

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

*На правах рукописи*



Васецкий Станислав Олегович

**Разработка адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического  
преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного  
эффекта**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы  
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д. т. н., профессор Бусурин В.И.

МОСКВА – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	16
1.1 Вибрационные преобразователи угловой скорости .....	16
1.1.1 Рамочный преобразователь угловой скорости .....	16
1.1.2 Камертонные преобразователи угловой скорости .....	18
1.1.3 Микрополусферические и кольцевые резонансные преобразователи угловой скорости .....	20
1.2 Преобразователи угловой скорости с оптическим съемом информации.....	22
1.2.1 Преобразователь угловой скорости с фотонными кристаллами.....	22
1.2.2 Преобразователь угловой скорости с брэгговской решеткой .....	23
1.2.3 Преобразователь угловой скорости с дифракционной решеткой.....	24
1.3 Преобразователи угловой скорости на основе эффекта Саньяка .....	25
1.4 Сравнительный анализ методов измерения угловой скорости .....	27
1.5 Разработка обобщенной схемы адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта .....	31
1.6 Постановка частных задач исследования.....	33
Выводы по Главе 1 .....	34
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАМОЧНОГО МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА.....	35
2.1 Разработка функциональной схемы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта .....	35

2.2 Разработка и исследование узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	37
2.2.1 Разработка и исследование математической модели узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	37
2.2.2 Экспериментальное исследование параметров математической модели и функции преобразования узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	43
2.3 Разработка математической модели микромеханического рамочного чувствительного элемента и привода колебаний для работы в зоне оптического туннелирования.....	46
2.3.1 Динамическая математическая модель для субмикрометровых перемещений рамочного чувствительного элемента.....	46
2.3.2 Анализ влияния сжатой газовой пленки на демпфирование рамочного чувствительного элемента.....	51
2.3.3 Анализ влияния скользящей газовой пленки на демпфирование рамочного чувствительного элемента.....	57
2.3.4 Расчет добротности рамочного чувствительного элемента и определение допустимого давления газовой среды.....	60
2.3.5 Определение параметров электромеханической части преобразователя для работы в зоне оптического туннелирования.....	62
2.3.6 Имитационное моделирование рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной дифференциальной обработкой сигналов.....	69
2.4 Экспериментальное исследование имитатора рамочного чувствительного элемента с узлом оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	76
Выводы по Главе 2 .....	80

## ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАМОЧНЫЙ МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И РАЗРАБОТКА СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ..... 82

3.1 Анализ влияния линейного ускорения на погрешность измерения угловой скорости рамочным МОЭМ преобразователем на основе ОТЭ ..... 82

3.2 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси считывания оптических сигналов на основе управления коэффициентом усиления..... 90

3.3 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси считывания оптических сигналов с использованием дополнительных электростатических приводов ..... 95

3.4 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси режима движения с использованием корректирующего устройства..... 97

3.6 Исследование влияния температуры на рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости ..... 99

3.7 Информационно-измерительная система на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости..... 104

3.7.1 Структурная схема информационно-измерительной системы на основе четырехканальных рамочных МОЭМ преобразователей..... 104

3.7.2 Определение параметров каналов угловой скорости и линейного ускорения..... 107

3.7.3 Имитационное моделирование информационно-измерительной системы на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости..... 110

Выводы по Главе 3 ..... 113

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО РАМОЧНОГО МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С ДВУХВОЛНОВЫМ УЗЛОМ ОПТИЧЕСКОГО СЧИТЫВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЕГО РАСЧЕТА ..... 115



4.1 Разработка двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта для расширения динамического диапазона измерения угловой скорости .....	115
4.1.1 Разработка и исследование математической модели двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	115
4.1.2 Исследование возможности использования тонкопленочной структуры для двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	120
4.2 Разработка и исследование адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с двухволновым узлом считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	124
4.2.1 Разработка функциональной схемы адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с двухволновым узлом считывания на основе оптического туннельного эффекта и алгоритма его работы.....	124
4.2.3 Компенсация дополнительной температурной погрешности на основе термооптического эффекта в узлах оптического считывания на основе ОТЭ .....	129
4.4 Разработка алгоритма расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ .....	132
4.4.1 Учет внутренних погрешностей узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта.....	132
4.4.2 Определение коэффициентов влияния на основную погрешность и допустимых отклонений параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости .....	137
4.4.3 Разработка программного обеспечения для автоматизированного расчета конструктивных параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости .....	141
Выводы по Главе 4 .....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	150

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	154

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В информационно-измерительных системах, предназначенных для определения параметров движения объектов, необходимо использовать данные об их линейных ускорениях и угловых скоростях. Известные механические преобразователи, использующие вращающиеся тела с несколькими степенями свободы для определения угловой скорости, имеют ряд недостатков: высокое энергопотребление, сравнительно большую массу, высокую себестоимость. Всех этих недостатков лишены современные малогабаритные микроэлектромеханические системы (МЭМС), которые используют резонаторы камертонного, балочного, роторного, кольцевого и рамочного типа в преобразователях угловых скоростей. Большой вклад в их развитие внесен российскими и зарубежными учеными В.В. Матвеевым, В.М. Ачильдиевым, С.П. Тимошенковым, В.Я. Распоповым, В.Г. Пешехоновым, В.Д. Вавиловым, С. Зарабади, С. МакВильямом, Б.Дж. Галакером, А.Дж. Харрисом и др. В МЭМС под действием угловой скорости происходит деформация чувствительного элемента, а определение его положения осуществляют в основном емкостным способом. Чувствительный элемент преобразователя перемещается на расстояния от единиц до десятков микрометров, при этом измерение информационно-измерительными системами малых угловых скоростей объектов ограничивается шумовыми характеристиками емкостных МЭМС преобразователей, а их функция преобразования существенно нелинейна. Кроме того, при уменьшении зазора между обкладками конденсатора при максимальных перемещениях чувствительного элемента могут создаваться условия для электрического пробоя, нарушающего работу преобразователя. Для устранения этого эффекта и обеспечения измерения малых угловых скоростей информационно-измерительными системами до долей градуса в час используются оптические измерительные системы на основе мини-резонаторов на модах «шепчущей галереи» или узлы оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Метод измерения с использованием ОТЭ не требует применения перестраиваемых источников оптического излучения, позволяет

детектировать положение чувствительного элемента с высоким разрешением в нанометровом диапазоне, обеспечивает электрическую развязку контура съёма информации от цепи возбуждения колебаний чувствительного элемента и измерение малых угловых скоростей при относительно небольшой амплитуде первичных колебаний чувствительного элемента. Поэтому, при построении информационно-измерительных систем с оптическим считыванием, целесообразно использовать адаптивные рамочные преобразователи на основе ОТЭ. Среди российских предприятий и институтов, работающих над созданием новых типов МЭМС, необходимо отметить АО «ГИРООПТИКА», НИУ МИЭТ, ЦНИИ «Электроприбор». Среди зарубежных фирм-разработчиков известны: Analog Devices, Tronic Microsystems, STMicroelectronics. В целом создание микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) на основе ОТЭ в РФ и за рубежом находится на этапе разработки опытных образцов. Сочетание МЭМС-технологий и оптического считывания в преобразователях, выполненных на одной кремниевой подложке, позволит уменьшить их размеры и увеличить чувствительность. При этом для таких микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) преобразователей угловой скорости не в полной мере разработаны математические модели, учитывающие мультифизические связи и свойства применяемых материалов, действующие силы на узлы преобразователя, алгоритмы коррекции выходных сигналов для повышения точности измерений. Поэтому разработка информационно-измерительных систем на основе оптического туннельного эффекта для измерения значений угловых скоростей является актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы** является повышение точности измерения угловой скорости микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости, за счет применения алгоритмов адаптации к внешним дестабилизирующим факторам и оптической измерительной системы.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих научно-технических задач:

- 1) разработка новой функциональной схемы рамочного преобразователя угловой скорости, включающей оптическую измерительную систему, основанную на использовании оптического туннельного эффекта;
- 2) построение и исследование математических моделей рамочного чувствительного элемента и оптической измерительной подсистемы, а также проведение численного моделирования для анализа их характеристик;
- 3) исследование параметров оптической измерительной системы для формализации преобразовательной функции субмикрометровых перемещений чувствительного элемента в выходной электрический сигнал;
- 4) анализ влияния внешних дестабилизирующих воздействий на погрешность преобразования и исследование механизмов демпфирования рамочного чувствительного элемента при различных режимах работы;
- 5) разработка адаптивных алгоритмов компенсации погрешностей, обусловленных воздействием дестабилизирующих факторов различной природы;
- 6) проведение комплекса экспериментальных исследований оптической измерительной системы, реализованной на основе оптического туннельного эффекта, с оценкой её характеристик;
- 7) разработка методики расчёта рамочного преобразователя угловой скорости с учётом влияния ключевых параметров конструкции и технологии на его точностные показатели.

**Объектом исследования** является адаптивный рамочный преобразователь угловой скорости с оптической измерительной системой на основе ОТЭ, силовой обратной связью и алгоритмами коррекции выходных сигналов.

**Предметом исследования** является улучшение характеристик преобразователя угловой скорости за счет разработки новых структур, реализующих оптическое считывание с двухволновым преобразованием, алгоритмов и средств адаптации к внешним дестабилизирующим факторам.

**Методы исследования.** При исследовании адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта применялись методы волновой оптики, теории

упругости и механики деформируемого твердого тела, теории автоматического управления, математического и полунатурного моделирования, технологические и конструкторские методы.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

- предложен и исследован новый адаптивный рамочный преобразователь угловой скорости, отличающийся использованием четырёхканальной оптической измерительной системы, обеспечившей повышение точности определения положения чувствительного элемента в диапазоне (80...800) нм при достижении основной среднеквадратической погрешности 76 пм и нелинейности преобразовательной функции не более 0,12%;

- разработан и исследован усовершенствованный алгоритм адаптации рамочного преобразователя угловой скорости, базирующийся на электростатической стабилизации положения чувствительного элемента, что позволило эффективно компенсировать воздействие линейного ускорения вдоль оси чувствительности при дополнительной погрешности не более 0,02% в диапазоне  $\pm 90$  g;

- впервые обосновано и реализовано использование двухволнового метода преобразования перемещений чувствительного элемента в оптической измерительной системе, что обеспечило расширение динамического диапазона на 2,33 дБ в полосе частот 1 кГц и позволило снизить температурную нестабильность выходного сигнала до 0,04%/°C в интервале температур от -40 °C до +60 °C за счёт применения термооптического эффекта;

- разработана методика расчёта, позволяющая количественно оценивать влияние определяющих конструктивных и технологических параметров на выходную характеристику преобразователя по среднеквадратическому отклонению основной погрешности, а также устанавливать допустимые пределы их отклонений в соответствии с заданными техническими требованиями.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- использование новой функциональной схемы и математической модели адаптивного рамочного преобразователя угловой скорости, отличающегося

использованием четырехканальной оптической измерительной системы считывания и учетом газодинамического демпфирования, обеспечивает измерение угловой скорости с основной среднеквадратичной погрешностью 0,6 град/ч;

- применение алгоритма адаптации рамочного преобразователя угловой скорости, содержащего контуры управления коэффициентом усиления и электростатическим приводом, обеспечивает компенсацию линейных ускорений, действующих вдоль оси чувствительности, в диапазоне  $\pm 90\text{ g}$  при сохранении дополнительной погрешности не более 0,02%;

- использование оптической измерительной системы, основанной на принципе двухволнового преобразования нанометровых перемещений чувствительного элемента, увеличивает динамический диапазон рамочного преобразователя в 1,7 раза и снижает дополнительную температурную погрешность до уровня 0,04%/°C;

- использование предложенной методики расчёта, основанной на статистической оценке влияния конструктивных и технологических параметров, позволяет формировать требования и устанавливать допуски на критические параметры, обеспечивая соответствие заданным техническим требованиям.

### **Практическая значимость результатов исследования:**

- применение разработанной математической модели адаптивного рамочного преобразователя угловой скорости обеспечивает повышение точности вычисления его рабочих характеристик, а также позволяет определить допустимые значения давления газовой среды в герметичном объёме корпуса, необходимые для сохранения высокой добротности чувствительного элемента;

- введение предложенных структуры и алгоритма работы электростатической системы компенсации дестабилизирующих линейных ускорений в диапазоне  $\pm 90\text{ g}$  вдоль оси чувствительности способствует увеличению точности измерения угловой скорости и исключает вероятность механического взаимодействия между чувствительным элементом и оптической измерительной системой;

- показано, что применение оптической измерительной системы с двухволновым преобразованием обеспечивает расширение динамического

диапазона рамочного преобразователя при сохранении требуемой чувствительности и позволяет компенсировать технологические погрешности на этапе калибровки без необходимости изменения конструкции;

- использование разработанной методики расчёта обеспечивает выявление ключевых параметров, влияющих на основную погрешность преобразователя, установление допустимых отклонений для обеспечения выхода изделий, соответствующих заданным техническим требованиям.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта, сопоставлением расчетных результатов и данных, полученных в ходе экспериментальных исследований.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы внедрены в АО «ГосНИИП», и используются в МАИ в учебном процессе по дисциплине «Оптические и волоконно-оптические устройства и системы».

**Апробация работы.** Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 27–29 января 2021 года; XXX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 14–20 сентября 2021 года; 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва 22-26 ноября 2021 года; XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства, Москва, 25-28 января 2022 года; 29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022», Зеленоград, 21-22 апреля 2022 года; 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва 21-25 ноября 2022 года; XLVII Академические чтения по космонавтике 2023, Москва, 24-27 января 2023 года;



XXX юбилейная Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 года; XXXII Международная научно-техническая конференция Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации, пос. Дивноморское, 14-20 сентября 2023 года; 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 20-24 ноября 2023 года.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 4 статьи в ведущих научных журналах, включенных в перечень ВАК, в том числе 1 статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 3 патента на изобретение РФ, 10 тезисов в материалах научно-технических конференций.

#### **Личный вклад автора**

Автором внесен определяющий вклад в получение основных результатов диссертационной работы: поиск, анализ и обобщение литературных данных; разработка структурных и функциональных схем адаптируемых рамочных микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта; разработка математических моделей чувствительного элемента, моделирование и обоснование аналитических расчетов применяемых моделей; расчет параметров преобразователя; разработка алгоритмов адаптации преобразователя; расчет конструктивно-технологических параметров; постановка и проведение экспериментальных исследований; разработка макета узла оптического считывания с двухволновым преобразованием на основе оптического туннельного эффекта.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 166 страницы. Работа содержит 82 рисунка и 4 таблицы. Список использованных источников включает 125 наименования.

Во **введении** подтверждены актуальность темы диссертационного исследования, определены цель и задачи исследования, определены объект, предмет

и методы исследования, приведены научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов. Представлены сведения о внедрении, апробации и краткая структура диссертационной работы.

В **первой главе** представлен анализ современного состояния разработок МЭМС и МОЭМ преобразователей угловой скорости. Показано, что микроэлектромеханические преобразователи обладают низкой точностью, чувствительностью к линейным ускорениям, низкой стабильностью нуля, температурным гистерезисом. Показана перспективность развития направления, связанного с исследованием МОЭМ преобразователей угловых скоростей на основе ОТЭ. Сформулированы частные задачи исследования и разработки способов повышения точности измерений угловой скорости в различных условиях работы, которые подлежат решению в ходе разработки адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ.

Во **второй главе** описаны новая функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости и математическая модель, учитывающая газодинамическое демпфирование в субмикронных зазорах. Функциональная схема включает узлы оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта, гребенчатый электростатический привод первичных колебаний и блок обработки измерительной информации. Представлена разработка экспериментальной установки, позволяющей исследовать характеристики узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта. Проанализированы различные механизмы газодинамического демпфирования, определено допустимое давление внутри корпуса, обеспечивающие поддержание высокой добротности чувствительного элемента для измерения малых угловых скоростей.

В **третьей главе** проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов, влияющих на характеристики рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости. Разработан и обоснован алгоритм адаптации, обеспечивающий уменьшение дополнительной погрешности от действующего линейного ускорения.

Проведено исследование информационно-измерительной системы на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости, позволяющей определять параметры движения малогабаритных объектов с повышенной точностью в условиях действия линейного ускорения.

В четвертой главе представлена разработка двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта, позволяющего расширить динамический диапазон измерений угловой скорости. Предложен алгоритм температурной компенсации, основанный на термооптическом эффекте в двухволновых узлах оптического считывания. Предложена методика расчета рамочных МОЭМ преобразователей и разработан программный комплекс, реализующий данную методику.

**Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.2.11.** Информационно-измерительные и управляющие системы по пункту 2 – Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений, пункту 4 – Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования.

# ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

## 1.1 Вибрационные преобразователи угловой скорости

Вибрационные МЭМ и МОЭМ преобразователи угловой скорости (ПУС), основанные на измерении силы Кориолиса широко применяются для измерения угловой скорости или вибрации [1-11]. Такие преобразователи часто содержат чувствительный элемент, выполненный в виде рамки, камертона, осесимметричной микрополусферы, кольца или балки.

### 1.1.1 Рамочный преобразователь угловой скорости

Простейшая структура рамочного преобразователя угловой скорости состоит из массы, которая под действием силы Кориолиса совершает колебания вдоль оси движения и вторичные колебания вдоль оси чувствительности (Рисунок 1).

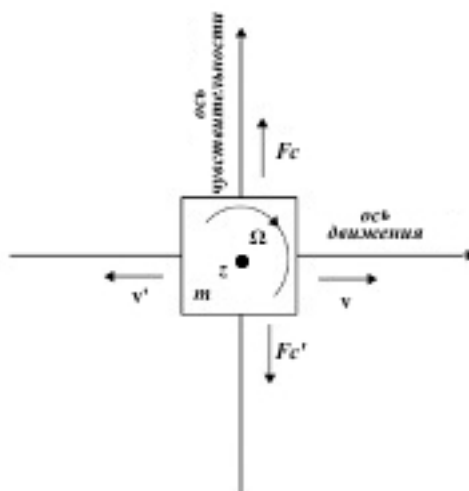


Рисунок 1 – Схема чувствительной структуры преобразователя угловой скорости с вибрационной массой

В системе координат, вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$ , инерционная масса  $m$ , вибрирующая (или движущаяся) со скоростью  $v$ , испытывает действие силы Кориолиса  $F_K$ :

$$F_K = -2m(\Omega \times v).$$

Угловая скорость, воздействующая на МЭМ ПУС, преобразуется в смещение инерционной массы чувствительной структуры под действием силы Кориолиса. Затем смещение чувствительной структуры преобразуется в выходной электрический сигнал с помощью преобразователя перемещений.

Рамочный МЭМ ПУС может быть представлен в виде одной чувствительной инерционной массы, которая может быть разделена на структуру без развязки [12-14] (Рисунок 2), структуру с одной развязкой [15-19] и структуру с двойной развязкой [20-22]. Развязка требуется для разделения режимов движения и чувствительности.

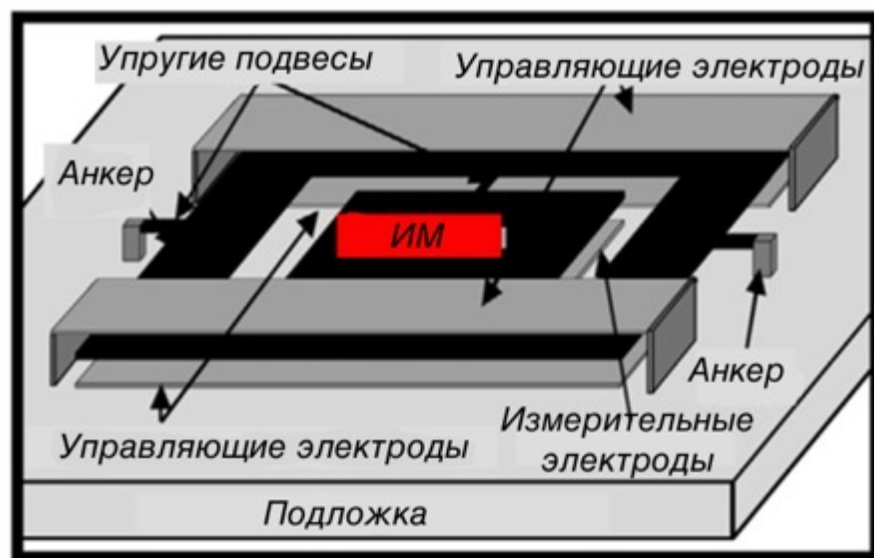


Рисунок 2 – Рамочный МЭМ ПУС [12]

Генератор движения приводит в движение внешнюю рамку под действием электростатической силы с постоянной амплитудой, вибрация передается на внутреннюю рамку через жесткий соединительный торсион, заставляя внутреннюю и внешнюю рамки вибрировать вдоль оси привода с одинаковой частотой. Когда вдоль оси вращения задается угловая скорость, под действием силы Кориолиса чувствительная масса, расположенная в центральной части, перемещает измерительную электродную пластину. Амплитуда колебаний внутренней рамки определяется путем измерения изменения емкости между электродами. Предельный уровень шума для такого преобразователя угловой

скорости составляет  $4^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$  при полосе пропускания 1 Гц, что соответствует случайному дрейфу нулевого сигнала  $240^\circ/\text{ч}$  [14].

### 1.1.2 Камертонные преобразователи угловой скорости

Камертонные преобразователи угловой скорости содержат двойную инерционную массу. Структура такого ПУС, впервые представленная Draper Laboratory в 1993 году, приведена на Рисунок 3 [23]. Двойная инерционная масса и дифференциальная схема измерения емкости значительно улучшают чувствительность ПУС. Разрешение такого преобразователя угловой скорости в полосе пропускания 1 Гц составляет  $0,19^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ , случайный дрейф нулевого сигнала  $0,72^\circ/\text{ч}$ , а смещение нуля  $55^\circ/\text{ч}$ .

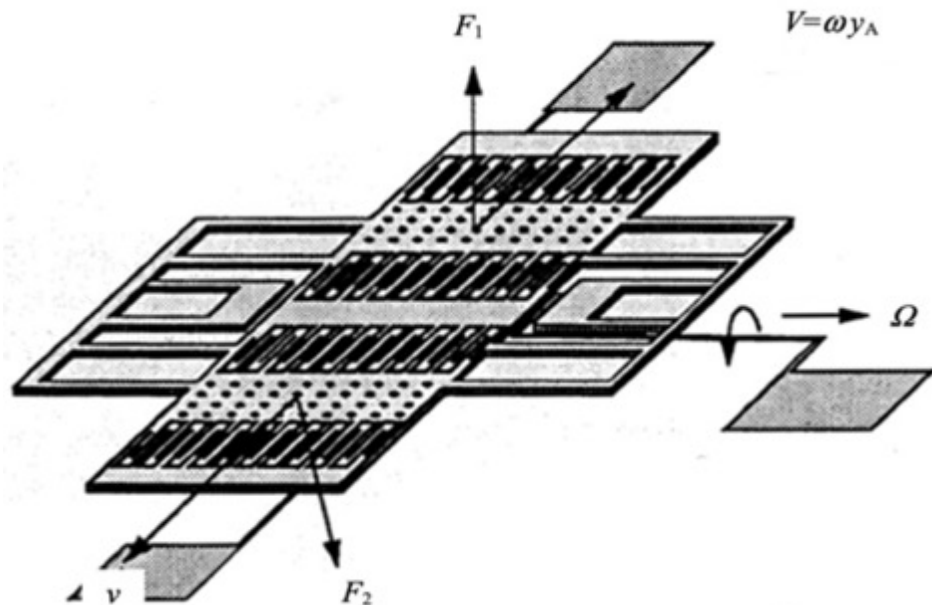


Рисунок 3 – МЭМ ПУС камертонного типа с двумя инерционными массами [23]

В 2019 году в Honeywell разработала МЭМ ПУС, используемый в инерционном блоке датчиков HG1930 (Рисунок 4).

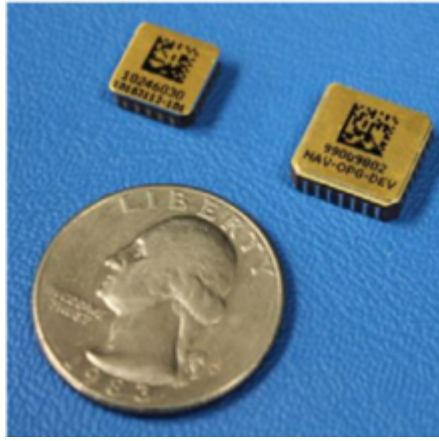


Рисунок 4 – Общий вид МЭМ ПУС производства Honeywell [24]

МЭМ ПУС производства Honeywell обладает случайным дрейфом нулевого сигнала  $0,36 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ , средней температурной стабильностью смещения нулевого сигнала  $0,2 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ - $0,12 \text{ } ^\circ/\text{ч}$  при полосе пропускания более 300 Гц [24]. Вариация Аллана при измерении смещения нулевого сигнала при температуре  $25^\circ\text{C}$  на частоте 12,5 Гц приведена на Рисунок 5 [24].

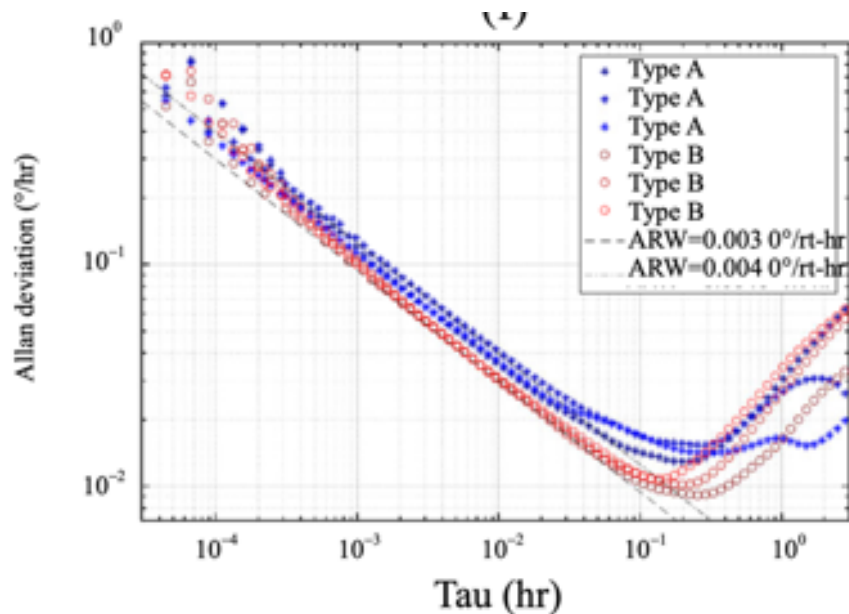


Рисунок 5 – Вариация Аллана МЭМ ПУС производства Honeywell [24]

Благодаря структуре из нескольких инерционных масс, преобразователи угловой скорости камертонного типа могут различать смещение в направлении измерения, вызванное силой Кориолиса, и смещение, вызванное линейными

ускорениями. Однако структура камертонного типа должна иметь сложную развязку, чтобы уменьшить связь между режимами движения и чувствительности. При этом необходимо технологически обеспечить идентичность инерционных масс, что усложняет технологию обработки кремниевой структуры и ограничивает точность такого типа преобразователей угловой скорости.

### 1.1.3 Микрополусферические и кольцевые резонансные преобразователи угловой скорости

Преобразователи с полусферическими и кольцевыми чувствительными элементами, используют резонансные колебания твердотельного резонатора для измерения угловой скорости. Основной принцип таких преобразователей основан на явлении стоячих волн в твердотельном резонаторе. При воздействии внешнего углового ускорения возникает сила Кориолиса, вызывающая прецессию узловых точек колебаний (Рисунок 6) [25-27].



Рисунок 6 – Колебания полусферического или кольцевого резонатора

Благодаря высокой симметрии резонатора, ПУС обладает высокой устойчивостью к случайным колебаниям, вызванным изменением температуры и другими дестабилизирующими факторами. Поэтому он может достичь лучших характеристик, чем рассмотренный ранее ПУС камертонного типа [24]. Колебания распределяются по резонатору и имеют четыре точки с волновой пучностью и четыре волновых узла, что называется режимом движения. Режим измерения



сдвинут на  $45^\circ$  от режима движения, и его волновая точка является волновым узлом режима движения. С помощью электрода, расположенного вне резонатора, возбуждают колебания в режиме движения [25]. Когда преобразователь вращается с угловой скоростью, вокруг оси, перпендикулярной плоскости кромки резонатора, энергия передается из режима движения в режим чувствительности. Измерительная система преобразователя определяет угловую скорость по амплитуде колебаний в режиме чувствительности [25, 27].

Основным ограничением точности ПУС с полусферическим резонатором является возможность изготовления высокосимметричного резонатора с высокой добротностью. В 2013 году Дж. Чо [28-30] представил прототип полусферического резонансного ПУС (Рисунок 7), со смещением нулевого сигнала  $1^\circ/\text{ч}$  и случайным дрейфом нулевого сигнала  $0,106^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ .

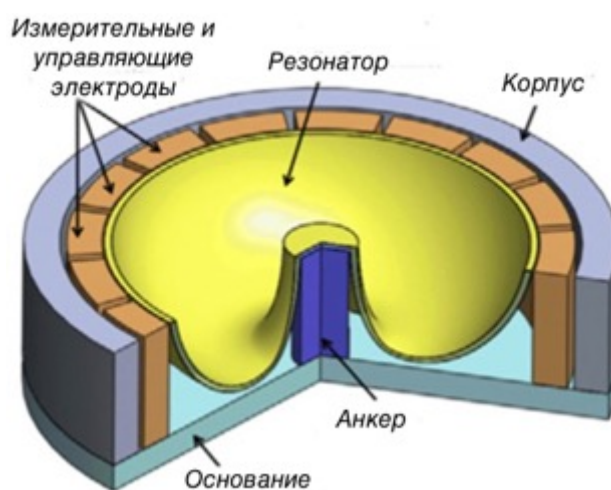


Рисунок 7 – Прототип полусферического ПУС [28]

В 2020 году исследователи из Мичиганского университета сообщили о полученных высоких характеристиках ПУС с полусферическим резонатором из плавленого кварца (Рисунок 8). Случайный дрейф нулевого сигнала составил  $0,00016^\circ/\sqrt{\text{ч}}$  и кратковременное смещение нулевого сигнала –  $0,0014^\circ/\text{ч}$  без температурной компенсации [29]. Добротность резонатора составила 5,2 млн при диаметре 1 см и частоте собственных колебаний 5,897 кГц [30].

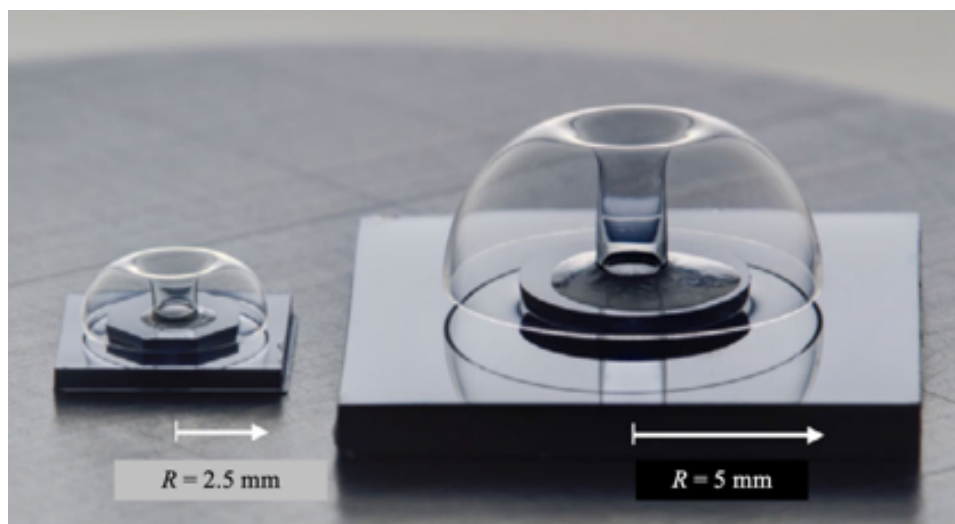


Рисунок 8 – Прототипы полусферического резонатора [30]

Полусферический резонансный ПУС обладает высокой точностью измерений, высокой стабильностью, надежностью и длительным сроком службы. Однако, поскольку технология изготовления таких резонаторов является сложной и дорогостоящей, применение подобных ПУС в недорогих системах становится затруднительно.

## 1.2 Преобразователи угловой скорости с оптическим съемом информации

### 1.2.1 Преобразователь угловой скорости с фотонными кристаллами

На основе технологии МОЭМС в 2002 году М. Норджиа [15] впервые представил преобразователь угловой скорости рамочного типа с одной инерционной массой, используя оптическую измерительную систему. В 2018 году А. Шейхалех и др. [16] предложили преобразователь угловой скорости рамочного типа с электростатическим приводом и оптической измерительной системой на основе фотонных кристаллов (Рисунок 9).

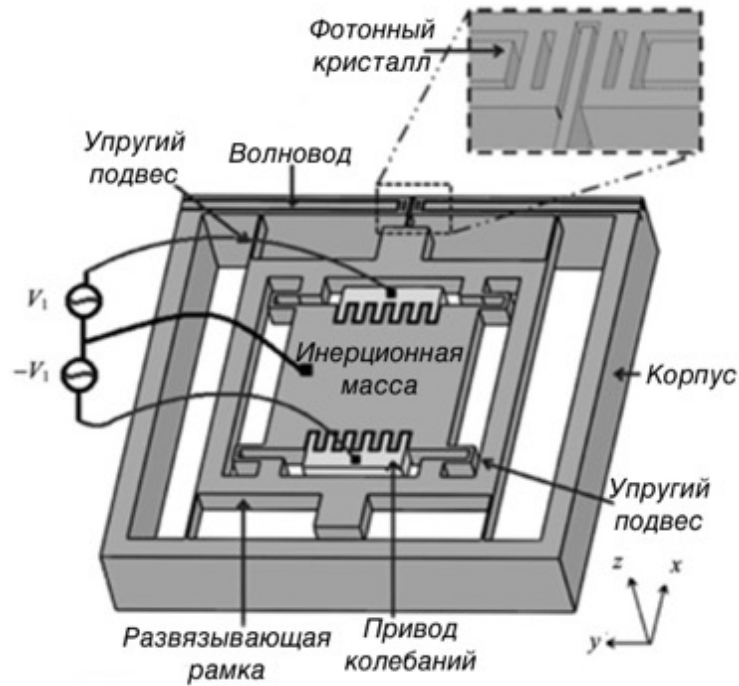


Рисунок 9 – МОЭМ преобразователь угловой скорости рамочного типа с фотонным кристаллом [16]

В их работах представлены результаты моделирования, демонстрирующие, что у структуры есть рабочая полоса частот в 200 Гц, механическая чувствительность к угловой скорости  $\Delta y / \Delta \Omega$  составляет 0,14 нм/(°/с), оптическая чувствительность  $\Delta \lambda / \Delta \Omega$  – 0,051 нм/(°/с), а диапазон измерения  $\pm 500$  °/с.

### 1.2.2 Преобразователь угловой скорости с брэгговской решеткой

В 2016 году С. Тригона [17, 18] представил МОЭМ преобразователь угловой скорости рамочного типа с электростатическим приводом, одновременно используемым в качестве распределенной брэгговской решетки для измерения смещения (Рисунок 10).

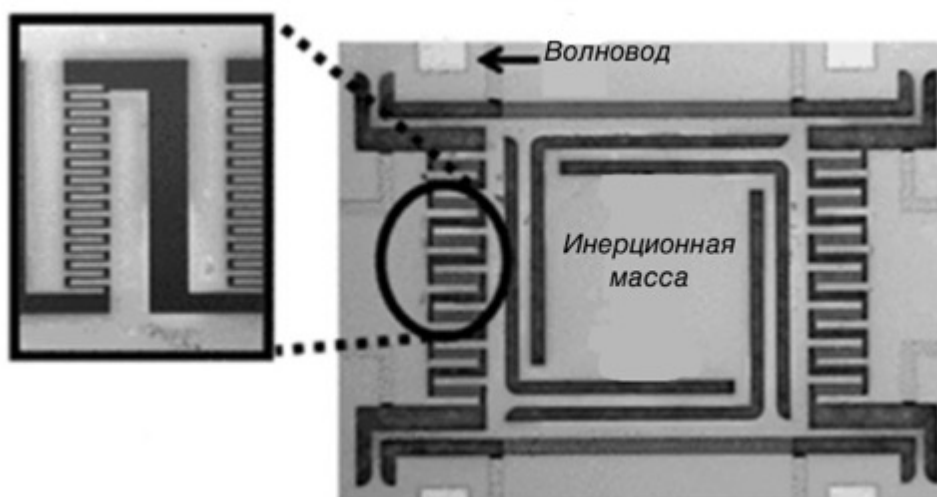


Рисунок 10 – МОЭМ преобразователь угловой скорости рамочного типа с распределенной брэгговской решеткой [49]

Электростатический привод возбуждает вынужденные колебания инерционной массы в вертикальном направлении. При воздействии угловой скорости инерционная масса смещается в горизонтальном направлении, изменяя тем самым воздушный зазор в распределенной брэгговской решетке [50-52]. Изменение зазора определялось по изменению оптического рефракционного спектра. Чувствительность этого преобразователя угловой скорости составляет 18,7 мВ/град/с.

### 1.2.3 Преобразователь угловой скорости с дифракционной решеткой

В 2021 году М. Ли [31, 32] и К. Ксе [33] представили МОЭМ преобразователь угловой скорости рамочного типа с электромагнитным приводом и дифракционным преобразователем перемещений (Рисунок 11).

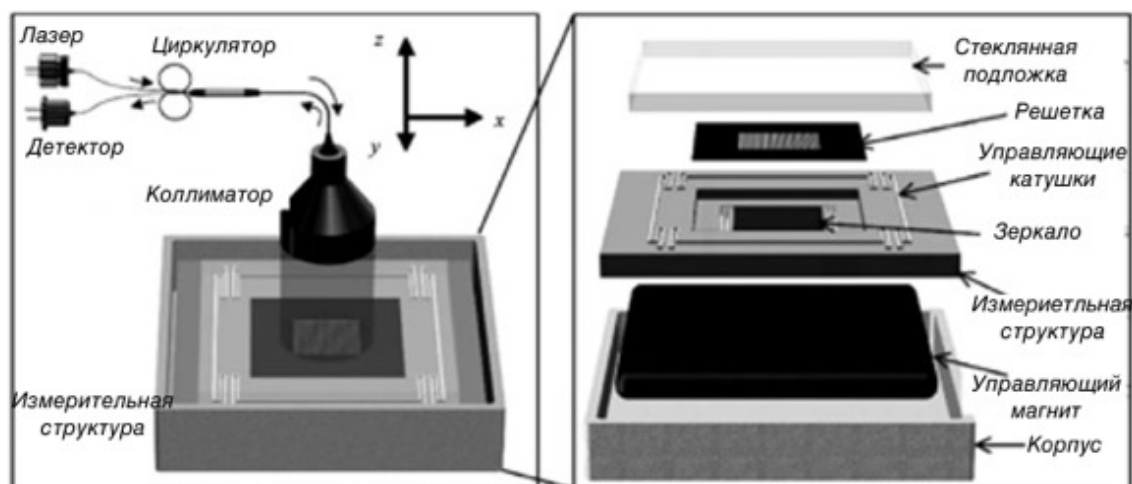


Рисунок 11 – МОЭМ преобразователь угловой скорости рамочного типа с дифракционной решеткой [32]

Инерционная масса преобразователя угловой скорости размещена в однородном магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами. Вызванное смещение по оси  $Z$  преобразуется в изменение интенсивности излучения структурой дифракционного датчика перемещений. Из экспериментальных данных следует, что его чувствительность может достигать 0,09 %/нм [33].

### 1.3 Преобразователи угловой скорости на основе эффекта Саньяка

Существуют также МОЭМ преобразователи угловой скорости, использующие низкий уровень интенсивности оптического излучения. Их можно разделить на резонансные и интерференционные преобразователи. Резонансные МОЭМ преобразователи угловой скорости в основном реализуются путем изготовления оптических волноводных резонаторов на кремниевых пластинах. Интерферометрические МОЭМ преобразователи угловой скорости заменяют оптическое волокно планарным оптическим волноводом или набором микрзеркал. Принцип его работы такой же, как и у традиционного оптического преобразователя угловой скорости, который использует эффект Саньяка для определения угловой скорости.

