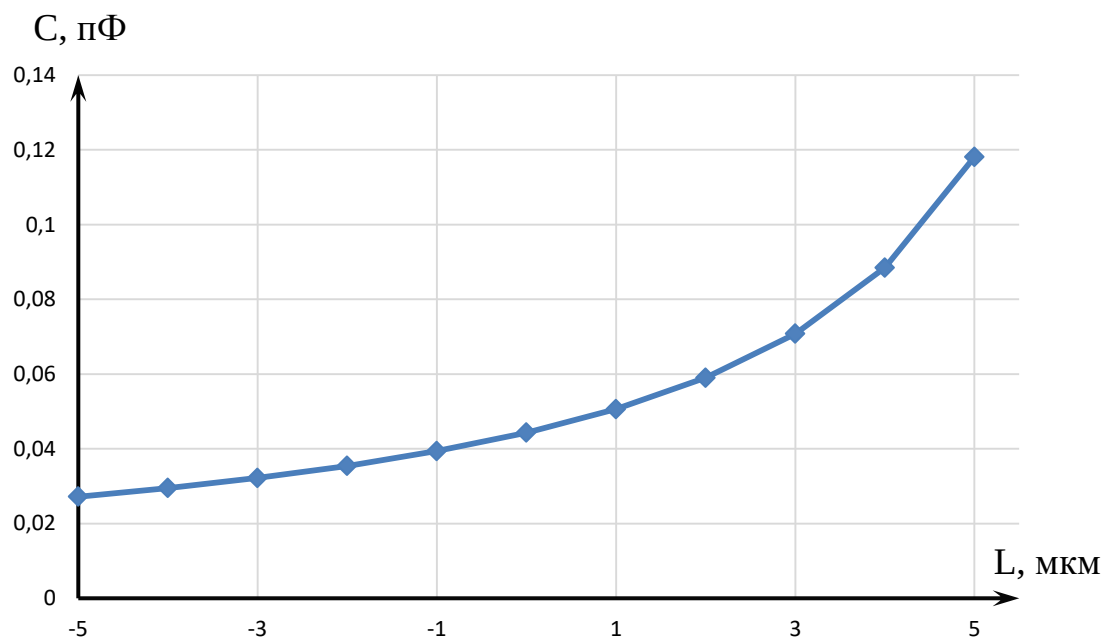


График 10 – Зависимость емкости от изменения зазора между двумя пластинами с учетом краевых эффектов

3.3.3 Метод конечных элементов

Была определена электрическая емкость методом конечных элементов при помощи математического моделирования в программе ANSYS. В результате построен график зависимости электрической емкости от перемещения с учетом краевых эффектов (график 11).

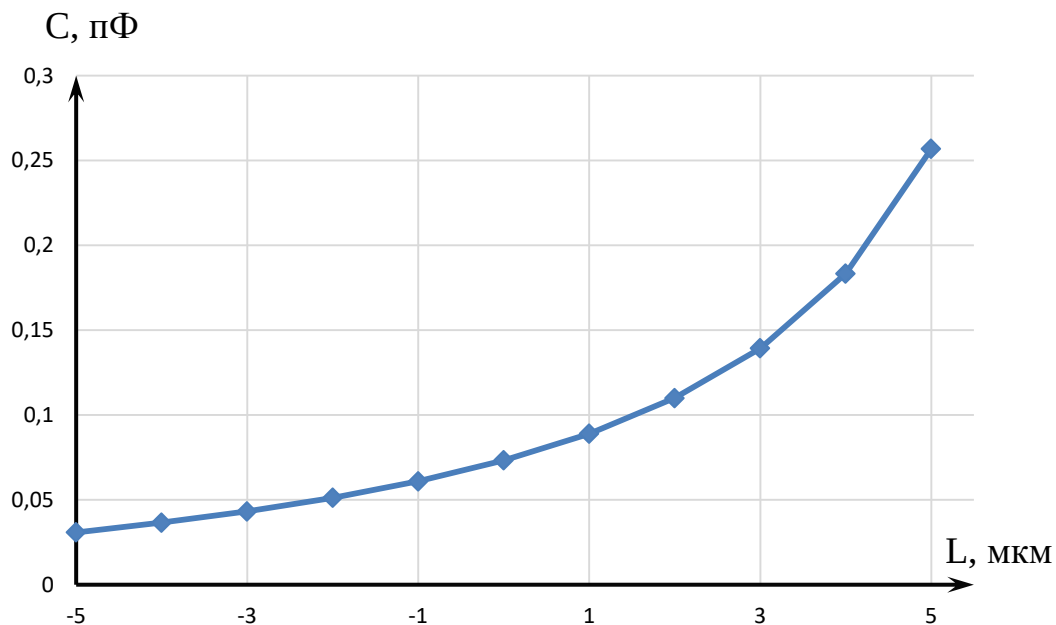


График 11 – Зависимость емкости от изменения зазора между двумя пластинами методом конечных элементов

Кроме того в процессе расчета методом конечных элементов был получен рисунок распределения электрического потенциала электродной структуры с изменением расстояния между обкладками (рисунок 13). На данном рисунке наглядно представлено искажение распределения электрического потенциала вблизи краев электродов, особенно это заметно на краях электродных структур, то есть на краях электродов происходит перераспределение потенциала.

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
VOLT (AVG)
RSYS=0
SMX =1

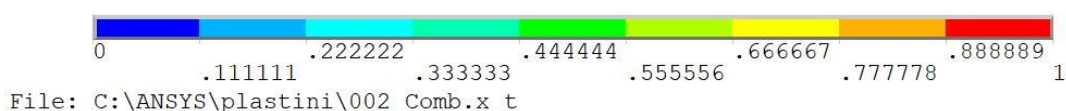
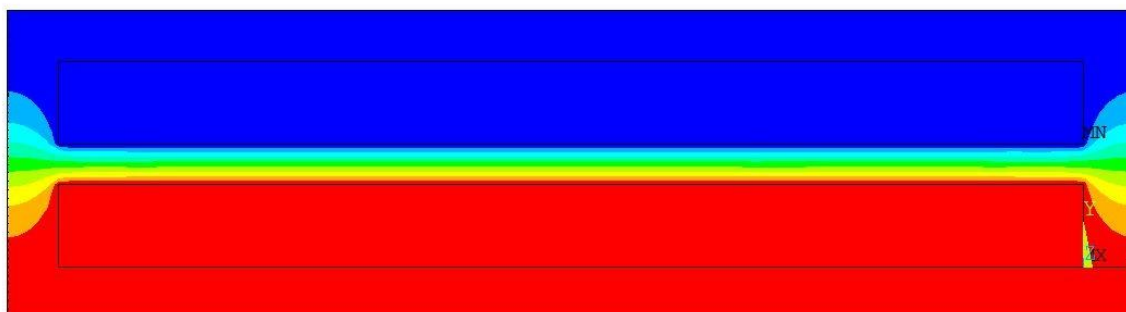


Рисунок 13 – распределение электрического потенциала электродной структуры с изменением зазора между двумя пластинами

3.3.4 Выводы по электродной структуре третьего типа

Для сравнения трех методов расчета электрической емкости электродной структуры третьего, в которой изменяется величина зазора между двумя пластинами, типа построен график зависимости емкости от перемещения электродной структуры (график 12).

По графику 12 можно увидеть, что зависимость электрической емкости от перемещения для электродной структуры третьего типа является нелинейной. Каждый из методов дал разные результаты, однако графики метода конечных элементов и аналитического метода с учетом краевых эффектов находятся ближе друг к другу чем график аналитического метода без учета краевых эффектов. Кроме того, учитывая рисунок 14, можно сказать о том, что краевые эффекты необходимо учитывать в определении электрической

емкости электродных структур микромеханических сенсоров, потому что без их учета погрешность измерения емкости будет высокой.

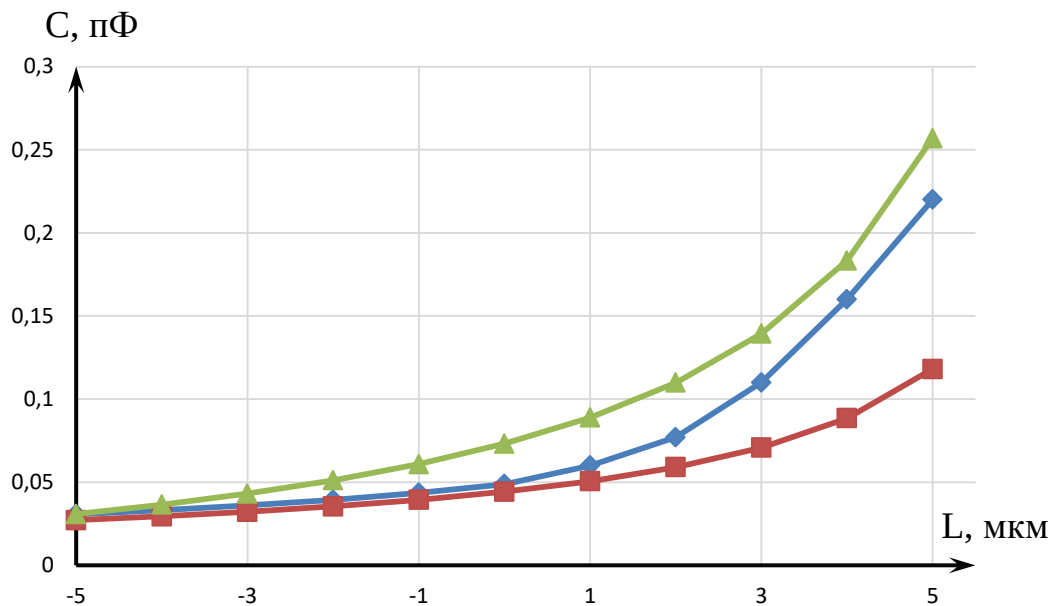


График 12 – Зависимость емкости от изменения зазора между двумя пластинами рассчитанной различными методами. Треугольники – МКЭ, ромбы – аналитический с учетом краевых эффектов, квадраты – аналитический без учета краевых эффектов

Чувствительность электродной структуры с изменением расстояния между обкладками будет равна:

$$S3 = \frac{dC}{dL} = \frac{(0.2568 - 0.0308) \text{ пФ}}{10 \text{ мкм}} = 0.0226 \frac{\text{пФ}}{\text{мкм}}$$

Учитывая высокую чувствительность, можно сказать, что данная электродная структура с изменением расстояния между пластинами-электродами будет эффективна в качестве сенсора, однако начальная емкость в точке равновесия (не смещенные гребенки) $C=0.0732$ пФ

не позволяет эффективно использовать такую структуру для создания усилия в микроэлектромеханических исполнительных устройствах.