Часто в оптических преобразователях для измерения угловой скорости используется эффект Саньяка [34-38]. Пунктирная и сплошная линии – пути,

пройденные лучом, движущимся в направлении вращения и против вращения (Рисунок 12). Разница между прямым и обратным оптическими путями пропорциональна угловой скорости вращения преобразователя. Таким образом, изменение угловой скорости может быть получено путем измерения изменения разности оптических путей.

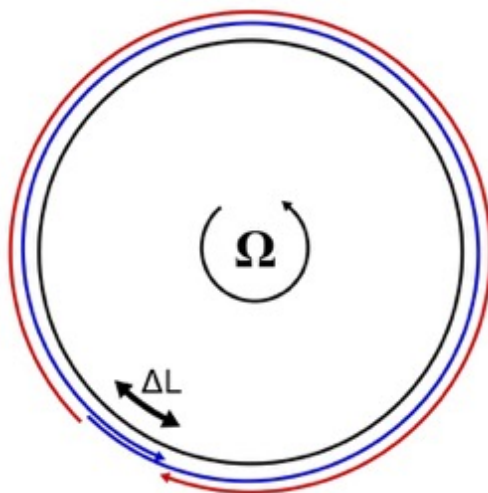


Рисунок 12 – К пояснению эффекта Саньяка

Традиционные оптические преобразователи угловой скорости можно разделить на кольцевые лазерные преобразователи угловой скорости [39-43] и волоконно-оптические преобразователи угловой скорости [44-47] в соответствии с их конструкциями, работающими на эффекте Саньяка. Для измерения малых угловых скоростей лазерным кольцевым преобразователями необходимо использовать схему «фазового дрожания». При вращении преобразователя угловой скорости на смесительной призме будет возникать движение интерференционной картины, а сигнал углового положения и угловой скорости преобразователя угловой скорости может быть получен путем ее обработки.

По принципу работы такие преобразователи можно разделить на интерферометрические волоконно-оптические [48, 49], резонансный волоконно-оптический преобразователь [50-52] и волоконно-оптический преобразователь с рассеянием Бриллюэна [53-55]. Технология интерферометрического волоконно-оптического преобразователя является наиболее развитой и широко используемой. Круговой оптический путь, необходимый для возникновения эффекта Саньяка,

формируется волоконной петлей, намотанной на  $n$ -петлевую катушку. При увеличении радиуса катушки и увеличении общей длины волокна и повышается точность измерений угловой скорости.

Волоконно-оптические преобразователи (ВОП) угловой скорости, производимые компанией Honeywell, занимают лидирующие позиции в мире [56]. Такие преобразователи применяются для систем, требующих длительного срока службы, низкого уровня шума и точность от  $0,002^\circ/\text{ч}$  до  $0,004^\circ/\text{ч}$ . Интерферометрические волоконно-оптические преобразователи угловой скорости высокой точности имеют стабильность смещения нулевого сигнала в диапазоне  $0,0002^\circ/\text{ч}$ - $0,0006^\circ/\text{ч}$ .

В 2013 году исследователи из Стэнфордского университета продемонстрировали, что при управлении ВОП с помощью лазера с относительно широкой шириной спектральной линией (10 МГц), смещение нуля ВОП составляет  $1,1^\circ/\text{с}$ , а случайный дрейф -  $0,058^\circ/\text{ч}$  [46].

По сравнению с вибрационными, рассмотренные преобразователи не имеют подвижной структуры. Поэтому к преимуществам волоконно-оптических преобразователей можно отнести длительный срок службы и высокую помехозащищенность. Однако большой размер конструкции и высокая стоимость приводят к тому, что их применение в недорогих информационно-измерительных системах ограничено. Поэтому использование технологии МОЭМС для уменьшения объема и стоимости волоконно-оптических преобразователей угловой скорости становится перспективным направлением исследований.

#### **1.4 Сравнительный анализ методов измерения угловой скорости**

При анализе современного состояния разработки микросистемных преобразователей угловой скорости используются следующие основные характеристики: смещение нуля (СН), случайный дрейф нулевого сигнала (СДН), масштабный коэффициент (МК), динамический диапазон, пропускная способность, соответствующая различным условиям эксплуатации [57-61].

Наиболее важными параметрами для информационно-измерительных и управляющих систем являются СН и СДН. СН представляет собой точность ПУС в течение длительного времени работы, которое отражает изменение смещения нулевого сигнала со временем после выхода на рабочий режим. СДН отражает точность ПУС за относительно короткое время, связанное с термомеханическим шумом, который приводит к ошибке с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением. МК, также называемый чувствительностью преобразователя, представляет собой коэффициент линейной корреляции между выходным сигналом и входной угловой скоростью. Большое значение МК снижает уровень шума, что обеспечивает более высокое отношение сигнал/шум (SNR). С помощью повышения добротности чувствительного элемента можно увеличить значение МК, что одновременно приведет к уменьшению полосы пропускания.

Часто ПУС выбирают с соответствующим динамическим диапазоном измерений, поскольку относительная точность преобразователя постоянна. Теоретически, низкий СДН и большой МК приведут к уменьшению динамического диапазона измерений. Это означает, что не все характеристики ПУС могут быть улучшены одновременно. При измерении большой угловой скорости возникает сильное воздействие инерциальных сил, приводящее к дестабилизации работы ПУС или к выводу его из строя. Таким образом необходимо рассматривать еще один параметр ПУС – максимальное значение угловой скорости, выдерживаемое ПУС.

В соответствии с ключевыми параметрами, рассмотренными выше, ПУС можно разделить на три класса: низкой, средней и высокой точности. В основном, преобразователи угловой скорости низкой точности, используются в бытовой электронике и в автомобильной навигации. Преобразователи угловой скорости высокой точности используются в информационно-измерительных и управляющих системах, авиационной навигации, позиционировании, где требуется как кратковременная, так и долговременная точность. Общепринятые характеристики ПУС для различных точностей приведены в таблице 1.



Таблица 1 – Значения параметров преобразователей угловой скорости различной точности

Параметр	Низкая точность	Средняя точность	Высокая точность
Смещение нуля, град/ч	10 – 1000	0,1 – 10	<0,01
Случайный дрейф нулевого сигнала, град/√ч	>0,5	0,5 – 0,05	<0,01
Нелинейность масштабного коэффициента, %	0,1 – 1	0,01 – 0,1	<0,001
Полоса пропускания, Гц	>70	100	100
Диапазон измерений, град/с	50 – 1000	>500	>400
Максимальная ударная нагрузка, g	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>

ВОП угловой скорости на основе эффекта Саньяка обладают хорошими значениями смещения нуля и случайного дрейфа, но большие габариты и высокая стоимость ограничивают их широкое применение. МОЭМ преобразователи угловой скорости изготавливаются по технологии кремниевой микроэлектроники, что сохраняет точностные характеристики ВОП угловой скорости, но уменьшает их стоимость и размер. Сложность создания оптического преобразователя угловой скорости на основе МОЭМС заключается в том, что трудно спроектировать чувствительный элемент с высокой добротностью на ограниченной площади кристалла.

Преобразователи угловой скорости на основе МЭМС обладают потенциалом для достижения более высоких точностей за счет внедрения технологий оптического считывания. Низкая стоимость, габариты, вес и энергопотребление становятся основными факторами для повышения конкурентоспособности новых информационно-измерительных систем. Характеристики преобразователей угловой скорости сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Характеристики различных МЭМ преобразователей угловой скорости

Производитель	Модель	Диапазон измерения	Дрейф нулевого сигнала	Смещение нулевого сигнала	Температурная погрешность
STMicroelectronics [62]	I3G4250D	$\pm 245$ град/с	300 град/ч	-	$\pm 0,03$ град/с/°C
Bosch Sensortec [63]	BMG160	$\pm 500$ град/с	40 град/ч	-	$\pm 0,015$ °/град/°C
Bosch Sensortec [64]	BMG250	$\pm 1000$ град/с	1800 град/ч	-	$\pm 0,05$ °/град/°C
Analog Devices [65]	ADXRS453	$\pm 300$ град/с	14,5 град/ч	$\pm 16$ град/час	-
АО «Гирооптика» [66]	БИЧЭ-100-мини	$\pm 300$ град/с	180 град/ч	$\pm 0,2$ °/с	-
ООО «Лаборатория микроприборов» [67]	ТГ-19	$\pm 900$ град/с	0,5 °/с	-	-
НПП «Гиронав» [68]	MP-300	$\pm 300$ град/с	5 град/ч	$\pm 0,2$ °/с	-

Из-за ограничений точности изготовления МЭМС и конструктивного исполнения, большинство преобразователей угловой скорости не достигает теоретической точности измерений. Поэтому разрабатываются преобразователи угловой скорости, основанные на новых принципах работы, таких, как преобразователи угловой скорости ядерного магнитного резонанса [69], холодные атомные преобразователи угловой скорости [70-73]. Альтернативным способом улучшения характеристик кремниевого микромеханического вибрационного преобразователя угловой скорости является разработка оптических измерительных систем для детектирования положения чувствительного элемента.

Узлы оптического считывания (УОС) положения чувствительного элемента в МОЭМ ПУС, построенные на основе перестраиваемых фотонных кристаллов или модах «шепчущей галереи», позволяют измерять угловые скорости с суммарной погрешностью порядка сотен микро радиан в секунду. Чувствительные элементы таких преобразователей имеют сложную геометрическую форму, а их перемещения находятся в диапазоне десятков нанометров. Эти обстоятельства накладывают ряд высоких требований к основным узлам, а достижение высокой

точности измерений обеспечивается с помощью калибровки. Отдельно следует выделить рамочные МОЭМ преобразователи с УОС на основе оптического туннельного эффекта, у которых чувствительный элемент имеет более простую геометрическую форму, а диапазон его перемещений находится в субмикрометровом диапазоне. Разработка и анализ характеристик новых адаптивных рамочных МОЭМ преобразователей на основе ОТЭ является актуальной задачей, которая направлена на повышение точности измерения угловой скорости в различных условиях эксплуатации.

### **1.5 Разработка обобщенной схемы адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта**

Основываясь на проведенном анализе структур преобразователей угловой скорости и оптических измерительных систем, разработана обобщенная функциональная схема МОЭМ преобразователя угловой скорости с рамочным чувствительным элементом (РЧЭ), использующего узел оптического считывания на основе ОТЭ и гребенчатый электростатический привод для возбуждения первичных колебаний (Рисунок 13) [74].

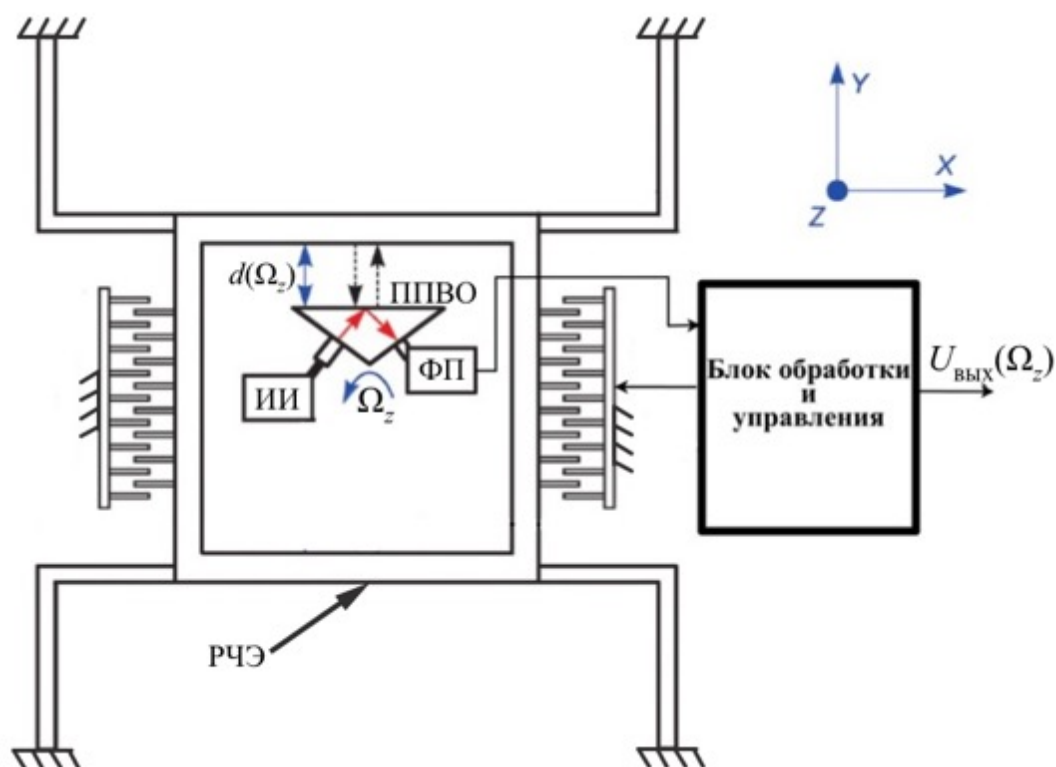


Рисунок 13 – Обобщенная функциональная схема адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя на основе оптического туннельного эффекта

УОС содержит источник оптического излучения (ИИ), призму полного внутреннего отражения (ППВО) и фотоприемник (ФП), связанные по оптическому лучу. Выход фотоприемника соединен со входом блока обработки и управления. Зазор  $d$  между поверхностями отражения призмы полного внутреннего отражения и гранями рамочного чувствительного элемента является равномерным и не превышает величину длины волны источника оптического излучения.

Использование оптического метода, основанного на оптическом туннельном эффекте для съема вторичных колебаний, амплитуда которых пропорциональна угловой скорости, повышает помехозащищенность датчика, так как в контуре возбуждения первичных колебаний и системе съема вторичных колебаний используются сигналы различной физической природы, что как следствие, приводит к уменьшению угловой скорости, эквивалентной шумам преобразователя.

## 1.6 Постановка частных задач исследования

Целью диссертационной работы является повышение точности измерения угловой скорости микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости за счет применения алгоритмов адаптации к внешним дестабилизирующим факторам и оптической измерительной системы.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих научно-технических задач:

- 1) разработка новой функциональной схемы рамочного преобразователя угловой скорости, включающей оптическую измерительную систему, основанную на использовании оптического туннельного эффекта;
- 2) построение и исследование математических моделей рамочного чувствительного элемента и оптической измерительной подсистемы, а также проведение численного моделирования для анализа их характеристик;
- 3) исследование параметров оптической измерительной системы с целью формализации преобразовательной функции субмикрометровых перемещений чувствительного элемента в выходной электрический сигнал;
- 4) анализ влияния внешних дестабилизирующих воздействий на погрешность преобразования и исследование механизмов демпфирования рамочного чувствительного элемента при различных режимах работы;
- 5) разработка адаптивных алгоритмов компенсации погрешностей, обусловленных воздействием дестабилизирующих факторов различной природы;
- 6) проведение комплекса экспериментальных исследований оптической измерительной системы, реализованной на основе оптического туннельного эффекта, с оценкой её характеристик;
- 7) разработка методики расчёта рамочного преобразователя угловой скорости с учётом влияния ключевых параметров конструкции и технологии на его точностные показатели.

## **Выводы по Главе 1**

Проведен анализ современного состояния разработок МЭМ и МОЭМ преобразователей угловой скорости, показана перспективность развития направления, связанного с исследованием преобразователей угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта для информационно-измерительных и управляющих систем.

Проведен аналитический обзор основных методов детектирования положения чувствительных элементов ПУС, по результатам которого оценены положительные и отрицательные аспекты их использования. Показана эффективность высокочувствительных оптических измерительных систем. Рассмотрены различные виды преобразователей угловых скоростей с разными типами чувствительные элементы. Предлагаемое совмещение МЭМ преобразователей угловой скорости, основанных на силе Кориолиса, и оптических измерительных систем, построенных на ОТЭ, позволит повысить чувствительность к нанометровым перемещениям чувствительного элемента и ограничить влияние силовых воздействий на него со стороны элементов считывания и управления.

Разработана и обоснована обобщенная функциональная схема рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта.

Выполнена постановка частных задач, которые подлежат решению в ходе разработки и исследования адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАМОЧНОГО МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

### 2.1 Разработка функциональной схемы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта

Предложен новый рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости, включающий в себя узел оптического считывания на основе ОТЭ для определения положения РЧЭ (Рисунок 14).

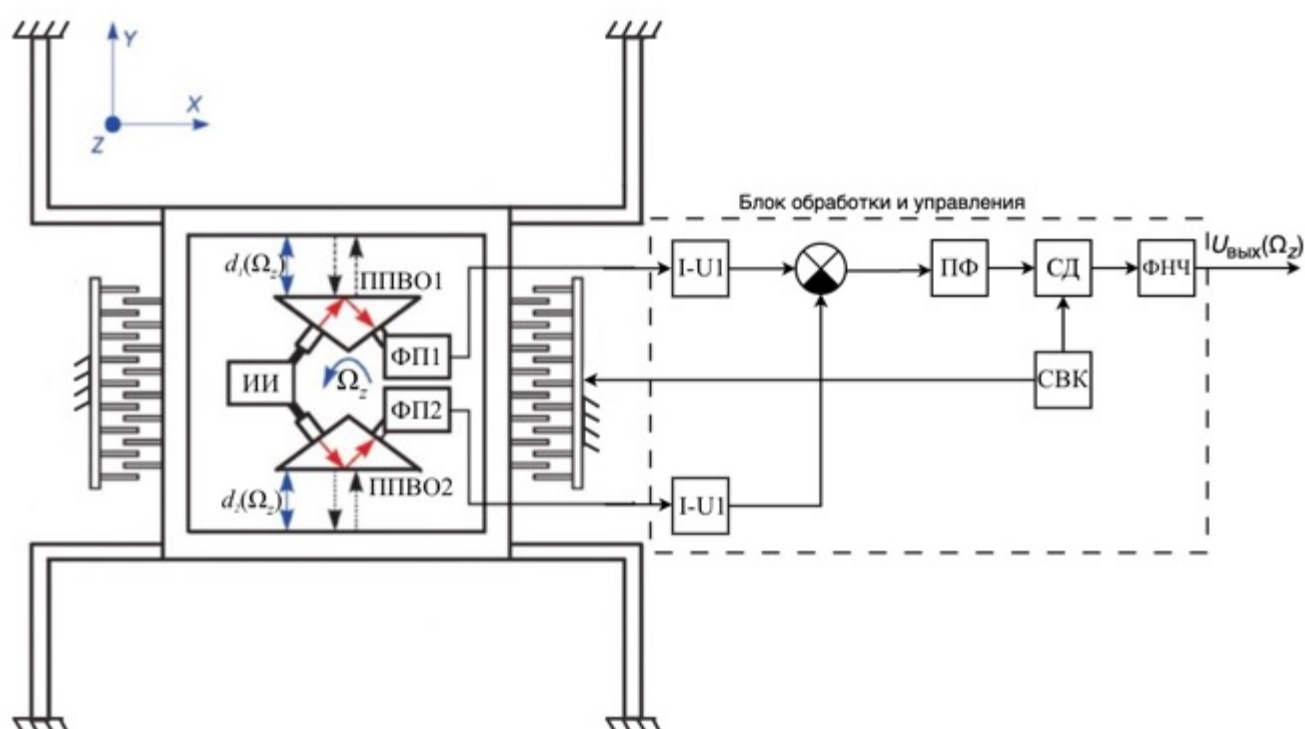


Рисунок 14 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с дифференциальным считыванием на основе ОТЭ

Предлагаемый преобразователь угловой скорости содержит основание, РЧЭ, расположенный с зазором относительно основания, связанный с упругими подвесами, систему возбуждения колебаний в режиме движения (СВК), состоящую из неподвижных электродов, закрепленных на основании, и подвижных электродов, закрепленных на внешней стороне РЧЭ. Каждый из узлов оптического считывания на основе ОТЭ состоит из общего источника оптического излучения

(ИИ), фотоприемников (ФП1, ФП2), оптических модуляторов, выполненных в виде призм полного внутреннего отражения (ППВО1, ППВО2) и поглощающего оптического элемента, закрепленного на наружной стороне РЧЭ. Поверхности отражения призм расположены на противоположных сторонах РЧЭ. Величина зазоров между отражающими поверхностями призм и поглощающими оптическими элементами является равномерной и не превышает величину длины волны источника оптического излучения.

Блок обработки и управления содержит преобразователи ток напряжение (I-U1, I-U2), сумматор, полосовой фильтр (ПФ), синхронный демодулятор (СД), фильтр низкой частоты (ФНЧ) и СВК. ПФ имеет узкую полосу пропускания с центральной частотой, равной собственной частоте колебаний РЧЭ. Синхронный демодулятор преобразовывает входной гармонический сигнал и передает его на ФНЧ, где выделяется постоянный сигнал по уровню 3 дБ, пропорциональный угловой скорости.

Основной элемент схемы – рамочный чувствительный элемент, перемещения которого связаны с внешней угловой скоростью  $\Omega_z$ , создающей силу Кориолиса  $F_K$ , и регистрируются узлами оптического считывания на основе ОТЭ. В качестве ИИ используется лазерный диод инфракрасного диапазона. Оптическое излучение источника разветвляется, вводится в два световода, проходит через призмы ППВО1, ППВО2 и поступает в фотоприёмники ФП1, ФП2. Блок обработки и управления формирует сигналы для СВК и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , пропорциональное, действующей угловой скорости  $\Omega_z$ .

Колебания в режиме движения РЧЭ возбуждаются вдоль оси  $OX$  с помощью сил электростатического взаимодействия на частоте резонанса РЧЭ. Для возбуждения колебаний в режиме движения используется СВК, выполненная в виде гребенчатого электростатического привода, состоящая из подвижных и неподвижных электродов с зазором, постоянным по ширине и заполненным диэлектрическим слоем.

Таким образом, определены основные узлы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости и их связи.



## **2.2 Разработка и исследование узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта**

### **2.2.1 Разработка и исследование математической модели узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта**

В рассматриваемом преобразователе угловой скорости амплитуда вибрации в режиме чувствительности чувствительного элемента пропорциональна входной угловой скорости вращения. При этом, частота вибрации, которая задается частотой СВК и выбирается с учетом собственной частоты конструкции, не содержит информации об угловой скорости вращения, но задает дополнительные требования к скорости детектирования измерительной системы. Амплитуда перемещений чувствительного элемента, создаваемая угловой скоростью вращения находится на субмикронном уровне, что в свою очередь означает, что измерительная система должна считывать перемещения с нанометровой точностью. Узел оптического считывания на основе ОТЭ может обеспечить достаточную чувствительность для измерения нанометровых перемещений РЧЭ.

В основе работы УОС с оптическим туннелированием лежит возбуждение эванесцентного поля, которое существует в оптически менее плотной среде и затухает согласно экспоненциальному закону [75], причем глубина проникновения такого поля в этой среде примерно равна длине волны  $\lambda$  источника излучения. Туннелируемая оптическая мощность зависит от отражательной способности  $R$  границы раздела сред, поляризации излучения, ширины зазора  $d$ , а также угла падения  $\theta$  оптического излучения на границу раздела двух сред, обеспечивающего условие полного внутреннего отражения [76-80].

Узел оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта содержит источник оптического излучения, фотоприемник и призму полного внутреннего отражения, в которой распространяется оптическое излучение (Рисунок 15). ИИ создает оптическое излучения с длиной волн  $\lambda$  и мощностью  $P$ . Если кромка рамочного чувствительного элемента МОЭМ преобразователя угловой скорости приближается к местам отражения оптического излучения на

расстояние  $d$ , которое меньше длины волны оптического излучения, то часть этого излучения будет туннелировать в РЧЭ, формируя на фотоприемнике амплитудно-модулированный сигнал.

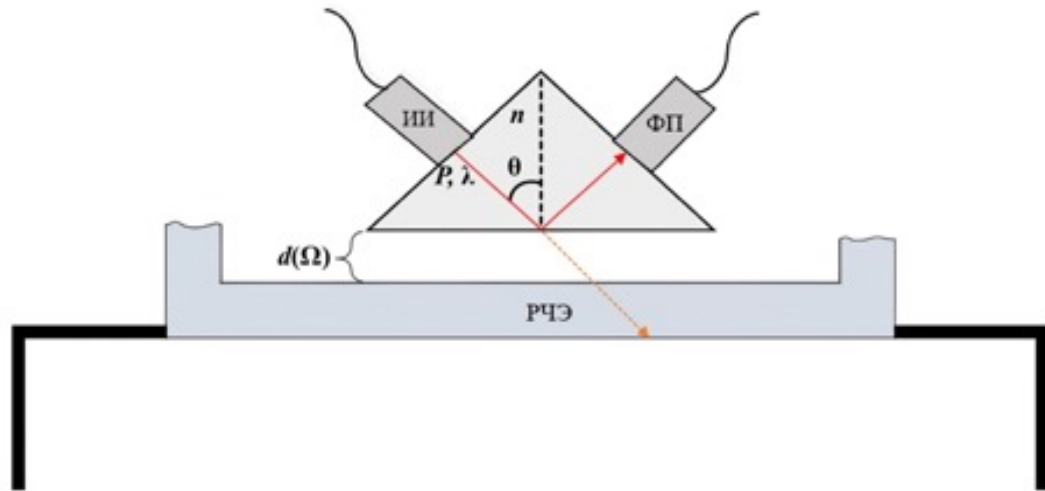


Рисунок 15 – Функциональная схема узла оптического считывания на основе ОТЭ

Изменение зазора  $d$  между УОС и РЧЭ сопровождается модуляцией отражательной способности  $R$  границ разделов сред «УОС-воздух-РЧЭ». Фотоприемник генерирует фототоки пропорциональные изменениям зазора  $d$ , индуцированных угловой скоростью  $\Omega_z$ . Глубина модуляции зависит от отражательной способности  $R$  границы раздела сред, которую можно представить с учетом [75] в виде:

$$R(\Lambda) = 0,5 \left[ \left( 1 + \frac{\sin^2 \varphi_{TE}}{\sinh^2 \Lambda} \right)^{-1} + \left( 1 + \frac{\sin^2 \varphi_{TM}}{\sinh^2 \Lambda} \right)^{-1} \right], \quad (1)$$

где  $\varphi_{TE}$ ,  $\varphi_{TM}$  – фазы параллельно и перпендикулярно поляризованных волн соответственно:

$$\varphi_{TE} = \arctan \left( \frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos^2 \theta - n^2 (n^2 \sin^2 \theta - 1)} \right), \quad (2)$$

$$\varphi_{TM} = \arctan \left( \frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n^2 \cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1} \right), \quad (3)$$

где  $n$  – показатель преломления призмы;

$\theta$  – угол падения оптического излучения;

$\Lambda$  – глубина проникновения эванесцентного поля,

$$\Lambda(d(\Omega_z), \lambda) = -2\pi \frac{d(\Omega_z)}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}. \quad (4)$$

Из формул (1)-(4) видно, что функция преобразования узла оптического считывания фактически зависит от безразмерной величины  $d/\lambda$ . Чувствительность узла оптического считывания  $S$  определится как

$$S = \frac{\partial R(d[\Omega], \theta, \lambda, n)}{\partial (d[\Omega]/\lambda)}. \quad (5)$$

Проведем численное моделирование узла оптического считывания для определения его характеристик. На Рисунок 16 показаны результаты расчёта отражательной способности  $R$  и чувствительности  $S$  УОС. Максимальная крутизна  $S_{max}$ , равная 1,9, наблюдается при  $d \approx 0,2\lambda$ .

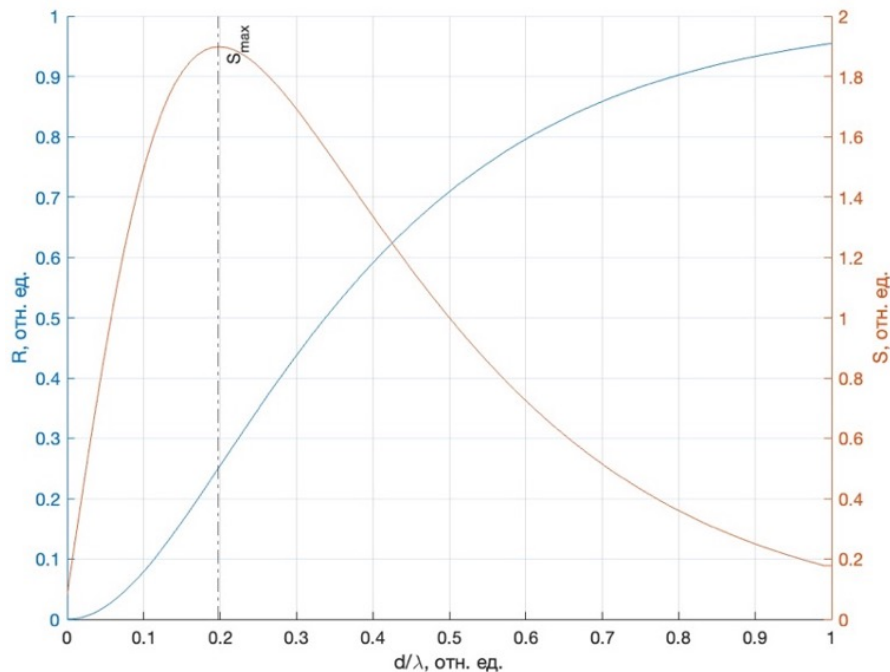


Рисунок 16 – Отражательная способность и нормированная чувствительность узла оптического считывания на основе ОТЭ

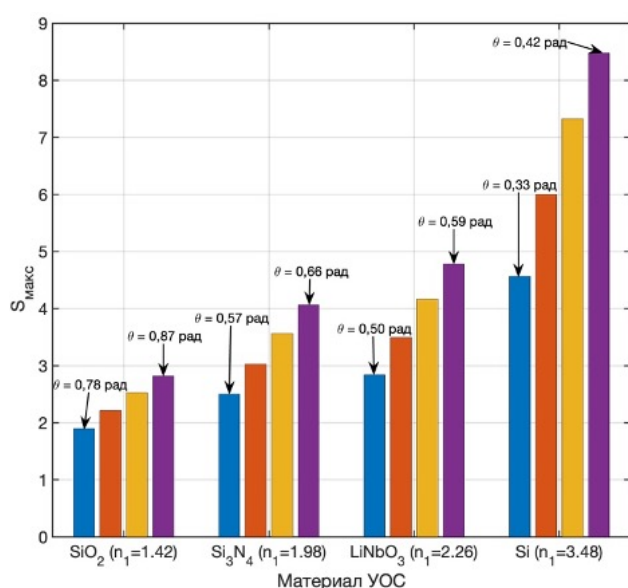
Нормированный диапазон измерений  $\Delta d/\lambda$  определяется по графику функции  $S(d/\lambda)$  по допустимому уменьшению нормированной чувствительности. Таким

образом, определяются значения нормированных минимальных и максимальных зазоров  $d_{\min}/\lambda$ ,  $d_{\max}/\lambda$  соответственно. Начальный зазор  $d_0/\lambda$  соответствует середине полученного диапазона изменения зазоров.

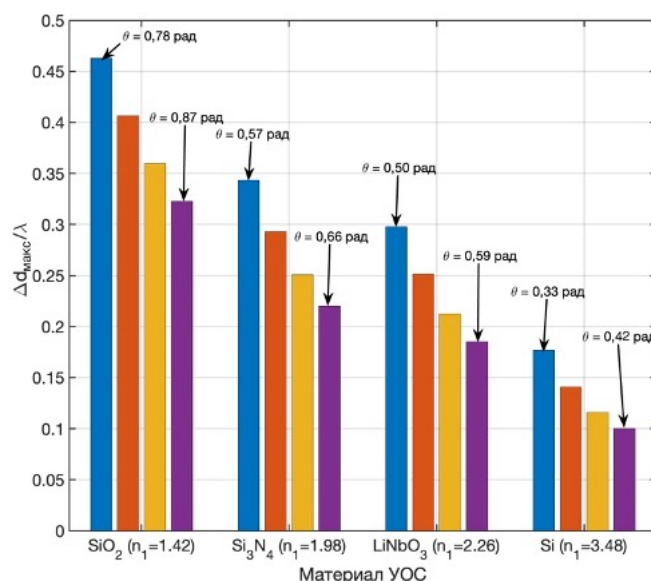
Определим значения минимального  $d_{\min}$  и максимального  $d_{\max}$  зазоров по критерию спада чувствительности  $S$  в 2 раза от максимальной величины:

$$\begin{cases} d_{\min} = 0,06\lambda, \\ d_{\max} = 0,52\lambda. \end{cases} \quad (6)$$

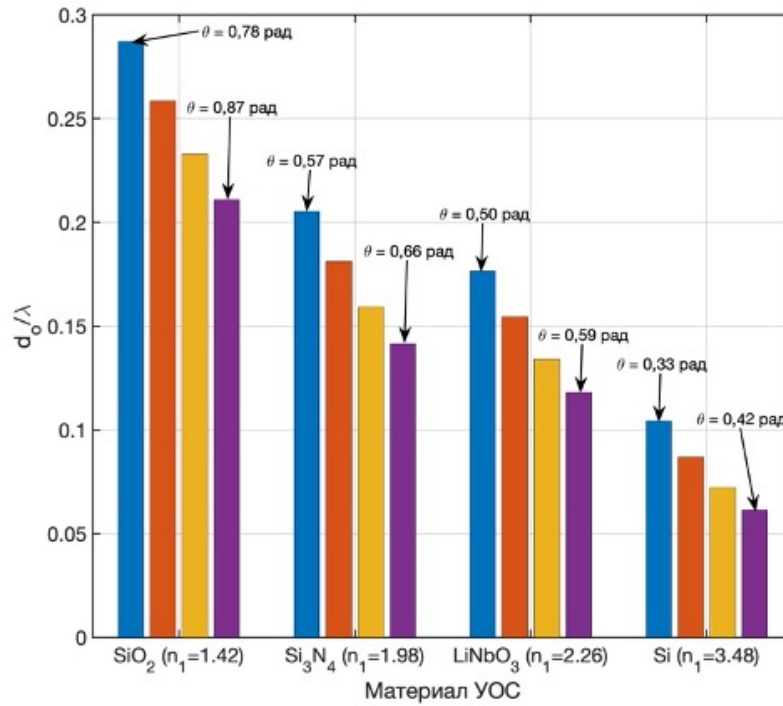
Проведем расчет нормированной чувствительности УОС по формуле (5) для часто используемых материалов ППВО: 1 –  $\text{SiO}_2$ , 2 –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 3 –  $\text{LiNbO}_3$ , 4 –  $\text{Si}$  и определим ее максимальные значения, при следующих параметрах: показатели преломления материалов  $n_{1i}$  (второй индекс  $i$ , обозначает порядковый номер материала),  $n_{11} = 1,42$ ;  $n_{12} = 1,98$ ;  $n_{13} = 2,26$ ;  $n_{14} = 3,48$ ;  $n_2 = 1,00$ ;  $\theta = \theta_{\text{кр}} \dots \theta_m$ , где  $\theta_{\text{кр}}$  – критический угол падения, определяемый по закону Снеллиуса,  $\theta_m$  – максимальный угол падения, задаваемый при расчете  $\theta_m < 1,57$  рад. На Рисунк 17 представлены результаты расчетов максимальной нормированной чувствительности УОС (а), нормированного диапазона измерения рабочих зазоров (б), начального зазора (в) для различных материалов ППВО и углов  $\theta$  с шагом 0,03 рад.



а)



б)



в)

Рисунок 17 – Расчётные параметры УОС для различных материалов ППВО и углов  $\theta$ : максимальная нормированная чувствительность УОС (а), нормированный диапазон измерения рабочих зазоров (б), нормированный начальный зазор (в)

При увеличении  $n_1$  значение максимальной нормированной чувствительности УОС  $S_{\text{макс}}$  увеличивается, при этом уменьшается диапазон измерения рабочих зазоров  $\Delta d_{\text{макс}}/\lambda$ , равное  $d_{\text{макс}} - d_{\text{мин}}$ , а значение начального зазора  $d_0$  смещается к меньшей границе диапазона измерения рабочих зазоров  $\Delta d_{\text{макс}}/\lambda$ .

Для рассмотренного набора материалов ППВО определено, что наблюдаются линейные зависимости расчётного параметра от угла падения и степенные зависимости от показателя преломления:

$$S_{\text{макс}} = (1,702n_1^2 + 7,179n_1 + 4,732)\theta - 26,58n_1^{0,13} + 22,37,$$

$$\frac{\Delta d_{\text{макс}}}{\lambda} = (-0,0096n_1^2 + 0,2134n_1 - 1,026)\theta - 1,464n_1^{-1,14} - 0,1349, \quad (7)$$

$$\frac{d_0}{\lambda} = (-0,0498n_1^2 + 0,4202n_1 - 1,307)\theta + 1,636n_1^{-1,49} - 0,0023.$$

Чувствительность  $S$  узла оптического считывания обратно пропорциональна длине волны  $\lambda$  и имеет максимальное значение от  $3.58 \text{ мкм}^{-1}$  для  $\lambda = 0.55 \text{ мкм}$  до  $1.22 \text{ мкм}^{-1}$  для  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$  (Рисунок 18).

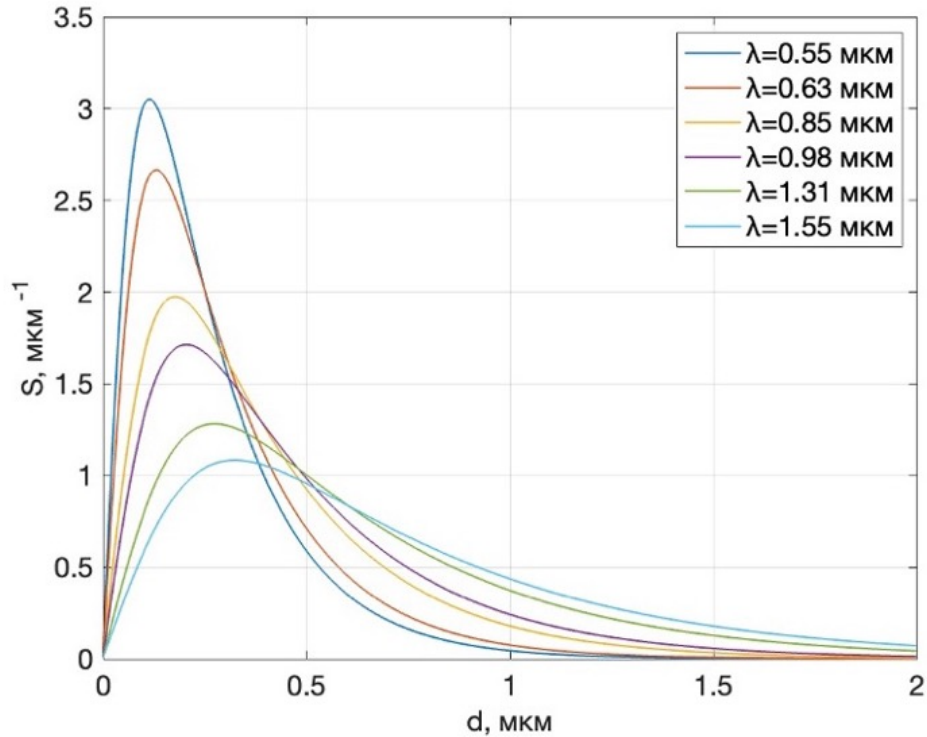


Рисунок 18 – Зависимость чувствительности узла оптического считывания  $S$  от величины зазора  $d$

Так при использовании  $\text{SiO}_2$ ,  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ ,  $\theta = 0,78 \text{ рад}$ , УОС имеет максимальную чувствительность  $S_{\text{макс}} = 2,95 \text{ мкм}^{-1}$ , диапазон измерения рабочих зазоров  $\Delta d = 710 \text{ нм}$ , начальный зазор  $d_0 = 430 \text{ нм}$ .

Функция преобразования  $I_{\text{ФП}}(d)$  перемещений РЧЭ в фототок определится как:

$$I_{\text{ФП}}(d) = PS_{\text{ФП}}R(d) + I_{\text{шум}}, \quad (8)$$

где  $d$  – величина зазора при  $d_{\text{макс}} \geq d \geq d_{\text{мин}}$ ;

$P$  – мощность падающего оптического излучения на ФП;

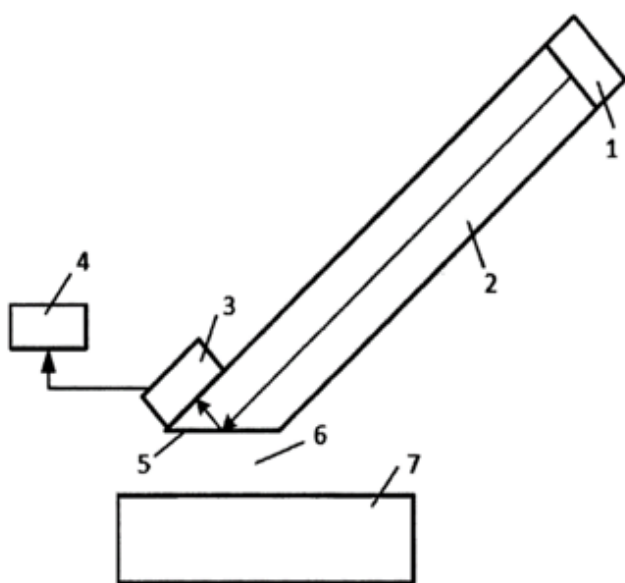
$S_{\text{ФП}}$  – спектральная чувствительность ФП;

$I_{\text{шум}}$  – случайный шум фотоприемника.

Таким образом, получены основные уравнения для узла оптического считывания на основе ОТЭ, по которым можно определять его параметры и функцию преобразования.

### 2.2.2 Экспериментальное исследование параметров математической модели и функции преобразования узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта

Для экспериментального исследования функции преобразования УОС на основе ОТЭ разработан и изготовлен его макет в виде волоконно-оптического преобразователя перемещений [81]. Макет состоит из источника оптического излучения 1, волоконно-оптического световода 2, фотоприемника 3, электронного блока обработки информации 4, воспринимающей зоны 5 (Рисунок 19).



а)



б)

Рисунок 19 – Схема и общий вид волоконно-оптического преобразователя

перемещений на основе ОТЭ (а) 1 – источник оптического излучения; 2 – волоконно-оптический световод; 3 – фотоприемник; 4 – электронный блок обработки сигналов; 5 – воспринимающая зона; 6 – среда, разделяющая подвижный объект и воспринимающую зону; 7 – подвижный объект; (б) изготовленный макет

Источник оптического излучения 1 прикреплен к первому концу волоконно-оптического световода 2, на втором конце расположена воспринимающая зона 5, выполненная в виде скоса, который образует призму полного внутреннего отражения, фотоприемник 3 закреплен на выходе волнового-оптического световода, выход которого подключен к электронному блоку обработки сигналов 4.

Волоконно-оптический преобразователь работает следующим образом. После включения волоконно-оптического преобразователя перемещений источник оптического излучения 1 с длиной волны  $\lambda$  излучает световой пучок постоянной мощности. Оптическое излучение поступает в волоконно-оптический световод 2 и отражается от воспринимающей зоны 5. Изменение расстояния между подвижным объектом 7 и воспринимающей зоны 5 приводит к изменению отражательной способности структуры «воспринимающая зона 5 - среда 6, разделяющая подвижный объект 7 и воспринимающую зону 5 - подвижный объект 7», что приводит к изменению мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник 3. Отраженная от воспринимающей зоны 5 оптическая мощность излучения регистрируется фотоприемником 3, подключенного к электронному блоку сигналов 4. По зависимости мощности оптического излучения от ширины зазора между воспринимающей зоной 5 и подвижным объектом 6 определяется перемещение подвижного объекта 7.

Для экспериментальной проверки преобразования величины зазора в изменение оптической мощности при нарушении полного внутреннего отражения использован макет УОС, в котором роль РЧЭ выполняла плоскопараллельная пластина, изготовленная из плавленого кварца. Для регулировки зазора в качестве одного из элементов конструкции применялся пьезопакет.

Величина зазора определяется толщиной пьезопакета, которая зависит от электрического напряжения  $U$ , подаваемого на пьезопакет. Изменение толщины пьезопакета в широком диапазоне перемещений (до 5 мкм) контролировалось с помощью микрометра 02ИГП с ценой деления шкалы 0,2 мкм. По результатам многократных измерений была определена чувствительность пьезопакета



$\alpha_K = (4,8 \pm 0,2)$  мкм/кВ. Полученное значение чувствительности использовалось для пересчёта прикладываемого к пьезопакету напряжения в величину зазора в диапазоне перемещений порядка 1 мкм.

В качестве источника оптической мощности использовался оптический тестер ТОПАЗ-7315-А, работающий в режиме генерации излучения с длинами волн 1,31 мкм и 1,55 мкм. Выходное оптическое излучение регистрировалось приемником оптического тестера. Электрическое напряжение, подаваемое на пьезопакет макета УОС от блока питания БП-10, контролировалось вольтметром В7-27 [82].

На Рисунок 20 показаны результаты измерения мощности выходного сигнала УОС для двух длин волн в зависимости от величины зазора, а также расчётные кривые. Полученные зависимости показывают согласие теории с экспериментом, что делает обоснованным применение математической модели в дальнейшем анализе.

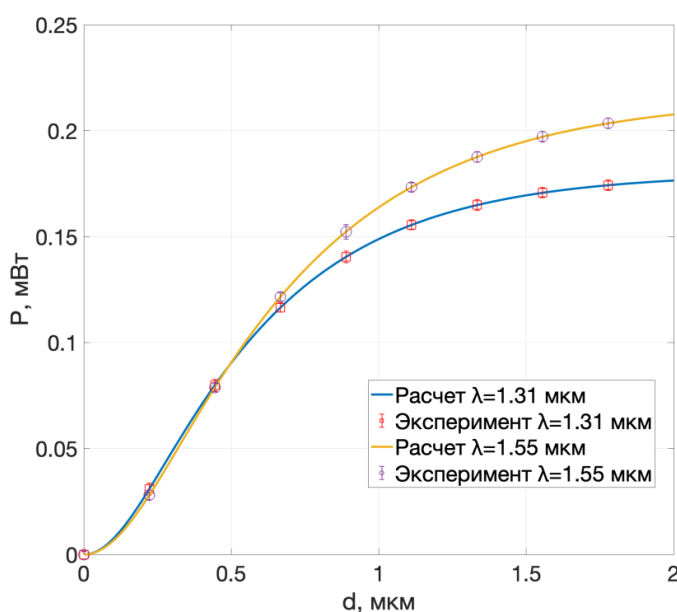


Рисунок 20 – Функция преобразования УОС на основе ОТЭ для двух длин волн и результаты измерений

Проведённое экспериментальное исследование подтвердило возможность использования ОТЭ для построения узла оптического считывания для рамочного преобразователя угловой скорости.

## 2.3 Разработка математической модели микромеханического рамочного чувствительного элемента и привода колебаний для работы в зоне оптического туннелирования

### 2.3.1 Динамическая математическая модель для субмикрометровых перемещений рамочного чувствительного элемента

Рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости состоит из двух частей: микровибрационной структуры и узлов оптического считывания, работающих на основе оптического туннельного эффекта. Входная угловая скорость вращения преобразуется в гармонические движения за счет силы Кориолиса в определенном направлении с помощью микровибрационной структуры. Затем узлы оптического считывания регистрируют перемещения и преобразовывают их в полезный сигнал, пропорциональный действующей угловой скорости.

Инерционная масса колеблется в режиме, обозначаемом как «режим движения», вдоль собственной оси. Часто, в МЭМС структурах, такие колебания возбуждают с помощью электростатических приводов. Воздействие силы Кориолиса, вызванной вращением преобразователя, создает колебания инерционной массы вдоль ортогональной собственной оси («режим чувствительности»). Величина субмикрометровых перемещений, индуцированных в режиме чувствительности, пропорциональна угловой скорости вращения преобразователя.

Уравнения движения для РЧЭ задаются как [83]:

$$m_x \frac{d\Delta x^2}{dt^2} + c_x \frac{d\Delta x}{dt} + k_x \Delta x = F_{\text{эл м}}, \quad (9)$$

$$m_y \frac{d\Delta y^2}{dt^2} + c_y \frac{d\Delta y}{dt} + k_y \Delta y = F_K, \quad (10)$$

$$F_K = -2m_x \Omega_z v_x, \quad (11)$$

где  $m_x, m_y$  – массы РЧЭ в направлении режимов движения и чувствительности соответственно;

$c_x, c_y$  – коэффициенты демпфирования колебаний РЧЭ в режимах движения и чувствительности соответственно;

$k_x, k_y$  – коэффициенты жесткости РЧЭ для режимов движения и чувствительности соответственно;

$\Delta x, \Delta y$  – перемещения РЧЭ для режимов движения и чувствительности соответственно;

$F_{эл\ m}$  – амплитуда электростатической силы;

$F_K$  – сила Кориолиса.

Электростатическая сила  $F_{эл\ m}$  и сила Кориолиса являются движущими силами для режимов движения и чувствительности.

Электростатический гребенчатый привод представляет собой устройство, основанное на использовании электростатических сил для преобразования электрической энергии в механическую. Он содержит подвижный электрод в виде гребенчатой структуры, прикрепленный к упругим элементам, и неподвижный электрод, расположенный напротив подвижного. При приложении напряжения между электродами возникает электростатическая сила притяжения, которая приводит к относительному перемещению подвижного электрода. Основными параметрами, определяющими работу привода, являются зазор между электродами, амплитуда приложенного напряжения, геометрия электродов, включая количество штырей, их длину и высоту, а также упругость механической системы.

Для конфигурации электростатического привода гребенчатого типа (Рисунок 21) составим математическую модель.

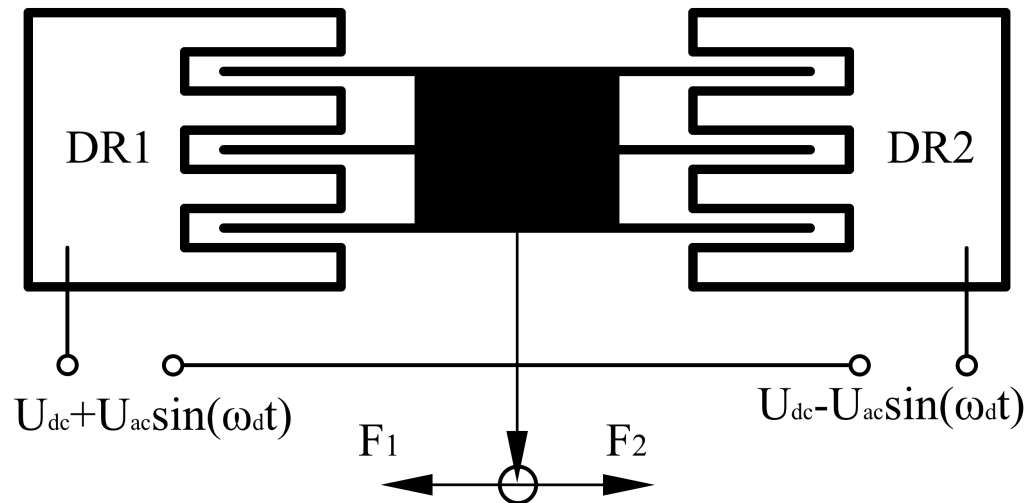


Рисунок 21 – Схема электростатического привода

Пусть число электродов гребенчатого привода равно  $N$ ,  $S$  – площадь пересечения между неподвижным и подвижным электродом,  $d_{0\text{ ш}}$  – расстояние между двумя штырями. Напряжения, приложенные к приводам DR1 и DR2 равны:

$$U_{DR1} = U_{dc} + U_{ac} \sin(\omega t),$$

$$U_{DR2} = U_{dc} - U_{ac} \sin(\omega t),$$

где  $U_{dc}$  – постоянное напряжение смещения, предназначенное для избежания контакта перемещающегося штыря с неподвижным штырем;

$U_{ac}$  – амплитуда напряжения переменного тока;

$\omega$  – частота колебаний электростатического привода.

Одним из важных параметров гребенчатого электростатического привода является жесткость электростатической силы. Если величина электростатической силы, стремящейся притянуть два электрода друг к другу, преодолевает механическую жесткость упругого подвеса в этом направлении, происходит эффект «втягивания» (эффект «*pull-in*») [84]. Этот эффект возникает из-за нелинейной зависимости электростатической силы от расстояния между электродами и ограниченной способности упругих элементов компенсировать эту силу. «Втягивание» представляет собой критическое состояние, при котором дальнейшая работа устройства становится невозможной, так как

электростатическое притяжение становится настолько сильным, что приводит к неконтролируемому движению подвижного электрода.

Анализ [84-87] показывает, что такой эффект происходит, когда расстояние между двумя электродами становится равным  $2/3$  от первоначального зазора между ними. Разность напряжений, приложенных к электродам, которая вызывает эффект «втягивания» может быть рассчитана как [84]:

$$U_B = \sqrt{\frac{8d_{0\text{ ш}}^3 k_x}{27\varepsilon_0 S_{\text{ш}}}}, \quad (12)$$

где  $d_{0\text{ ш}}$  – зазор между штырями гребенчатого привода;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$S_{\text{ш}}$  – площадь перекрытия штырей.

Поэтому, напряжения  $U_{DR1}$  и  $U_{DR2}$  не должны превышать величину напряжения  $U_B$ .

Напряжение  $U_{ac}$  определяет перемещения РЧЭ на частоте собственных колебаний. Электростатическая сила приводов DR1 и DR2 с учетом [83] определится в виде:

$$F_{DR1} = \frac{1}{2} N \varepsilon_0 \frac{h_{\text{ш}}}{d_{0\text{ ш}}} [U_{dc} + U_{ac} \sin(\omega t)]^2, \quad (13)$$

$$F_{DR2} = \frac{1}{2} N \varepsilon_0 \frac{h_{\text{ш}}}{d_{0\text{ ш}}} [U_{dc} - U_{ac} \sin(\omega t)]^2. \quad (14)$$

Электростатическая сила, действующая на РЧЭ с учетом [61] определится в виде:

$$F_{\text{эл}} = F_{DR1} - F_{DR2} = 2N \varepsilon_0 \frac{h_{\text{ш}}}{d_{0\text{ ш}}} U_{dc} U_{ac} \sin(\omega t), \quad (15)$$

где  $b$  – длина штыря;

$U_{dc}$  – напряжение постоянного смещения;

$U_{ac}$  – амплитуда напряжения переменного тока.

Подставим (15) в (9) и получим:

$$m_x \frac{d\Delta x^2}{dt^2} + c_x \frac{d\Delta x}{dt} + k_x \Delta x = 2N \varepsilon_0 \frac{h_{\text{ш}}}{d_{0\text{ ш}}} U_{dc} U_{ac} \sin(\omega t). \quad (16)$$

Примем

$$c_x = \frac{\sqrt{k_x m_x}}{Q_x} = 2\xi_x \sqrt{k_x m_x},$$

$$\omega_x = \sqrt{\frac{k_x}{m_x}}.$$

Амплитуда перемещения рамочного чувствительного элемента вдоль оси движения равна:

$$\Delta x_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{эл м}}}{k_x} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_x}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\xi_x \omega}{\omega_x}\right)^2}}, \quad (17)$$

где  $F_{\text{эл м}}$  – амплитуда электростатической силы, действующей на РЧЭ.

Когда частота движения РЧЭ вдоль оси  $OX$  равна собственной частоте вдоль оси движения,  $\omega = \omega_x$ , сдвиг фазы перемещений вдоль оси движения составляет  $\alpha = 90^\circ$ . Если собственная частота вдоль оси движения равна собственной частоте вдоль оси чувствительности,  $\omega_x = \omega_y$ , то выражение для амплитуды колебаний вдоль оси чувствительности упрощается:

$$\Delta y_{\text{макс}} = \frac{\pi \Omega_z m_x F_{\text{эл м}} \omega Q_x Q_y}{180 k_x k_y}.$$

Или входная угловая скорость вращения определится как:

$$\Omega_z = \frac{180 k_x k_y \Delta y_{\text{макс}}}{\pi m_y F_{\text{эл м}} \omega Q_x Q_y}. \quad (18)$$

Как видно из (18), для расчета конструктивных параметров РЧЭ и электростатического гребенчатого привода, обеспечивающего работу МОЭМ преобразователя в зоне оптического туннелирования, необходимо знать значения добротностей микровибрационной структуры.

Параметры гребенчатого электростатического привода и РЧЭ должны обеспечивать перемещения вдоль оси чувствительности в диапазоне 90...800 нм линейного преобразования УОС на основе ОТЭ, как определено в п. 2.2.

### 2.3.2 Анализ влияния сжатой газовой пленки на демпфирование рамочного чувствительного элемента

При работе УОС на основе ОТЭ происходит изменение относительного зазора между РЧЭ и ППВО, что приводит к значительному изменению объема газовой среды (на 30 - 50%), и сжатая газовая пленка может оказывать существенное влияние на динамику РЧЭ. Поэтому необходимо провести анализ влияния сжатой газовой пленки на демпфирование.

Существует несколько механизмов рассеивания энергии в рамочном МОЭМ преобразователе угловой скорости. Их можно разделить на внешние – связанные с условиями окружающей среды, в которой находится РЧЭ, и внутренние, связанные с характеристиками материалов и методами изготовления. РЧЭ выполнен из монокристаллического кремния, и, соответственно, вклад в общее демпфирование пренебрежимо мал по сравнению с внешними потерями. Стоит отметить, что влияние внутренних потерь начинает преобладать при минимизации внешних источников демпфирования. К наиболее распространенным механизмам внешней диссипации относят потери, возникающие за счет: газового демпфирования, потери от акустического излучения и потери в креплениях конструкции упругих подвесов. Обычно, источники потерь энергии описывают через добротность  $Q$ .

Газовое демпфирование в МОЭМС состоит множества факторов, основными являются – эффект скользящей газовой пленки и эффект сжатой газовой пленки. Их необходимо рассматривать, так как РЧЭ движется на микрометровом расстоянии от подложки [84].

С учетом вышеизложенного полная добротность  $Q$  может быть выражена как:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{сдгп}}} + \frac{1}{Q_{\text{скгп}}} + \frac{1}{Q_{\text{ост}}}, \quad (19)$$

где  $Q_{\text{сдгп}}$  – добротность, описывающая диссипации в результате эффекта демпфирования сжатой газовой пленки;

$Q_{\text{скгп}}$  – добротность, описывающая потери энергии в результате эффекта демпфирования скользящей газовой пленки;

$Q_{\text{ост}}$  – добротность, описывающая остальные потери.

Вследствие малого расстояния между электродами гребенчатных структур, сравнимого с их толщинами, газ испытывает трение о поверхность электродов гребенки (Рисунок 22).

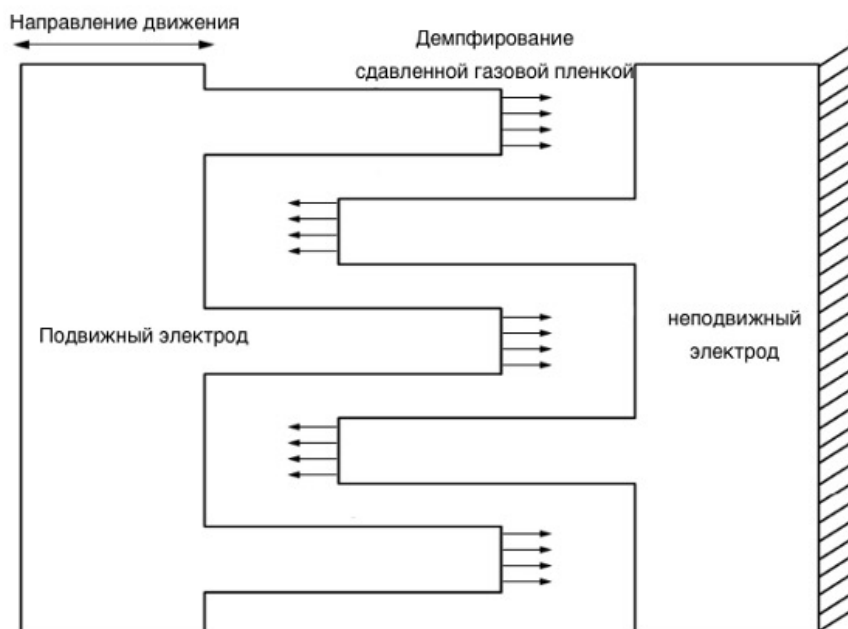


Рисунок 22 – Эффект демпфирования сжатой газовой пленки в гребенчатом электростатическом приводе

Часто МОЭМ преобразователи работают при высоком вакууме, а добротность РЧЭ зависит от изменения давления внутри корпуса. Такую зависимость возможно рассчитать аналитически с помощью уравнения Навье-Стокса [84]. Для оценки вклада различных сил используется число Рейнольдса, являющееся мерой инерционных сил по сравнению с вязкими, оно определяется как [84]:

$$Re = \frac{v\rho H}{\mu}, \quad (20)$$

где  $v$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  – скорость, плотность, вязкость жидкости (газа), соответственно;  
 $H$  – расстояние между УОС на основе ОТЭ и торцевой поверхностью РЧЭ.



В зависимости от значения числа Кнудсена  $K_n$ , зависящего от длины свободного пробега молекул, течение газа можно разделить на режимы: ламинарный поток, скользящий поток, свободномолекулярный поток [84]:

$$K_n = \frac{\lambda}{H}, \quad (21)$$

где  $\lambda$  – длина свободного пробега;

$H$  – характерный размер системы, в данном случае расстояние между электродами гребенки.

Длина свободного пробега зависит от давления и определяется как [84]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 P_0}{P}, \quad (22)$$

где  $\lambda_0$  – длина свободного пробега при нормальных условиях;

$P_0$  – атмосферное давление;

$P$  – давление среды.

Число Кнудсена, рассчитанное по формуле (21) при различных давлениях, представлено на Рисунок 23.

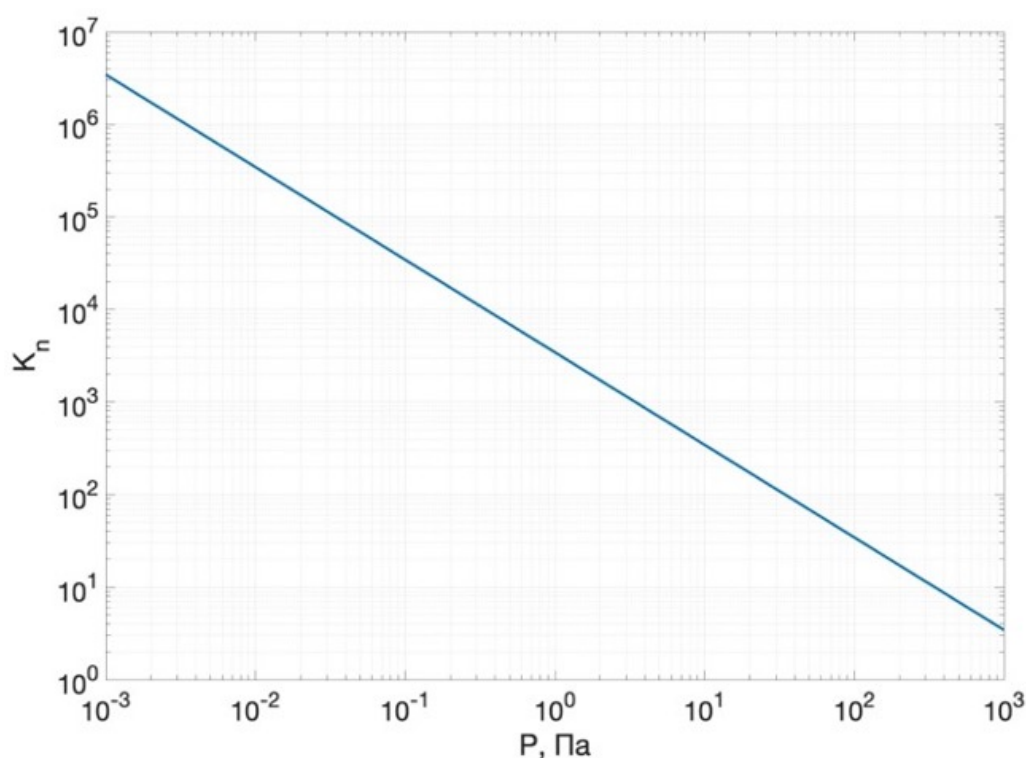


Рисунок 23 – Зависимость числа Кнудсена от давления внутри корпуса рамочного МОЭМ преобразователя

Из рассчитанных значений числа Кнудсена видно, что РЧЭ работает в молекулярном режиме.

Так как РЧЭ осуществляет колебания в субмикрометровых зазорах между электродами, подложкой и другими элементами конструкции, окружающая газовая среда не может быть описана в рамках модели непрерывной сплошной среды. Необходимость учитывать молекулярную природу газа. Для корректного описания газодинамического взаимодействия между колеблющимся РЧЭ и окружающим газом используется понятие эффективной вязкости, которая учитывает влияние разреженности газа. Эффективная вязкость зависит от безразмерного параметра – числа Кнудсена, определяющего отношение средней длины свободного пробега молекул газа к характерному геометрическому размеру зазора. При увеличении числа Кнудсена наблюдается отклонение вязкости от табличного значения, что необходимо учитывать при расчёте демпфирования и добротности РЧЭ [88]:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9,638K_n^{1,159}}. \quad (23)$$

Для определения модели сжимаемого газа можно использовать число сжимаемости  $\sigma$  [84]:

$$\sigma = \frac{12A\omega\mu_{eff}}{PH^2}. \quad (24)$$

Для давлений в диапазоне  $P = (10^{-3}...10^3)$  Па проведен расчет числа сжимаемости, значение которого не превысило 0,13 (Рисунок 24). Это означает, что вязкие силы трения преобладают над силами упругости и для аналитического расчета уравнения Рейнольдса применима модель несжимаемого газа [89].

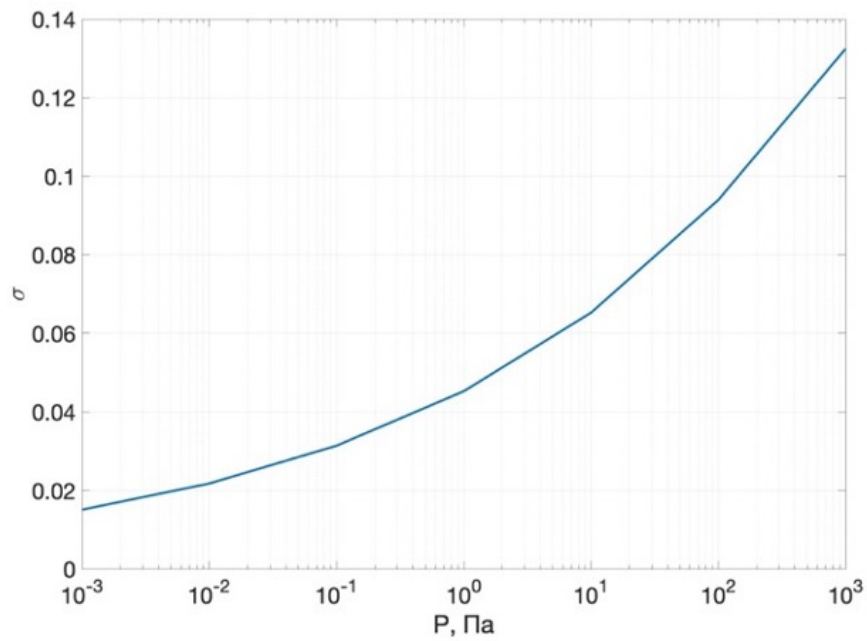


Рисунок 24 – Зависимость числа сжимаемости  $\sigma$  от давления внутри корпуса рамочного МОЭМ преобразователя

Коэффициент вязкого демпфирования выражается как [84]:

$$c = \frac{0,8\mu_{eff}A^2}{H^3(1 + \beta^2)}. \quad (25)$$

Рассчитанный по формуле (25) коэффициент вязкого демпфирования представлен на Рисунок 25.

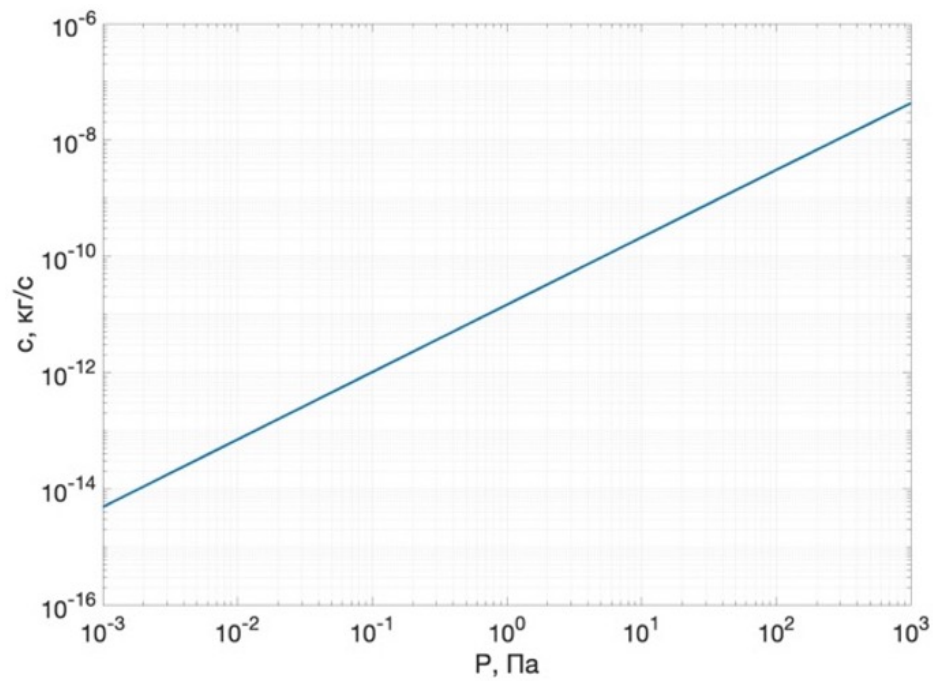


Рисунок 25 – Расчётный коэффициент вязкого демпфирования для эффекта сжатой газовой пленки

Оценим вклад эффекта демпфирования сжатой газовой пленки в диапазоне значений давления газовой среды 0,001 Па...1000 Па с учетом (25) как:

$$Q_{\text{сдгп}} = \frac{m\omega H^3(1 + \beta^2)}{0,8\mu_{\text{eff}}A^2}.$$

Зависимость  $Q_{\text{сдгп}}$  от давления представлена на Рисунок 26.

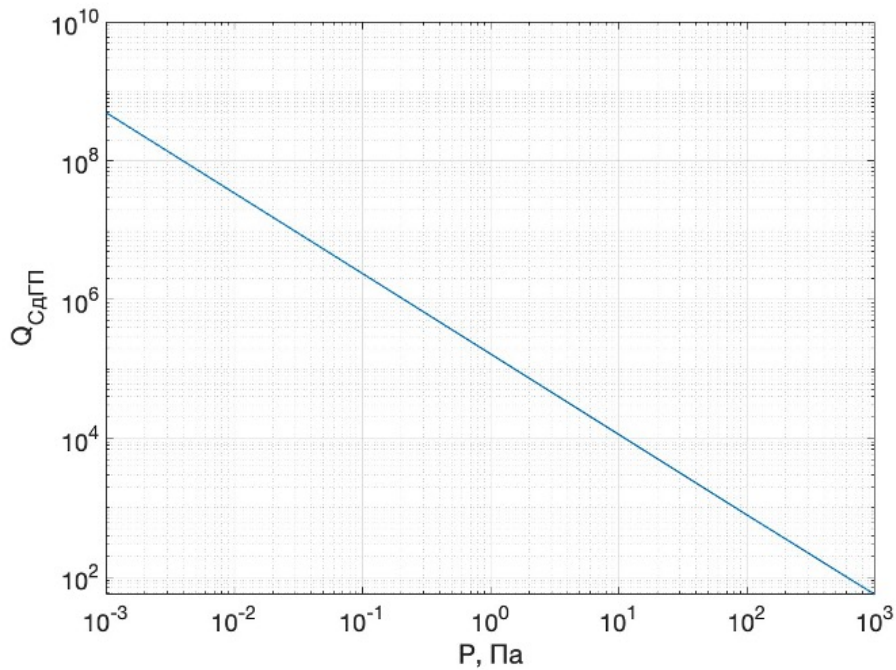


Рисунок 26 – Зависимость добротности  $Q_{сдгп}$  от давления внутри корпуса рамочного МОЭМ преобразователя

Рассмотренный эффект демпфирования сжатой пленки оказывает сильное влияние на добротность РЧЭ, который необходимо учитывать при расчете полной добротности по формуле (19).

### 2.3.3 Анализ влияния скользящей газовой пленки на демпфирование рамочного чувствительного элемента

При движении РЧЭ параллельно подложке электроды гребенчатого привода, в условиях малых зазоров, взаимодействуют с остаточными газами, что также приводит к диссипации энергии (Рисунок 27).

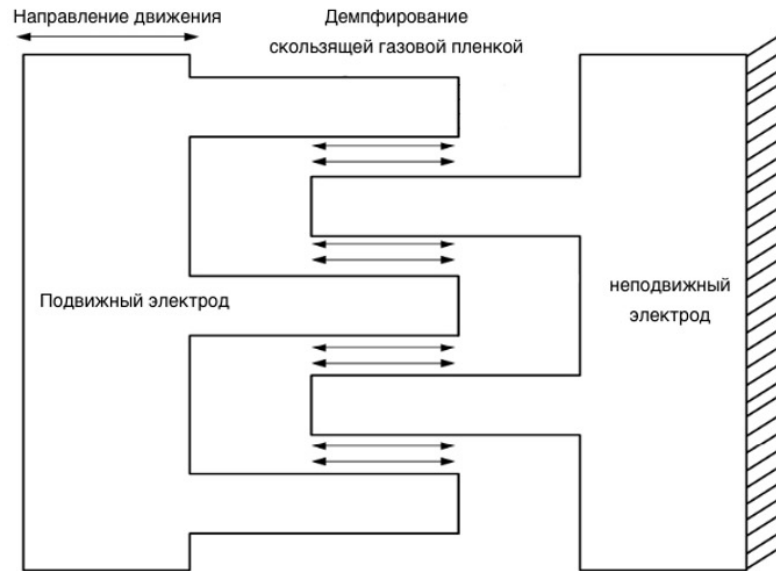


Рисунок 27 – Эффект демпфирования скользящей газовой пленки между штырями гребенчатого электростатического привода

Эффективная вязкость в случае эффекта демпфирования скользящей газовой пленки определяется следующим образом [90]:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 2K_n + 0,2K_n^{0,788} e^{\frac{-K_n}{10}}}. \quad (26)$$

Существуют две модели, описывающие взаимодействие движущейся структуры с жидкостью или газом: модель течения Куэтта и модель Стокса [84]. Выбор модели для расчета зависит от числа  $\delta$ , которое характеризует расстояние, на котором амплитуда движения уменьшается в  $e$  раз [84]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu_{eff}}{\rho\omega}}. \quad (27)$$

где  $\rho$  – плотность газа;

$\omega$  – собственная частота колебаний РЧЭ.

Для определения расчетной модели было рассчитано  $\delta$  по формуле (27), расчет представлен на Рисунок 28.

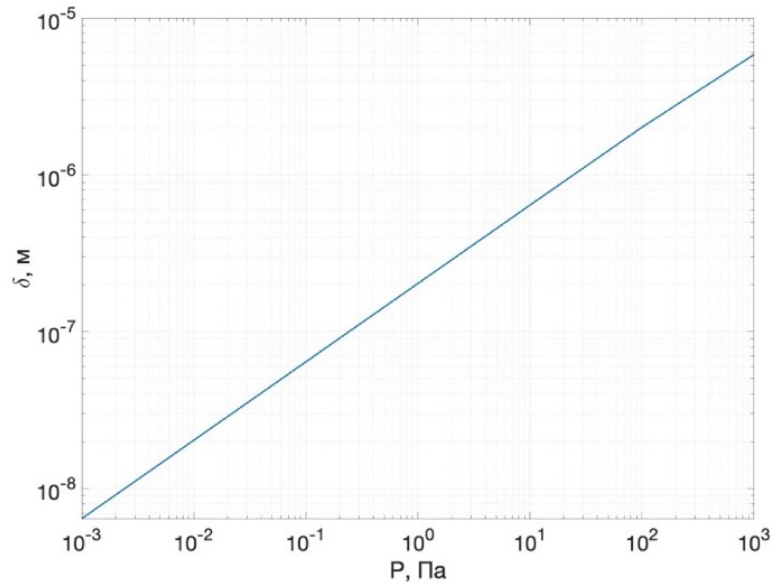


Рисунок 28 – Зависимость  $\delta$  от давления внутри корпуса

Для разработанного РЧЭ применима модель Стокса. Это предположение соответствует геометрии конструкции РЧЭ и электродов гребенчатого привода. Коэффициент вязкого демпфирования  $c_{\text{пс}}$ , обусловленный трением газа под структурой, согласно модели Стокса, может быть рассчитан с учетом [84]:

$$c_{\text{пс}} = \mu_{\text{eff}} \frac{A}{H} \times F. \quad (28)$$

где  $A$  – площадь перекрытия между поверхностями подвижной и неподвижной частями электростатического привода;

$F$  – добавочный коэффициент, определяемый по формуле:

$$F = \beta^* H \times \frac{\sin(2\beta^* H) - \sinh(2\beta^* H)}{\cosh(2\beta^* H) - \cos(2\beta^* H)}. \quad (29)$$

где  $\beta^* = 1/\delta$ .

Коэффициент вязкого демпфирования  $c_{\text{нс}}$ , обусловленный трением газа над поверхностью движущейся структуры, в соответствии с моделью [84]:

$$c_{\text{нс}} = \frac{\mu_{\text{eff}} A}{\delta}. \quad (30)$$

Добротность, связанная только с эффектом скользящей пленки  $Q_{\text{скГП}}$  и определенная по формулам (28), (29), (30), представлена на Рисунок 29.

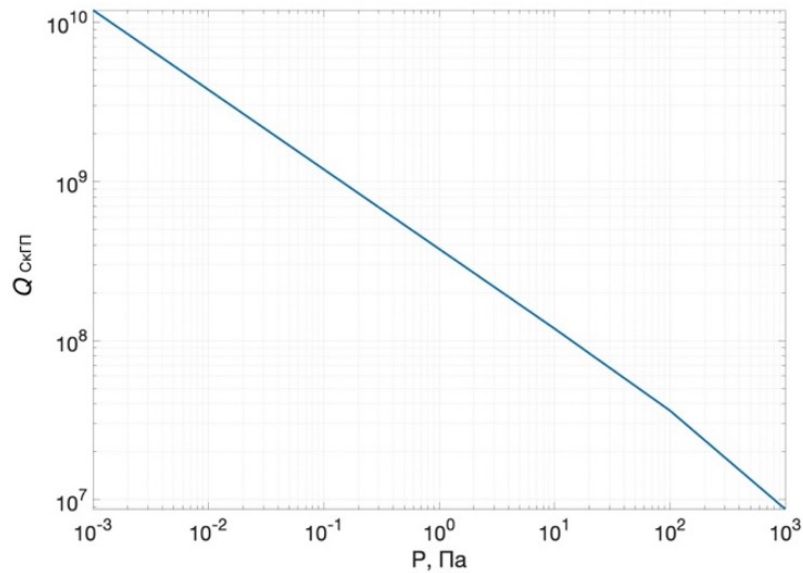


Рисунок 29 – Зависимость добротности  $Q_{\text{скп}}$  от давления

Рассмотренный эффект демпфирования скользящей пленки также оказывает сильное влияние на добротность РЧЭ, который необходимо учитывать в формуле (19).

Добротность, описывающая остальные потери  $Q_{\text{ост}}$ , зависит в большей степени от внутренних механизмов диссипации энергии. Их можно рассчитать через добротность, ограниченную свойствами материалов [91]:

$$Q_{\text{ост}} = \frac{\rho C_p}{E \alpha^2 T_0}, \quad (31)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость;

$T_0$  – равновесная температура;

$E$  – модуль Юнга;

$\alpha$  – коэффициент температурного расширения.

При использовании кремния в качестве материала РЧЭ, добротность, описывающая остальные потери  $Q_{\text{ост}}$  равна  $7,5 \cdot 10^4$  при температуре  $T_0 = 20^\circ \text{C}$ .

#### 2.3.4 Расчет добротности рамочного чувствительного элемента и определение допустимого давления газовой среды

Для измерения перемещений РЧЭ с помощью УОС на основе ОТЭ необходимо опередить величину давления остаточных газов в системе, которая



обеспечивает допустимое расстояние между подвижными и неподвижными электродами для максимального проявления эффектов вязкого газодинамического демпфирования и значительного увеличения добротности.