3.4 Электродная структура четвертого типа

Электродная структура четвертого типа представляет собой две неподвижных гребенки и одну подвижную. с длиной электродов 67 мкм, шириной электрода 5 мкм, толщиной 40 мкм, расстояние между соседними электродами составляет 8 и 15 мкм соответственно, изменяется расстояние между электродами, движение происходит вдоль оси X на ± 5 мкм (Рисунок 14).

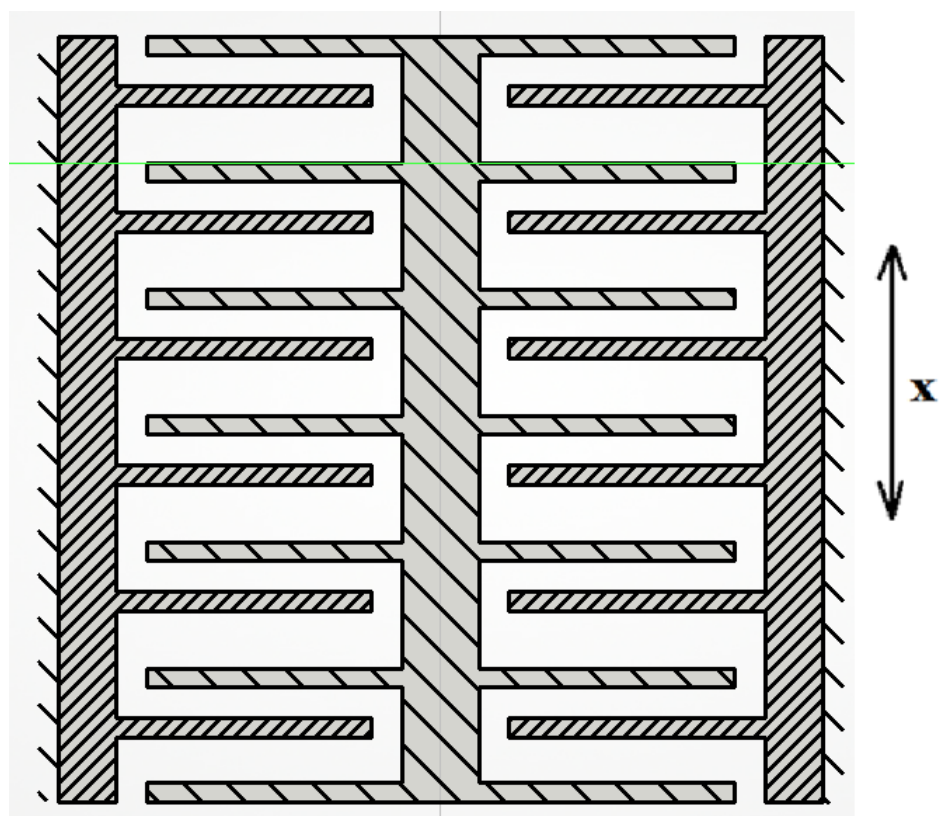


Рисунок 14 – электродная структура с изменением расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной

3.4.1 Аналитический метод без учета краевых эффектов

Для расчета электрической емкости без учета краевых эффектов воспользуемся формулой идеального плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a, b - размеры обкладок конденсатора (электродов);

d - расстояние между пластинами.

В результате расчета электрической емкости без учета краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 13).

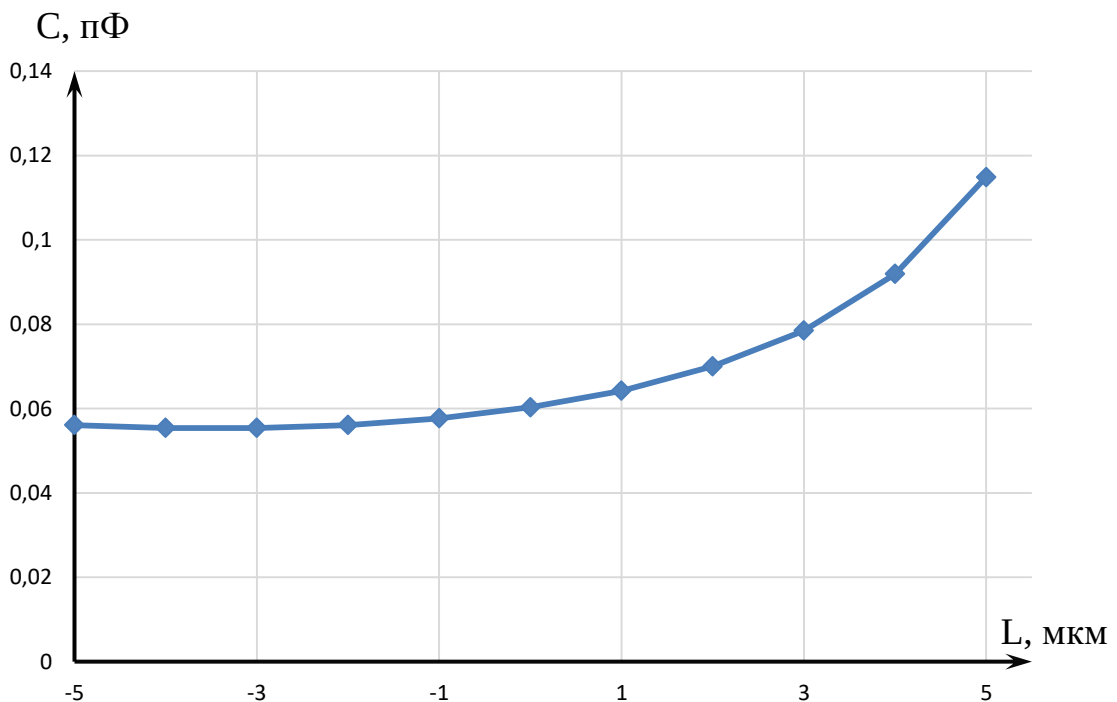


График 13 - Зависимость емкости от изменения расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной без учета краевых эффектов

3.4.2 Аналитический метод с учетом краевых эффектов

Для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов воспользуемся формулой представленной Х.Б. Пальмером [4]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln(2\pi) \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{a} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln(2\pi) \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{b} \right) \right],$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 — электрическая постоянная, численно равная $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

a — длина обкладки;

b — ширина обкладки;

d — расстояние между обкладками.

В результате расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов был построен график зависимости электрической емкости от перемещения (график 14).

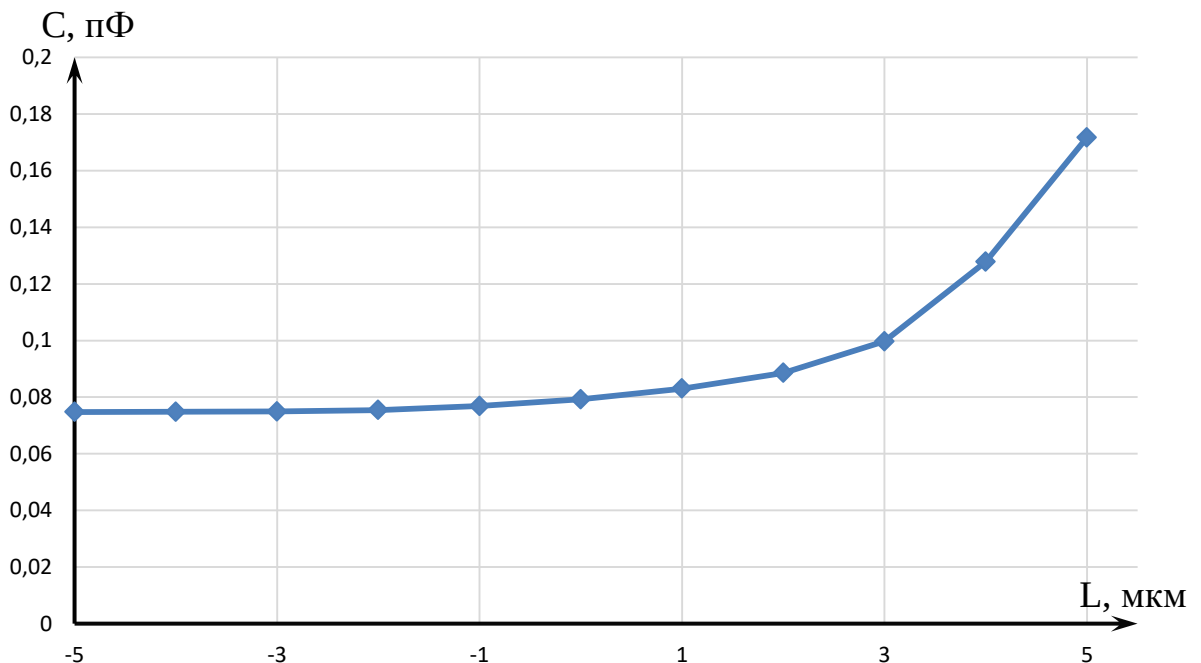


График 14 – Зависимость емкости от расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной с учетом краевых эффектов

3.4.3 Метод конечных элементов

Была определена электрическая емкость методом конечных элементов при помощи математического моделирования в программе ANSYS. В результате построен график зависимости электрической емкости от перемещения с учетом краевых эффектов (график 15).