Для того, чтобы оценить влияние различных механизмов потерь задавались граничные условия для зазоров, образованных торцевыми областями штырей гребенок и условия для боковых поверхностей штырей гребенок. Расстояние между электродами гребенки  $H = 2$  мкм, площадь перекрытия между поверхностями подвижной и неподвижной частями гребенчатого привода  $A = 0,01$  мм<sup>2</sup>.

Полная добротность  $Q$  РЧЭ, рассчитанная по формуле (19) в зависимости от давления с учетом вязкого газодинамического демпфирования представлена на Рисунок 30.

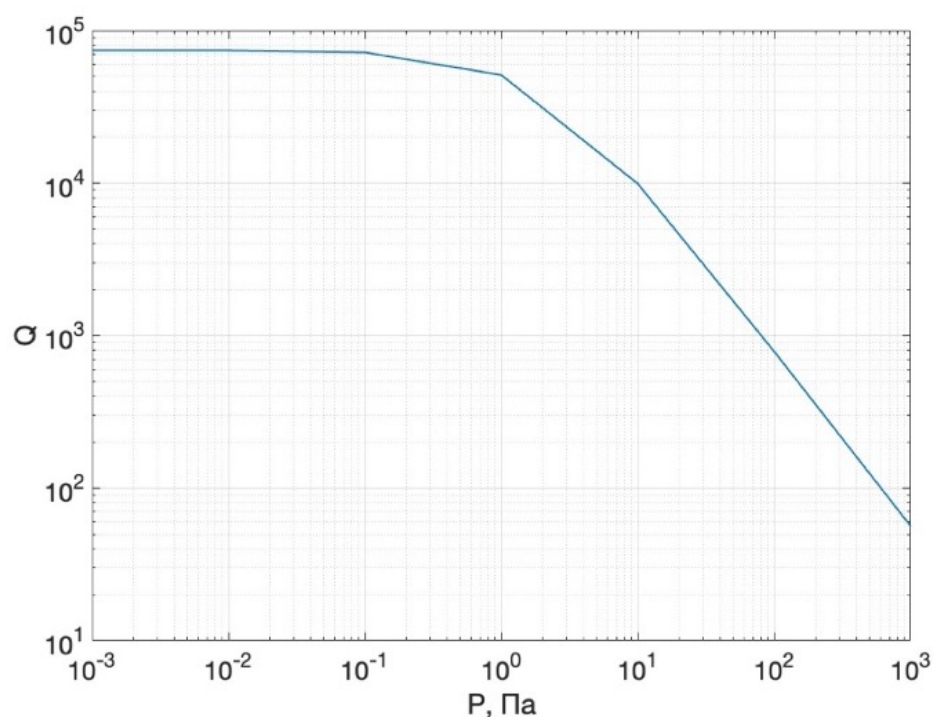


Рисунок 30 – Результат аналитического расчета зависимости добротности рамочного чувствительного элемента от давления

В идеальном случае элементы РЧЭ и УОС на основе ОТЭ вдоль ортогональных осей движения имеют идентичные геометрические параметры, механические свойства и материал, что обеспечивает одинаковую жесткость и эффективную массу. Это приводит к одинаковой резонансной частоте и равномерному распределению потерь энергии.

Показано, что добротность РЧЭ, работающего совместно с УОС на основе ОТЭ, незначительно изменяется в области давлений от 0,001 Па до 0,1 Па. Это дает возможность сохранить добротность на уровне  $7,5 \cdot 10^4$  при очень высоком уровне вакуума, что упрощает задачу герметизации и поддержания необходимого разрежения внутри корпуса преобразователя.

Однако наличие дефектов при изготовлении РЧЭ увеличивает диссипацию энергии в осях и снижают добротность РЧЭ. Дефекты могут возникать на этапах литографии, травления или осаждения материалов, приводя к неравномерной толщине структур, локальным напряжениям, усиливающим внутреннее трение, или асимметрии креплений, увеличивающей анкерные потери. Экспериментальные исследования [92-96] подтверждают, что преобразователи угловой скорости с высоким уровнем технологического обеспечения, созданные методом глубокого травления, демонстрируют минимальный разброс добротности по осям. Поэтому при определении параметров РЧЭ принимаем равенство добротностей по ортогональным осям, что обусловлено симметрией конструкции и равномерным распределением потерь. Различия в добротности являются следствием технологических погрешностей, таких как дефекты изготовления, которые нарушают симметрию системы и увеличивают диссипацию энергии.

### **2.3.5 Определение параметров электромеханической части преобразователя для работы в зоне оптического туннелирования**

Для моделирования движений РЧЭ необходимо определить значения параметров конструкции. Одним из основных параметров является коэффициент жесткости подвесов, определяющийся их физико-механическими свойствами, которые обеспечивают движение РЧЭ с двумя ортогональными степенями свободы.

Рассмотрим *L*-образный упругий подвес из кремния. Такой тип подвесов позволяет снизить напряжения в конструкции за счет увеличения жесткости вдоль оси *OZ* (Рисунок 31).

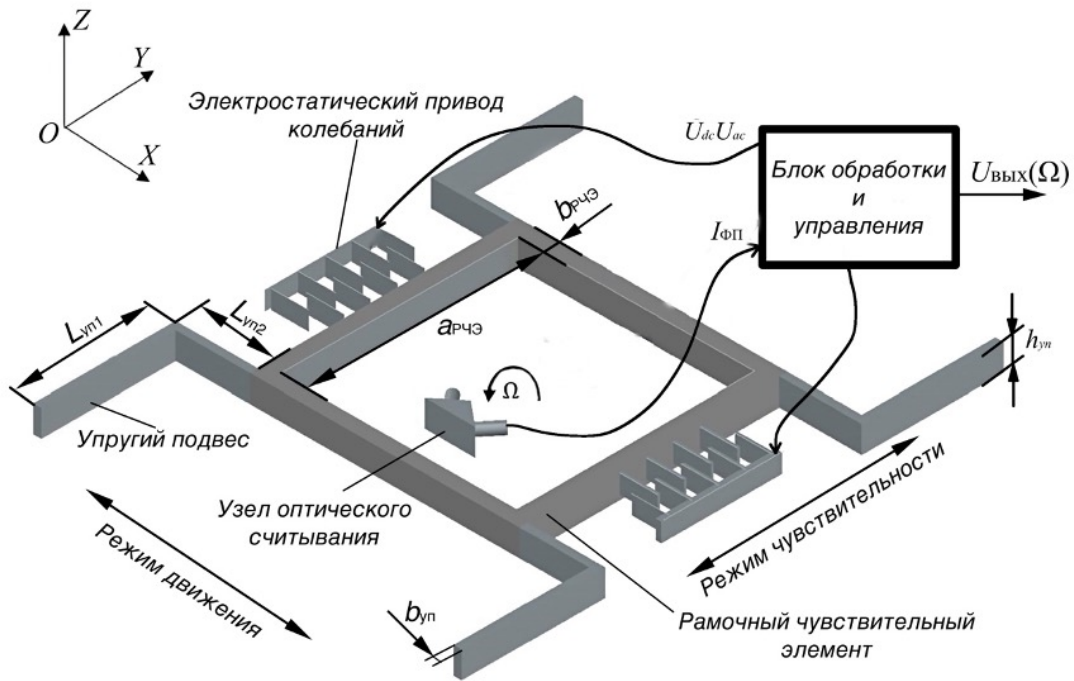


Рисунок 31 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ

Для расчета конструктивных параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости необходимо учитывать, что амплитуда вторичных колебаний  $\Delta u_{\text{макс}}$ , соответствующая границе диапазона измерений угловой скорости  $\Omega_{\text{макс}}$ , не должна превышать значение  $d_{\text{макс}} - d_0$ . При этом она зависит от амплитуды первичных колебаний  $\Delta x_{\text{макс}}$ , массы РЧЭ  $m$  и частоты колебаний режима движения  $\omega$ . Для обеспечения максимальной чувствительности преобразователя к действующей угловой скорости частота режима движения должна согласоваться с частотами собственных колебаний РЧЭ вдоль осей движения  $\omega_x$  и чувствительности  $\omega_y$  ( $\omega = \omega_x = \omega_y$ ).

При расчете упругого подвеса необходимо учитывать возможность движения РЧЭ по двум перпендикулярным осям в одной плоскости с одинаковой частотой. Толщина РЧЭ и упругих подвесов задается в соответствии с требованием к толщине слоя устройства. Ширина, длина упругих подвесов и РЧЭ должны быть минимальными, с учетом обеспечения приемлемой прочности конструкции и амплитуд колебаний в диапазоне оптического туннелирования. Условие прочности

упругих подвесов для осей режима движения (индекс  $x$ ) и режима чувствительности (индекс  $y$ ) определяется:

$$\begin{cases} \sigma_{\max x} = \frac{M_x}{W_x} < [\sigma_x] \\ \sigma_{\max y} = \frac{M_y}{W_y} < [\sigma_y] \end{cases},$$

где  $\sigma_{\max x, y}$  – нормальные напряжения упругих подвесов;

$M_{x, y}$  – изгибающие моменты деформации упругих подвесов;

$W_{x, y}$  – моменты сопротивлений упругих подвесов;

$[\sigma_{x, y}]$  – предельно допустимые напряжения упругих подвесов, определяемые запасом прочности и текучестью материала РЧЭ.

Исходя из геометрических размеров РЧЭ для определения количества электродов гребенчатого электростатического привода предлагается использовать следующую формулу с округлением до единиц в меньшую сторону:

$$N = \left\lfloor \frac{a_{\text{РЧЭ}}}{2(b_{\text{эл}} + d_{0\text{ ш}})} - 1 \right\rfloor, \quad (32)$$

где  $a_{\text{РЧЭ}}$  – длина РЧЭ;

$b_{\text{эл}}$  – ширина электрода гребенчатого электростатического привода.

Введем правостороннюю ортогональную и нормализованную систему отсчета  $OXYZ$ . Колебания в режиме движения возбуждаются вдоль оси  $OX$ . При вращении РЧЭ вокруг оси  $OZ$  возникают колебания в режиме чувствительности вдоль оси  $OY$ .

Жесткость упругих подвесов вдоль оси  $OX$  можно определить следующим выражением с учетом [97]:

$$k_X = 4 \frac{E h_{\text{уп}} b_{\text{уп}}^3 (L_{\text{уп}2} + 4L_{\text{уп}1})}{L_{\text{уп}1}^3 (L_{\text{уп}1} + L_{\text{уп}2})}, \quad (33)$$

где  $E$  – модуль Юнга;

$L_{\text{уп}1}, L_{\text{уп}2}$  – длины упругого подвеса;

$h_{\text{уп}}$  – толщина упругого подвеса;

$b_{\text{уп}}$  – ширина упругого подвеса.

Амплитуда колебаний  $\Delta x_{\max}$  в режиме движения с учетом (15) и (33)

определяется как:

$$\Delta x_{\text{макс}} = \frac{N \varepsilon \varepsilon_0 t_{\varepsilon} U_{dc} U_{ac} L_{\text{уп1}}^3 (L_{\text{уп2}} + L_{\text{уп1}})}{4 E h_{\text{уп}} b_{\text{уп}}^3 d_{0 \text{ ш}} (L_{\text{уп2}} + 4 L_{\text{уп1}})} Q_x. \quad (34)$$

Амплитуда колебаний РЧЭ в режиме чувствительности  $\Delta y_{\text{макс}}$  пропорциональна действующей угловой скорости  $\Omega_z$ , а также зависит от амплитуды колебаний в режиме движения, массы  $m$  и частоты  $\omega$  управляющего напряжения с учетом [97] равна:

$$\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) = \frac{2 m \Omega_z \Delta x_{\text{макс}} \omega L_{\text{уп2}}^3 (L_{\text{уп1}} + L_{\text{уп2}})}{4 E b_{\text{уп}} h_{\text{уп}}^3 (L_{\text{уп1}} + 4 L_{\text{уп2}})} Q_y. \quad (35)$$

Исходя из геометрии РЧЭ и упругих подвесов, их суммарная масса  $m$  с учетом [83] равна:

$$m = 4 b_{\text{РЧЭ}} h_{\text{РЧЭ}} (a_{\text{РЧЭ}} - b_{\text{РЧЭ}}) \rho + \frac{33}{35} b_{\text{уп}} h_{\text{уп}} (L_{\text{уп1}} + b_{\text{уп}} [L_{\text{уп2}} - b_{\text{уп}}]) \rho, \quad (36)$$

где  $a_{\text{РЧЭ}}$ ,  $b_{\text{РЧЭ}}$ ,  $h_{\text{РЧЭ}}$  – длина, ширина и толщина РЧЭ;

$\rho$  – плотность материала РЧЭ.

Проведем анализ влияния конструктивных параметров на перемещения РЧЭ в режимах движения и чувствительности с учетом напряжения втягивания  $U_v$  для обеспечения работы в зоне ОТЭ. Для достижения наибольшего значения амплитуды колебаний в режиме чувствительности на верхней границе диапазона измерения угловой скорости при наименьшем значении управляющего напряжения  $U_{dc} + U_{ac} \sin(\omega t)$  необходимо, чтобы частота управляющего напряжения равнялась собственной частоте РЧЭ.

Длина упругого подвеса  $L_{\text{уп2}}$  входит в числитель в третьей степени, что указывает на её значительное влияние на амплитуду колебаний в режиме чувствительности. Увеличение длины  $L_{\text{уп2}}$  приводит к резкому росту  $\Delta y_{\text{макс}}$ , так как при увеличении  $L_{\text{уп2}}$  жесткость вдоль оси  $OY$  уменьшается. Длина упругого подвеса  $L_{\text{уп1}}$  входит как в числитель, так и в знаменатель линейно, и её влияние зависит от соотношения  $L_{\text{уп1}}$  и  $L_{\text{уп2}}$ . Если  $L_{\text{уп1}}$  мала по сравнению с  $L_{\text{уп2}}$ , её влияние на амплитуду колебаний в режиме чувствительности незначительно, но при сопоставимых значениях  $L_{\text{уп1}}$  и  $L_{\text{уп2}}$  влияние становится значительным.

На Рисунок 32 приведены зависимости амплитуд колебаний РЧЭ в режиме чувствительности от длины упругих подвесов  $L_{уп1}$ ,  $L_{уп2}$  для различных значений ширины  $b_{уп}$ , толщины  $h_{уп} = 50$  мкм и угловой скорости  $\Omega_{z \text{ макс}} = 360$  град/с.

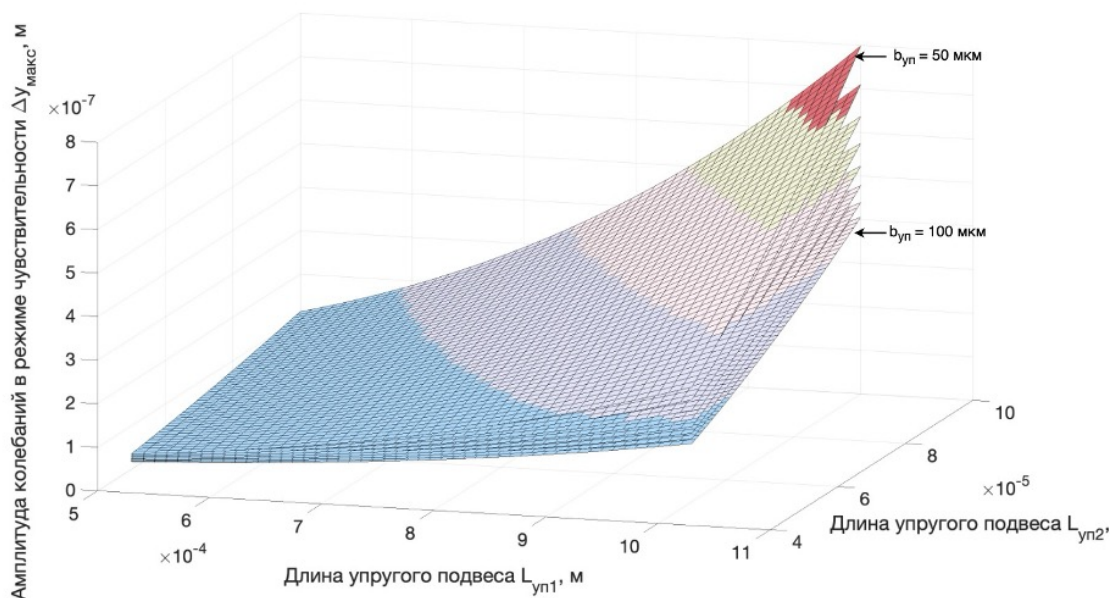


Рисунок 32 – Зависимости амплитуд колебаний в режиме чувствительности от длин упругих подвесов  $L_{уп1}$ ,  $L_{уп2}$  для различных значений ширины  $b_{уп} = (50; 57; 64; 70; 77; 84; 91; 100)$  мкм и постоянных значениях толщины  $h_{уп} = 50$  мкм и угловой скорости  $\Omega_{z \text{ макс}} = 360$  град/с

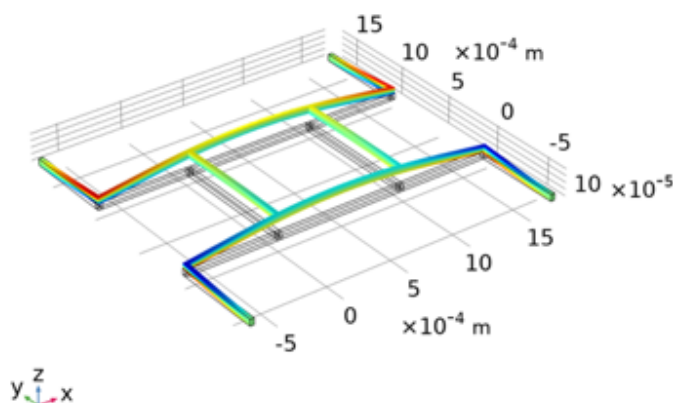
При уменьшении ширины  $b_{уп}$ , и увеличении длин  $L_{уп1}$ ,  $L_{уп2}$  упругого подвеса рамочного преобразователя увеличивается амплитуда вторичных колебаний, которая линейно зависит от действующей угловой скорости и достигает нескольких сотен нанометров при достаточно малых размерах РЧЭ [98].

Полученные значения амплитуды колебаний в режиме чувствительности соответствуют диапазону работы УОС на основе ОТЭ, равному (90...800) нм. Выбранные параметры РЧЭ представлены в таблице 3.

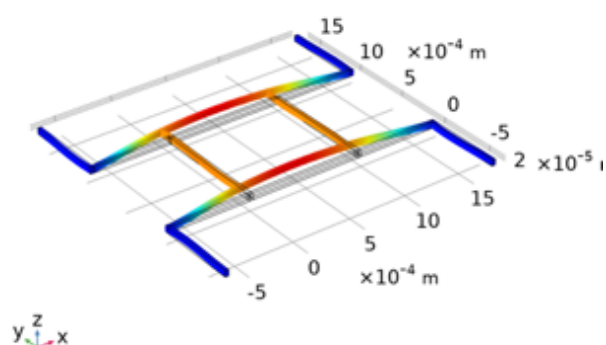
Таблица 3 – Параметры рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, обеспечивающие работу с УОС на основе ОТЭ

Параметр	Величина	Единицы измерения
Длина подвеса $L_{уп1}$	0,7	мм
Длина подвеса $L_{уп2}$	0,7	мм
Ширина подвеса $b_{уп}$	50	мкм
Толщина подвеса $h_{уп}$	50	мкм
Длина рамки $a_{рчэ}$	1	мм
Ширина рамки $b_{рчэ}$	30	мкм
Толщина рамки $h_{рчэ}$	50	мкм
Длина штыря привода	100	мкм
Ширина штыря привода	10	мкм
Расстояние между штырями привода	5	мкм
Количество штырей привода	82	ед.
Модуль Юнга	$1,69 \cdot 10^5$	МПа
Коэффициент Пуассона	$3 \cdot 10^{-1}$	
Плотность	$2,5 \cdot 10^{-15}$	кг/мкм <sup>3</sup>
Температурный коэффициент расширения кремния	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1/К
Теплопроводность	$1,48 \cdot 10^8$	пкВт/мкм*К
Удельная теплота	$7,12 \cdot 10^{14}$	пкДж/кг*К

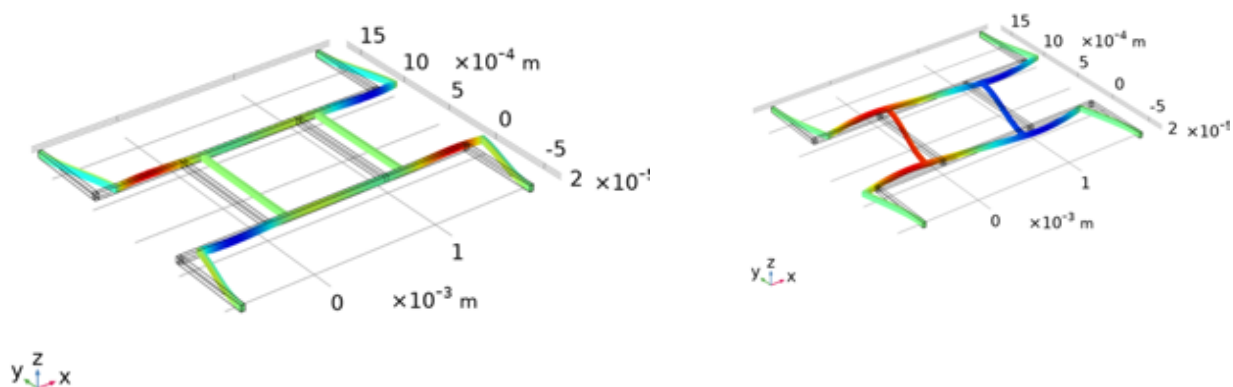
Проведено исследование колебаний РЧЭ с выбранным параметрами методом конечных элементов (Рисунок 33).



а)



б)



в)

г)

Рисунок 33 – Собственные частоты РЧЭ с  $L$ -образными упругими подвесами для различных форм колебаний: а) первая форма  $f_{рез} = 21632$  Гц, б) вторая форма  $f_{рез} = 30730$  Гц, в) третья форма  $f_{рез} = 30730$  Гц, г) четвертая форма  $f_{рез} = 36031$  Гц

Проведенный анализ собственных частот для различных форм колебаний РЧЭ показал, что в режиме движения он колеблется по второй форме, а в режиме чувствительности – по третьей. При этом остальные формы колебаний значительно разнесены в частотной области, что обеспечивает разделение мод и уменьшение перекрестных связей между ними. Кроме того, разнесение колебаний в частотной области позволяет снизить уровень шума и повысить добротность РЧЭ, что напрямую влияет на погрешность измерения угловой скорости с помощью УОС на основе ОТЭ.

Составлена имитационная модель перемещений РЧЭ в среде Matlab Simulink (Рисунок 34).

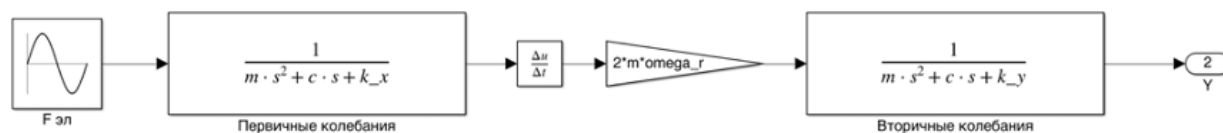


Рисунок 34 – Имитационная модель перемещений РЧЭ

Используя параметры, приведенные в Таблица 3, которые обеспечивают перемещения РЧЭ в диапазоне работы УОС на основе ОТЭ, проведено моделирование колебаний РЧЭ при воздействии угловой скорости  $\Omega_z = 360$  град/с



(Рисунок 35).

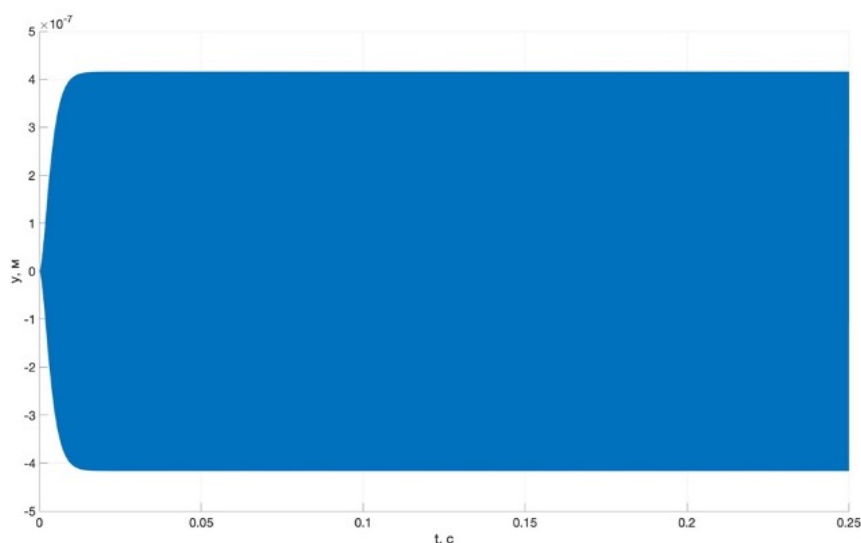


Рисунок 35 – Результат имитационного моделирования перемещений РЧЭ в зоне оптического туннелирования

Амплитуда колебаний РЧЭ в режиме чувствительности составляет 420 нм, что соответствует диапазону работы УОС на основе ОТЭ с высокой чувствительностью. Время установления колебаний РЧЭ в режиме чувствительности составляет 12 мс и находится в пределах типичных значений для вибрационных микроэлектромеханических преобразователей (МЭМ преобразователи угловой скорости серии ADXRS производства Analog Devices имеют время готовности 15 мс, а преобразователи L3GD20 производства STMicroelectronics имеют время готовности около 30 мс [62, 65]).

Таким образом, определены параметры РЧЭ и электростатического гребенчатого привода, обеспечивающие работу рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с УОС на основе ОТЭ, позволяющим определять перемещения РЧЭ в нанометровом диапазоне.

### **2.3.6 Имитационное моделирование рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной дифференциальной обработкой сигналов**

При работе одного УОС нелинейность функции преобразования составляет

порядка 3% в диапазоне измерений угловой скорости  $\Omega_z = \pm 360$  град/с. Для повышения линейности функции преобразования предлагается использовать четырехканальную дифференциальную схему съема информации (Рисунок 36).

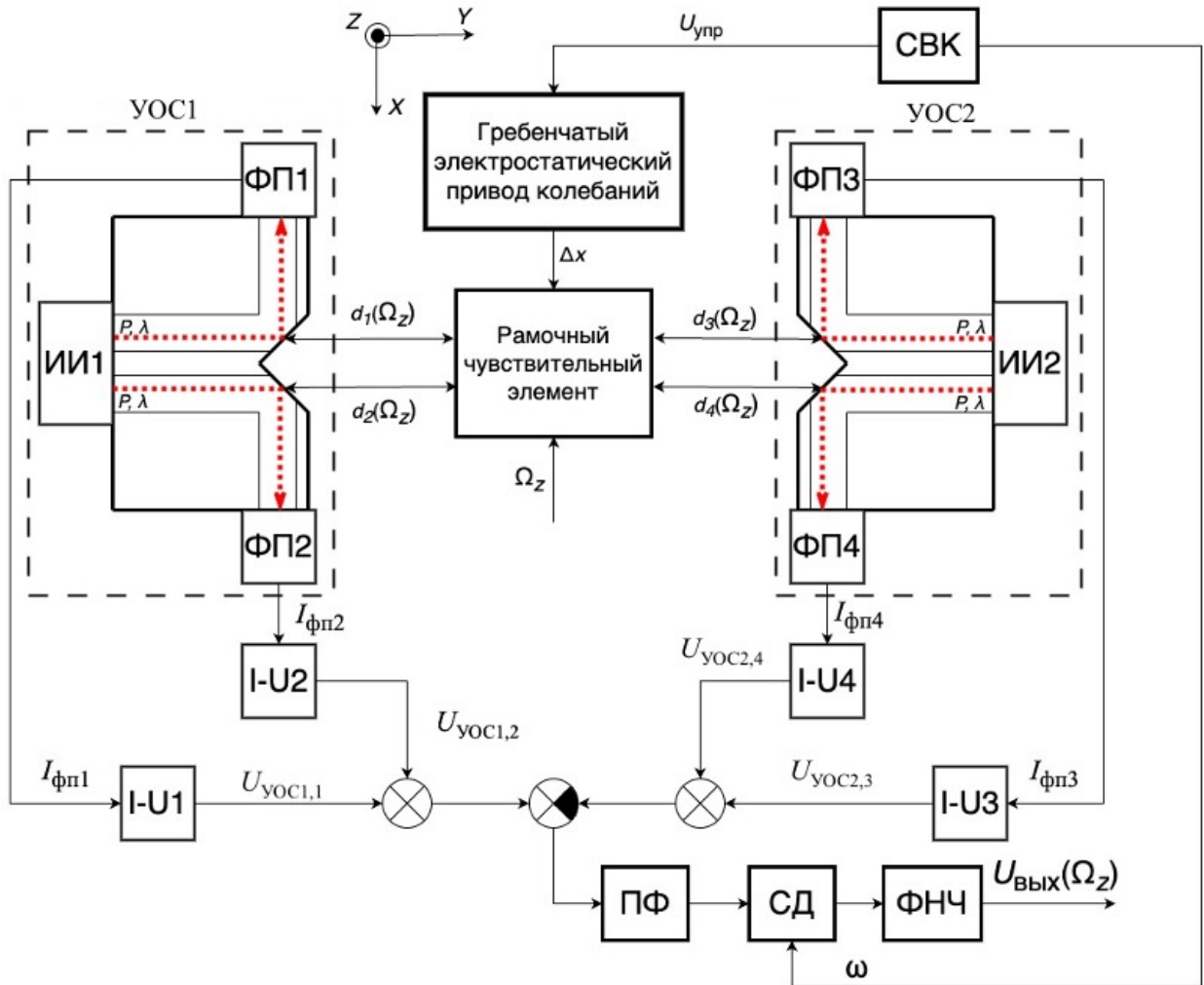


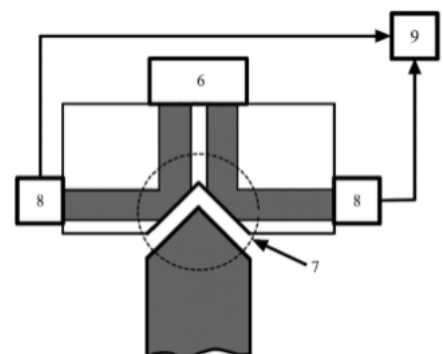
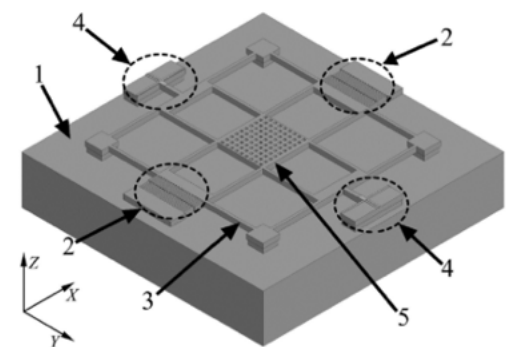
Рисунок 36 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной дифференциальной схемой считывания на основе ОТЭ

Четырехканальная дифференциальная схема считывания содержит два УОС на основе ОТЭ. Каждый из УОС на основе ОТЭ состоит из источника оптического излучения, двух фотоприемников, двух оптических модуляторов, выполненных в виде призм полного внутреннего отражения и поглощающего оптического элемента, закрепленного на наружной стороне РЧЭ. Поверхности отражения призм расположены под углом  $90^\circ$  относительно друг друга. Оптическое излучение

источника вводится в два световода, проходит через призмы и поступает на фотоприёмники [99].

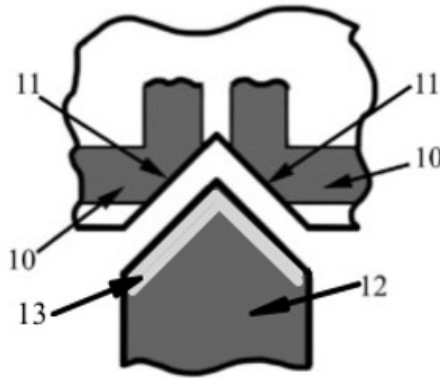
Блок обработки и управления содержит преобразователи ток напряжение (I-U1, I-U2, I-U3, I-U4), два сумматора, вычитающее устройство, ПФ, СД, ФНЧ и СВК. ПФ имеет узкую полосу пропускания с центральной частотой, равной частоте возбуждения колебаний РЧЭ в режиме движения. СД преобразовывает входной гармонический сигнал и передает его на ФНЧ, где выделяется постоянная составляющая сигнала, пропорциональная угловой скорости. Блок обработки и управления формирует сигналы для СВК и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}(\Omega_z)$ , пропорциональное, действующей угловой скорости  $\Omega_z$ .

Рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости с четырехканальной системой съема информации содержит подложку из диэлектрического материала 1, систему возбуждения колебаний 2, РЧЭ 3, два УОС 4, инерционную массу 5 (Рисунок 37 а). Каждый УОС 4 содержит ИИ 6, оптический модулятор 7, ФП 8. Выходы фотоприемников соединены со входами блока обработки 9 (Рисунок 37 б). Оптический модулятор 7, выполнен в виде двух призм полного внутреннего отражения 10, выполненных по планарной технологии, поверхности отражения 11 которых расположены под углом  $90^\circ$  друг к другу, и клиновидного оптического элемента 12 (КОЭ). КОЭ закреплен на наружной стороне рамки 3, причем величина симметричных зазоров между поверхностями отражения 11 призм и гранями КОЭ 12 является равномерной и не превышает величину длины волны источника оптического излучения. На поверхности КОЭ 12 имеется поглощающее оптическое излучение покрытие 13 (Рисунок 37 в).



а)

б)



в)

Рисунок 37 – Общий вид РЧЭ и функциональная схема УОС на основе ОТЭ: а) общий вид РЧЭ, б) функциональная схема УОС на основе ОТЭ, в) общий вид оптического модулятора

Колебания в режиме чувствительности вдоль оси  $OY$  детектируются УОС на основе ОТЭ. При этом зазоры между КОЭ и ППВО изменяются по гармоническому закону. Изменение величины зазора  $d_i$  приводит к изменению отражательной способности  $R_i$  области, разделяющей поверхности отражения ППВО и КОЭ, что приводит к изменению мощности оптического излучения, поступающего на ФП, и затем, после детектирования, к формированию электрического сигнала, поступающего в блок обработки.

Фотоприемники преобразуют оптические мощности излучения  $P_{\text{ФП1}}, P_{\text{ФП2}}, P_{\text{ФП3}}, P_{\text{ФП4}}$  в фототоки  $I_{\text{ФП1}}, I_{\text{ФП2}}, I_{\text{ФП3}}, I_{\text{ФП4}}$ , которые поступают на преобразователи «ток – напряжение»  $I-U_1, I-U_2, I-U_3, I-U_4$ .

Зазоры  $d_1, d_2, d_3, d_4$  между РЧЭ и узлами оптического считывания изменяются с частотой колебаний в режиме чувствительности, зависят от действующей угловой скорости и влияют на оптическое туннелирование. Когда угол между поверхностью отражения ППВО и осью КОЭ равен  $45^\circ$ , величины зазоров  $d_1, d_2, d_3, d_4$  равны:

$$d_1(\Omega_z, t) = d_0 - \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2},$$

$$d_2(\Omega_z, t) = d_0 - \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2},$$

$$d_3(\Omega_z, t) = d_0 + \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2},$$

$$d_4(\Omega_z, t) = d_0 + \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2}.$$

Диапазон измеряемых угловых скоростей нелинейно связан с диапазоном допустимых значений зазоров между призмами и РЧЭ. Оптические мощности  $P_{\text{ФП1}}$ ,  $P_{\text{ФП2}}$ ,  $P_{\text{ФП3}}$ ,  $P_{\text{ФП4}}$  излучения, падающего на фотоприёмники, определяются с помощью приближённой модели. В рамках этой модели зазор рассчитывается по центральному лучу источника излучения как точки контакта на модулирующей грани ППВО и изменяется пропорционально отражательным способностям  $R_1[d_1(\Omega_z, t)]$ ,  $R_2[d_2(\Omega_z, t)]$ ,  $R_3[d_3(\Omega_z, t)]$ ,  $R_4[d_4(\Omega_z, t)]$  [100]. Оптические мощности излучения  $P_{\text{ФП1}}$ ,  $P_{\text{ФП2}}$ ,  $P_{\text{ФП3}}$ ,  $P_{\text{ФП4}}$  на квазилинейном участке функции преобразования с учётом возможных потерь выражаются как

$$P_{\text{ФП1}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ1}}R_1[d_1(\Omega_z, t)]K_1,$$

$$P_{\text{ФП2}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ1}}R_2[d_2(\Omega_z, t)]K_2,$$

$$P_{\text{ФП3}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ2}}R_3[d_3(\Omega_z, t)]K_3,$$

$$P_{\text{ФП4}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ2}}R_4[d_4(\Omega_z, t)]K_4.$$

где  $P_{\text{ИИ1}}$ ,  $P_{\text{ИИ2}}$  – оптические мощности источников излучения;

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  – коэффициенты суммарных потерь.

При использовании операционного усилителя выходные сигналы УОС на основе ОТЭ определяются как:

$$U_{\text{УОС1,1}}(\Omega_z, t) = (S_{\text{ФП1}}P_{\text{ФП1}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум1}})R_{\text{ОС1}},$$

$$U_{\text{УОС1,2}}(\Omega_z, t) = (S_{\text{ФП2}}P_{\text{ФП2}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум2}})R_{\text{ОС2}},$$

$$U_{\text{УОС2,3}}(\Omega_z, t) = (S_{\text{ФП3}}P_{\text{ФП3}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум3}})R_{\text{ОС3}},$$

$$U_{\text{УОС2,4}}(\Omega_z, t) = (S_{\text{ФП4}}P_{\text{ФП4}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум4}})R_{\text{ОС4}}.$$

В соответствии с предложенной дифференциальной схемой обработки, суммарное напряжение  $U_{\text{сум}}(\Omega_z, t)$  определится как:

$$U_{\text{сум}}(\Omega_z, t) = U_{\text{УОС1,1}}(\Omega_z, t) + U_{\text{УОС1,2}}(\Omega_z, t) - U_{\text{УОС2,3}}(\Omega_z, t) - U_{\text{УОС2,4}}(\Omega_z, t).$$

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}(\Omega_z)$  рамочного МОЭМ преобразователя определяется амплитудой суммарного напряжения  $U_{\text{сум м}}(\Omega_z)$ :

$$U_{\text{вых}}(\Omega_z) = U_{\text{сум м}}(\Omega_z)/\sqrt{2}.$$

Зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(\Omega_z)$  от внешней угловой скорости при дифференциальной обработке четырех оптических сигналов представлена на Рисунок 38 при следующих выбранных параметрах:  $P_{\text{ли}} = 2$  мВт,  $\lambda = 1550$  нм, угол падения оптического излучения  $\theta = 0,78$  рад.

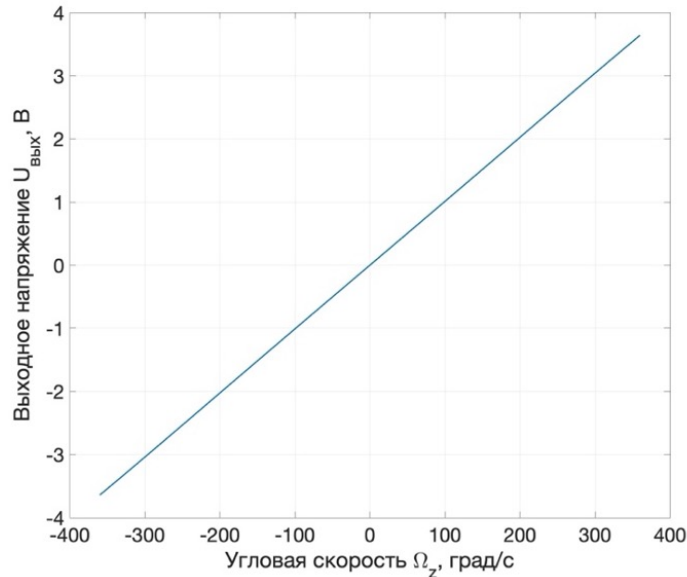


Рисунок 38 – Зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  МОЭМ преобразователя от угловой скорости  $\Omega_z$

Нелинейность функции преобразования в диапазоне угловой скорости  $0 \dots 360$  град/с составляет  $\delta_{\text{нел}} = 0,12\%$ . При увеличении диапазона измерения угловой скорости до  $800$  град/с нелинейность функции преобразования увеличивается до  $\delta_{\text{нел}} = 2,5\%$  (Рисунок 39), что обусловлено увеличением амплитуды колебаний  $\Delta u_{\text{макс}}(\Omega_{z \text{ макс}})$  более чем на  $\lambda/2$  [74].

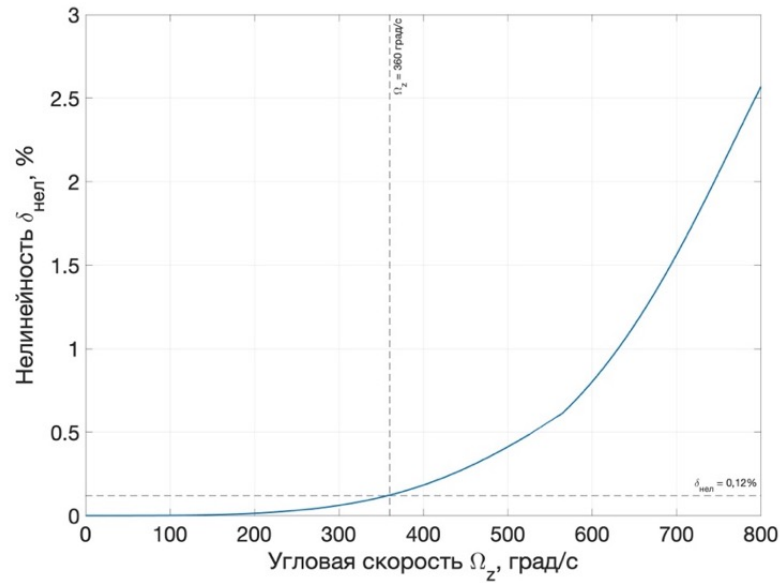


Рисунок 39 – Зависимость нелинейности функции преобразования  $\delta_{\text{нел}}$  от действующей угловой скорости  $\Omega_z$

Для сохранения малой нелинейности при расширении диапазона угловых скоростей необходимо уменьшать амплитуду колебаний РЧЭ в режиме движения.

При оценке основной среднеквадратичной погрешности угловой скорости  $\Delta\Omega_z$  на установленном диапазоне измерений  $\Omega_{z \text{ макс}}$ , примем, что источником погрешностей измерения является шумовая составляющая выходного сигнала УОС на основе ОТЭ:

$$\frac{\Delta I_{\text{ФП макс}}}{I_{\text{шум } \Sigma}} = \frac{\Omega_{z \text{ макс}}}{\Delta\Omega_z},$$

где  $\Delta I_{\text{ФП макс}}$  – максимальное изменение фототока ФП при изменении рабочих зазоров  $\Delta d$ ;  $I_{\text{шум } \Sigma}$  – значение случайных шумов ФП.

Значение среднеквадратичного отклонения случайных шумов ФП с учетом дробового, теплового, темного и фликкер шумов можно определить как:

$$I_{\text{шум } \Sigma} = \sqrt{I_{\text{шум ФП1}}^2 + I_{\text{шум ФП2}}^2 + I_{\text{шум ФП3}}^2 + I_{\text{шум ФП4}}^2},$$

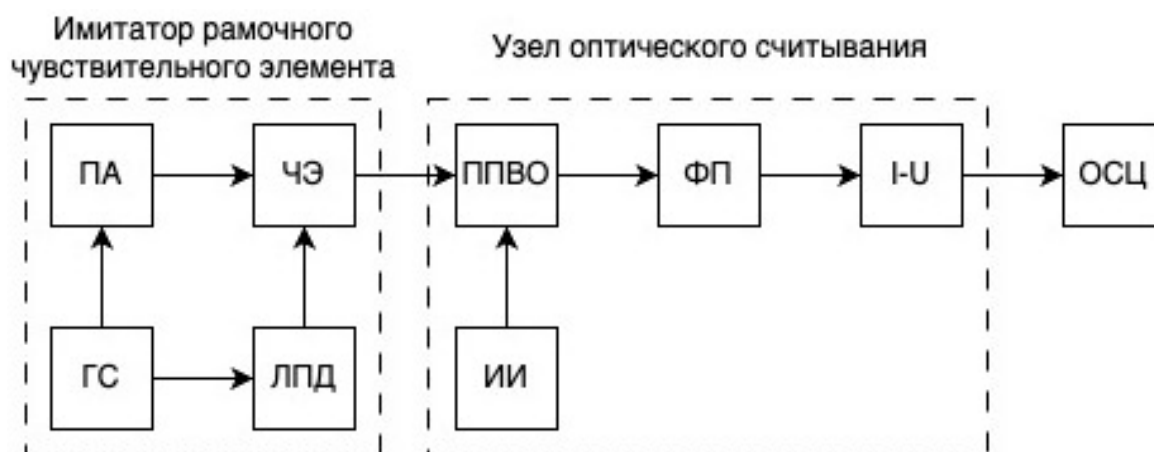
$$I_{\text{шум ФП}i} = \sqrt{\left( |e|(S_{\text{ФП}i} P_{\text{ФП}i} + 3I_{\text{темн}}) + \frac{4k_B T}{R_{\text{шунт } i}} \right) \Delta f_{\text{ФП } i}},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $I_{\text{темн}}$  – темновой ток ФП,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $R_{\text{шунт}}$  – шунтирующее сопротивление ФП,  $\Delta f_{\text{ФП}}$  – полоса пропускания ФП.

Для следующих параметров:  $S_{\text{ФП}} = 0,9 \text{ А/Вт}$ ,  $I_{\text{темн}} = 1 \text{ нА}$ ,  $R_{\text{шунт}} = 350 \text{ МОм}$ ,  $T = 297 \text{ К}$ ,  $\Delta f = 500 \text{ Гц}$ ,  $\Delta I_{\text{ФП макс}} = 453 \text{ мкА}$ ,  $\Omega_z = 360 \text{ град/с}$  получена основная среднеквадратичная погрешность  $\Delta \Omega_z = 0,6 \text{ град/ч}$ .

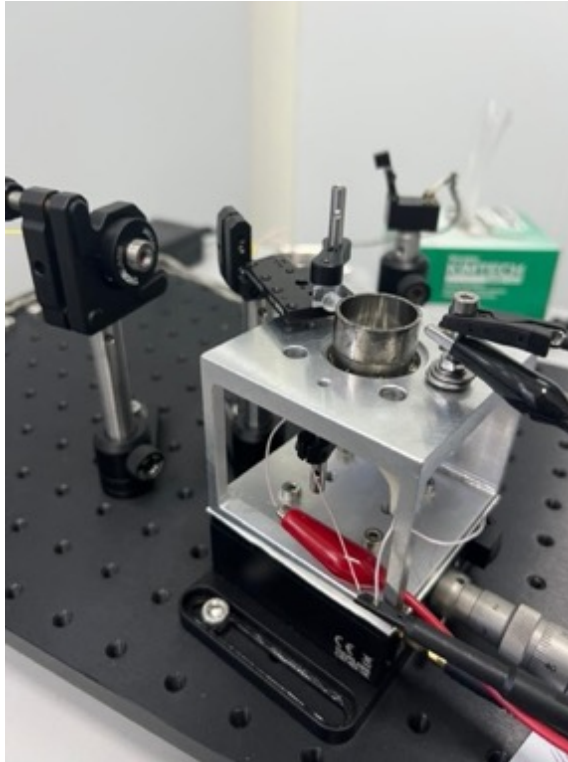
## 2.4 Экспериментальное исследование имитатора рамочного чувствительного элемента с узлом оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта

Для экспериментального исследования функции преобразования УОС, зависимости амплитуды выходного напряжения УОС на основе ОТЭ  $U_{\text{УОС м}}$  от амплитуды переменного зазора  $\Delta u_{\text{макс}}$ , разработана экспериментальная установка, которая состоит из имитатора РЧЭ и УОС, позволяющая определять амплитуду колебаний РЧЭ в субмикрометровом диапазоне (Рисунок 40).



а)





б)

Рисунок 40 – Экспериментальная установка: а) структурная схема: ПА – пьезоактюатор, ОСЦ – осциллограф, ГС – генератор сигналов, ЛПД – линейный пьезодвигатель; б) внешний вид

Оптическое излучение мощностью  $P_{\text{ии}} = 5 \text{ мВт}$  и длиной волны  $\lambda = 1550 \text{ нм}$  нормально падает на катетную грань ППВО и отражается от ее гипотенузной грани. В месте отражения оптического излучения формируется эллиптическая воспринимающая зона, а отраженное излучение, при дальнейшем распространении, падает на фоточувствительную область ФП. ФП генерирует фототок, который преобразуется в напряжение и усиливается с помощью преобразователя «ток-напряжение». В качестве имитатора РЧЭ используется чувствительный элемент в виде цилиндрического резонатора с наклеенной на его оболочку сферический элемент, выполненный из кварцевого стекла марки КУ-1. Имитация колебаний РЧЭ в режиме чувствительности осуществляется с помощью пьезоактюаторов, наклеенных на дно цилиндрического резонатора и соединённых с генератором сигналов [101].

Цилиндрический резонатор закреплен на линейном пьезодвигателе модели Thorlabs NFL5DP20, позволяющем совершать линейное движение на расстояние до 20 мкм с разрешающей способностью 1 нм [102]. С его помощью выставляется начальный зазор  $d_0 \approx 0,8$  мкм между сферическим элементом и узлом оптического считывания. Величина начального зазора  $d_0$  определялась по напряжению  $U_{\text{ЛПД}}$ , подаваемому на ЛПД в соответствии с его градуировочной характеристикой.

Стенка цилиндрического резонатора совершает колебания, находясь в воспринимающей зоне узла оптического считывания. На выходе ФП формируются сигналы, соответствующие колебаниям кромки резонатора, которые подаются на преобразователь «ток-напряжение». Выходное напряжение УОС на основе ОТЭ  $U_{\text{УОС}}(t)$  выводится на экран осциллографа (Рисунок 41).

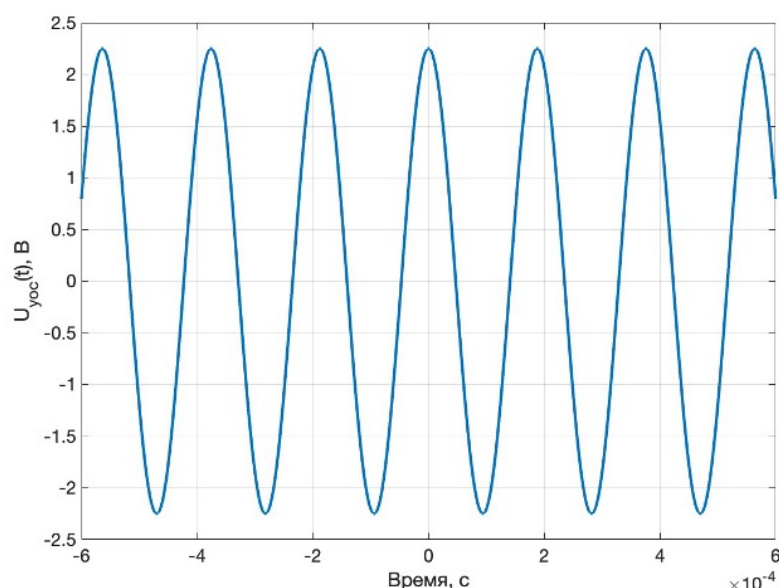


Рисунок 41 – Осциллограмма выходного напряжения узла оптического считывания  $U_{\text{УОС}}(t)$  при  $\Delta y_{\text{макс}} \approx 0,45$  мкм

Экспериментальная зависимость амплитуды выходного напряжения узла оптического считывания  $U_{\text{УОС м}}(\Delta y_{\text{макс}})$  от амплитуды колебаний стенки цилиндрического резонатора  $\Delta y_{\text{макс}}$ , оцениваемой по подаваемому на ПА напряжению  $U_{\text{ПА}}$  приведена на Рисунок 42.

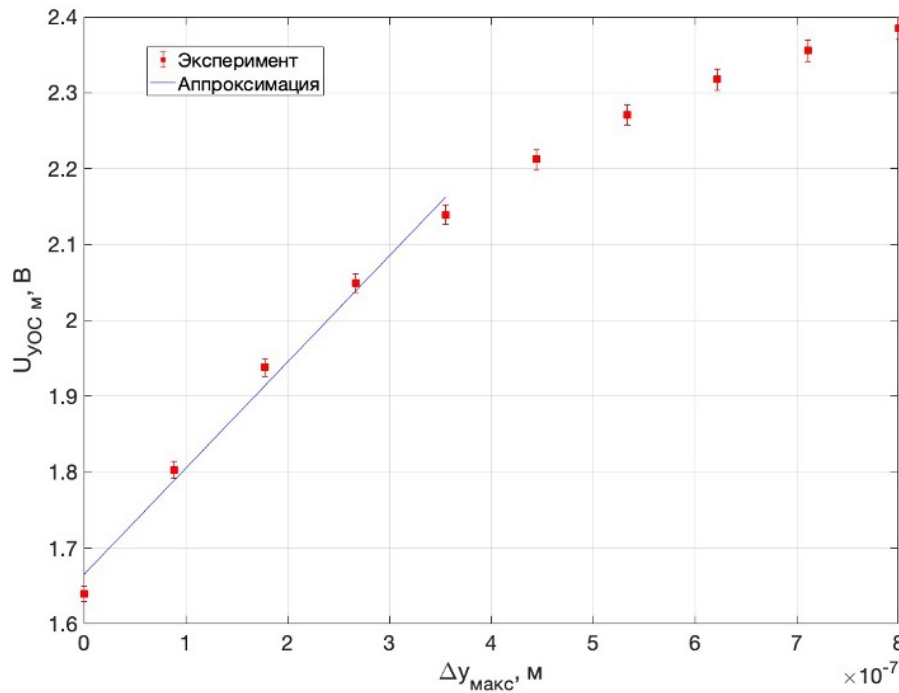


Рисунок 42 – Зависимость амплитуды выходного напряжения узла оптического считывания от амплитуды колебаний чувствительного элемента:

1 – экспериментальные значения, 2 – аппроксимация линейного участка

Зависимость  $U_{\text{УОС м}} = f(\Delta y_{\text{макс}})$  линейно аппроксимирована и используется в дальнейших расчетах рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости. Квазилинейная функция преобразования субмикрометровых перемещений исследуемого УОС на основе ОТЭ представлена в виде:

$$U_{\text{УОС м}}(\Delta y_{\text{макс}}) = K_1 \Delta y_{\text{макс}} + U_0(d_0),$$

где  $U_0(d_0)$  – экспериментальное значение смещения выходного напряжения, пропорциональное начальному зазору  $d_0$ ,  $U_0(d_0) = 1,6 \text{ В}$ ;

$K_1$  – чувствительность к субмикрометровым перемещениям,  $K_1 = 1,3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ .

Проведена оценка значения отношения сигнал/шума УОС на основе ОТЭ. В ходе оценки использовался ФП, чувствительность которого варьировалась в зависимости от нестабильностей длины волны и оптической мощности падающего излучения. С помощью анализатора спектра определялся уровень шума в отсутствие входного оптического сигнала. Для различных значений оптической мощности проводилось измерение выходного напряжения УОС  $U_{\text{УОС м}}$  при постоянной амплитуде колебаний стенки цилиндрического резонатора

$\Delta u_{\text{макс}} \approx 0,35$  мкм. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как отношение среднего уровня выходного напряжения УОС  $U_{\text{УОС м}}$  к среднему уровню шумов. Отношение сигнал/шум для УОС составляет 79 дБ в полосе пропускания 1 кГц.

## Выводы по Главе 2

Предложена новая функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с электрической развязкой контура возбуждения колебаний в режиме движения и оптической системы измерения перемещений в режиме чувствительности. За счет использования узлов оптического считывания на основе ОТЭ для измерения параметров колебаний в режиме чувствительности повышается помехозащищенность преобразователя, так как в системе возбуждения колебаний в режиме движения и системе съема колебаний в режиме чувствительности используются сигналы различной физической природы.

Разработана математическая модель рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости для работы с узлами оптического считывания на основе ОТЭ, обеспечивающая расчет перемещений рамочного чувствительного элемента в субмикрометровом диапазоне, учитывающая вязкое газодинамическое демпфирование РЧЭ. Проведено экспериментальное исследование узла оптического считывания на основе ОТЭ; получена экспериментальная функция преобразования величины зазора между РЧЭ и поверхностью отражения ППВО в оптическую мощность. Предложено аппроксимирующее выражение для линейного участка функции преобразования. Показано, что разработанный узел оптического считывания на основе ОТЭ, выполненный в виде скошенного световода может применяться для считывания субмикрометровых перемещений малогабаритных объектов.

Выполнен анализ механизмов демпфирования РЧЭ, влияющих на характеристики рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ. Показано, что добротность РЧЭ, работающего совместно с УОС на основе ОТЭ, незначительно изменяется в области давлений от 0,001 Па до 0,1 Па. Это дает

возможность сохранить добротность на уровне  $7,5 \cdot 10^4$  на граничном значении среднего уровня вакуума, что упрощает задачу герметизации и поддержания необходимого разрежения внутри корпуса преобразователя.

Проведено моделирование работы рамочного МОЭМ преобразователя с четырехканальной дифференциальной схемой считывания на основе ОТЭ. В диапазоне угловой скорости  $\pm 360$  град/с нелинейность функции преобразования составила 0,12%. Проведено экспериментальное исследование имитатора рамочного МОЭМ преобразователя. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами моделирования, что подтверждает возможность использования предложенных моделей узлов оптического считывания субмикрометровых перемещений.

### ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАМОЧНЫЙ МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И РАЗРАБОТКА СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ

#### 3.1 Анализ влияния линейного ускорения на погрешность измерения угловой скорости рамочным МОЭМ преобразователем на основе ОТЭ

Одной из погрешностей преобразователей угловой скорости на основе МЭМС является чувствительность к линейному ускорению. Линейное ускорение, действующее на ось чувствительности преобразователя угловой скорости, вызывает смещение колебаний чувствительного элемента, изменяя средний зазор между штырями электростатического привода. В результате возникают колебания выходного сигнала и изменение масштабного коэффициента, что значительно увеличивает погрешность выходных данных преобразователя угловой скорости.

Рассмотрим действие линейного ускорения на рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости. По сравнению с движением обычного вибрационного преобразователя угловой скорости, движения рамочного чувствительного элемента можно рассматривать как суперпозицию его смещения, вызванного линейным ускорением, и колебательного движения чувствительного элемента преобразователя угловой скорости.

Под действием линейного ускорения начальный зазор  $d_0$  между рамочным чувствительным элементом и узлом оптического считывания на основе ОТЭ изменяется из-за деформаций упругих подвесов. Это вызывает несимметричность выходных сигналов в дифференциальных каналах, а также может привести к механическому контакту рамочного чувствительного элемента с узлом оптического считывания, что нарушит работу преобразователя [103, 104].

Смещения рамочного чувствительного элемента под действием линейного ускорения вдоль осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  определим, как

$$\Delta x_a = ma_x/k_x,$$

$$\Delta y_a = ma_y/k_y,$$

$$\Delta z_a = ma_z/k_z,$$

где  $k_z$  – суммарная жёсткость упругих подвесов вдоль оси  $OZ$  соответственно.

Смещение оси колебаний РЧЭ в режиме чувствительности не одинаково влияет на амплитуду дифференциальных выходов измерительных каналов из-за высокой чувствительности к наноперемещениям и нелинейности функции преобразования. Следовательно, сигналы положительных и отрицательных выходов измерительных каналов режима чувствительности получают дополнительную ошибку измерения угловой скорости в дифференциальной схеме считывания.

Колебания в режиме движения вдоль оси  $OX$  представляют собой синусоидальные колебания с постоянной амплитудой на частоте собственных колебаний РЧЭ. При действии угловой скорости  $\Omega_z$  по оси  $OZ$  и линейного ускорения  $a_y$  по оси  $OY$  общее ускорение  $a_{y\Sigma}$  по оси  $OY$  запишем в виде [83]:

$$a_{y\Sigma} = 2\Omega_z v_x + a_y,$$

где  $v_x$  — скорость колеблющегося РЧЭ вдоль оси  $OX$ .

Следовательно, движение вдоль оси чувствительности с общим ускорением  $a_{y\Sigma}$  определяется двумя входными величинами: угловой скоростью  $\Omega_z$  и действующим линейным ускорением  $a_y$  вдоль оси  $OY$ .

Изменение зазоров  $d_1, d_2, d_3, d_4$  между рамочным чувствительным элементом и УОС на основе ОТЭ при воздействии линейного ускорения вдоль оси  $OY$  можно представить в виде:

$$d_1(\Omega_z, a_y) = d_0 - (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) - \Delta y_a(a_y)) / \sqrt{2},$$

$$d_2(\Omega_z, a_y) = d_0 - (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) - \Delta y_a(a_y)) / \sqrt{2},$$

$$d_3(\Omega_z, a_y) = d_0 + (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) + \Delta y_a(a_y)) / \sqrt{2},$$

$$d_4(\Omega_z, a_y) = d_0 + (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) + \Delta y_a(a_y)) / \sqrt{2}.$$

При воздействии линейного ускорения  $a_y$  вдоль оси  $OY$  выходные напряжения УОС на основе ОТЭ запишем в виде:

$$U_{\text{УОС1,1}}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ay}(\Delta y_a), \quad (37)$$

$$U_{\text{УОС1,2}}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ay}(\Delta y_a), \quad (38)$$

$$U_{\text{УОС}2,3}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ay}(\Delta y_a), \quad (39)$$

$$U_{\text{УОС}2,4}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ay}(\Delta y_a), \quad (40)$$

где  $U_{ay}$  – напряжение смещения, пропорциональное действующему линейному ускорению  $a_y$ ;

$K_{\text{УОС}}$  – масштабный коэффициент УОС на основе ОТЭ.

Масштабный коэффициент  $K_{\text{УОС}}$  УОС на основе ОТЭ определяем как:

$$K_{\text{УОС}} = \frac{\Delta P_{\text{ФП}} S_{\text{ФП}} R_{\text{ОС}}}{\Delta d \sqrt{2}}. \quad (41)$$

Смоделирована работа рамочного МОЭМ преобразователя при воздействии линейного ускорения в диапазоне  $a_y = 0 \dots 883 \text{ м/с}^2$  вдоль оси  $OY$ . При моделировании использованы параметры узла оптического считывания: начальный зазор  $d_0 = 540 \text{ нм}$  между РЧЭ и узлами оптического считывания, длина волны оптического излучения  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ , угол падения оптического излучения на границу раздела сред  $\theta = 0,78 \text{ рад}$ , показатель преломления призмы и КОЭ РЧЭ  $n_1 = n_3 = 1,45$ , показатель преломления разделяющей среды  $n_2 = 1,0$ , мощность источника излучения  $P_{\text{ии}} = 5 \text{ мВт}$ .

Относительная погрешность измерения угловой скорости  $\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y)$  вокруг оси  $OZ$  с учетом влияния линейного ускорения  $a_y$  по оси  $OY$  определяется как:

$$\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y) = \frac{|U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y) - U_{\text{вых}}(\Omega_z, 0)|}{U_{\text{вых}}(\Omega_z, 0)} 100\%.$$

Зависимость относительной погрешности измерения  $\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y)$  от линейного ускорения  $a_y$  по оси  $OY$  представлена на Рисунок 43.



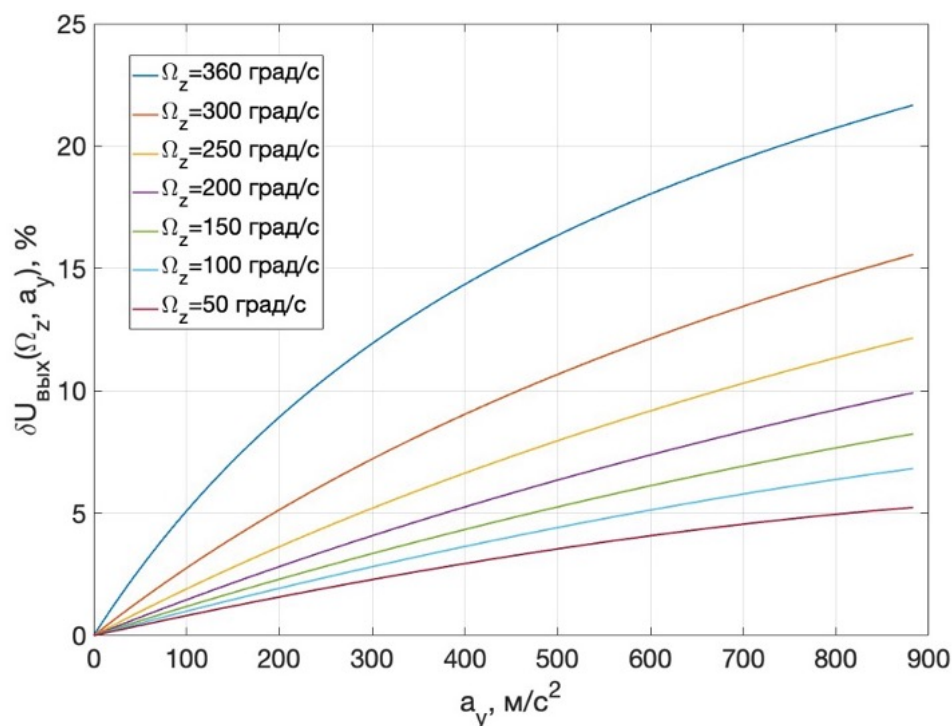


Рисунок 43 – Зависимость относительной погрешности  $\delta U_{\text{вых}}$  рамочного МОЭМ преобразователя от линейного ускорения  $a_y$  при угловой скорости  $\Omega_z = 360; 300; 250; 200; 150; 100; 50$  град/с

Проведённое моделирование показало, что относительная погрешность  $\delta U_{\text{вых}}$  зависит от угловой скорости ( $\Omega_z = 360$  град/с) и линейного ускорения  $a_y$ . При ускорении  $100 \text{ м/с}^2$  относительная погрешность составляет 5%. При увеличении ускорения до  $883 \text{ м/с}^2$  относительная погрешность достигает 21,5% и требует разработки средств компенсации.

Проведено моделирование осевого перемещения РЧЭ  $\Delta x_a$  и эквивалентного перемещения  $\Delta x_{a \text{ экв}}$  КОЭ, возникающих под действия линейного ускорения  $a_x$  вдоль оси  $OX$ . Осевое перемещение РЧЭ  $\Delta x_a$  и эквивалентное перемещение  $\Delta x_{a \text{ экв}}$  КОЭ под действием ускорении  $a_x = 883 \text{ м/с}^2$  без учета электростатической силы, возбуждающей колебания вдоль оси  $OX$ , показаны на Рисунок 44.

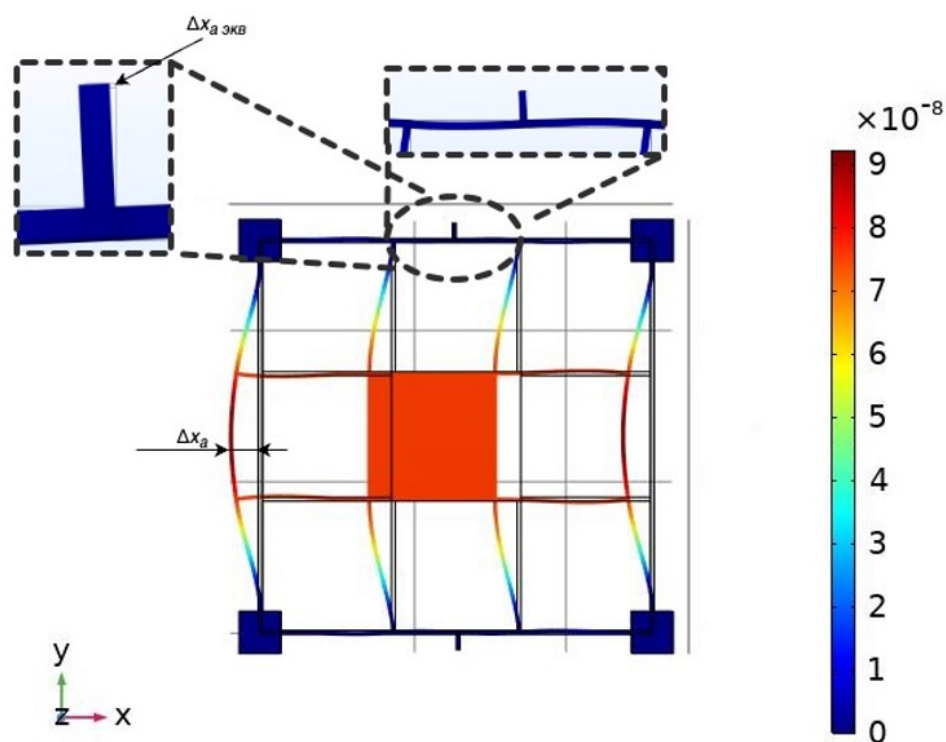


Рисунок 44 – Осевое перемещение РЧЭ  $\Delta x_a$  и эквивалентное перемещение  $\Delta x_{a \text{ экв}}$  КОЭ при ускорении  $a_x = 883 \text{ м/с}^2$

Под действием ускорения  $a_x = 883 \text{ м/с}^2$ , РЧЭ перемещается на величину  $\Delta x_a = 87 \text{ нм}$ , при этом эквивалентное перемещение КОЭ составляет  $\Delta x_{a \text{ экв}} = 5 \text{ нм}$ .

Зависимость эквивалентного перемещения  $\Delta x_{a \text{ экв}}$  КОЭ от линейного ускорения  $a_x$  можно аппроксимировать выражением:

$$\Delta x_{a \text{ экв}} = 5,99 \cdot 10^{-12} [\text{с}^2] \cdot a_x.$$

Зависимость осевого перемещения  $\Delta x_a$  в диапазоне ускорений  $a_x = 0 \dots 883 \text{ м/с}^2$  без учета электростатической силы, возбуждающей колебания вдоль оси  $OX$ , показана на Рисунок 45.

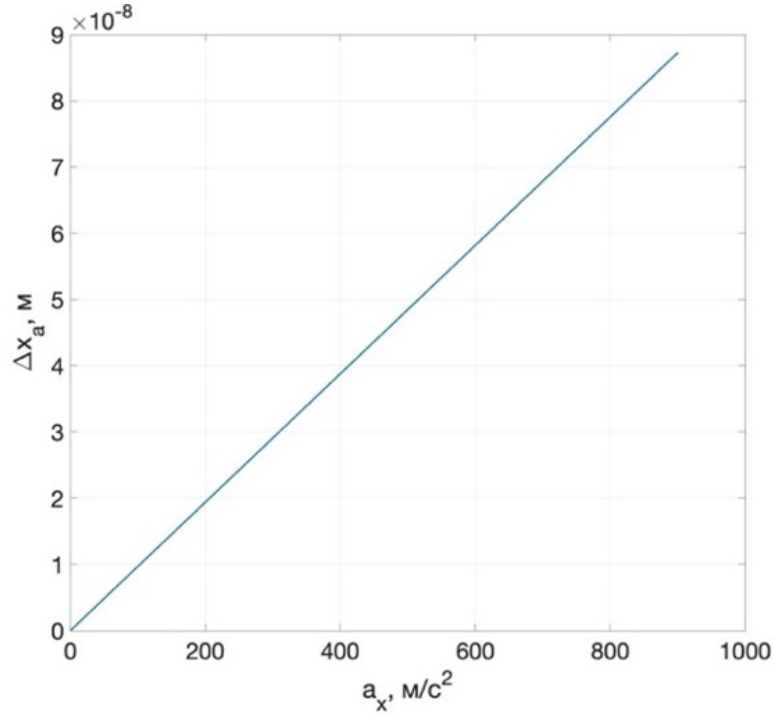


Рисунок 45 – Зависимость осевого перемещения  $\Delta x_a$  РЧЭ от линейного ускорения вдоль оси  $OX$

Такое отклонение  $\Delta x_a$  изменяет величину электростатических сил в гребенчатом приводе колебаний в режиме движения, что приводит к изменению перемещений вдоль оси  $OY$ .

Рассмотрим изменение зазоров  $d_1, d_2, d_3, d_4$  между рамочным чувствительным элементом и УОС на основе ОТЭ при воздействии линейного ускорения  $a_x$  вдоль оси  $OX$ . Зазоры  $d_1, d_2, d_3, d_4$  представим в виде:

$$d_1(\Omega_z, a_x) = d_0 - (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) - \Delta x_{a \text{ экв}}(a_x))/\sqrt{2},$$

$$d_2(\Omega_z, a_x) = d_0 - (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) + \Delta x_{a \text{ экв}}(a_x))/\sqrt{2},$$

$$d_3(\Omega_z, a_x) = d_0 + (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) - \Delta x_{a \text{ экв}}(a_x))/\sqrt{2},$$

$$d_4(\Omega_z, a_x) = d_0 + (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) + \Delta x_{a \text{ экв}}(a_x))/\sqrt{2}.$$

Для анализа влияния линейного ускорения вдоль оси  $OX$  на выходной сигнал МОЭМ преобразователя в уравнения движения (9)-(11) и формулах для электростатической силы (13)-(15) учтено дополнительное смещение  $\Delta x_a$ .

Выходные напряжения УОС на основе ОТЭ с учетом действия линейного ускорения  $a_x$  запишем в виде:

$$U_{yOC1,1}(\Omega_z, a_x, t) = K_{yOC}\Delta y_{\max}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \quad (42)$$

$$U_{yOC1,2}(\Omega_z, a_x, t) = K_{yOC}\Delta y_{\max}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \quad (43)$$

$$U_{yOC2,3}(\Omega_z, a_x, t) = K_{yOC}\Delta y_{\max}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \quad (44)$$

$$U_{yOC2,4}(\Omega_z, a_x, t) = K_{yOC}\Delta y_{\max}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \quad (45)$$

где  $U_{ax}$  – напряжение смещения, пропорциональное действующему линейному ускорению  $a_x$ .

Относительная погрешность измерения угловой скорости  $\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_x)$  вокруг оси  $OZ$  с учетом влияния линейного ускорения по оси  $OX$  определяется как:

$$\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_x) = \frac{|U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_x) - U_{\text{вых}}(\Omega_z, 0)|}{U_{\text{вых}}(\Omega_z, 0)} 100\%.$$

Зависимость относительной погрешности измерения  $\delta U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_x)$  от линейного ускорения  $a_x$  по оси  $OX$  представлена на Рисунок 46.

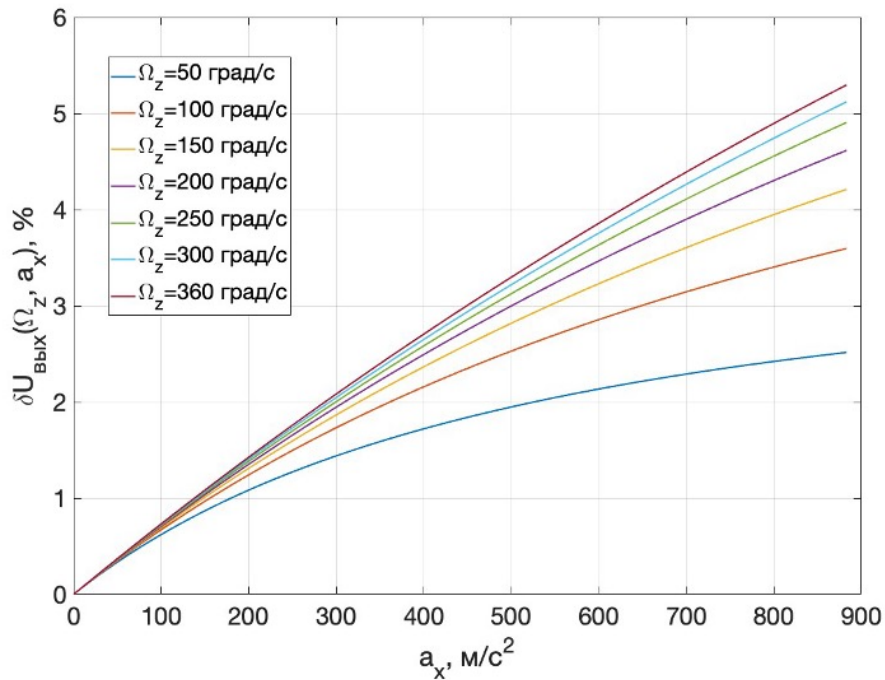


Рисунок 46 – Зависимость относительной погрешности  $\delta U_{\text{вых}}$  рамочного МОЭМ преобразователя от линейного ускорения  $a_x$

Напряжение  $U_{ax}$ , пропорциональное действующему линейному ускорению  $a_x$ , предлагается использовать для формирования сигнала обратной связи в контуре возбуждения первичных колебаний для стабилизации РЧЭ.

Проведено моделирование перемещения  $\Delta z_a$  РЧЭ вдоль оси  $OZ$  под действием линейного ускорения  $a_z$ . Зависимость перемещения  $\Delta z_a$  в диапазоне ускорений  $a_z = 0 \dots 883 \text{ м/с}^2$  вдоль оси  $OZ$  приведена на Рисунок 47.

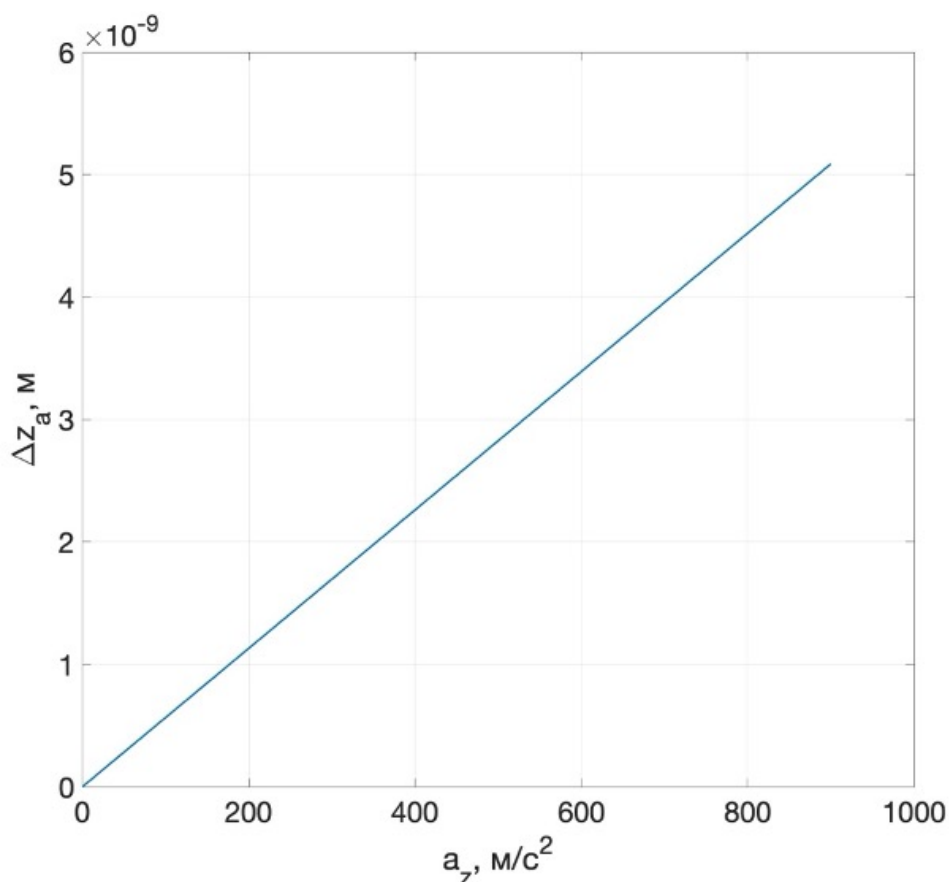


Рисунок 47 – Зависимость перемещения РЧЭ вдоль оси  $OZ$  под действием линейного ускорения  $a_z$

На верхней границе диапазона ускорений  $a_z$  перемещения вдоль оси  $OZ$  составляют менее 5,5 нм. Такое перемещение не влияет на выходной сигнал, так как много меньше ширины ППВО в УОС на основе ОТЭ.