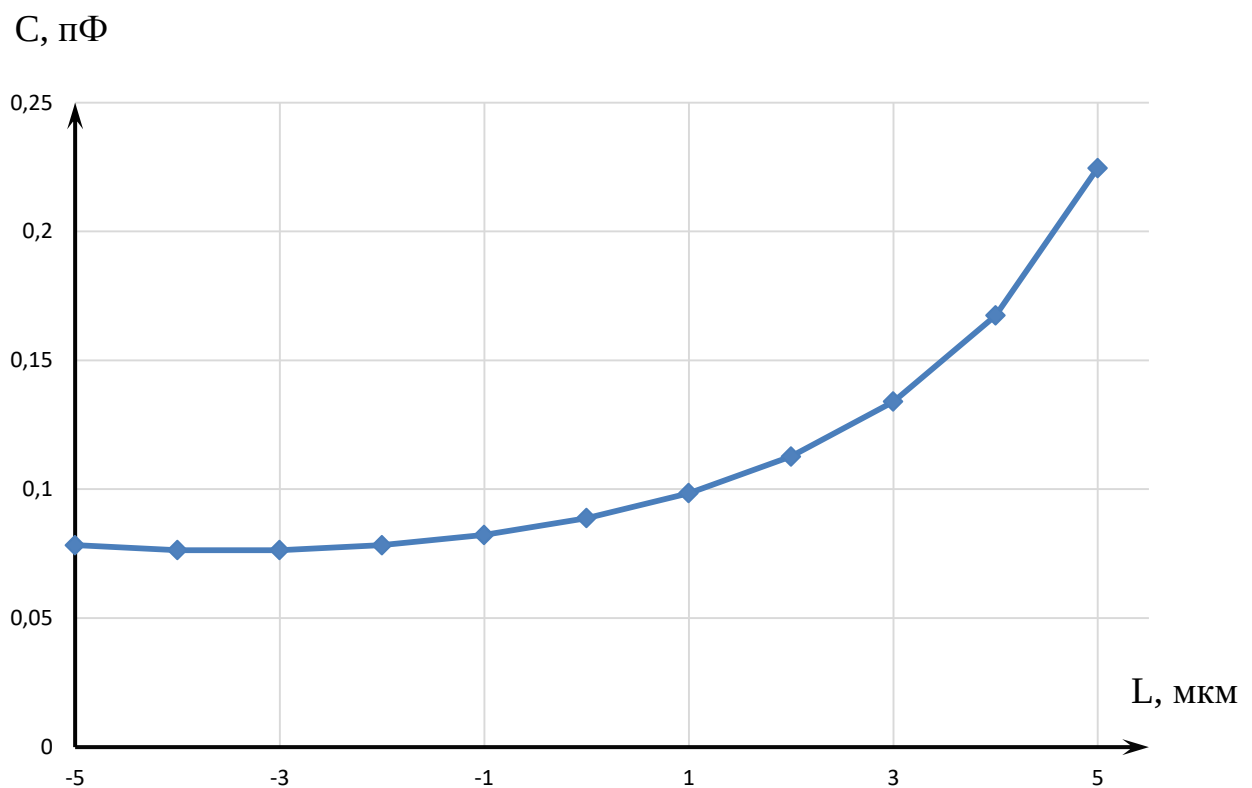


График 15 – Зависимость емкости от расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной рассчитанной методом конечных элементов

Кроме того в процессе расчета методом конечных элементов был получен рисунок распределения электрического потенциала электродной структуры с изменением расстояния между двумя неподвижными и одно подвижной гребенками (рисунок 15). На данном рисунке наглядно представлено искажение

распределения электрического потенциала вблизи краев электродов, особенно это заметно на краях электродных структур, то есть на краях электродов происходит перераспределение потенциала.

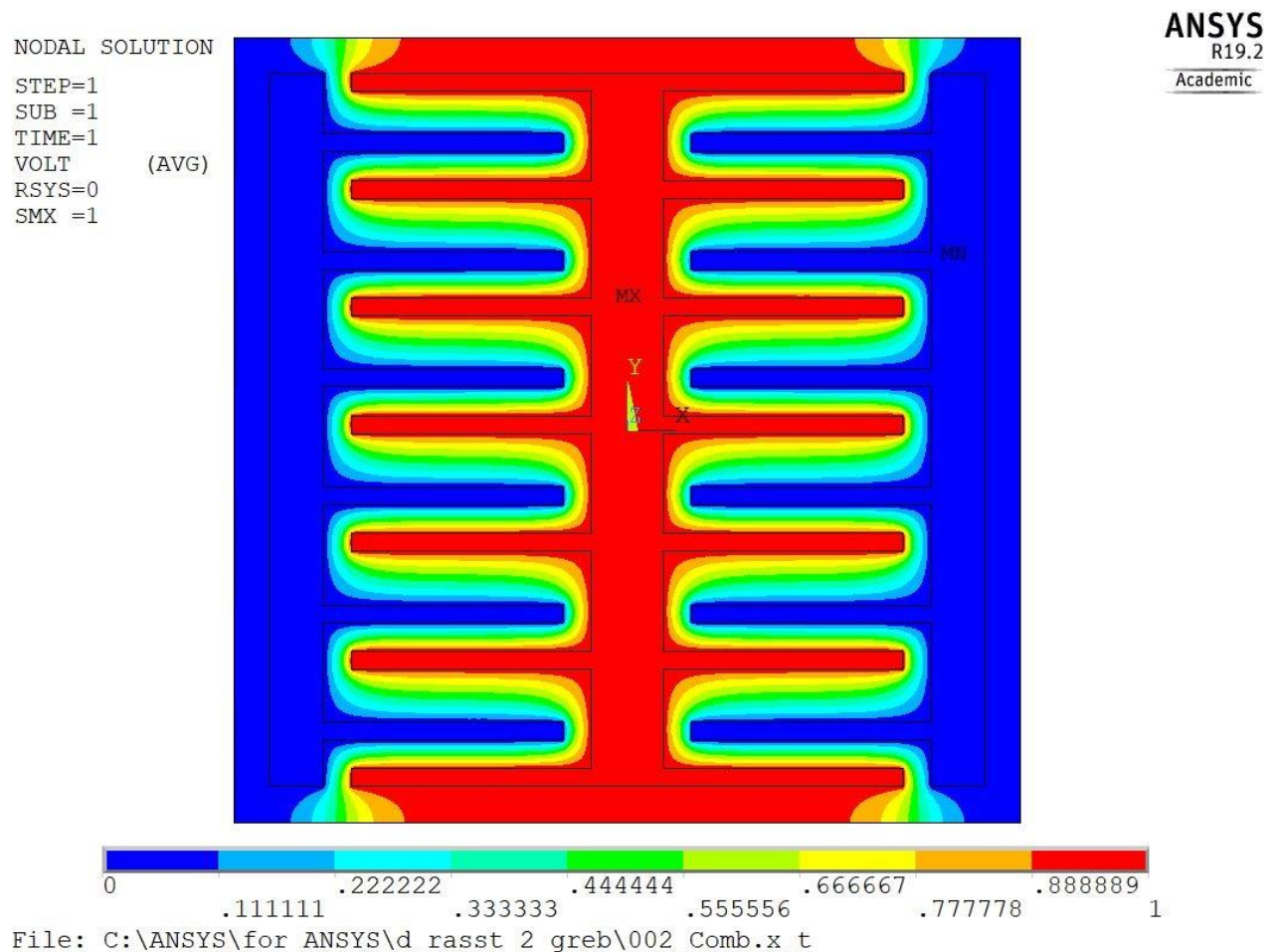


Рисунок 15 – распределение электрического потенциала электродной структуры с изменением расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной

3.4.4 Выводы по электродной структуре четвертого типа

Для сравнения трех методов расчета электрической емкости электродной структуры четвертого типа построен график зависимости емкости от перемещения электродной структуры (график 16).

По графику 16 можно увидеть, что зависимость электрической емкости от перемещения для электродной структуры четвертого типа является нелинейной. Каждый из методов дал разные результаты, однако графики метода конечных элементов и аналитического метода с учетом краевых эффектов находятся ближе друг к другу чем график аналитического метода без учета краевых эффектов. Кроме того, учитывая рисунок 16, можно сказать о том, что краевые эффекты необходимо учитывать в определении электрической емкости электродных структур микромеханических сенсоров, потому что без их учета погрешность измерения емкости будет высокой. Кроме того метод конечных элементов позволяет наглядно увидеть изменение электрического поля в близи краев электродной структуры.

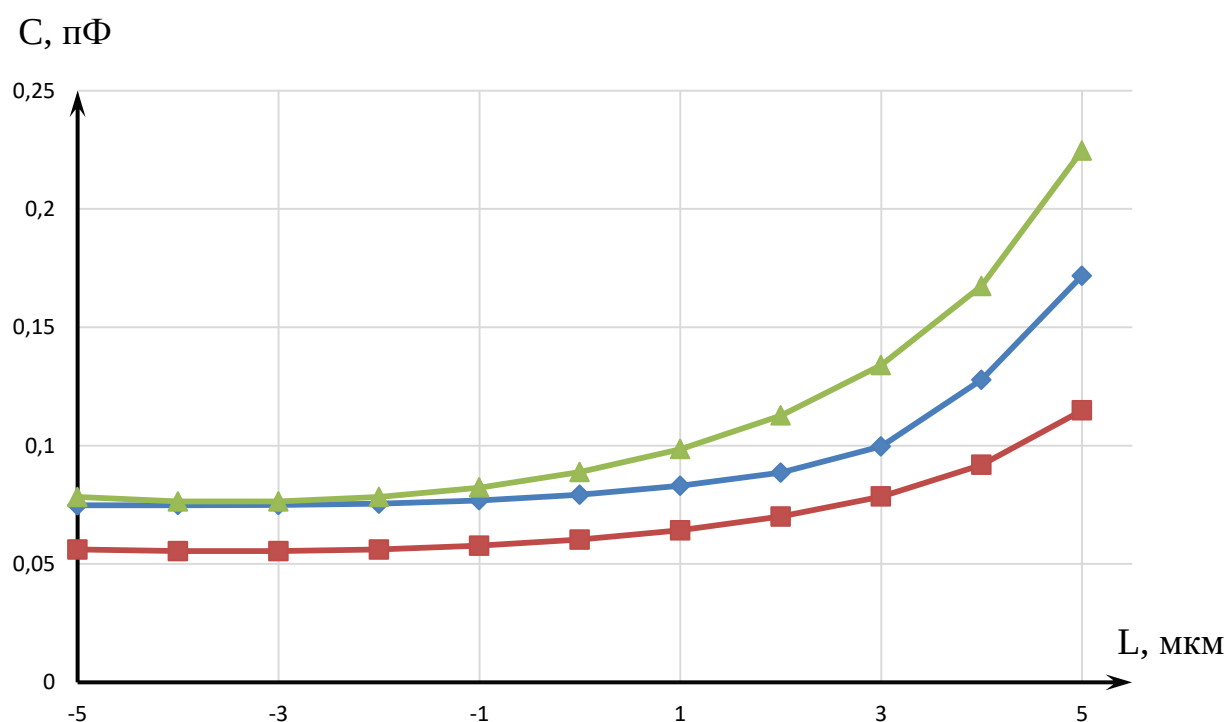


График 16 – Зависимость емкости изменения расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной рассчитанной различными методами. Треугольники – МКЭ, ромбы – аналитический с учетом краевых эффектов, квадраты – аналитический без учета краевых эффектов