Таким образом, проведенный анализ влияния линейного ускорения на погрешность измерения угловой скорости рамочным МОЭМ преобразователем показал необходимость разработки схем компенсации действия ускорений  $a_y$  вдоль оси  $OY$  и  $a_x$  вдоль оси  $OX$  для повышения точности измерения.

### 3.2 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси считывания оптических сигналов на основе управления коэффициентом усиления

В МОЭМ преобразователе угловой скорости действующая угловая скорость преобразуется в сигналы УОС на основе ОТЭ, модулированные частотой  $\omega$  колебаний в режиме движения. При измерении угловой скорости подвижного объекта МОЭМ преобразователь испытывает низкочастотные перегрузки, обусловленные внешним воздействием линейного ускорения.

На Рисунк 48 показана частотная характеристика МОЭМ преобразователя по оси чувствительности, которая смоделирована как пружинно-массово-демпферная система второго порядка. На резонансной частоте системы  $\omega_{\text{соб}}$  график показывает высокий пик, который является рабочей областью преобразователя. Добротность чувствительной оси  $Q_y$  определяет чувствительность преобразователя. Для достижения высокой чувствительности преобразователя резонансные моды двух осей (движения и чувствительности) согласованы.

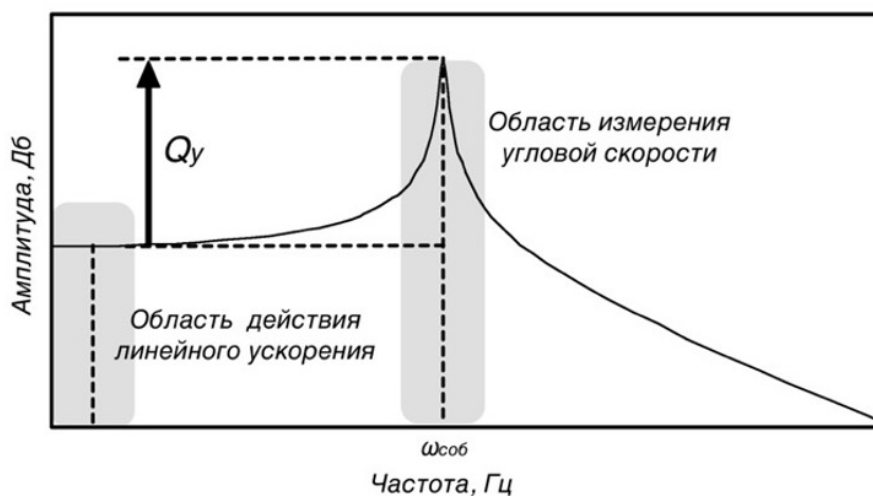


Рисунок 48 – Частотные области измерения угловой скорости и воздействия линейного ускорения

Когда угловая скорость и линейное ускорение действуют на преобразователь с низкой частотой, то можно получить два сигнала с помощью фильтрации и демодуляции. Частота изменения линейного ускорения находится в области низких частот, а угловые скорости формируют сигналы в килогерцовом диапазоне частот,

поэтому можно сформировать дополнительный управляющий сигнал компенсации линейного ускорения [105].

Для уменьшения погрешности измерения угловой скорости рамочного МОЭМ преобразователя, вызванной влиянием линейного ускорения  $a_y$ , рассмотрено два способа компенсации: управление коэффициентом усиления и использование силовой обратной связи.

В соответствии с уравнениями (37)-(42), действие линейного ускорения приводит к дополнительному смещению выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y)$  на значение  $U_{ay}(a_y)$  и увеличению нелинейности преобразования. Для компенсации дополнительной погрешности измерений угловой скорости введём коэффициент усиления  $K_{\text{ус}}$ , зависящий от напряжения  $U_{ay}(a_y)$ , тогда при воздействии линейного ускорения  $a_y$  скорректированные значения выходного напряжения  $U_{\text{вых скор}}(\Omega_z, a_y)$  определим как:

$$U_{\text{вых скор}}(\Omega_z, a_y) = U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y) K_{\text{ус}}.$$

Напряжение  $U_{ay}(a_y)$ , пропорциональное линейному ускорению  $a_y$ , получаем с помощью низкочастотной фильтрации с применением фильтра Баттерворта 2-го порядка. Использование низкочастотной фильтрации обусловлено различными частотными диапазонами сигналов угловой скорости и линейного ускорения. При воздействии угловой скорости оптическое излучение модулируется на резонансной частоте рамочного чувствительного элемента (десятки килогерц), в то время как дополнительная модуляция от линейного ускорения составляет менее 1 кГц.

Зависимость коэффициента усиления  $K_{\text{ус}}$  от напряжения  $U_{ay}$  получим следующим образом. На первом этапе получим значения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  при воздействии угловой скорости  $\Omega_z$ , на втором – значения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  при воздействии угловой скорости  $\Omega_z$  и линейного ускорения  $a_y$ , при этом зафиксировав значения  $U_{ay}(a_y)$ . На третьем этапе определим коэффициент усиления как:

$$K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{вых}}(\Omega_z)}{U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_y)}.$$

На четвёртом этапе построим градуировочную характеристику  $K_{\text{ус}}[U_a(a_y)]$  и

аппроксимируем полученный результат. Для формирования скорректированного значения выходного сигнала коэффициент  $K_{yc}(U_a)$  определим для каждого диапазона угловых скоростей (Рисунок 49). Количество диапазонов определяется с учётом требуемой точности преобразования [106].

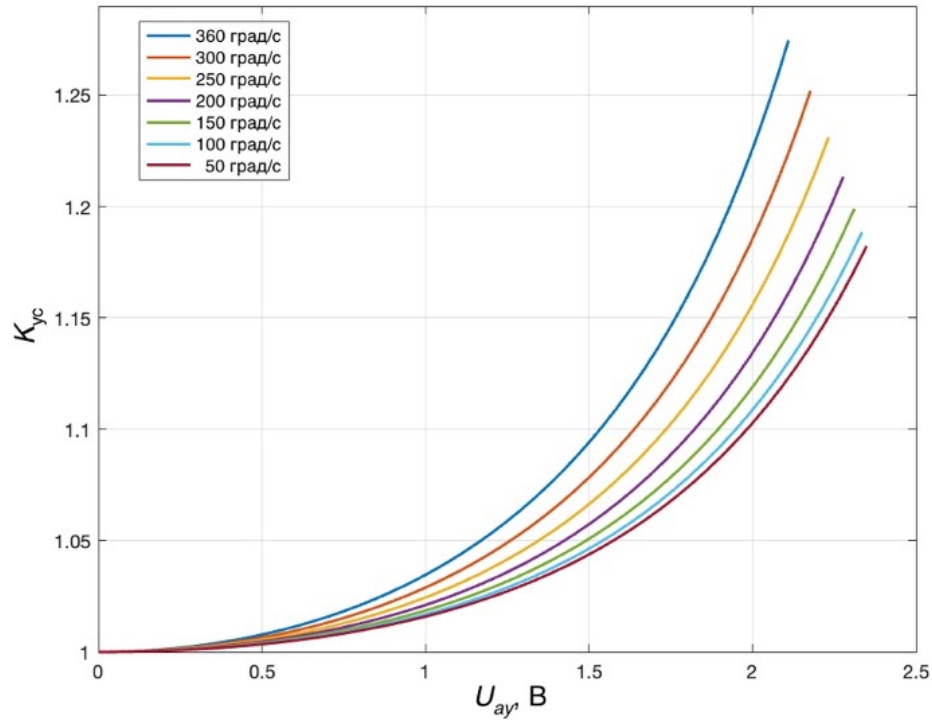


Рисунок 49 – Зависимость коэффициента усиления  $K_{yc}$  от напряжения  $U_a$ , при различной угловой скорости  $\Omega_z = 0 \dots 360$  град/с

Для уменьшения дополнительной погрешности от линейного ускорения  $a_y = 0 \dots 883$  м/с<sup>2</sup> запишем зависимости изменения коэффициента усиления  $K_{yci}(U_{ay})$  (где  $i = 1 \dots 7$  – номер диапазона) для следующих диапазонов угловых скоростей:

$$K_{yc1}(U_{ay}) = 0,022U_{ay}^4 - 0,052U_{ay}^3 + 0,081U_{ay}^2 - 0,017U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 300 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 360 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (46)$$

$$K_{yc2}(U_{ay}) = 0,018U_{ay}^4 - 0,043U_{ay}^3 + 0,068U_{ay}^2 - 0,015U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 250 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 300 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (47)$$

$$K_{yc3}(U_{ay}) = 0,015U_{ay}^4 - 0,036U_{ay}^3 + 0,058U_{ay}^2 - 0,013U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 200 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 250 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (48)$$

$$K_{yc4}(U_{ay}) = 0,013U_{ay}^4 - 0,031U_{ay}^3 + 0,051U_{ay}^2 - 0,012U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 150 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 200 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (49)$$



$$K_{yc5}(U_{ay}) = 0,011U_{ay}^4 - 0,027U_{ay}^3 + 0,045U_{ay}^2 - 0,011U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 100 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 150 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (50)$$

$$K_{yc6}(U_{ay}) = 0,010U_{ay}^4 - 0,025U_{ay}^3 + 0,041U_{ay}^2 - 0,010U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 50 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 100 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (51)$$

$$K_{yc7}(U_{ay}) = 0,010U_{ay}^4 - 0,023U_{ay}^3 + 0,038U_{ay}^2 - 0,009U_{ay} + 1; \left. \begin{array}{l} 0 \text{ град/с} \leq \Omega_z \leq 50 \text{ град/с;} \end{array} \right\} \quad (52)$$

По результатам моделирования работы рамочного МОЭМ преобразователя с блоком коррекции выходного напряжения, в котором использованы системы уравнений (46)–(52) относительная погрешность скорректированного выходного напряжения  $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z, a_y)$  составила 0,15 % (Рисунок 50).

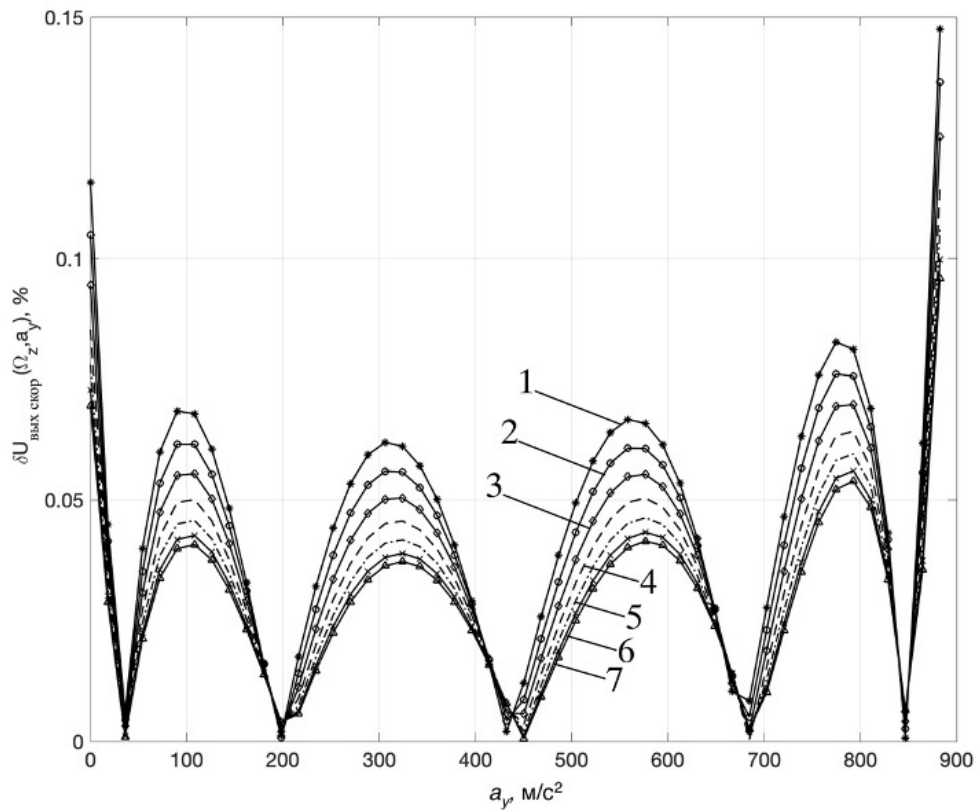


Рисунок 50 – Зависимости относительной погрешности рамочных МОЭМ-преобразователей с блоком коррекции выходного напряжения  $\delta U_{\text{вых скор}}$  от линейного ускорения  $a_y$  при различной угловой скорости  $\Omega_z = 360; 300; 250; 200; 150; 100; 50$  град/с (кривые 1-7)

По предложенному способу коррекции выходного напряжения на основе управления коэффициентом усиления разработан алгоритм работы блока обработки, который представлен на Рисунок 51. Разработанный алгоритм

действует по принципу поиска необходимого полинома, аппроксимирующего зависимость коэффициента усиления от напряжения смещения.

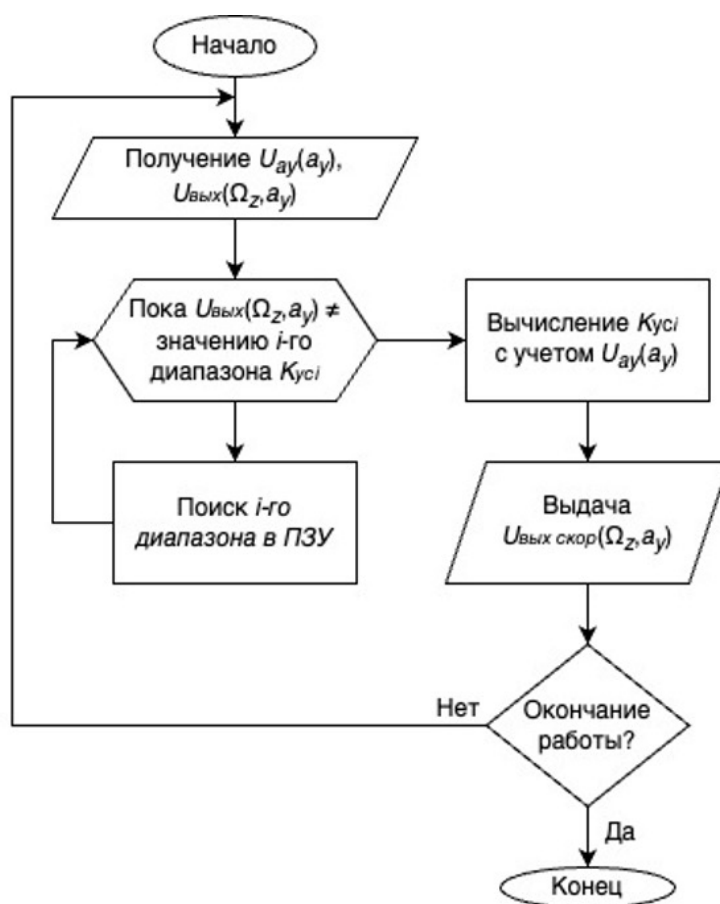


Рисунок 51 – Алгоритм коррекции выходного сигнала рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе управления коэффициентом усиления

Алгоритм управления коэффициентом усиления накладывает ограничение по максимально допустимому значению действующего линейного ускорения вдоль оси чувствительности  $a_y = \pm 883 \text{ м/с}^2$ , так как при таком ускорении минимальный зазор  $d(\Omega_z, a_y, t)$  уменьшается до 38 нм при воздействии угловой скорости  $\Omega_z = 360 \text{ град/с}$ . Дальнейшее увеличение линейного ускорения приведёт к механическому контакту одного из УОС на основе ОТЭ с рамочным чувствительным элементом и некорректной работе преобразователя. Для увеличения допуска на линейное ускорение предлагается применять дополнительную систему электростатических приводов с обратной связью.

### 3.3 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси считывания оптических сигналов с использованием дополнительных электростатических приводов

Для компенсации погрешности, обусловленной линейным ускорением, в рамочный МОЭМ преобразователь введём систему компенсации низкочастотного смещения. Система состоит из пары электродов компенсации гребенчатого типа, расположенных перпендикулярно СВК (Рисунок 52).

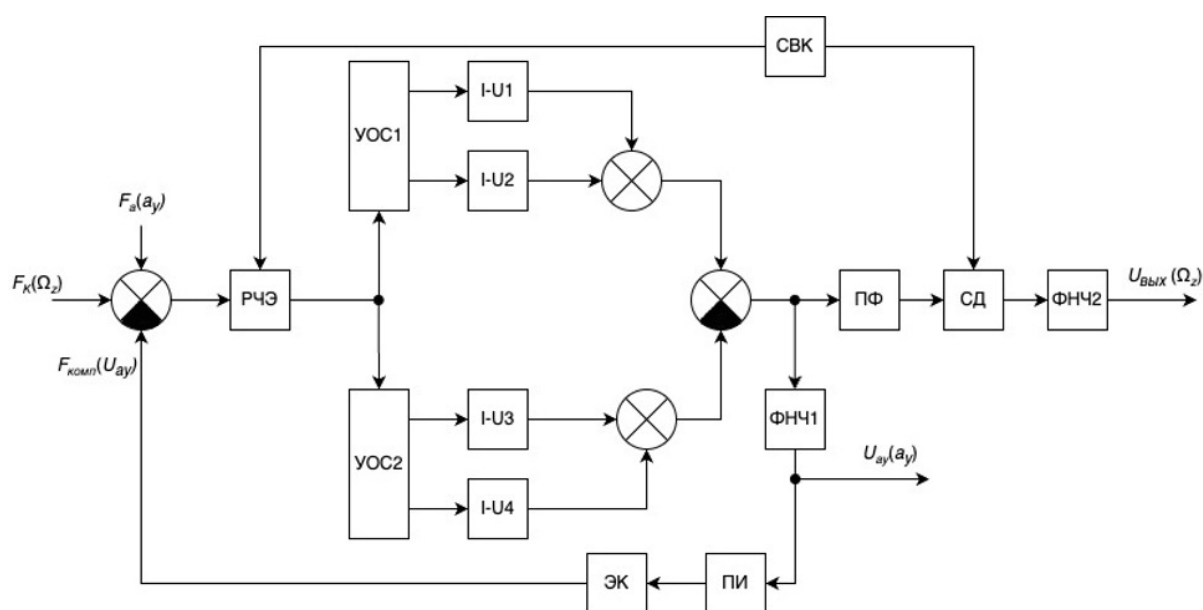


Рисунок 52 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с силовой обратной связью, ПИ – пропорционально-интегрирующий регулятор; ЭК – электроды компенсации

При обработке сигналов рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с компенсационным электростатическим приводом гребенчатого типа выходной сигнал вычитающего устройства поступает в каналы угловой скорости и обратной связи. Выходной сигнал ПФ канала угловой скорости  $\Omega_z$  с полосой пропускания  $\pm 1$  кГц и центральной частотой, равной собственной частоте колебаний РЧЭ, поступает в СД. Далее сигнал проходит в ФНЧ2 канала угловой скорости, где выделяется постоянный сигнал, пропорциональный угловой скорости. В канале обратной связи выходной сигнал ФНЧ1  $U_{ay}$  поступает в ПИ

регулятор, который формирует напряжение обратной связи для ЭК [107].

Система компенсации низкочастотного смещения преобразует напряжение, соответствующее линейному ускорению  $U_{ay}(a_y)$ , в компенсирующее смещение РЧЭ  $\Delta y_{\text{комп}}$ , и возвращает элемент в положение до действия линейного ускорения. При этом зазор между РЧЭ и УОС на основе ОТЭ определится как:

$$d(\Omega_z, a_y) = d_0 + (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) + \Delta y_a(a_y) - \Delta y_{\text{комп}})/\sqrt{2}. \quad (53)$$

Результат моделирования работы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с парой компенсационных электростатических приводов вдоль оси чувствительности  $OY$  показан на Рисунок 53.

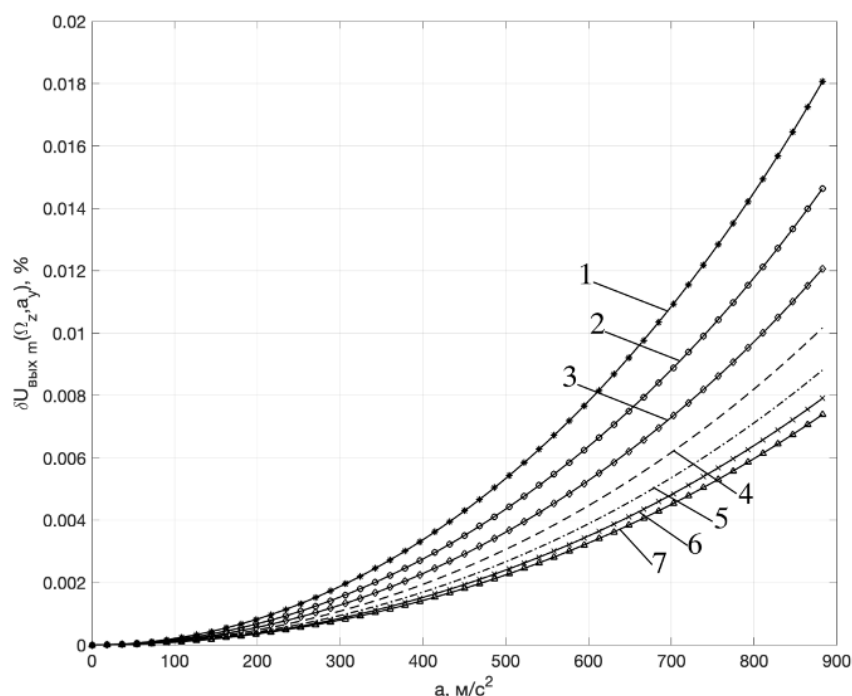


Рисунок 53 – Зависимости относительной погрешности  $\delta U_{\text{вых}}$  рамочного МОЭМ преобразователя с парой компенсационных электростатических приводов от линейного ускорения  $a_y$  при различной угловой скорости  $\Omega_z = 360; 300; 250; 200; 150; 100; 50$  град/с кривые 1-7 соответственно

Погрешность измерения угловой скорости при компенсации влияния линейного ускорения  $a_y = 0 \dots 883 \text{ м/с}^2$  составила не более 0,018 %. Метод компенсации с применением силовой обратной связи значительно повышает точность измерения угловой скорости и уменьшает риск механического контакта между рамочным чувствительным элементом и узлом оптического считывания.

### 3.4 Компенсация влияния линейного ускорения вдоль оси режима движения с использованием корректирующего устройства

Для компенсации низкочастотных смещений РЧЭ, вызывающих дополнительную погрешность от линейного ускорения  $a_x$  вдоль оси  $OX$ , в рамочном МОЭМ преобразователе предлагается использовать обратную связь для управления СВК. Для этого вводится пропорционально-интегрирующий регулятор (ПИ2), создающий постоянным напряжением  $U_{dc}$ , управляющее СВК (Рисунок 54).

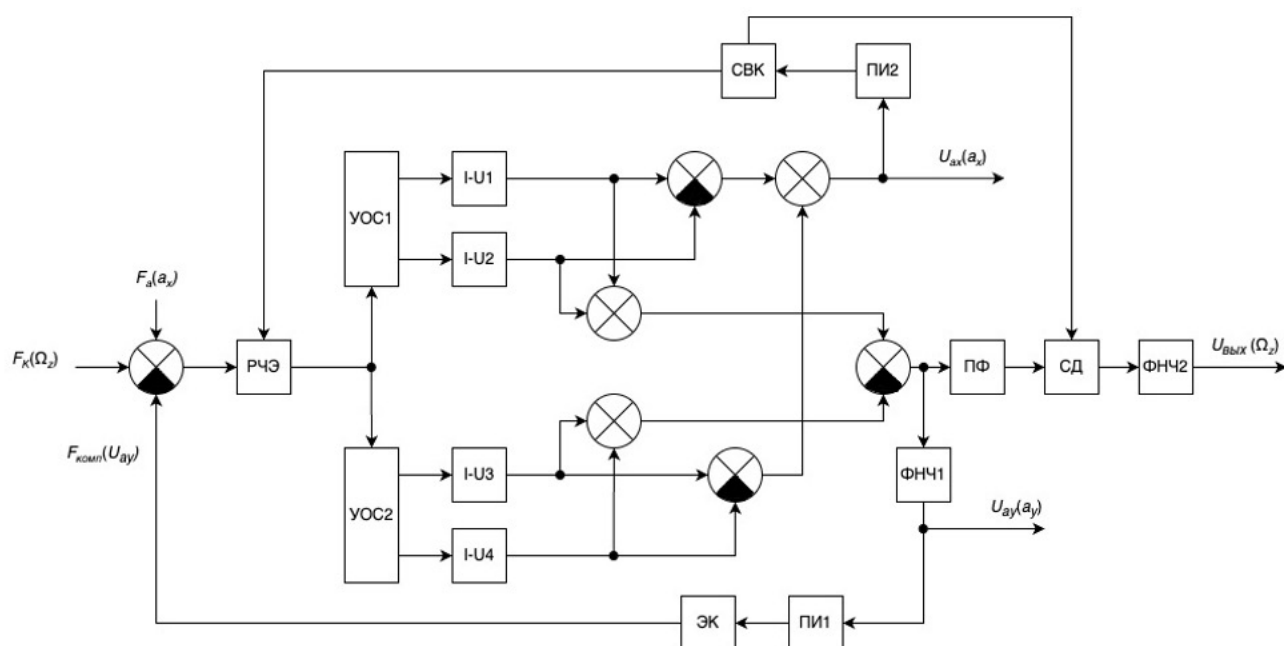


Рисунок 54 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с управлением СВК

Напряжение смещения  $U_{ax}$ , пропорциональное действующему линейному ускорению  $a_x$ , получим следующим образом. Пары выходных сигналов преобразователей I-U1, I-U2 и I-U3, I-U4 поступают на вычитающие устройства для формирования постоянных составляющих сигналов. Затем они суммируются, формируя напряжение смещения  $U_{ax}$ . Напряжение смещения  $U_{ax}$  поступает на ПИ2, который формирует постоянное напряжение обратной связи  $U_{dc}$  для управления СВК.

Постоянное напряжение  $U_{dc}$  зависит от величины эквивалентного

перемещения КОЭ  $\Delta x_{a \text{ экв}}$ . Этот сигнал может усиливать или ослаблять электростатическое поле, действующее между штырями электростатических приводов, изменяя силу притяжения между ними.

В результате зазор между РЧЭ и УОС на основе ОТЭ определится как:

$$d(\Omega_z, a_x) = d_0 - (\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) + \Delta x_{a \text{ экв}}(a_x) - \Delta x_{\text{комп}})/\sqrt{2}, \quad (54)$$

где  $\Delta x_{\text{комп}}$  – компенсационное смещение РЧЭ, зависящее от напряжения  $U_{dc}$ .

Результаты моделирования работы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с управлением СВК при воздействии линейного ускорения  $a_x$  по оси движения  $OX$  показаны на Рисунок 55.

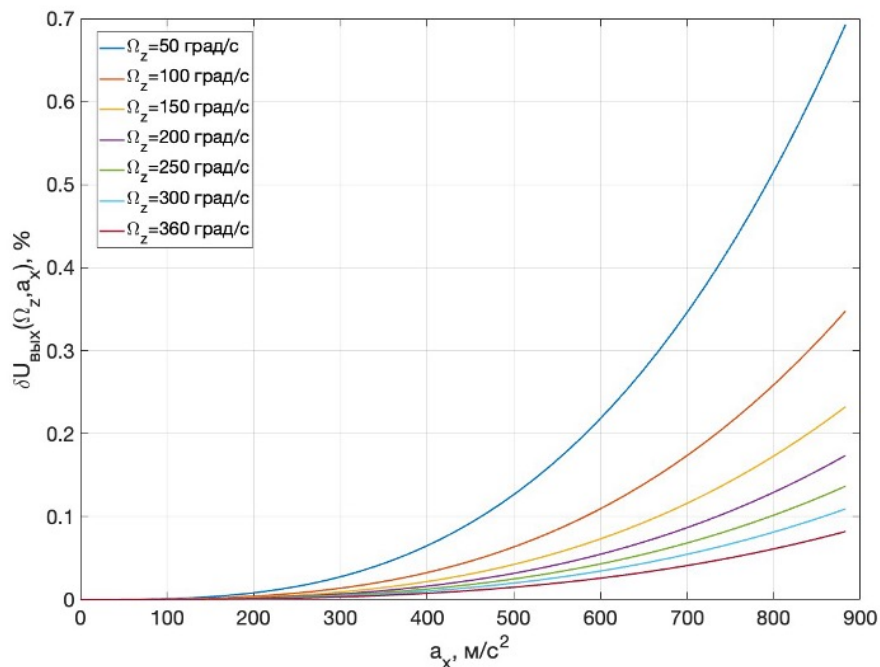


Рисунок 55 – Зависимости относительной погрешности  $\delta U_{\text{вых}}$  рамочного МОЭМ преобразователя с управлением СВК от линейного ускорения  $a_x$  при различной угловой скорости  $\Omega_z$

Предложенное решение для компенсации влияния линейного ускорения  $a_x = 883 \text{ м/с}^2$  вдоль оси  $OX$  на измерения угловой скорости  $\Omega_z$  снижают погрешность измерений до 0,7%, а для  $a_x = 196 \text{ м/с}^2$  – до 0,01%. Метод компенсации с применением управления СВК обратной связи значительно повышает точность измерения угловой скорости и уменьшает риск механического

контакта между рамочным чувствительным элементом и узлом оптического считывания.

### **3.6 Исследование влияния температуры на рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости**

Для оценки температурной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, необходимо определить температурные изменения всех параметров, влияющих на функцию преобразования.

Изменения температуры могут вызвать расширение или сжатие материалов преобразователя, что приводит к механическим напряжениям и деформациям внутри устройства. Некоторые компоненты внутри преобразователя, такие как РЧЭ, УОС имеют зависимость от температуры. Возникает постоянное смещение РЧЭ, которое представляет собой постоянную ошибку в отсутствие входного сигнала угловой скорости [108].

Влияние температуры на МОЭМ преобразователь угловой скорости сводится к основным причинам – изменению модуля Юнга материала рамки от температуры, возникновение температурного шума фотоприемника, термомеханических колебаний РЧЭ, возникновение термооптического эффекта в узле оптического считывания, оказывающего влияние на изменение показателя преломления.

Учитывая, что подложкой МОЭМ преобразователя является стекло, а РЧЭ изготовлен из монокристаллического кремния, модуль Юнга изменяется с изменением температуры, поэтому их взаимосвязь может быть выражена как:

$$E(\Delta T) = K_E T E_0, \quad (55)$$

где  $E_0$  – модуль упругости кремния РЧЭ при температуре 293 К;

$\Delta T$  – изменение температуры;

$T$  – температура;

$K_E$  – температурный коэффициент модуля упругости кремния.

Между РЧЭ и подложкой существуют внутренние напряжения из-за разницы коэффициентов теплового расширения их материалов, поэтому напряжения можно выразить с учетом [84] как:

$$\varepsilon_{\text{терм}} = \int_{T_0}^T (\alpha_{\text{к}} - \alpha_{\text{ст}}) dT = (\alpha_{\text{к}} - \alpha_{\text{ст}}) \Delta T, \quad (56)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$ ,  $\alpha_{\text{ст}}$  - коэффициенты теплового расширения монокристаллического кремния и стекла соответственно.

Коэффициенты температурного расширения  $\alpha_{\text{к}}$ ,  $\alpha_{\text{ст}}$  по уточненной математической формуле определяются как [84]:

$$\alpha_{\text{к}} = -3,0451 + 0,035705T - 7,981 \cdot 10^{-5}T^2 + 9,5783 \cdot 10^{-8}T^3 - 5,8919 \cdot 10^{-11}T^4 + 1,4614 \cdot 10^{-14}T^5, \quad (57)$$

$$\alpha_{\text{ст}} = 0,39510^{-6} + 1,292 \cdot 10^{-9}T - 1,689 \cdot 10^{-12}T^2. \quad (58)$$

При этом, влиянию температуры подвержен и показатель преломления призмы ПВО. Изменение показателя преломления при вариациях температуры можно описать линейным уравнением [109]:

$$n(T_0 + \Delta T) = n_0 + \beta \Delta T, \quad (59)$$

где  $\beta$  – термооптический коэффициент волноводной среды.

Флуктуационная сила, возникающая от термомеханического шума, для системы с полосой пропускания  $\Delta f$  определяется как [83]:

$$F_{\text{терм}}(T) = \sqrt{4k_{\text{Б}}Tc\Delta f}, \quad (60)$$

где  $k_{\text{Б}}$  – постоянная Больцмана Дж/К;

$c$  – коэффициент демпфирования, кг/с,

$$c = \frac{m\omega_y}{Q_y}. \quad (61)$$

Добротность вдоль оси чувствительности  $Q_y$  определим как:

$$Q_y = \frac{1}{2\zeta_y}, \quad (62)$$

где  $\zeta_y$  – коэффициент затухания,

$$\zeta_y = \frac{c}{2m\omega_y}. \quad (63)$$

Проведено моделирование перемещений РЧЭ, возникающих от флуктуационной силы  $F_{\text{терм}}$  (Рисунок 56).



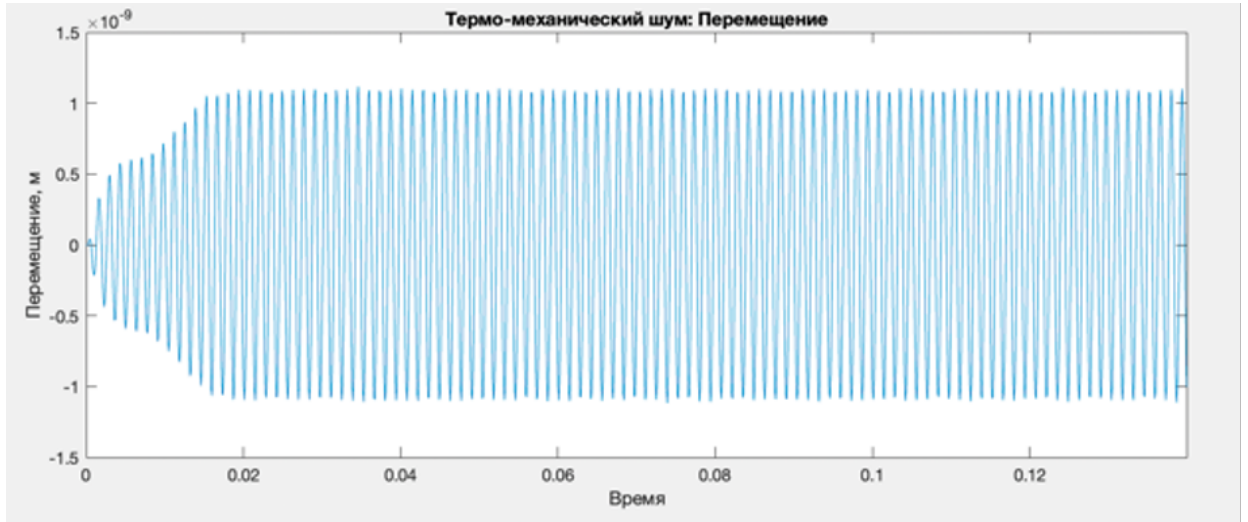


Рисунок 56 – Перемещения РЧЭ, возникающие от флуктуационной силы  $F_{\text{терм}}$

Проведем оценку пороговой чувствительности рамочного МОЭМ преобразователя, определяя угловую скорость, эквивалентную температурным шумам:

$$\Omega_{\text{шум}} = \sqrt{\Omega_{\text{терм}}^2 + \Omega_{\text{ФП}}^2},$$

где  $\Omega_{\text{терм}}$  – угловая скорость, эквивалентная термомеханическому шуму;

$\Omega_{\text{ФП}}$  – угловая скорость, эквивалентная шумам фотоприемника.

Определим угловую скорость, эквивалентную термомеханическому шуму, приравняв силу Кориолиса  $F_K$  флуктуационной силе  $F_{\text{терм}}$  с учетом (60)-(63):

$$\Omega_{\text{терм}} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_y \Delta f}{m \omega_x^2 A_x^2 Q_y}}. \quad (64)$$

Согласно уравнению (64), угловая скорость, эквивалентная термомеханическому шуму, может быть уменьшена за счет использования большей массы  $m$ , высокой частоты первичных колебаний  $\omega_x$ , большой амплитуды первичных колебаний  $A_x$ , малой полосы пропускания  $\Delta f$  и высокой добротности  $Q_y$ .

Угловая скорость, эквивалентная температурным шумам фотоприемника, определится как:

$$\Omega_{\text{ФП}} = K_M R_{\text{ОС}} I_{\text{шум}}(T), \quad (65)$$

где  $K_m$  – масштабный коэффициент;

$R_{oc}$  – сопротивление в цепи обратной связи в схеме преобразования на операционном усилителе;

$I_{шум}$  – полный шумовой ток фотоприемника, учитывающий температурные изменения.

Расчетные значения пороговой чувствительности рамочного МОЭМ преобразователя в диапазоне температур от 233 K до 333 K представлены на Рисунок 57.

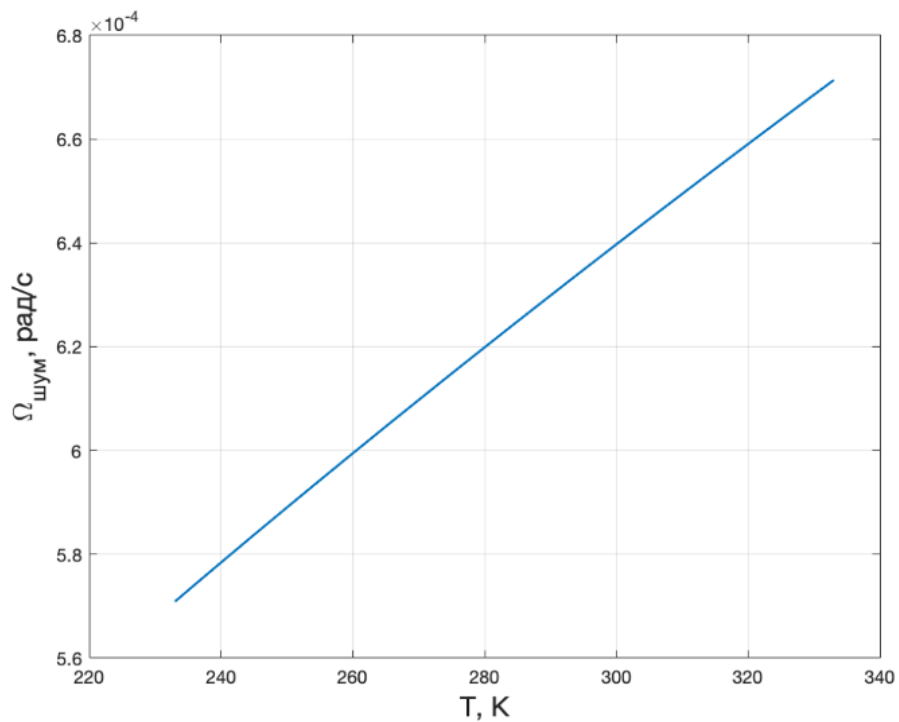


Рисунок 57 – Зависимость пороговой чувствительности  $\Omega_{шум}$  от температуры

Смоделирована работа рамочного МОЭМ преобразователя в температурном диапазоне от 233 K до 333 K.

Дополнительная температурная погрешность измерения угловой скорости  $\delta_L(\Omega_z, T)$  вокруг оси  $OZ$  определяется как:

$$\delta_T = \frac{|U_{вых}(\Omega_z, T) - U_{вых}(\Omega_z, T_0)|}{U_{вых}(\Omega_z, T_0)} 100\%.$$

Зависимость дополнительной температурной погрешности измерения  $\delta_L(\Omega_z, T)$  представлена на Рисунок 58.