Чувствительность электродной структуры с двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной по методу конечных элементов будет равна

$$S_4 = \frac{dC}{dL} = \frac{(0.2246 - 0,0783) \text{ пФ}}{10 \text{ мкм}} = 0.014 \frac{\text{пФ}}{\text{мкм}}$$

Учитывая среднюю чувствительность, можно сказать, что данная электродная структура с изменением расстояния между двумя подвижными электродными структурами и одной неподвижной будет достаточно эффективна в качестве сенсора, однако низкая начальная емкость в точке равновесия (не смещенные гребенки) $C=0.088$ пФ не позволяет эффективно использовать такую структуру для создания усилия в микроэлектромеханических исполнительных устройствах.

3.5 Заключение по разделу

В ходе работы по данному разделу были разработаны четыре электродных структуры для электростатических микромеханических систем, проведен их анализ, а так же даны рекомендации по их применению. Таким образом электродные структуры первого типа предпочтительнее использовать для создания усилия, электродные структуры третьего и четвертого типов предпочтительнее использовать в качестве измерительных структур, а электродная структура второго типа возможно эффективно использовать как для создания усилия, так и для измерений.

Кроме того было проведено сравнение методов расчета электрических емкостей для микромеханических систем. Для МЭМС следует рассчитывать электрическую емкость учитывая краевые эффекты, так как при расчете аналитическим методом без учета краевых эффектов возникает значительная погрешность. Аналитический метод с учетом краевых эффектов удобно

использовать и легко применять, но для каждой формулы есть ограничения и границы применимости. Метод конечных элементов позволяет несколько автоматизировать процесс расчета, но требует мощной вычислительной техники и достаточно сложен в освоении.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Прежде, чем проводить сегментирование рынка, необходимо выделить критерии, согласно которым будет составлена карта рынка. В качестве таких критериев, можно рассматривать месторасположение производства – отечественное и зарубежное; отрасль применения – военная, бытовая, промышленная, авиационная; вид выпускаемой продукции – микроэлектромеханические системы (датчики, сенсоры, актюаторы); размер – крупный, средний, мелкий.

В качестве двух наиболее важных критериев целесообразно выделить наиболее значимые для рынка данного продукта: месторасположение производства и область применения МЭМС. Результаты построения карты сегментирования рынка представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Область применения			
	Средства вооружения	Потребительская электроника	Средства передвижения	Промышленная электроника
Зарубежные				
Отечественные				

Синий - низкая конкуренция, красный - высокая конкуренция

Исходя из полученных значений таблицы выше, можно увидеть, в каких нишах в России уровень конкуренции низок. Таким образом, разработка ориентирована на производственную сферу применения.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательской разработки для исследования ее внешней и внутренней среды.

Первый этап – заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, а также в выявлении возможностей и угроз для реализации разработки.

Сильные стороны:

- Использование электростатических структур (наиболее распространенных);
- Анализ нескольких электродных структур;
- Расчет электрических емкостей при помощи аналитических методов и метода конечных элементов;
- Возможность использования отечественных технологий производства.

Слабые стороны:

- Отсутствие расчетов методом граничных элементов;
- отсутствие анализа микроэлектромеханических систем основанных на иных физических принципах;

Возможности:

- Использование инновационной структуры ТПУ;
- Привлечение инвесторов с помощью различных платформ;
- Государственное финансирование разработки;
- Увеличение спроса, за счет привлечения новых рынков;
- Использование отечественных производственных предприятий.

Угрозы:

- Повышенная конкуренция;

– Отсутствие спроса в связи с небольшим количеством производственных предприятий, которые обладают необходимыми технологиями для производства;

– Отсутствие интереса инвесторов, в том числе государства;

Все вышеперечисленные особенности, позволяют наглядно увидеть преимущества и недостатки проекта. Оценить возможные риски проекта. Далее переходим к осуществлению второго этапа.

Второй этап позволяет выявить соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательской разработки внешним условиям окружающей среды. Исходя из полученных соответствий или несоответствий можно выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

На данном этапе были построены интерактивные матрицы проекта (таблицы 3-6), которые помогают разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (слабое соответствие); «0» - если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 3 – Интерактивная матрица проекта сильных сторон и возможностей

	Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4
Возможности проекта	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+
	B4	+	+	+	+
	B5	-	+	+	-

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта сильных сторон и угроз

	Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4
Угрозы проекта	У1	0	+	+	+
	У2	-	-	-	+
	У3	-	-	-	+

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта слабых сторон и возможностей

	Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2
Возможности проекта	B1	+	-
	B2	+	+
	B3	+	+
	B4	+	+
	B5	-	-

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта слабых сторон и угроз

	Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2
Угрозы проекта	У1	+	+
	У2	-	-
	У3	+	+

На третьем этапе, составляется таблица SWOT анализа (таблица 7), состоящая из данных, которые были получены на 1 и 2 этапе.

Таблица 7 – SWOT анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Использование электростатических структур (наиболее распространенных); С2. Анализ нескольких электродных структур; С3. Расчет электрических емкостей при помощи аналитических методов и метода конечных элементов; С4. Возможность использования отечественных технологий производства;	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие расчетов методом граничных элементов; Сл2. Отсутствие анализа микроэлектромеханических систем основанных на иных физических принципах;
Угрозы: У1. Повышенная конкуренция; У2. Отсутствие спроса на новую технологию; У3. Отсутствие интереса инвесторов, в том числе государства;	Действующие исследования в области электродных структур МЭМС со стороны зарубежных и отечественных производителей могут привести к снижению конкурентноспособности данной разработки.	Более полная и детальная разработка и анализ электродных структур МЭМС может привести к большему интересу со стороны производственных предприятий, благодаря чему предприятия начнут внедрять необходимые технологии производства.

Продолжение таблицы 7

Возможности:	Преимущества разработки,	Использование
В1. Использование инновационной структуры ТПУ;	могут помочь привлечь различных инвесторов.	инновационной структуры ТПУ позволит провести необходимые
В2. Привлечение инвесторов с помощью различных платформ;	Использование инновационной структуры ТПУ также может увеличить конкурентноспособность разработки.	дополнительные исследования, что в свою очередь может увеличить интерес у
В3. Государственное финансирование разработки;		производственных предприятий.
В4. Увеличение спроса, за счет привлечения новых рынков;		
В5. Уменьшение стоимости производства двигателя за счет дополнительных лабораторных исследований;		
В6. Использование отечественных комплектующих.		

Результаты SWOT-анализа наглядно показывают сильные и слабые стороны научно-исследовательской работы, а также ее возможности и угрозы. Полученные данные позволяют найти пути улучшения разработки,

Таким образом, согласно SWOT-анализу можно наглядно увидеть, какие сильные и слабые стороны имеет научно-исследовательская работа, а также ее возможности и угрозы. Исходя из полученных данных, можно разработать

варианты улучшения разработки, тем самым сделав ее более привлекательной на рынке.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения работы необходимо осуществлять ее планирование. Оно происходит в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Определение структуры работ необходимо для правильного планирования, финансирования и определения трудоемкости выполнения НИР. Для этого необходимо разбить ее на этапы. Этап – это часть работы, имеющая самостоятельное значение и являющаяся объектом планирования и финансирования.

Данную НИР можно разделить на следующие этапы: а) Разработка технического задания; б) Выбора направления исследования; в) Теоретические и экспериментальные исследования; г) Обобщение и оценка результатов; д) Оформление отчета НИР.

В работе принимали участие 2 человека: научный руководитель (НР) и инженер (И). Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 8:

Таблица 8 – перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	НР, И
Выбора направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	И
	3	Выбор направления исследования	НР
	4	Календарное планирование работ по теме	НР
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение теоретических материалов	И
	6	Теоретический расчет	И
	7	Компьютерное моделирование	И
	8	Обработка полученных данных	И
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ полученных результатов, выводы	И, НР
	10	Оценка эффективности полученных результатов	И
Оформление отчета НИР	11	Составление пояснительной записки	И, НР

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется следующая формула:

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

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;
 $t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pt} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

где $T_{\text{кал}} = 365$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 52$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1.22$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу 9.

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исполнитель	Трудоемкость работ (чел-дни)			Длительность работ (дн.)			
					T_{pi}		T_{ki}	
		$t_{\min i}$	$t_{\max i}$	$t_{ожi}$	НР	И	НР	И
Составление и утверждение технического задания	НР	2	4	2.8	2.8	-	3.4	-
Подбор и изучение материалов по тематике	И	14	20	16.4	16.4	16.4	20	20
Календарное планирование работ по теме	НР	1	3	2.2	2.2	-	2.7	-
Разработка электродных структур	И	25	35	29	-	29	-	35.4
Расчет необходимых данных	И	3	5	3.8	-	3.8	-	4.6
Обработка полученных данных	И	10	15	12	-	12	-	14.7
Анализ полученных результатов, вывод	НР, И	3	5	3.8	1.6	1.6	2	2
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	2	5	3.2	-	3.2	-	3.96
Оформление материала	НР, И	2	4	2.8	1.4	1.4	1.36	1.36
Подведение итогов	НР, И	1	3	1.8	0.9	0.9	1.1	1.1
Предзащита	И	1	1	1	-	1	-	1.22
Корректировка ВКР по результатам предзащиты	И	2	4	2.8	-	2.8	-	3.4

4.2.4 Построение графика работ

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными по времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

На основе таблицы 9 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 9 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица – 10 Календарный план-график проведения ВКР по теме «Разработка электродных структур микромеханических сенсоров»

Название работы	Исполнитель	$T_{кi}$	Продолжительность выполнения работ														
			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление и утверждение ТЗ	НР	3.4															
Подбор и изучение материалов по теме	И	20															
Календарное планирование	НР	2.7															
Разработка электродных структур	И	35.4															
Расчет необходимых данных	И	4.6															
Обработка полученных данных	И	14.7															
Анализ полученных результатов, вывод	НР, И	2															
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	4															
Оформление материала	НР, И	1.36															
Подведение итогов	НР, И	1.1															
Предзащита	И	1.22															
Корректировка ВКР по результатам предзащиты	И	3.4															

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НИР)

4.3.1 Расчет материальных затрат НИР

В ходе расчета материальных затрат НИР, учитывается стоимость всех материалов, используемых для реализации комплекса работ. В стоимость материальных затрат входят:

- Сырье и материалы
- Канцелярские принадлежности
- Покупные материалы

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расхi}$$

где m — количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении диплома;

$N_{расхi}$ — количество материальных ресурсов, планируемых к использованию при выполнении диплома (шт., кг, м и т.д.);

$Ц_i$ — цена приобретенной единицы i -го вида (руб./шт., руб./кг, руб./м и т.д.);

k_T — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Материальные затраты необходимые для данной разработки занесем в таблицу (таблица 11).

Таблица 11 – Материальные затраты необходимые для разработки

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага (А4)	Пачка	1	270	270
Ручка	Шт.	1	55	55
Интернет	М/бит (пакет)	1	350	350
Итого				675

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации сводятся в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования тыс. руб.
1	Персональный компьютер	1	42000	48300

Продолжение таблицы 12

2	Настольная лампа	1	800	920
3	Принтер	1	5750	6612
Итого				55832

4.3.3 Заработная плата исполнителей темы

В данной статье рассчитывается основная и дополнительная заработная плата инженерно-технических и научных работников. Заработная плата складывается из основной и дополнительной, и рассчитывается по формуле:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата (руб.);

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (руб.);

Сначала рассчитаем основную заработную плату по формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата (руб.);

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемая работником.

Средняя заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника (руб.);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени (Таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	44	48
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	56	28
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	275

Месячный должностной оклад работника рассчитывается исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$$

$З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке (руб.);

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок (0,2-0,5);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент 1,3 (для г. Томска).

Таблица 14 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	$Z_{\text{ТС}}$ руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ руб.	$Z_{\text{дн}}$ руб.	$T_{\text{р}}$	$Z_{\text{осн}}$ руб.
Научный руководитель	33664	0,3	0,4	1,3	74397	3065,16	25	76629
Инженер	26300	0,3	0,4	1,3	58123	2397	72	172584
Итого $Z_{\text{осн}}$								249213

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата является доплатой, учитывающая условия труда, отличные от нормальных, а также выплаты, связанные с обеспечением гарантий и компенсаций. Величина дополнительной заработной платы определяется Трудовым кодексом РФ.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

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

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$Z_{\text{доп рук}} = 76629 \cdot 0,15 = 11494 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{доп ст}} = 172584 \cdot 0,15 = 25888 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{доп}} = 11494 + 25888 = 37382 \text{ руб}$$

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

В данном разделе будут рассчитаны отчисления во внебюджетные фонды, согласно законодательству РФ являются обязательными, а именно отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды.

На 2017г. согласно пункту 1 ст. 58 федерального закона №212-ФЗ размер страховых взносов образовательных учреждений составляет 27.1%

Отчисления во внебюджетные фонды представим в таблице 15.

Таблица 15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб
Руководитель	76629	11494	23881
Инженер	172584	25888	53786
Итого			77667

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовый и телеграфный расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{пр}},$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (675 + 76 + 249213 + 37382 + 77667) \cdot 0,16 = 58402 \text{ руб.}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определим бюджет затрат на научно-исследовательский проект путем суммирования предыдущих статей, и получим общую себестоимость, которую занесем в таблицу 16.

Таблица 16 – Общие расходы

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИР	675	Пункт 2.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных работ	55832	Пункт 2.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	249213	Пункт 2.3.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	37382	Пункт 2.3.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	77667	Пункт 2.3.5
6. Накладные расходы	58402	Пункт 2.3.6
7. Бюджет затрат НИР	479171	Сумма ст. 1-6

Согласно смете затрат на проектирование, наибольшие затраты идут на затраты по основной заработной плате исполнителей проекта. Данный уровень расходов соответствует текущему уровню затрат на научно-исследовательскую работу.

4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр1}} = \frac{\Phi_{\text{р1}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118057}{125000} = 0,94$$

$$I_{\text{финр2}} = \frac{\Phi_{\text{р2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{114000}{125000} = 0,91$$

$$I_{\text{финр3}} = \frac{\Phi_{\text{р3}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{122100}{125000} = 0,97$$

$$I_{\text{финр4}} = \frac{\Phi_4}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{125000}{125000} = 1$$

где, $I_{\text{финр1}}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{р1}}$ – стоимость варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно
– исследовательского проекта;

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_p = \sum a_1 \cdot b_1$$

где I_p - интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_1 - весовой коэффициент варианта исполнения разработки;

b_i - бальная оценка варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4
1. Наибольшее изменение электрической емкости	0,25	5	4	3	4
2. Чувствительность	0,35	5	4	3	5
3. Надежность	0,15	3	4	4	3

Продолжение таблицы 17

4.Сложность изготовления структуры	0,25	3	3	4	4
ИТОГО	1				

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 = 4,2$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 = 3,75$$

$$I_{p-исп3} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 = 3,4$$

$$I_{p-исп4} = 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 = 4,2$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{исп}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр1}} = \frac{4,2}{0,94} = 4,46$$

$$I_{исп2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр2}} = \frac{3,75}{0,91} = 4,12$$

$$I_{исп3} = \frac{I_{p-исп3}}{I_{финр3}} = \frac{3,4}{0,97} = 3,5$$

$$I_{исп4} = \frac{I_{p-исп4}}{I_{финр4}} = \frac{4,2}{1} = 4,2$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$):

$$\mathcal{E}_{ср2} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{4,46}{4,12} = 1,08$$

$$\mathcal{E}_{ср3} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп3}} = \frac{4,46}{3,5} = 1,27$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}4} = \frac{I_{\text{исп}1}}{I_{\text{исп}2}} = \frac{4,46}{4,2} = 1,06$$

Таблица 18 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.4
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,94	0,91	0,97	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,2	3,75	3,4	4,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,46	4,12	3,5	4,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,08	1,27	1,06

По совокупности показателей приведенных в таблице 18 можно сделать вывод, что наиболее оптимальное исполнение проекта под номером 1.

5. Социальная ответственность

В данной главе рассмотрены положения, связанные с организацией рабочего места – 105 аудитория 4 корпуса - и условий, в которых будет проходить выполнение выпускной квалификационной работы, а именно разработка электродных структур микромеханических сенсоров.

Рассмотрены возможные ЧС и меры по улучшению качества условий труда для работы с ПЭВМ.

Разработка, реализуемая в ходе выполнения ВКР, будет использоваться в электростатических микромеханических сенсорах.

Рабочее место разработчика представляет собой компьютерный стол с персональным компьютером и предустановленным на нем, программным обеспечением, необходимым для разработки электродных структур микромеханических сенсоров.

При работе с ПК человек подвергается воздействию ряда вредных и опасных производственных факторов, к которым относится: повышенный уровень электромагнитного излучения, повышенный уровень вибрации и шума на рабочем месте, а также повышенный уровень статического электричества [5].

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.

При осуществлении трудовой деятельности за ПЭВМ, нормативное регулирование охраны труда осуществляется посредством следующих документов:

- Федеральный закон № 426 «Об специальной оценке условий труда»;
- СанПиН 2.2.2./2.4;
- Трудовой Кодекс РФ;
- Приказ Министерства Здравоохранения РФ №302н.
- ГОСТ 12.2.032-78
- СП 52.13330.2011
- ГОСТ 12.1.038-82

Нормальная продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Работникам до 16 лет – не более 24 часов в неделю, 16 – 18 лет и для инвалидов первой и второй групп – не более 35 часов в неделю, работникам, чья работа отнесена к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов в неделю. Для беременной женщины и для одного из родителей, имеющего ребенка до 14 лет или ребенка инвалида в возрасте до 18 лет, возможно установление неполных рабочих дней.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 устанавливает организацию перерывов в трудовой деятельности продолжительностью 10 – 15 минут каждый час работы. Эти перерывы в работе должны включаться в общее трудовое время, а также увеличиваться на 30%, если сотрудник работает за компьютером в ночное время.

Организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Если работа происходит с

опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

В данном пункте приводятся эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя для создания комфортной рабочей среды.

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающего способностью накапливать статическое электричество. При выполнении работы, предусматривающей длительную работу за ПК, рекомендуется изолировать рабочие столы исследователей друг от друга перегородками высотой не менее 1,5 м. Ширина и глубина рабочего стола, должна составлять не менее 80 см., высота от пола 75 см. Расстояние от глаз до монитора не менее 60 см, клавиатуры от края стола, не менее 10 см.

В соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 рабочий стул не должен нарушать кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте, и должен позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сидения и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сидения, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Аудитория 105, 4 корпуса ТПУ оборудована столами и компьютерами соответствующих предъявленным требованиям.

5.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть при разработке электродных структур микромеханических сенсоров.

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [6].

Перечень опасных и вредных факторов, характерных при работе, представлен в таблице 19.