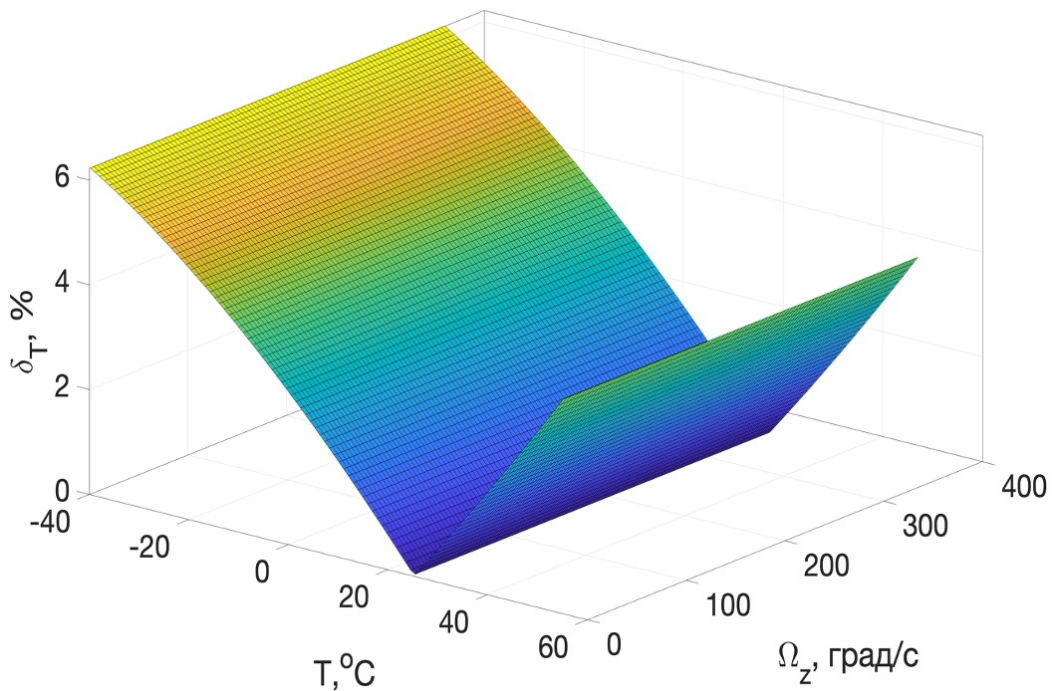


Рисунок 58 – Дополнительная температурная погрешность рамочного МОЭМ преобразователя для различных угловых скоростей

Дополнительная температурная погрешность  $\delta_T$  измерения угловой скорости рамочным МОЭМ преобразователем на основе ОТЭ в диапазоне угловых скоростей  $\Omega_z = 6,28$  рад/с достигает 6 % в диапазоне температур 233...333 К.

Проведенный анализ температурных факторов, влияющих на работу МОЭМ преобразователя угловой скорости, показал, что температурные колебания оказывают значительное воздействие на механические свойства монокристаллического кремния и стекла. Поскольку подложка преобразователя выполнена из стекла, а РЧЭ из кремния, возникает разница в коэффициентах теплового расширения этих материалов, что приводит к внутренним термонапряжениям.

Термооптические и термомеханические шумы также оказывают существенное влияние на работу преобразователя. Изменение температуры вызывает вариации показателя преломления в УОС на основе ОТЭ, что приводит к дополнительной температурной погрешности. Термомеханический шум,

вызванный тепловыми флуктуациями, ограничивает точность преобразователя и зависит от таких параметров, как демпфирование, масса РЧЭ и частота собственных колебаний. Для минимизации этого шума следует учитывать параметры демпфирования и резонансные частоты РЧЭ, что позволит снизить влияние температурных колебаний на точность МОЭМ преобразования угловой скорости.

Пороговая чувствительность рамочного МОЭМ преобразователя, эквивалентная термомеханическим шумам, связана с силой Кориолиса и флуктуационной силой, вызванная температурными изменениями. Уравнения, описывающие эти зависимости, позволяют количественно оценить влияние температуры на минимально измеряемую угловую скорость. Результаты расчетов показывают, что пороговая чувствительность может быть улучшена за счет увеличения массы РЧЭ, повышения частоты колебаний в режиме движения, уменьшения полосы пропускания и увеличения добротности преобразователя.

Температурные шумы фотоприемника также оказывают значительное влияние на точность преобразования. Угловая скорость, эквивалентная температурным шумам фотоприемника, может быть снижена за счет использования схем обратной связи с высоким сопротивлением

### **3.7 Информационно-измерительная система на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости**

#### **3.7.1 Структурная схема информационно-измерительной системы на основе четырехканальных рамочных МОЭМ преобразователей**

Требования к точности и компактности инерциальных измерительных систем постоянно возрастают, особенно в таких областях, как навигация автономных транспортных средств, робототехника и системы стабилизации беспилотных летательных аппаратов. Классические решения на базе микромеханических гироскопов и акселерометров имеют ограничения по точности и устойчивости к вибрациям и магнитным помехам. Использование МОЭМ

преобразователей позволяет значительно снизить массу и размеры системы, повышая её точность и устойчивость к внешним воздействиям.

Предложена информационно-измерительная система для измерения угловых скоростей и линейных ускорений вдоль трех осей на базе четырехканальных рамочных МОЭМ преобразователей на основе оптического туннельного эффекта. Система использует рамочные чувствительные элементы, единый оптический источник излучения и фотоприемники для преобразования измеренных параметров движения (Рисунок 59).

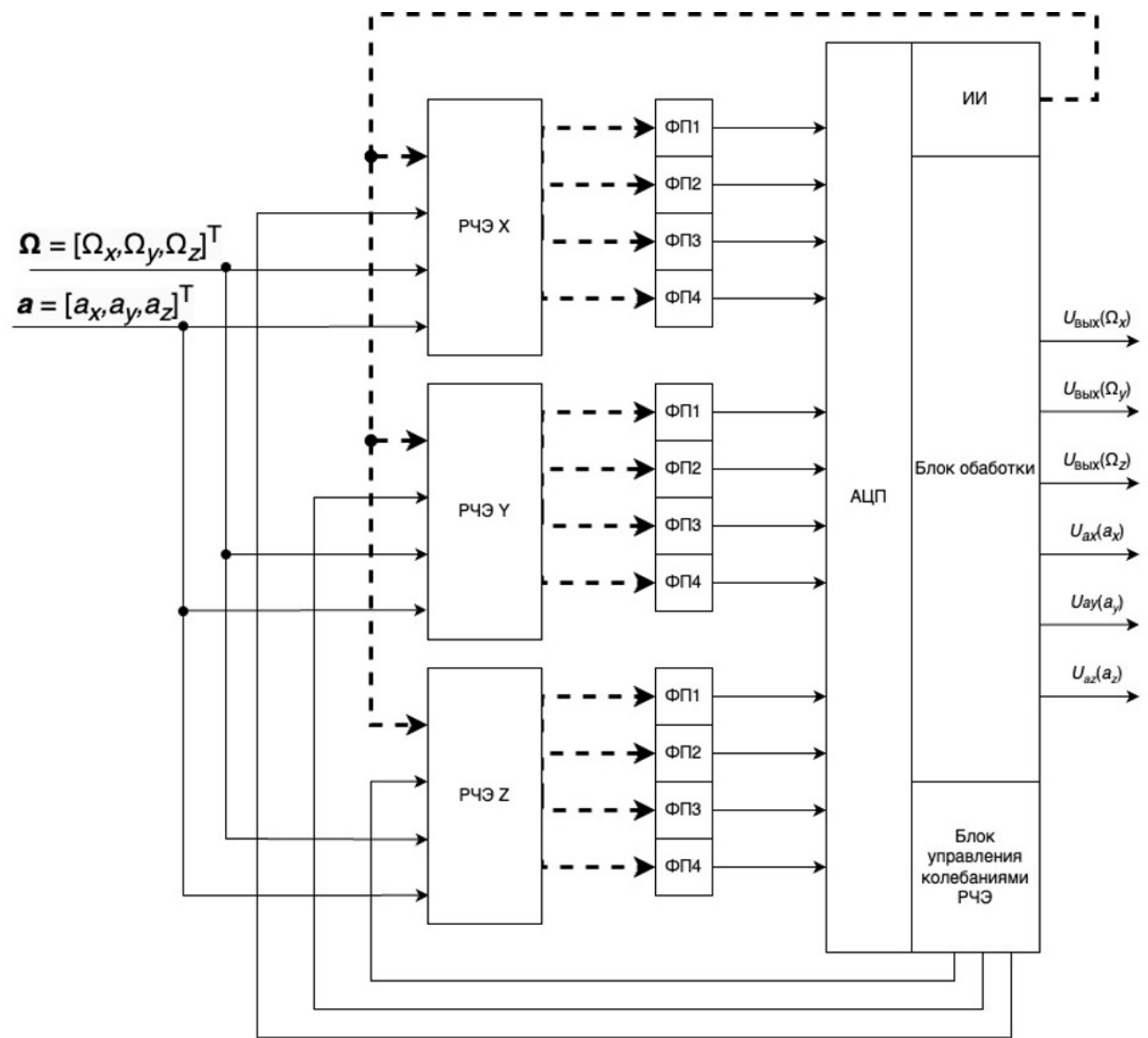


Рисунок 59 – Функциональна схема информационно-измерительной системы на основе четырехканальных рамочных МОЭМ преобразователей

На каждый РЧЭ, установленный вдоль одной из ортогональных осей, воздействуют угловая скорость и линейное ускорение. Их воздействие преобразуется в изменение оптических сигналов, поступающих на соответствующие фотоприемники. Фотоприемники преобразуют изменения оптического сигнала в электрические сигналы. Сигналы, поступающие с фотоприемников, представляют собой аналоговые электрические сигналы, величина которых зависит от изменений угловой скорости и линейного ускорения, регистрируемых рамочными чувствительными элементами. Эти сигналы преобразуются в АЦП в цифровую форму для дальнейшей обработки.

Цифровые сигналы в блоке обработки проходят первичную фильтрацию для устранения высокочастотных шумов.

Блок управления колебаниями поддерживает электромеханические параметры работы РЧЭ, что необходимо для устойчивой работы системы в условиях внешних воздействий.

ИИ генерирует стабильное оптическое излучение, необходимое для работы четырехканальных рамочных МОЭМ преобразователей. Это излучение проходит через микрооптические компоненты РЧЭ и под воздействием угловой скорости и линейного ускорения изменяет свои параметры, что фиксируется фотоприемниками.

### 3.7.2 Определение параметров каналов угловой скорости и линейного ускорения

Для оценки характеристик информационно-измерительной системы необходимо определить погрешности каналов угловой скорости и линейного ускорения рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости. Модель выходного напряжения  $U_{\text{вых}}[\Omega(t)]$  для каждой оси с учетом погрешностей масштабного коэффициента  $\Delta K_{\Omega}$ , смещения нуля  $b_{\Omega}$  и случайного шума  $\sigma_{\Omega}$  запишем в виде:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}[\Omega_x(t)] &= (\Omega_x(t) + b_{\Omega x}(t) + \sigma_{\Omega x})(K_{\Omega x} + \Delta K_{\Omega x}), \\ U_{\text{вых}}[\Omega_y(t)] &= (\Omega_y(t) + b_{\Omega y}(t) + \sigma_{\Omega y})(K_{\Omega y} + \Delta K_{\Omega y}), \\ U_{\text{вых}}[\Omega_z(t)] &= (\Omega_z(t) + b_{\Omega z}(t) + \sigma_{\Omega z})(K_{\Omega z} + \Delta K_{\Omega z}), \end{aligned}$$

где  $K_{\Omega x}$ ,  $K_{\Omega y}$ ,  $K_{\Omega z}$  – масштабные коэффициенты каналов угловой скорости рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ ;

$\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$  – действующие значения угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ .

Масштабный коэффициент канала угловой скорости рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с учетом (18) и (41) определим как:

$$K_{\Omega} = \frac{2m\omega\Delta x_{\text{макс}}Q_y\Delta P_{\text{ФП}}S_{\text{ФП}}R_{\text{ОС}}}{k_y\Delta d\sqrt{2}}. \quad (66)$$

Представим переменные из формулы (66) в виде вектора параметров  $\mathbf{p}$ :

$$\mathbf{p} = \left( m, \omega, \Delta x_{\text{макс}}, Q_y, k_y, \frac{\Delta P_{\text{фп}}}{\Delta d}, S_{\text{фп}}, R_{\text{ос}}, \right).$$

Тогда погрешность масштабного коэффициента  $\Delta K_{\Omega}$  определится в виде:

$$\Delta K_{\Omega} = K_{\Omega} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta p_i}{p_i} \right)^2},$$

где  $\Delta p_i$  – абсолютная погрешность параметра  $p_i$ ;

$N$  – количество параметров вектора  $\mathbf{p}$ .

Смещение нуля  $b_{\Omega}$  каналов угловой скорости зависит от ряда физических параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, связанных с его конструкцией, материалами и внешними воздействиями. Основными факторами являются: температурные деформации конструкции преобразователя, вызывающие смещение начального зазора  $d_0$  в УОС на основе ОТЭ; влияние термомеханического шума, вызывающего случайные колебания РЧЭ; чувствительность РЧЭ к действующему линейному ускорению.

Смещение нуля  $b_{\Omega}$  каналов угловой скорости рамочных МОЭМ преобразователей определим с учетом (64) и (65) как:

$$b_{\Omega x}(T, t) = \Omega_{\text{фп}}(T) + \Omega_{\text{терм}}(T) + \Omega_{ax}(a_x),$$

$$b_{\Omega y}(T, t) = \Omega_{\text{фп}}(T) + \Omega_{\text{терм}}(T) + \Omega_{ay}(a_y),$$

$$b_{\Omega z}(T, t) = \Omega_{\text{фп}}(T) + \Omega_{\text{терм}}(T) + \Omega_{az}(a_z),$$

где  $b_{\Omega x}$ ,  $b_{\Omega y}$ ,  $b_{\Omega z}$  – смещение нуля каналов угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  соответственно;

$\Omega_{ax}$ ,  $\Omega_{ay}$ ,  $\Omega_{az}$  – угловая скорость, эквивалентная действующему линейному ускорению по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  соответственно.

Угловая скорость  $\Omega_a$ , эквивалентная действующему линейному ускорению, определится в виде:

$$\Omega_{ax}(a_x) = K_m \frac{m}{k_y} a_x / K_{\Omega x},$$

$$\Omega_{ay}(a_y) = K_m \frac{m}{k_y} a_y / K_{\Omega y}$$



$$\Omega_{az}(a_z) = K_m \frac{m}{k_y} a_z / K_{\Omega z}.$$

Измерение напряжения  $U_a$ , пропорционального линейному ускорению для каждой оси с учетом ошибки масштабного коэффициента, запишем в виде:

$$U_{ax}(a_x, t) = (a_x(t) + g_x + b_{ax})(K_{ax} + \Delta K_{ax}),$$

$$U_{ay}(a_y, t) = (a_y(t) + g_y + b_{ay})(K_{ay} + \Delta K_{ay}),$$

$$U_{az}(a_z, t) = (a_z(t) + g_z + b_{az})(K_{az} + \Delta K_{az}),$$

где  $a_x, a_y, a_z$  – действующие значения линейного ускорения по осям  $OX, OY, OZ$ ;  $b_{ax}, b_{ay}, b_{az}$  – смещение нуля канала линейного ускорения по осям  $OX, OY, OZ$ ;  $K_{ax}, K_{ay}, K_{az}$  – масштабные коэффициенты каналов линейных ускорений рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости по осям  $OX, OY, OZ$ ;  $\Delta K_{ax}, \Delta K_{ay}, \Delta K_{az}$  – погрешность масштабных коэффициентов каналов линейных ускорений рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости по осям  $OX, OY, OZ$ , определяемая аналогично погрешности масштабных коэффициентов каналов угловых скоростей.

Масштабный коэффициент  $K_a$  канала линейного ускорения рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с учетом (41) определим как:

$$K_a = K_{yoc} \frac{m}{k_y}.$$

Смещение нуля  $b_a$  каналов линейного ускорения имеет тот же характер, что и для каналов угловой скорости и определяется линейными ускорениями, эквивалентными шумам фотоприемников, термомеханическому шуму и температурным изменением начального зазора  $d_0$  между КОЭ и УОС на основе ОТЭ.

Таким образом, определены источники погрешностей каналов угловой скорости и линейного ускорения рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, которые учтены при оценке характеристик информационно-измерительной системы.

### 3.7.3 Имитационное моделирование информационно-измерительной системы на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости

Проведем моделирование дрейфа смещения нуля  $b_\Omega$  за 120 секунд для каналов угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  с учетом разработанных математических моделей рамочного МОЭМ преобразователя. Результат моделирования приведен на Рисунок 60.

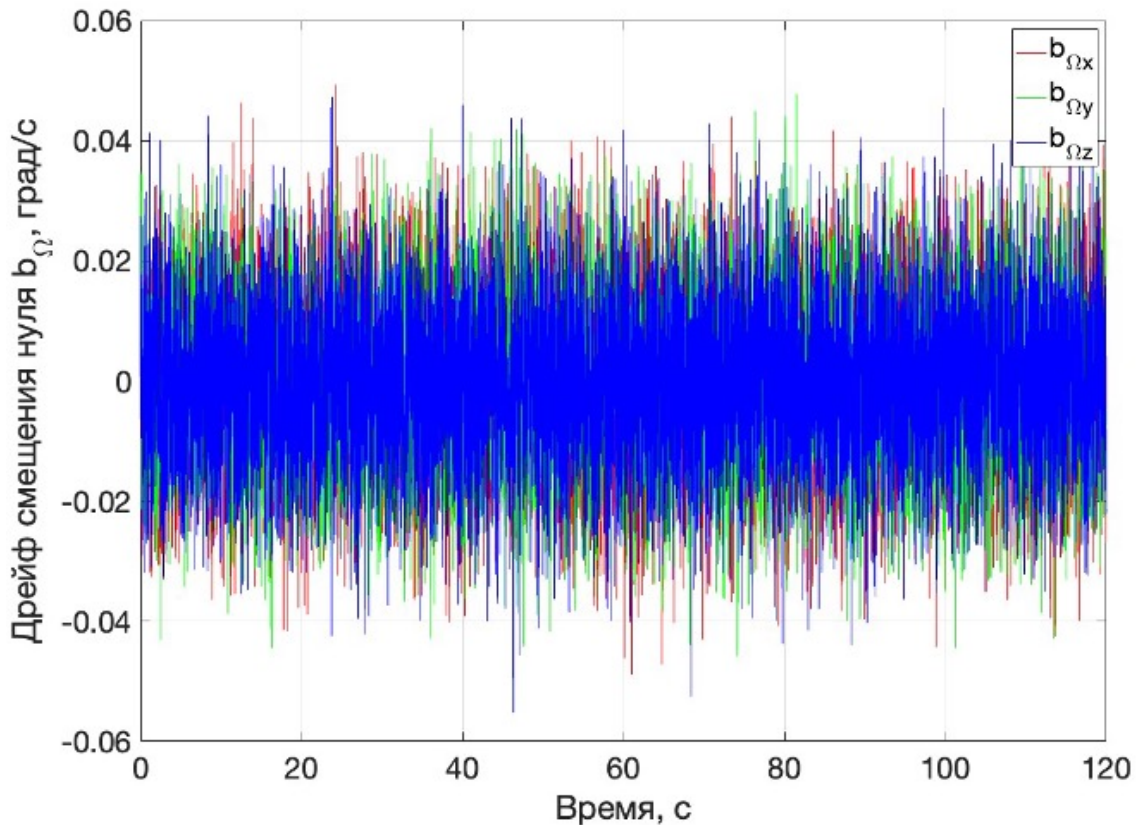


Рисунок 60 – Дрейф смещения нуля  $b_\Omega$  для каналов угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$

Дрейф смещения нуля  $b_\Omega$  проявляется в виде медленно изменяющегося сигнала, который интерпретируется МОЭМ преобразователем угловой скорости как ненулевая угловая скорость в состоянии покоя. Систематическая составляющая смещения нуля может быть частично компенсирована методами калибровки, включая температурную коррекцию и алгоритмическую фильтрацию, например, с использованием фильтров Калмана. Случайная составляющая дрейфа смещения нуля  $b_\Omega$  часто описывается среднеквадратическим отклонением и определяет нижнюю границу точности прибора. Дрейф смещения нуля  $b_\Omega$  для каналов угловой

скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  составил  $b_{\Omega_x} = 0,0131$  град/с,  $b_{\Omega_y} = 0,0129$  град/с,  $b_{\Omega_z} = 0,0130$  град/с в заданном временном интервале.

Проведено моделирование измерения угловой скорости с учетом полученных дрейфов смещения нуля  $b_{\Omega}$  и погрешности масштабного коэффициента  $K_{\Omega}$  для каналов угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  за 120 секунд. Результат моделирования приведен на Рисунок 61.

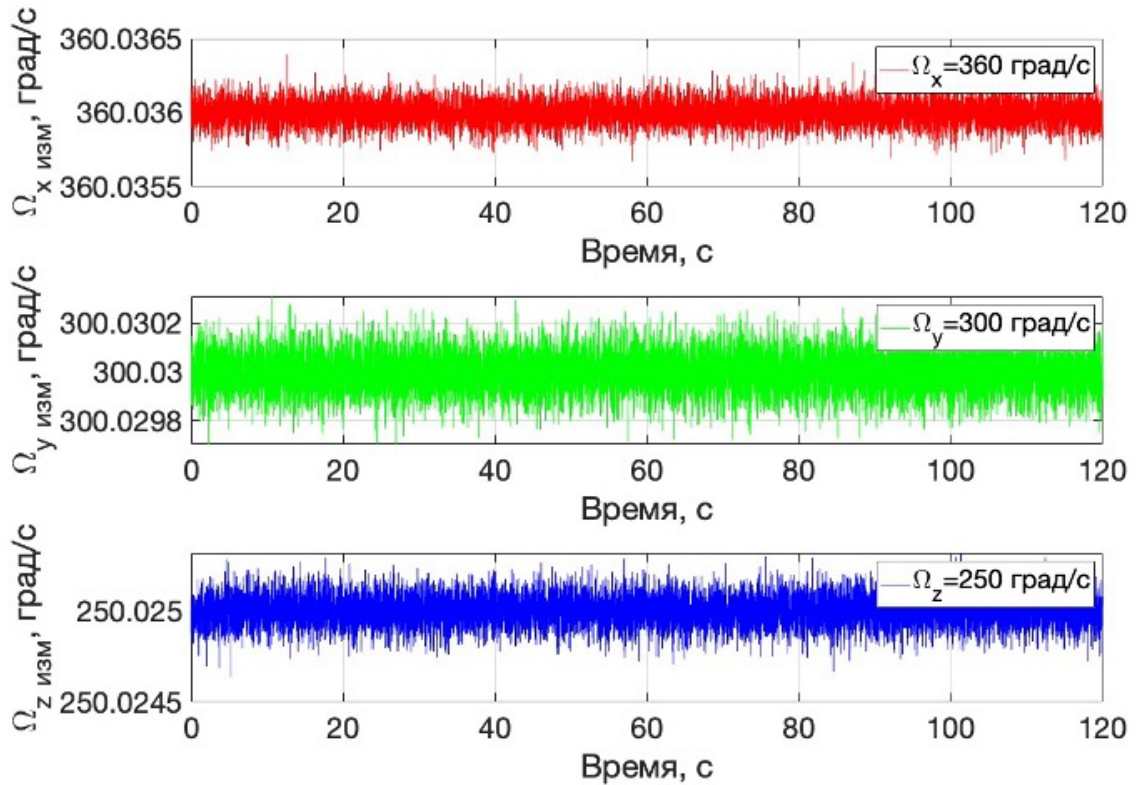


Рисунок 61 – Измеренная угловая скорость для каналов угловой скорости по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$

Случайная составляющая измеренной угловой скорости  $\Omega_{изм}$ , соответствующая среднеквадратическим отклонениям по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  составила  $\Omega_{x\text{ изм}} = 0,3011$  град/ч,  $\Omega_{y\text{ изм}} = 0,3009$  град/ч,  $\Omega_{z\text{ изм}} = 0,3047$  град/ч в заданном временном интервале.

Проведено моделирование дрейфа смещения нуля  $b_a$  за 120 секунд для каналов линейного ускорения по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  с учетом разработанных

математических моделей рамочного МОЭМ преобразователя. Результат моделирования приведен на Рисунок 62.

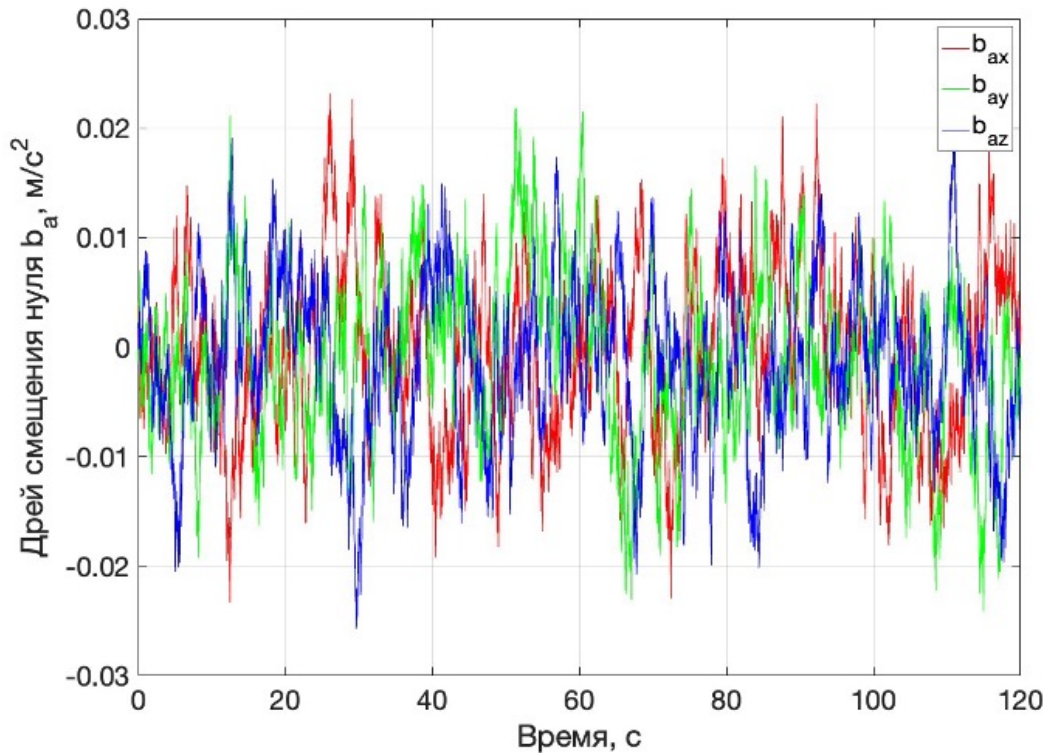


Рисунок 62 – Дрейф смещения нуля  $b_a$  для каналов линейного ускорения по осям  $OX, OY, OZ$

Дрейф смещения нуля  $b_a$  для каналов линейного ускорения по осям  $OX, OY, OZ$  составил  $b_{ax} = 0,0044$  м/с<sup>2</sup>,  $b_{ay} = 0,0015$  м/с<sup>2</sup>,  $b_{az} = 0,0021$  м/с<sup>2</sup> в заданном временном интервале.

Проведено моделирование измерения линейного ускорения с учетом полученных дрейфов смещения нуля  $b_a$  и погрешности масштабного коэффициента  $K_a$  для каналов линейного ускорения по осям  $OX, OY, OZ$  за 120 секунд. Результат моделирования приведен на Рисунок 63.

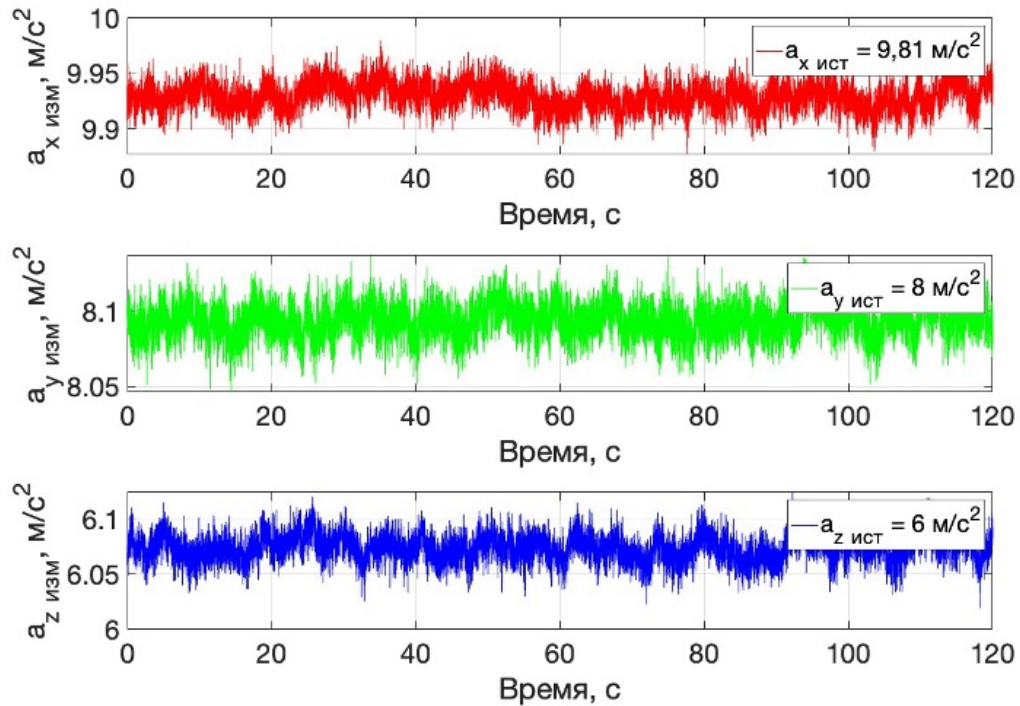


Рисунок 63 – Измерение линейного ускорения  $a_{\text{изм}}$  для каналов линейного ускорения по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$

Случайная составляющая измеренного линейного ускорения  $a_{\text{изм}}$ , соответствующая среднеквадратическим отклонениям по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  составила  $a_{x \text{ изм}} = 0,0128 \text{ м/с}^2$ ,  $a_{y \text{ изм}} = 0,0120 \text{ м/с}^2$ ,  $a_{z \text{ изм}} = 0,0131 \text{ м/с}^2$  в заданном временном интервале.

Для дальнейшей уменьшения ошибок каналов угловой скорости и линейного ускорения необходимо проводить дополнительную калибровку информационно-измерительной системы на основе рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости.

### Выводы по Главе 3

Проведено исследование влияния внешних дестабилизирующих факторов на функционирование рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости. Воздействие линейного ускорения вызывает изменение зазора между рамочным чувствительным элементом и узлом оптического считывания, что приводит к

существенным погрешностям в измерении угловой скорости. Относительная погрешность при этом может достигать 21,5%.

Для уменьшения погрешности предложено использовать управление коэффициентом усиления и силовую обратную связь с использованием электростатических приводов. Определены зависимости коэффициента усиления от линейного ускорения вдоль оси чувствительности. Предложен алгоритм коррекции выходного напряжения рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе управления коэффициентом усиления. Проведённое моделирование показало возможность снизить относительную погрешность измерений до 0,02%.

Разработана схема четырёхканальной дифференциальной обработки сигналов, позволяющая повысить линейность функции преобразования и снизить нелинейные искажения до 0,12%. Применение силовой обратной связи позволяет минимизировать риск механического контакта между элементами преобразователя, что обеспечивает его надёжное функционирование в условиях внешних воздействий.

Исследовано температурное воздействие на параметры рамочного МОЭМ преобразователя. Температурные колебания приводят к изменениям модуля упругости и оптических свойств материалов преобразователя, что оказывает влияние на погрешность измерения угловой скорости. Определены температурные зависимости основных параметров МОЭМ преобразователя угловой скорости.

Предложена структура информационно-измерительной системы на основе рамочных МОЭМ преобразователей для измерения угловых скоростей и линейных ускорений с повышенной точностью. Определены параметры каналов измерения угловой скорости и линейного ускорения.



## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО РАМОЧНОГО МОЭМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С ДВУХВОЛНОВЫМ УЗЛОМ ОПТИЧЕСКОГО СЧИТЫВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЕГО РАСЧЕТА

### 4.1 Разработка двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта для расширения динамического диапазона измерения угловой скорости

#### 4.1.1 Разработка и исследование математической модели двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта

Двухволновой узел оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта содержит два источника оптического излучения, фотоприемник и призму полного внутреннего отражения, в которой распространяется оптическое излучение [110]. Источники ИИ1,2 создают оптическое излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  мощностью  $P_1$  и  $P_2$  соответственно. Если КОЭ РЧЭ приближается к местам отражения оптического излучения на расстояние  $d$ , которое меньше длины волны оптического излучения, то часть этого излучения будет туннелировать, формируя на фотоприемнике амплитудно-модулированный сигнал (Рисунок 64).

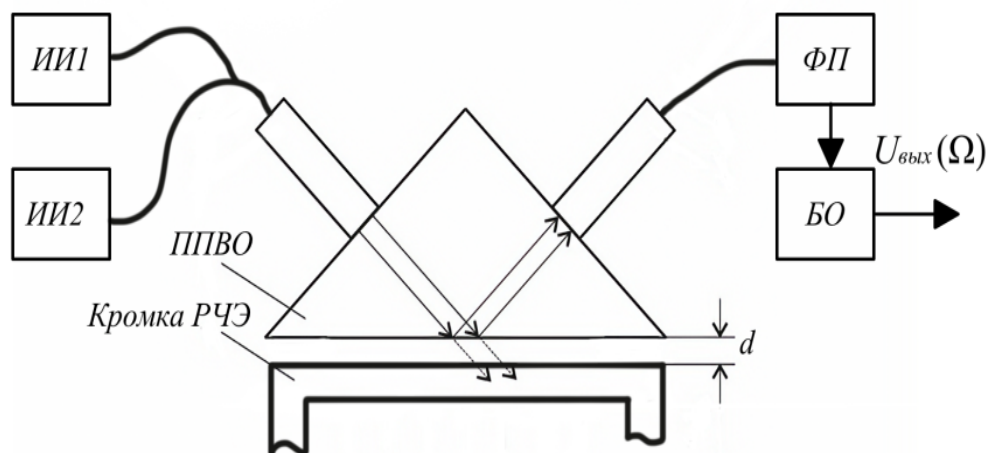


Рисунок 64 – Функциональная схема узла оптического считывания с двухволновым преобразованием

Рассмотрим случай, когда входное оптическое излучение содержит две спектральные компоненты с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Тогда суммарная мощность оптического излучения  $P_{\text{ФП}}$  на фотоприемнике запишется в виде:

$$P_{\text{ФП}}(d) = P_1 R_1(d, \lambda_1) + P_2 R_2(d, \lambda_2), \quad (67)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – мощность входного излучения на длине волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно.

С учетом (5) определим минимальный  $d_{\text{мин}}$  максимальный  $d_{\text{макс}}$  и первоначальный  $d_0$  зазоры, в которых спад чувствительности не превышает 3 дБ для двухволнового преобразования:

$$\begin{cases} d_{\text{мин}} = 0,06\lambda_1; \\ d_{\text{макс}} = 0,52\lambda_2; \\ d_0 = \frac{d_{\text{макс}} + d_{\text{мин}}}{2}. \end{cases} \quad (68)$$

Введём параметр балансировки  $B_m$  как долю мощности входного оптического излучения на длине волны  $\lambda_1$  от суммарной входной оптической мощности  $P_0$ . Тогда для оптических мощностей запишем:

$$\begin{cases} P_0 = P_1 + P_2; \\ P_1 = B_m P_0; \\ P_2 = (1 - B_m) P_0. \end{cases} \quad (69)$$

Эффективную отражательную способность отражения  $R_\Sigma$  структуры «ППВО-воздушный зазор-кромка РЧЭ» определим в виде:

$$R_\Sigma(d) = B_m R_1(d, \lambda_1) + (1 - B_m) R_2(d, \lambda_2). \quad (70)$$

На Рисунок 65 приведены результаты расчета параметров УОС на основе ОТЭ, выполненные для одноволнового режима с  $\lambda = 1.55$  мкм и двухволновых режимов  $\lambda_{11} = 0.55$  мкм,  $\lambda_2 = 1.55$  мкм и  $\lambda_{12} = 0.85$  мкм,  $\lambda_2 = 1.55$  мкм. Расчет выполнен для случая равных мощностей спектральных составляющих ( $B_m = 0.5$ ).



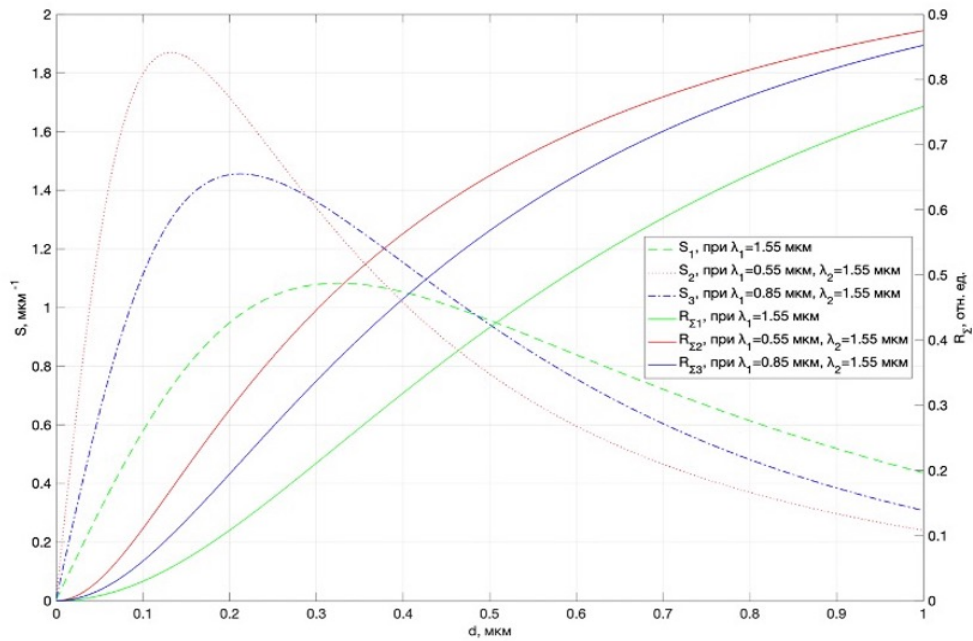


Рисунок 65 – Зависимость эффективной отражательной способности  $R_{\Sigma}$  (сплошные линии) и чувствительности УОС  $S$  (пунктирные линии) от зазора  $d$  в одноволновом и двухволновом режимах

Двухволновой режим одновременно влияет на чувствительность УОС и на диапазон преобразователя по уровню -3дБ от максимальной чувствительности, причем уменьшение меньшей из двух длин волн приводит к росту чувствительности и сужению диапазона измерения УОС.

С учетом разных значений спектральной чувствительности выходной фототок УОС  $I_{\text{УОС}}$  запишем в виде [111]:

$$I_{\text{УОС}}(d) = I_{\text{шум}} + B_{\text{T}} S_{\text{ФП1}} P_1 R(d, \lambda_1) + (1 - B_{\text{T}}) S_{\text{ФП2}} P_2 R(d, \lambda_2), \quad (71)$$

где  $S_{\text{ФП1}}$ ,  $S_{\text{ФП2}}$  – чувствительность фотодиода на длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  соответственно;

$I_{\text{шум}}$  – полный шумовой ток;

$B_{\text{T}}$  – параметр балансировки по току.

При определении параметра балансировки  $B_{\text{T}}$  необходимо учесть спектральную чувствительность фотоприемника для разных длин волн, которая часто находится в диапазоне от 0,2 А/Вт до 0,95 А/Вт, где меньшая чувствительность соответствует меньшей длине волны.