Таблица 19 – Опасные и вредные факторы на рабочем месте разработчика

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Разработка электродных структур; 2. Работа с ЭВМ	1. Неудовлетворительный микроклимат; 2. Повышенный уровень электромагнитных полей;	1. Электрический ток. 2. Пожаровзрывоопасность	СанПиН 2.2.1/2.1.1.127-8-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

Продолжение таблицы 19

	3. Недостаточная освещенность рабочей зоны;		СанПиН 2.2.4.1191-03
	4. Повышенный уровень шума на рабочем месте.		СП 52.13330.2011
			СанПиН 2.2.4.548–96
			СН 2.2.4/2.1.8.562–96
			ГОСТ 30494-2011

5.2.1 Микроклимат

Согласно СанПиНу 2.2.2/2.4.1340-03 в помещениях с использованием ПЭВМ оптимальные параметры микроклимата должны обеспечиваться для категории работ 1а и 1б. Эти параметры описаны в СанПиН 2.2.4.548-96 и представлены в таблице 20.

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности [11].

Проводимые работы относятся к категории легких работ 1а. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	21-23	20-24	60-40	0.1
Теплый	Ia	22-24	21-25	60-40	0.1

В случае, если параметры не удовлетворяют оптимальным, необходимо воспользоваться отопительными системами и системами кондиционирования помещения. В аудитории 105, 4 корпуса, также предусмотрена возможность естественного проветривания.

Согласно [12], условия труда в аудитории 105 корпуса 4 по микроклимату соответствует допустимым нормам.

5.2.2 Электромагнитные поля

Источником электромагнитных полей являются персональные компьютеры. При длительном влиянии электромагнитного излучения, на организм человека, могут происходить нарушения нормального функционирования организма, такие как: нарушение работы сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем; снижение иммунитета; риск развития раковых клеток.

ПК должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [13].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) в аудитории 105 4 корпуса ТПУ [8], создаваемых ПК, не должны превышать значений [12], представленных в таблице 21:

Таблица 21 – Предельно допустимые уровни электромагнитных полей

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Для минимизации действия данного фактора нужно сокращать время работы с источником излучения, увеличивать расстояние до экрана. Между рабочими столами устанавливать специальные защитные экраны, с покрытием, поглощающим низкочастотное электромагнитное излучение. Также необходимо использовать очки для работы с ПЭВМ со специальным покрытием. Экран дисплея ежедневно очищать от пыли, в аудитории 105, 4 корпуса проводится ежедневная уборка помещения согласно установленным нормам.

В аудитории 105 4 корпуса электромагнитные поля на рабочих местах разработчика соответствуют допустимым нормам.

5.2.3 Производственное освещение

Во время работы с ПЭВМ, особенно большая физическую нагрузку выдерживают органы зрения, что может привести к нарушения функционального состояния зрения.

Согласно требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 необходимо применять комбинированную освещенность, естественный свет преимущественно должен падать слева. В таких помещениях используется естественное боковое одностороннее освещение в дневное время, в вечернее время используется искусственное общее равномерное освещение. Искусственное освещение в

помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов). Освещенность на поверхности стола должна лежать в пределах 300 – 500лк и не создавать бликов на поверхности экрана. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.» Норма коэффициента естественного освещения в исследуемом помещении равна 3% [9].

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк . Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

В качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно светодиодные светильники. При устройстве отраженного освещения в производственных и административно-общественных помещениях допускается применение металлогалогенных ламп. В светильниках местного освещения допускается применение ламп накаливания, в том числе галогенные [13].

Таблица 22 - Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий [14]

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дискомфорта М, не более	Коэффициент пульсации и освещенности, K_p , %, не более
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении			
Кабинеты	Г-0,8	3,0	1,0	1,8	0,6	300	40	20

В рабочей зоне 105 аудитории 4 корпуса ТПУ, освещение комбинированное, на рабочем месте разработчика естественный свет падает слева. Освещенность помещения соответствует норме. Для соблюдения санитарных норм, нужно осуществлять очистку окон два раза в год и своевременно проводить замену перегоревших ламп, что обеспечивается технической службой ТПУ.

Согласно [14] освещение на рабочем месте разработчика в аудитории 105 корпуса 4 соответствуют допустимым нормам.

5.2.4 Электробезопасность

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ЭВМ в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [15]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия: 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением; 2) проведение инструктажей и допуск к работе; 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В, для серверного оборудования 380 В. По опасности поражения электрическим током помещение 105, 4 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40- 50%) [15].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются: 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением; 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением; 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала; 4) поражение шаговым напряжением.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ [12], являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Не следует размещать рабочие места с ЭВМ вблизи силовых кабелей, технологического оборудования, создающего помехи в работе ЭВМ[13].

Рассчитано защитное заземление для шкафов релейной защиты и серверного оборудования, которое находится в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ [16]:

1. В качестве заземляющего устройства (вертикальные электроды) используем стальные трубы диаметром $d = 55$ мм, в качестве соединяющего элемента – стальная полоса шириной $b = 50$ мм.

2. Сопротивлению грунта в районе размещения установки или устройства.

Таблица 23 - Исходные данные для расчета

Вид заземления	контурное
Длина заземлителя l , м	2,7
Глубина заземлителя в грунте h , м	0,65
Сезонный коэффициент K_c	2,0
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	70
Диаметр d , мм	55
Ширина соединительной полосы b , мм	50
Допустимое сопротивление системы заземления по ПУЭ $R_{з.у.}$, Ом	4
Уровень напряжения, В	220-380

3. Величина электрического сопротивления растекания тока в грунт с одиночного заземлителя:

$$R_z = 0,366 \frac{\rho \cdot K_c}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) =$$

$$= 0,366 \frac{70 \cdot 2}{2,7} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,7}{0,055} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 2,7}{4 \cdot 2 - 2,7} \right) = 40,62 \text{ Ом},$$

где $\rho = 70$ Ом – удельное сопротивление грунта,

$K_c = 2$ – коэффициент сезонности,

$l = 2,7$ м – длина заземлителя,

$d = 0,055$ м – диаметр заземлителя,

$t = h + 0,5l = 0,65 + 0,5 \cdot 2,7 = 2$ м – длина от поверхности земли до середины заземлителя.

4. Число заземлителей без взаимных помех, получаемых друг от друга, без так называемого явления «экранирования»:

$$n' = \frac{R_z}{R_{з.у.}} = \frac{40,62}{4} = 10,15 \approx 10$$

5. Число заземлителей с коэффициентом экранирования:

$$n = \frac{n'}{\eta_z} = \frac{10}{0,58} = 17,24 \approx 18$$

где $\eta_z = 0,58$ – коэффициент экранирования [56].

Принимаем расстояние между заземлителями $a = l = 2,7$ м.

6. Длина соединительной полосы:

$$l_n = 1,05 \cdot n \cdot a = 1,05 \cdot 18 \cdot 2,7 = 51,03 \text{ м}$$

7. Значение сопротивления растекания тока с соединительной полосы:

$$R_{II} = 0,366 \frac{\rho K_c}{l_n} \lg \frac{2l_n^2}{b \cdot h} = 0,366 \frac{70 \cdot 2}{51,03} \lg \frac{2 \cdot 51,03^2}{0,05 \cdot 0,65} = 5,2 \text{ Ом}$$

8. Полное сопротивление системы заземления:

$$R_{з.у.} = \frac{R_z \cdot R_{II}}{R_z \cdot \eta_n + R_{II} \cdot \eta_z \cdot n} = \frac{40,62 \cdot 5,2}{40,62 \cdot 0,51 + 5,2 \cdot 0,58 \cdot 18} = 2,82 \text{ Ом},$$

где $\eta_n = 0,51$ – коэффициент экранирования полосы.

Таким образом, сопротивление $R_{з.у.} = 2,82$ Ом не превышает 4 Ом. Следовательно, диаметр заземлителя $d = 55$ мм при числе заземлителей $n = 18$ является достаточным для обеспечения защиты при контурной схеме расположения заземлителей.

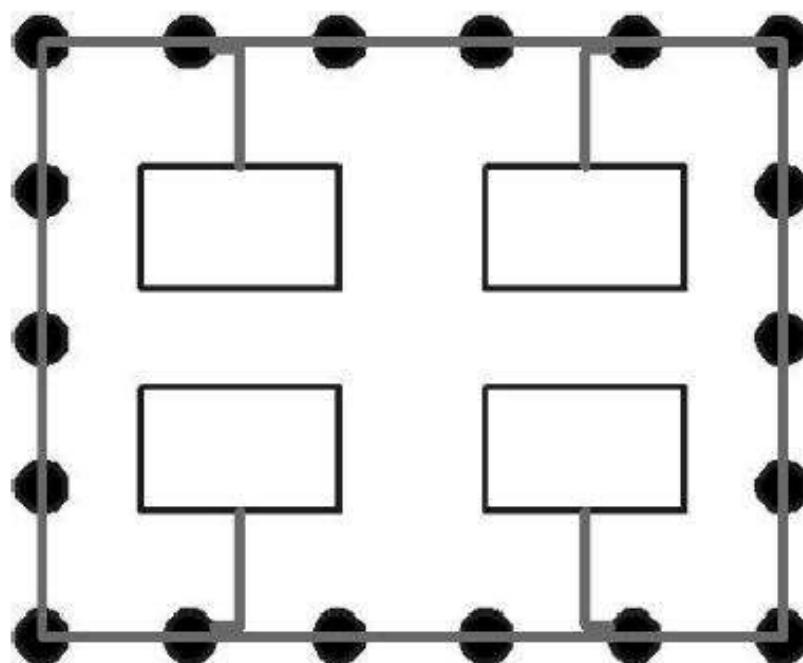


Рисунок 18 – Схема полученного контурного заземления

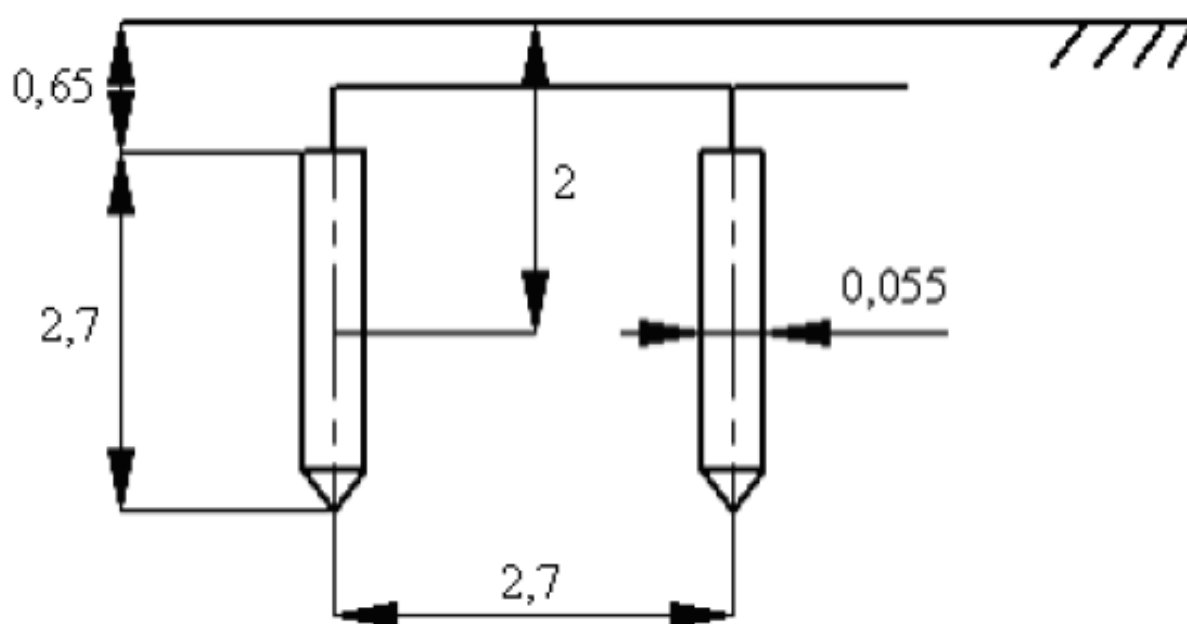


Рисунок 19 – Схема расположения заземлителей

Разработанные мероприятия и расчеты обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ.

5.2.5 Производственный шум

В аудитории 105 4 корпуса ТПУ имеется оборудование (ПК, 3D принтер), которое создает шумы. Производственные шумы должны соответствовать допустимым нормам.

Таблица 24 - Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Согласно [7] уровень шума в аудитории 105 4 корпуса ТПУ не превышает допустимые нормы - 80 дБА.

5.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду

Разрабатываемые электродные структуры не наносят ущерба окружающей среде. С точки зрения влияния на окружающую среду можно рассмотреть влияние электронно-вычислительной аппаратуры при ее утилизации.

Утилизация компьютеров – это обязательная процедура для всех официально работающих предприятий и юридических лиц. И нарушение ее ведет к налоговой и административной ответственности. Списание компьютеров требуется для того, чтобы не платить налог на имущество. Их утилизация возможна только при помощи специализированных компаний.

В компьютерах имеется определенный процент драгоценных металлов, которые нужно провести по бухгалтерии строго определенным образом. В подобной технике есть немало вредных веществ (ртуть; кадмий; мышьяк; свинец; цинк; никель и др.), и выкидывать их на обычную свалку опасно как для окружающей среды, так и для здоровья человека. Подобные действия ведут к штрафным санкциям.

Вся ненужная техника, подвергающаяся процессу утилизации, проходит специальную процедуру:

Утилизация плат непосредственный процесс переработки;

Отправку некоторых частей оргтехники на аффинаж (это металлургический процесс изъятия высокочистых благородных металлов при отделении от них загрязняющих примесей, один из видов извлечение металлов).

Для утилизации и переработки отходов, которые образуются после окончания срока эксплуатации ПЭВМ, ЭВМ, металл отправляют в переплав на предприятия черной и цветной металлургии и предприятия по извлечению драгоценных металлов из узлов. Остальные отходы отправляются на полигоны для захоронения твердых отходов.

Переработку целесообразно проводить в местах образования отходов, что сокращает затраты на погрузочные работы, снижает безвозвратные потери при их транспортировке и высвобождает транспортные средства.

Эффективность использования лома и отходов металла зависит от их качества. Загрязнение и засорение металлоотходов приводят к большим потерям при переработке, поэтому сбор, хранение и сдача их регламентируется специальными стандартами.

Основные операции первичной обработки металлоотходов — сортировка, разделка, механическая обработка. Сортировка заключается в разделении лома и отходов по видам металлов. Разделка лома состоит в разделении металлических и неметаллических включений. Механическая обработка включает рубку, резку, пакетирование и брикетирование на прессах.

Переработку промышленных отходов производят на специальных полигонах, предназначенных для централизованного сбора, обезвреживания и захоронения токсичных отходов промышленных предприятий, которые образуются как при изготовлении новых приборов (в том числе и печатных плат), так и при утилизации вышедших из строя.

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Загрязнение воздушного бассейна, гидросферы и литосферы при работе непосредственно за компьютером не обнаружено.

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка электродных структур с помощью систем автоматизированного проектирования T-flex, ANSYS. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Техносферными источниками чрезвычайных ситуаций (ЧС) на рассматриваемом рабочем месте могут быть пожары и взрывы, обрушение здания, затопления при разрушении плотин.

Причинами возникновения пожаров являются: нарушение противопожарного режима, неосторожное обращение с огнем; нарушение мер пожарной безопасности при проектировании и строительстве зданий. К первичным средствам пожаротушения в соответствии с относятся: огнетушители, внутренние пожарные краны, ящики с песком, противопожарные щиты с набором инвентаря и др[15].

Для обеспечения безопасности при пожаре должна включаться предупредительная сигнализация. При автоматической пожарной сигнализации используются датчики, реагирующие на появление открытого огня, дыма, повышение температуры согласно.

Профилактические мероприятия по пожаровзрывобезопасности при проектировании и строительстве зданий включают решение таких вопросов, как повышение огнестойкости зданий и сооружений, зонирование территории, применение противопожарных разрывов, применение противопожарных

преград, обеспечение удаления из помещения дыма при возникновении пожара, обеспечение безопасной эвакуации людей при возникновении пожара.

В производственных помещениях должно быть не менее двух эвакуационных выходов.

К мероприятиям, повышающих устойчивость и механическую прочность зданий, сооружений, оборудования и их конструкций, относятся в соответствии с:

- проектирование сооружений с жестким каркасом (металлическим или железобетонным, со стеновым заполнением из облегченных материалов, с легкой и огнестойкой кровлей).

- применение для несущих конструкций высокопрочных и легких материалов (сталей повышенной прочности, алюминиевых сплавов)

- применение облегченных междуэтажных перекрытий и лестничные марши;

- дополнительное крепление воздушных линий связи, электропередач, наружных трубопроводов на высоких эстакадах в целях защиты от повреждения при ЧС;

- повышение устойчивости оборудования путем усиления его наиболее слабых элементов, а также созданием запасов этих элементов (прочное закрепление установок на фундаментах), размещение тяжелого оборудования на нижних этажах производственных зданий;

- устройство дополнительных конструкций для быстрой эвакуации людей при ЧС.

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

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Помещения должны быть оснащены средствами пожаротушения, а именно огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-3 или ОП-3 (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники).

Согласно ПУЭ [13] аудитория 105 4 корпуса ТПУ, относится к типу П-Па – пожароопасные:

Таблица 25 - Категория помещения по пожароопасности [15]

Категория помещения	Характеристика пожароопасной зоны
П-Па пожароопасные	Пространство в помещениях, в которых обращаются твердые или волокнистые, не переходящие во взвешенное состояние, горючие вещества, материалы.

Классы пожара характеризуют объект пожара в зависимости от вида горящих веществ (материалов) и сложности их тушения. Для данной аудитории имеют место пожары класса Е - горение электроустановок и электрооборудования, находящегося под напряжением [15].

В аудитории 105 4 корпуса ТПУ имеется 1 огнетушитель типа ОП-3, пожарная автоматика и сигнализация. План эвакуации этажа представлен на рисунке 16.

План помещений с нанесением путей эвакуации людей
Северное крыло 4 учебного корпуса, 1-ый этаж

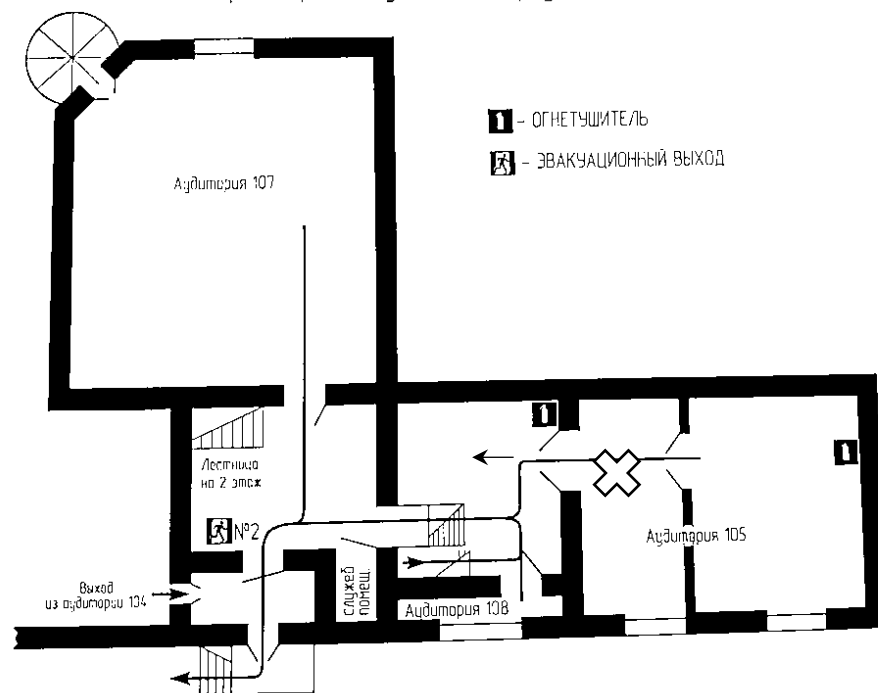


Рисунок 16 - План эвакуации

При обнаружении пожароопасных ситуациях необходимо:

1. при любых случаях сбоя в работе оборудования или программного обеспечения вызвать представителя инженерно-технической службы;
2. при возгорании оборудования, отключить питание и принять меры к тушению очага пожара при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя, вызвать пожарную команду и сообщить о происшествии руководителю работ.
3. при возгорании оборудования, которое не получилось затушить самостоятельно, срочно произвести эвакуацию работников, согласно схеме эвакуации, и вызвать пожарную команду и сообщить о происшествии руководителю работ.
4. при эвакуации в первую очередь вывести женщин и помочь пожилым людям, оказать помощь пострадавшим. Зону пожара покинуть как можно быстрее, заранее прикинув безопасный маршрут. При необходимости использовать запасные пожарные выходы и лестницы. Брать с собой нужно только документы и деньги, ценные вещи, которые можно унести за один раз.

Обязательно использовать простейшие средства защиты органов дыхания от угарного газа: смоченные водой платки, простыни, ватно-марлевые повязки. При сильном задымлении передвигайтесь ползком к выходу, так как внизу около пола дыма меньше и ниже вероятность потерять сознание. Уходя, не закрывать входную дверь в помещение возгорания на ключ. При невозможности покинуть помещение, стараться обратить на себя внимание: выбить окно, кричать и размахивать яркой тканью.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были разработаны электродные структуры электростатических микромеханических устройств, проведен их анализ, а так же даны рекомендации по их применению.

Была проведена оценка коммерческого потенциала, в ходе которой был произведен анализ рынка и выбрана ниша, с наиболее низким уровнем конкуренции. SWOT-анализ позволил наглядно рассмотреть сильные и слабые стороны, возможности и угрозы научно-исследовательской работы. Исходя из полученных данных видно способы улучшения разработки.

Также был разработан план работ и составлен график их проведения.

В ходе работы были выявлены вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на исследователя во время проведения расчетно-проектировочных работ. А также рассмотрены факторы, оказывающие воздействие на природу, в ходе разработки.

Список используемой литературы

1. Учайкин С.В. Разработка методов высокоуровневого проектирования многокомпонентных микросистем: Научно-технический отчет по теме / Нестеренко Т.Г., Чурсин Ю.А., Борилов. Томск 2013. - 200с.
2. Разработка теоретических основ и методики проектирования электростатических МЭМП механической энергии в электрическую: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Остертак Д.И. – Новосибирск 2009. – 209 с.
3. Однокомпонентный микромеханический гироскоп с расширенной полосой пропускания: бакалаврская работа / Шагдыров Б.И. – Томск 2016. - 98 с.
4. Сивков М.А. Специальное решение уравнения реального конденсатора в случае статики / М.А. Сивков // XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015": статья / Сивков М.А., Алешин Ю.К. – М. 2015.
5. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019
6. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
7. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996
8. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003
9. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011
10. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996
11. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.

- 12.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
- 13.Правила устройства электроустановок. Седьмое издание, 2002
- 14.ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011
- 15.НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003
- 16.Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс] URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: 10.03.2019

Приложение А (обязательное)

Программа – макрос для расчета емкости методом конечных элементов в программе ANSYS.

! Макрос для расчёта ёмкости между двумя частями гребёнок. По оси Y!

! Для расчёта необходимо в формате PARASOLID загрузить

! неподвижную, а затем подвижную части гребёнок.

! Результаты расчёта записываются в файл Capacitance_dy.txt

FINISH

/CLEAR,START

/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 0

/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 13

/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 14

/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 15

/REPLOT

! Цикл для перемещения подвижной части гребёнок по оси Y

!*do, d_y, -5*1e-6, 5*1e-6, 1*1e-6

k=1e-6

n=0.25e+6 !0.25e+6 - грубая сетка; 1e+6 - точная сетка

Airx= 10 !Ширина воздуха со всех сторон

Airy= 10

h_gap =10*k ! Воздух

h_si =40*k ! толщина сенсора

d_y= 0*1e-6

key_modif=0 !

! comb

mat_id_fixelec=1

mat_id_movelec=2

```

mat_id_air=3
/prep7
~PARAIN,'001_Comb','x_t',,SOLIDS,0,0 ! с рабочей директории
/facet
lsel, s, loc, z, 0
cm, lin0,line
allsel, all
asel, s, loc, z, 0
cm, are0,area
allsel, all
lsel, u,,,lin0
asel, u,,,are0
vdelete, all
adelete, all
ldelete, all
allsel, all
kselect, s, loc, z, k, 100*k
kdelete, all
allsel, all
NUMCMP, all
!/eof
~PARAIN,'002_Comb','x_t',,SOLIDS,0,0 ! с рабочей директории
lsel, s, loc, z, 0
cm, lin0,line
allsel, all
asel, s, loc, z, 0
cm, are0,area
allsel, all
lsel, u,,,lin0
asel, u,,,are0

```

```

vdele, all
adele, all
ldele, all
allsel, all
ksel, s, loc, z, k, 100*k
kdele, all
allsel, all
NUMCMP, all
*GET, maxA, AREA,, NUM, MAX
!/eof
!Перемещение подвижной части гребёнок
AGEN,,maxA,,,,d_y,,,1
*GET, minX, KP,, MNLOC, X
*GET, maxX, KP,, MXLOC, X
*GET, minY, KP,, MNLOC, Y
*GET, maxY, KP,, MXLOC, Y
*GET, mkp, KP,, NUM, MAX
!/eof
!===Оригинал
K, mkp+1, minX-Airx*K, minY-Airy*K
K, mkp+2, minX-Airx*K, maxY+Airy*K
K, mkp+3, maxX+Airx*K, maxY+Airy*K
K, mkp+4, maxX+Airx*K, minY-Airy*K
l, mkp+1, mkp+2
l, mkp+2, mkp+3
l, mkp+3, mkp+4
l, mkp+4, mkp+1
a, mkp+1, mkp+2, mkp+3, mkp+4
aovlp,all
numcmp,all

```

```

!===Разбиение линий для сетки
*GET, nline, line,, num, max
*do, i, 1, nline
  LSEL,S,, , i
  LSUM
  *get, dlinal, line,, LENG
  lesize, i,,dlinal*n
  allsel, all
*enddo
!/eof
asel,s,area,,1 $AATT,mat_id_movElec !,mat_id_movElec,mat_id_movElec
asel,s,area,,2 $AATT,mat_id_fixElec !,mat_id_fixElec,mat_id_fixElec
asel,s,area,,3 $AATT,mat_id_air !,mat_id_air,mat_id_air
allsel
aplot
! elements for 2D mesh
ET,1,PLANE121 ! 8-Node 2D
ET,11,SOLID122 ! Electrostatic domain
! Material properties Si (MKS units)
emunit,epzro,8.854e-12 ! absolute permittivity
MP,PERX,1,11.7 ! Si
MP,PERX,2,11.7 ! Si
MP,PERX,3,1.0 ! air
MP,PERX,4,11.7 ! Si
NUMCMP,LINE
allsel
!/eof
type,1
amesh,all

```

```

allsel
*GET,Kmax1,KP,,NUM,MAX
*GET,Lmax1,LINE,,NUM,MAX
K,Kmax1+1,0,0,0
K,Kmax1+2,0,0,h_gap
K,Kmax1+3,0,0,h_gap+h_si
K,Kmax1+4,0,0,h_gap+h_si+h_gap
! mesh in z-direction nZ - число разбиений по высоте
nZ1=3 $L,Kmax1+1,Kmax1+2,nZ1 !
nZ2=4 $L,Kmax1+2,Kmax1+3,nZ2 !
nZ3=3 $L,Kmax1+3,Kmax1+4,nZ3 !
n_line1=Lmax1+1
n_line2=Lmax1+2
n_line3=Lmax1+3
SHPP,OFF ! Deactivates element shape checking
allsel
TYPE,11
mat,mat_id_air
VDRAG,ALL,,,,,n_line1,n_line2,n_line3
ALLSEL
eplot
!/eof
! elements modif
vsel,s,volu,,4
eslv,s
emodif,all,mat,mat_id_movElec
vsel,s,volu,,5
eslv,s
emodif,all,mat,mat_id_fixElec

```

```

! delete 2D elements
esel,s,type,,1 $aclear,all
allsel

! Compresses the numbering
NUMCMP,ELEM
NUMCMP,NODE

*GET,Kmax,KP  ,,NUM,MAX
*GET,Nmax,NODE,,NUM,MAX
*GET,Emax,ELEM,,NUM,MAX

! Components for boundary condition
esel,s,mat,,mat_id_movElec
nsel,s,ext
cm,movElec,node
esel,s,mat,,mat_id_fixElec
nsel,s,ext
cm,fixElec,node
allsel

/color,num,cyan,1
/pnum,mat,1 $/number,1 $epplot

! boundary condition
cmsel,s,movElec,node
cp,1,volt,all $*get,nCOND1,NODE,0,num,min    !
cmsel,s,fixElec,node
cp,2,volt,all $*get,nCOND2,NODE,0,num,min
cmsel,all $allsel

Vs=1 ! V

D,nCOND1,VOLT,Vs      !
D,nCOND2,VOLT,0       !

ANTYPE,STATIC

/solu

```



```

SOLVE
/post1
vsel,s,loc,z,0,h_gap+h_si
eslv,s
PLNSOL,VOLT
!PLVECT,EF,,,VECT,ELEM,OFF
/eof
! capacitance
allsel
ETABLE,SENE,SENE $SSUM $*GET,W_elec,SSUM,,ITEM,SENE
Cap=2*W_elec/Vs**2
*STATUS,Cap
!/eof
/head,off,off,off,off,off,off
/output,Cap_001,txt,,append
*VWRITE,d_y,Cap
(2E20.12)
/output
!/eof
!===Для включения цикла включить всё ниже
FINISH
/CLEAR,START
*enddo

```