Определим динамические диапазоны УОС на основе ОТЭ в двухволновых режимах по спаду чувствительности на 3дБ в зависимости от параметра балансировки  $B_{Ti}$  ( $i$  – второй индекс первой спектральной компоненты) для различных длин волн  $\lambda_{1i}$  при постоянном значении второй спектральной компоненты  $\lambda_2 = 1.55$  мкм (Рисунок 66)

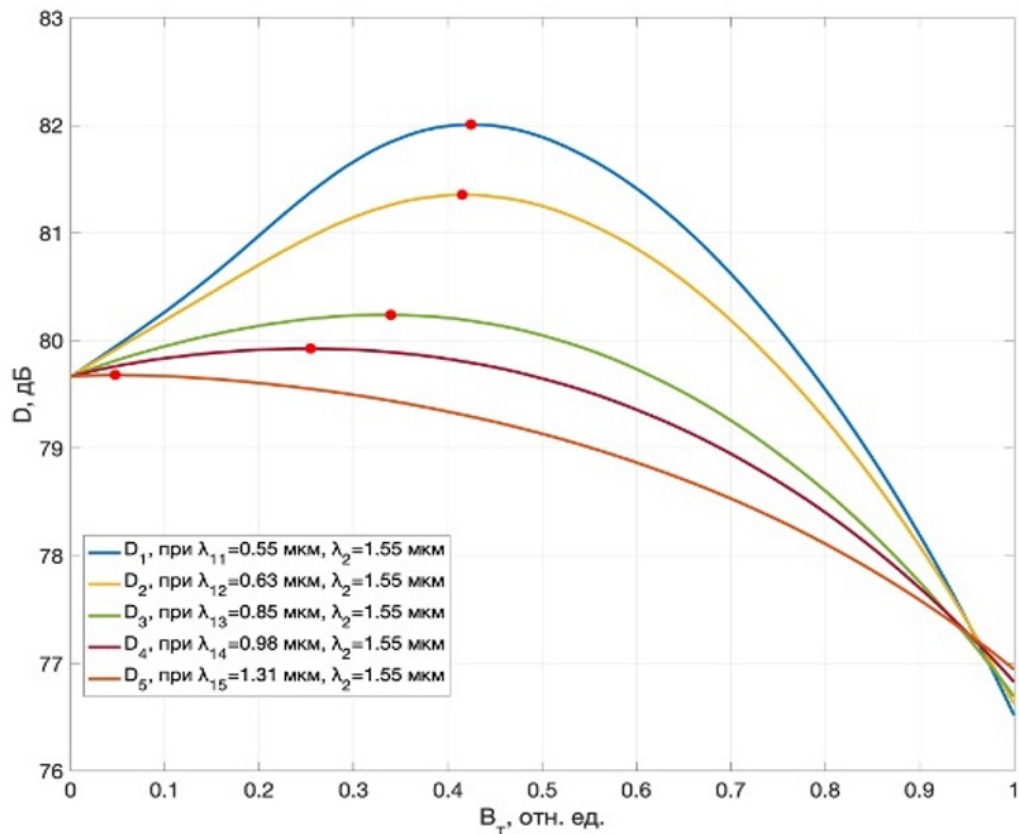


Рисунок 66 – Зависимость динамического диапазона  $D$  от параметра балансировки  $B_T$  для двухволнового режима УОС (красной точкой показано максимальное значение динамического диапазона  $D$ )

Для случая использования различных комбинаций двух длин волн  $\lambda_{1i}$  и  $\lambda_2 = 1.55$  мкм получим следующие значения параметра балансировки по току  $B_{T1}=0,42$ ,  $B_{T2}=0,41$ ,  $B_{T3}=0,33$ ,  $B_{T4}=0,25$ ,  $B_{T5}=0,047$ , при которых достигается максимальный динамический диапазон. При этом динамический диапазон  $D_i$  УОС на основе ОТЭ зависит от значения  $B_{Ti}$  и равен:  $D_1 = 82$  дБ,  $D_2 = 81,35$  дБ,  $D_3 = 80,24$  дБ,  $D_4 = 79,92$  дБ,  $D_5 = 79,68$  дБ соответственно. Максимальное расширение

динамического диапазона достигается при наибольшем различии в длинах волн  $\lambda_{1i}$  и  $\lambda_2$ . Для одноволнового режима с  $\lambda = 1,55$  мкм динамический диапазон  $D = 79,67$  дБ. При использовании двухволнового режима с  $\lambda_1 = 0,55$  мкм и  $\lambda_2 = 1,55$  мкм и  $B_T = 0,42$  динамический диапазон  $D$  увеличивается на 2,33 дБ.

Применение двухволнового режима в УОС на основе ОТЭ позволяет управлять параметрами УОС без изменения его структуры, добиваясь изменения диапазона измерения при поддержании необходимой чувствительности УОС. При этом большей чувствительности соответствует меньший диапазон изменения рабочих зазоров. Изменение диапазона зазоров происходит преимущественно за счет изменения нижней границы диапазона. С помощью двухволнового преобразования можно компенсировать технологические неточности при изготовлении рамочных МОЭМ преобразователей, устанавливая величину балансирующего коэффициента  $B_T$  на этапе калибровки.

Таким образом, для регулирования параметров УОС на основе ОТЭ предложено использовать зависимость отражательной способности структуры «призма ПВО-воздушный зазор-РЧЭ» от длины волны оптического излучения. Экспериментально исследована функция преобразования УОС на основе ОТЭ при различных значениях длины волны оптического излучения.

Исследован двухволновой режим УОС на основе ОТЭ, когда спектр оптического излучения содержит две составляющие, отличающиеся по длине волны, для комбинаций первой длины волны 0,55 мкм, 0,63 мкм, 0,85 мкм, 0,98 мкм, 1,31 мкм со второй длиной волны 1,55 мкм, для которых существует развитая элементная база полупроводниковых излучателей и фотоприёмников. Для различных длин волн максимальная чувствительность изменяется от  $1,22 \text{ мкм}^{-1}$  до  $3,58 \text{ мкм}^{-1}$ , а диапазон рабочих зазоров - от 0,25 мкм до 0,72 мкм по уровню падения чувствительности на 3 дБ. Применение двухволнового режима в УОС на основе ОТЭ позволяет управлять параметрами преобразователя за счет изменения соотношения мощностей спектральных составляющих. Показано, что динамический диапазон выходного сигнала УОС в двухволновом режиме увеличивается на 2,33 дБ.

Применение режима двухволнового преобразования в узлах оптического считывания на основе ОТЭ обеспечивает возможность изменять параметры рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, регулируя соотношение мощностей спектральных составляющих.

#### **4.1.2 Исследование возможности использования тонкопленочной структуры для двухволнового узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта**

Волноводы на основе нитрида кремния  $Si_3N_4$  на слое диоксида кремния  $SiO_2$  широко используются в интегральной оптике. Слой диоксида кремния  $SiO_2$  имеет низкий показатель преломления (1,44) и используется в качестве буфера, предотвращающего переход оптического излучения в кремниевый РЧЭ. Слой нитрида кремния  $Si_3N_4$  с более высоким показателем преломления (2,0) образует сердцевину волновода, в котором распространяется оптическое излучение за счет контраста показателей преломления.

Для обеспечения распространения оптического излучения в слое  $Si_3N_4$  необходимо определить толщину буферного слоя  $SiO_2$  для наибольшей входной длины волны ( $\lambda=1550$  нм). Для этого проведем моделирование структуры с варьированием толщины буферного слоя  $SiO_2$ , записывая значения интенсивности оптического излучения в слое  $Si$  (Рисунок 67).

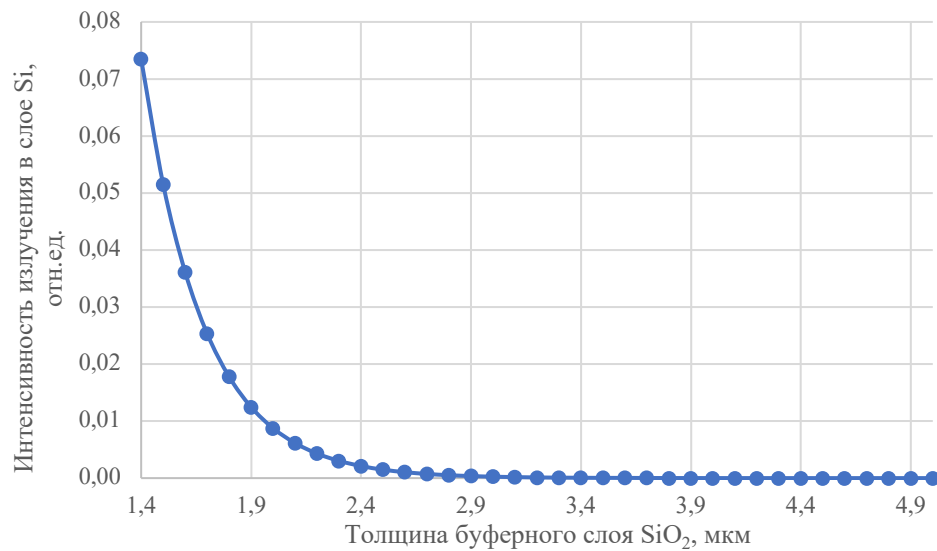


Рисунок 67 – Зависимость интенсивности излучения в слое  $Si$  от толщины буферного слоя  $SiO_2$

Определено, что для обеспечения распространения оптического излучения с длиной волны  $\lambda_1 = 1,55$  мкм и  $\lambda_2 = 0,55$  мкм толщина буферного слоя  $SiO_2$  должна быть не меньше 2,9 мкм.

Проведено моделирование распределения модового поля с выбранными толщинами слоёв тонкопленочного двухволнового узла оптического считывания: слой  $Si_3N_4$  – 1 мкм,  $SiO_2$  – 3 мкм,  $Si$  – 50 мкм (Рисунок 68).

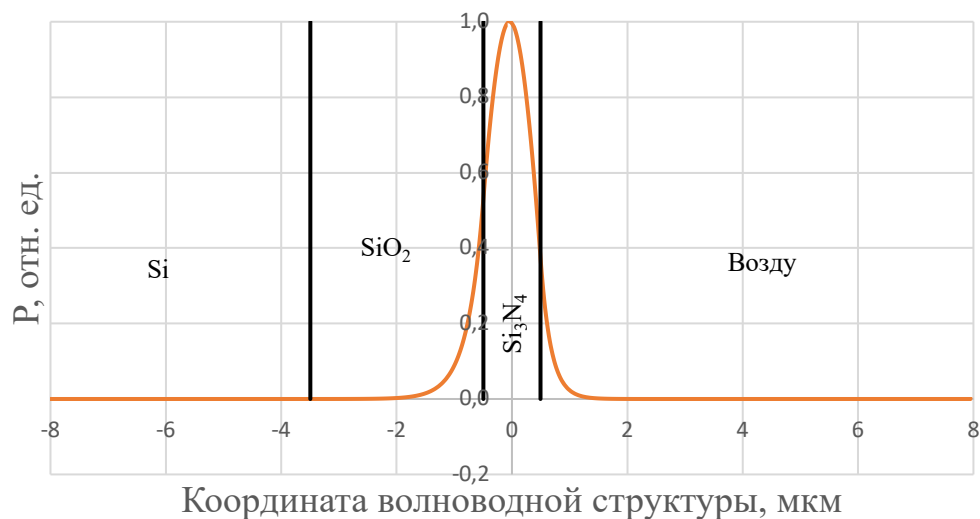


Рисунок 68 – Распределение нормированной оптической мощности  $P$  в структуре тонкоплёночного волновода  $Si-SiO_2-Si_3N_4$

Используя толщину буферного слоя  $SiO_2$ , равную 3 мкм, излучение не выходит за пределы слоя  $SiO_2$  и обеспечивает работу узла оптического считывания в двухволновом режиме.

Изготовлено два макетных образца с выбранными параметрами тонкоплёночного волновода со структурой  $Si_3N_4-SiO_2-Si$  с топологиями в виде призмы полного внутреннего отражения и в виде полоскового волновода (Рисунок 69).



а)



б)

Рисунок 69 – Общий вид макетных образцов: а) призма полного внутреннего отражения, б) полосковый волновод

Для измерения оптических параметров полученных структур использовался призмный метод ввода излучения. Этот метод позволяет определить показатель преломления, толщину, и эффективные показатели преломления возбужденных в пленке волноводных мод.

Для реализации призмного метода ввода излучения макетный образец приводится в контакт с основанием призмы с помощью соединительной головки с пневматическим приводом, создавая субмикрометровый воздушный зазор между пленкой нитрида кремния и призмой. Оптическое излучение падает на основание призмы, отражается от границы раздела сред и достигает фотоприемника. При определенных значениях угла падения  $\theta$ , оптическое излучение туннелирует через воздушный зазор в пленку и переходит в режим направленного распространения, вызывая резкое падение мощности оптического излучения  $P$ , достигающего фотоприемника.

Измерения проводились с помощью поворотного стола с автоматизированным управлением, который изменяет угол падения  $\theta$  оптического излучения относительно основания призмы (Рисунок 70).

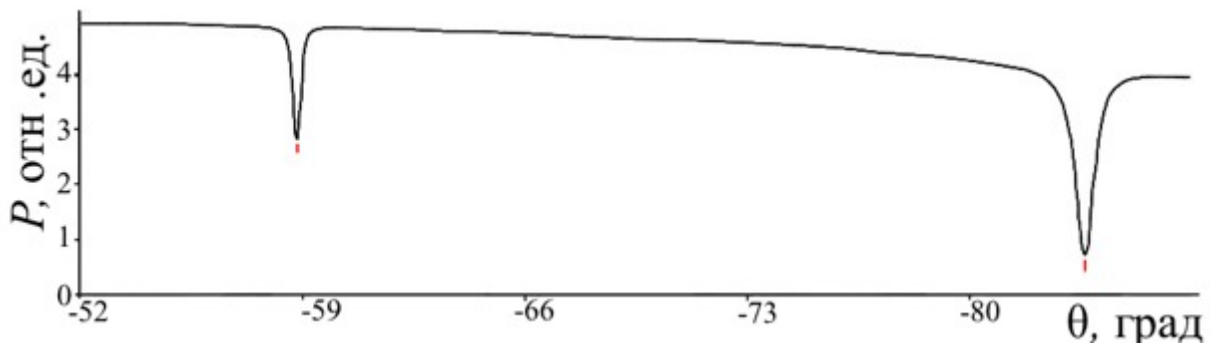


Рисунок 70 – Зависимость мощности оптического излучения  $P$  от угла падения  $\theta$  оптического излучения

В ходе проведения измерений на длине волны излучения  $\lambda=636$  нм были обнаружены 2 волноводные моды. Определен эффективный показатель преломления слоя  $Si_3N_4$   $n_{\text{эфф}} = 1,8$ .

Для оценки вносимых потерь в оптическом волноводе, на макетном образце с прямолинейной структурой использовался торец одномодового волокна. Юстировка проводилась по наибольшему уровню сигнала на измерителе мощности (Рисунок 71).

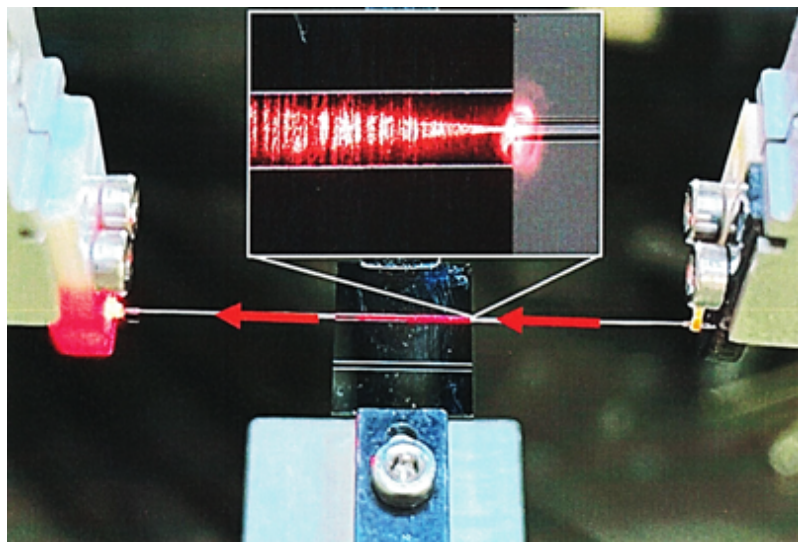


Рисунок 71 – Общий вид измерения вносимых потерь в оптическом волноводе с прямолинейной структурой

При вводе оптического излучения с длиной волны  $\lambda=636$  нм наблюдается его распространение в оптическом волноводе с расходящимся пучком, так как ширина волновода существенно больше длины волны. В результате измерения, значение вносимых потерь с учетом ввода и вывода составили 25 дБ/см.

## **4.2 Разработка и исследование адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с двухволновым узлом считывания на основе оптического туннельного эффекта**

### **4.2.1 Разработка функциональной схемы адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с двухволновым узлом считывания на основе оптического туннельного эффекта и алгоритма его работы**

Предложен адаптивный рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости, включающий в себя ЭК и двухволновые УОС на основе ОТЭ, обеспечивающие определения положения РЧЭ в расширенном динамическом диапазоне (Рисунок 72).



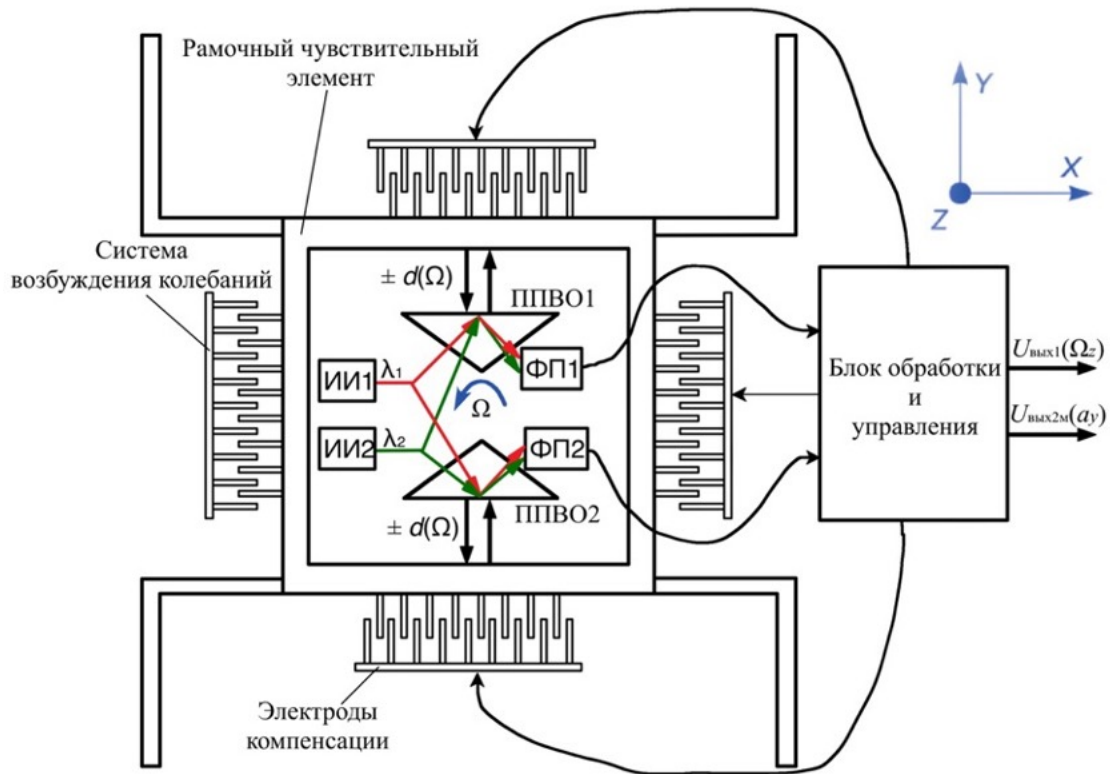


Рисунок 72 – Функциональная схема адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости

Колебания РЧЭ в режиме движения вдоль оси  $OX$  создаются путем приложения переменного напряжения к СВК с частотой  $\omega$ , соответствующей резонансной частоте колебаний РЧЭ. В отсутствие угловой скорости амплитуда колебаний РЧЭ в режиме движения вдоль оси  $OY$  равна нулю. При внешнем вращении с угловой скоростью  $\Omega_z$  вокруг оси  $OZ$  возникает сила Кориолиса, формирующая колебания РЧЭ в режиме движения вдоль оси  $OY$ . Амплитуда колебаний РЧЭ в режиме движения вдоль оси  $OY$  пропорциональна  $\Omega_z$ . Эти колебания детектируются двухволновыми УОС на основе ОТЭ. Изменение величины зазора  $d$  приводит к изменению эффективной отражательной способности  $R_\Sigma$  области, разделяющей поверхности отражения ППВО и КОЭ, что приводит к изменению мощности оптического излучения, поступающего на фотоприемник  $P_{ФП}$ , и затем, после детектирования к формированию электрического сигнала, используемого в блоке обработки.

В блоке обработки реализуется четырехканальная дифференциальная схема, основанная на суммирующих и вычитающих устройствах. Сигналы, поступающие от вычитающего устройства, разделяются по частоте с помощью ПФ и второго ФНЧ. ПФ соединен с СД, выход которого соединен со входом первого ФНЧ. Выходные сигналы второго ФНЧ передаются на ПИ регулятор, связанный с системой компенсации низкочастотного смещения рамки. При воздействии линейного ускорения  $a_y$  вдоль оси  $OY$  создается дополнительное смещение рамки  $\Delta y_a$  вдоль оси  $OY$ , которое компенсируется системой компенсации низкочастотного смещения РЧЭ. При воздействии линейного ускорения  $a_x$  вдоль оси  $OX$  создается дополнительное смещение рамки  $\Delta x_a$  и эквивалентное перемещение КОЭ  $\Delta x_{a \text{ экв}}$  вдоль оси  $OX$ , которое компенсируется с помощью управления постоянным напряжением  $U_{dc}$  в СВК. Контроллер оптической мощности устанавливает пропорциональное соотношения оптических мощностей  $P_1$ ,  $P_2$ , обеспечивая необходимую чувствительность УОС на основе ОТЭ для детектирования субмикрометровых перемещений РЧЭ.

Разработан алгоритм адаптации рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ, реализующий компенсацию погрешности линейных ускорений вдоль осей движения и чувствительности. Алгоритм представлен на Рисунок 73.

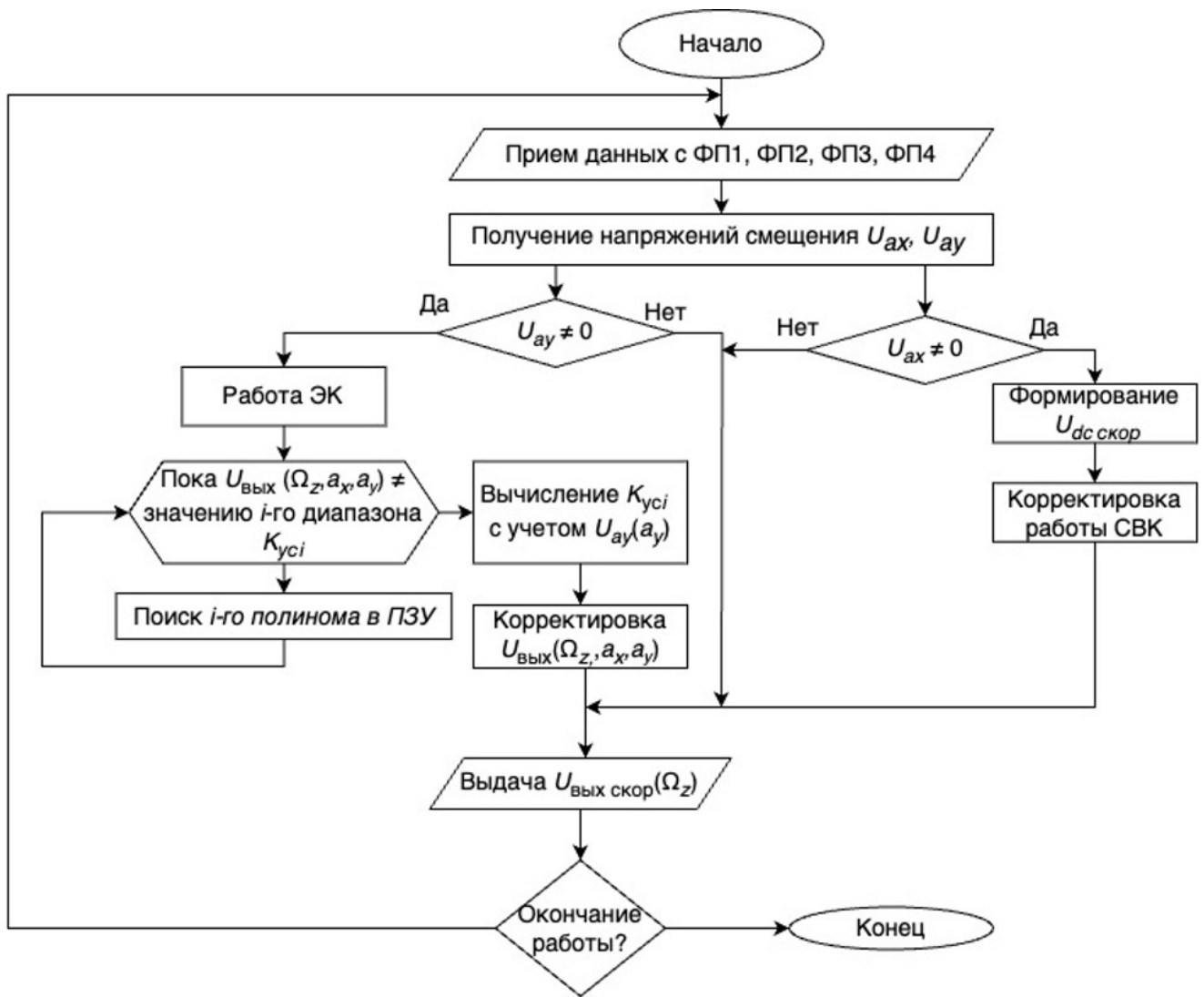


Рисунок 73 – Алгоритм адаптации рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости

Алгоритм работает следующим образом. Вначале проводится запуск алгоритма и приём данных с фотоприёмников (ФП1, ФП2, ФП3, ФП4). На основе принятых данных вычисляются напряжения смещения  $U_{ax}$ ,  $U_{ay}$ . Далее проверяется, равно ли напряжение  $U_{ay}$  нулю. Если  $U_{ay} = 0$  В, алгоритм проверяет напряжение  $U_{ax}$ . Если  $U_{ax} \neq 0$  В, формируется скорректированное значение напряжения  $U_{dc \text{ скор}}$  и производится корректировка работы СВК. Если  $U_{ax} = 0$  В, алгоритм переходит непосредственно к выдаче выходного сигнала. Если  $U_{ay} \neq 0$  В, запускается блок работы ЭК. Проводится вычисление и подбор коэффициента коррекции  $K_{yci}$  с учётом текущего напряжения  $U_{ay}$ . После чего осуществляется корректировка

выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(\Omega_z, a_x, a_y)$  и формируется выходное напряжение  $U_{\text{вых скор}}(\Omega_z)$ .

Проведено моделирование предложенного алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя к внешнему линейному ускорению с учетом полученных уравнений (46)-(54). Относительная погрешность  $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z)$  измерения угловой скорости представлена на Рисунок 74.

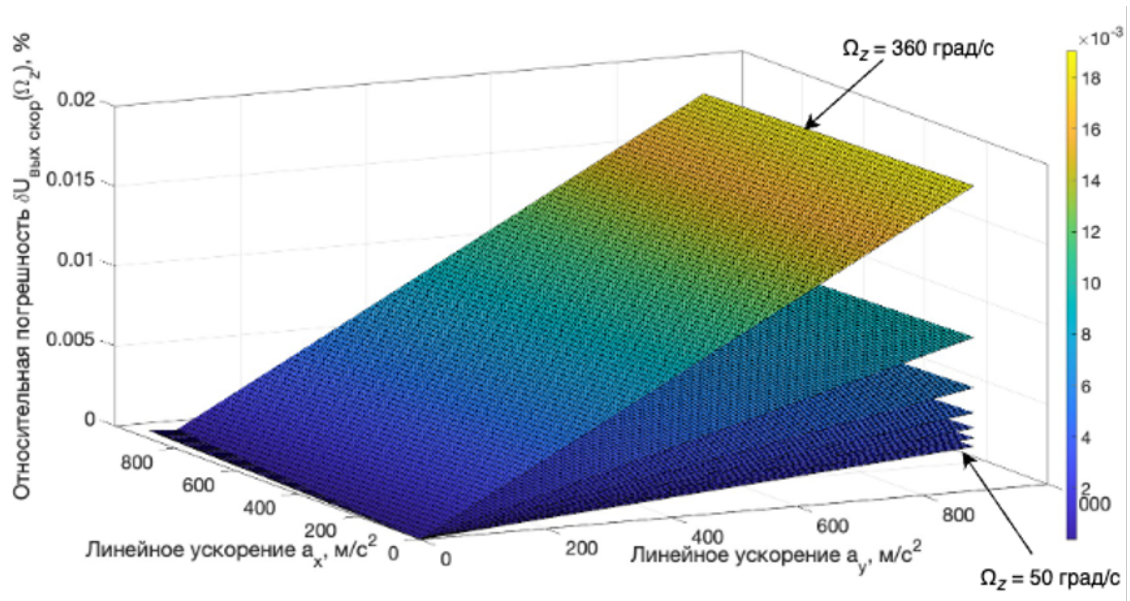


Рисунок 74 - Зависимость относительной погрешности  $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z)$  от воздействия линейных ускорения  $a_x, a_y$  по осям  $OX, OY$  с применением алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя для различных угловых скоростей

Применение разработанного алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя показывает, что относительная погрешность не превышает  $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z) = 0,018 \%$  при  $\Omega_z = 360$  град/с. При этом наибольший вклад в погрешность измерения угловой скорости вносит линейное ускорение  $a_y$ , действующее по оси  $OY$ .

Таким образом, алгоритм позволяет производить итеративную адаптацию МОЭМ преобразователя угловой скорости, уменьшая напряжение смещения нуля за счёт изменения корректирующих коэффициентов.

#### **4.2.3 Компенсация дополнительной температурной погрешности на основе термооптического эффекта в узлах оптического считывания на основе ОТЭ**

Температурные колебания являются одним из основных факторов, влияющих на точность оптических систем считывания, использующих оптический туннельный эффект (ОТЭ). Это обусловлено изменением оптических свойств материалов, таких как коэффициент преломления, длина волны и геометрические размеры узлов под воздействием температуры. Для уменьшения температурной погрешности применяется компенсация, основанная на использовании термооптического эффекта, который описывает зависимость оптических характеристик материала от температуры.

Компенсация основана на использовании математической модели, описывающей температурную зависимость параметров узла, включая коэффициенты преломления оптических элементов, межслойные зазоры. В рамках модели учитываются линейные и нелинейные изменения термооптических свойств, а также их влияние на пропускательную способность. На основе этой модели разработан алгоритм динамической коррекции параметров узла в реальном времени [112].

Практическая реализация компенсации предполагает использование материалов с низкой температурной дисперсией или парных материалов с противоположными термооптическими характеристиками.

Благодаря применению термооптического эффекта, система способна адаптироваться к температурным изменениям и сохранять высокую точность считывания при различных условиях окружающей среды.

Для компенсации дополнительной температурной погрешности можно использовать термооптический эффект. В этом случае предлагается использовать два УОС, работающих в двухволновом режиме, с призмами ПВО с разными показателями преломления, у которых термооптические коэффициенты значительно отличаются. При изменении температуры одна из призм ПВО будет слабо изменять свой показатель преломления, а другая более сильно. Изменение

показателя преломления при вариациях температуры можно описать линейным уравнением [109]:

$$n(T_0 + \Delta T) = n_0 + \beta \Delta T, \quad (72)$$

где  $\beta$  – термооптический коэффициент волноводной среды.

На основе соотношений рассчитываются эффективные отражательные способности  $R_\Sigma(T_0)$  при температуре  $T_0 = 293$  К и  $R_\Sigma(T)$  при  $T = T_0 + \Delta T$ .

Высокой чувствительностью к изменению температуры обладает оптическая среда, выполненная из  $Si$ , а низкой чувствительностью – из  $Si_3N_4$  [113-115]. Для  $Si$  термооптический коэффициент равен  $\beta_{Si} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ , а для  $Si_3N_4$  –  $\beta_{Si_3N_4} = 2,45 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ . Для определения текущей температуры предлагается использовать температурный коэффициент  $K_T(T)$ , определяемый отношением выходных напряжений двух узлов оптического считывания:

$$K_T(T) = \frac{U_{\text{УОС2}}(\Omega, T)}{U_{\text{УОС1}}(\Omega, T)}, \quad (73)$$

где  $U_{\text{УОС1}}$  – выходное напряжение УОС со слабо термочувствительным волноводом:

$$U_{\text{УОС1}}(\Omega, T) = R_{\text{ос}} \left[ I_{\text{шум}}(T) + B_{\text{т}} S_{\text{ФП1}} P_1 R(\Omega, n_{Si_3N_4}(T), \lambda_1) + (1 - B_{\text{т}}) S_{\text{ФП2}} P_2 R(\Omega, n_{Si_3N_4}(T), \lambda_2) \right],$$

$U_{\text{УОС2}}$  – выходное напряжение УОС с сильно термочувствительным волноводом:

$$U_{\text{УОС2}}(\Omega, T) = R_{\text{ос}} \left[ I_{\text{шум}}(T) + B_{\text{т}} S_{\text{ФП1}} P_1 R(\Omega, n_{Si}(T), \lambda_1) + (1 - B_{\text{т}}) S_{\text{ФП2}} P_2 R(\Omega, n_{Si}(T), \lambda_2) \right].$$

Получаемое значение  $K_T(T)$  используется для управления коэффициентом усиления  $K_y = f[K_T(T)]$  для получения скорректированного выходного напряжения  $U_{\text{вых скор}}(\Omega, T)$  рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости. Скорректированное выходное напряжение  $U_{\text{вых скор}}(\Omega, T)$  с учетом коэффициента усиления  $K_y$  определится как:

$$U_{\text{вых скор}}(\Omega, T) = U_{\text{УОС1}}(\Omega, T) K_y(K_T).$$

По результатам моделирования зависимость (73) аппроксимируем выражением:

$$K_T(T) = 5,4 \cdot 10^{-4} [\text{К}^{-1}] T + 0,845. \quad (74)$$

Для получения зависимости коэффициента усиления  $K_y = f[K_T(T)]$  от температурного коэффициента  $K_T(T)$  определим выходное напряжение УОС с

низкой чувствительностью к термооптическому эффекту  $U_{\text{YOC1}}$  для различных угловых скоростей  $\Omega$  при температуре  $T=293$  К. Затем определим выходное напряжение  $U_{\text{YOC1}}$  при вариации температур в диапазоне от  $T = 233...353$  К и определим значения коэффициента усиления  $K_y$ :

$$K_y = \frac{U_{\text{YOC1}}(\Omega)}{U_{\text{YOC1}}(\Omega, T)}.$$

С учетом (74) получим градуировочную характеристику  $K_y = f[K_T(T)]$ , которую аппроксимируем выражением:

$$K_y(K_T) = -1,89K_T + 2,88.$$

Зависимость дополнительной температурной погрешности с учетом применения алгоритма компенсации приведена на Рисунок 75.

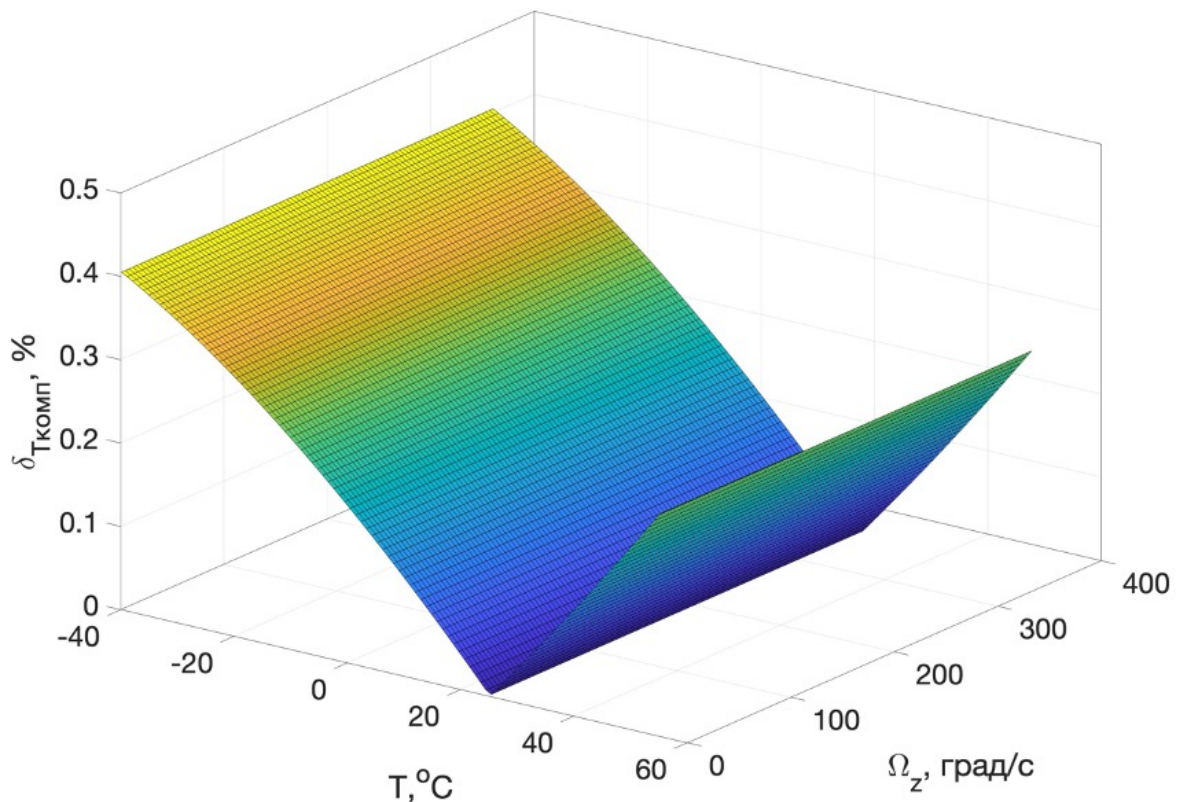


Рисунок 75 – Зависимость дополнительной температурной погрешности с учетом применения алгоритма компенсации для различной угловой скорости в диапазоне температур 233-333 К

Моделирование МОЭМ преобразователя с блоком коррекции выходного напряжения показало, что дополнительная температурная погрешность  $\delta_{T_{\text{комп}}}$  снижается до 0,04 % °C в диапазоне температур -40...+55 °C.

#### **4.4 Разработка алгоритма расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ**

##### **4.4.1 Учет внутренних погрешностей узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта**

Источниками шумов узла оптического считывания на основе ОТЭ являются: шумы фотодетектора, нестабильность длины волны источника излучения, нестабильность генерации оптической мощности источником оптического излучения. Для учета внутренних погрешностей УОС на основе ОТЭ необходимо учитывать и потери оптической мощности при его распространении в УОС.

Для определения результирующего шума фотоприемника можно использовать метод квадратов, который позволяет учитывать различные виды шумов и их влияние на общее отношение сигнал/шум ( $SNR$ ). Ток, генерируемый шумами фотоприемника, который можно представить в виде [116]:

$$I_{\text{шум}} = \sqrt{I_{\text{темн}}^2 + I_{\text{дроб}}^2 + I_{\text{тепл}}^2},$$

где  $I_{\text{темн}}$  – темновой ток, обусловленный термической генерацией носителей заряда в полупроводниковом материале;

$I_{\text{дроб}}$  – ток, возникающий в результате квантовых флуктуаций фотонов;

$I_{\text{тепл}}$  – тепловой шум, вызванный случайным тепловым движением электронов в сопротивлении шунта  $R_{\text{шунт}}$ .

Ток дробового шума можно выразить [116]:

$$I_{\text{дроб}} = \sqrt{2e_0 I_{\text{ФП}} \Delta f_{\text{ФП}}},$$

где  $e_0$  – заряд электрона;

$I_{\text{ФП}}$  – фототок, генерируемый в результате поглощения оптического излучения, попадающего на фоточувствительную зону фотоприемника;

$\Delta f_{\text{ФП}}$  – полоса пропускания ФП.



Тепловой шум  $I_{\text{тепл}}$  может быть записан как [116]:

$$I_{\text{тепл}} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R_{\text{шунт}}}},$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура в Кельвинах;

$R_{\text{шунт}}$  – сопротивление шунта, которые также являются функцией температуры для кремниевых, *InGaAs* и *Ge* фотодиодов.

Для учета нестабильности длины волны и оптической мощности источника излучения будем использовать спектральные характеристики, приведенные спецификациях малогабаритных полупроводниковых лазеров. Так для лазерного диода Thorlabs LP1550-SAD2 центральная длина волны  $\lambda = 1550$  нм, и стандартное отклонение в режиме генерации излучения 5 пм. Оптическая мощность  $P = 1,5$  мВт имеет нормальное распределение по оптическому пятну со стандартным отклонением 2 мкВт (Рисунок 76).

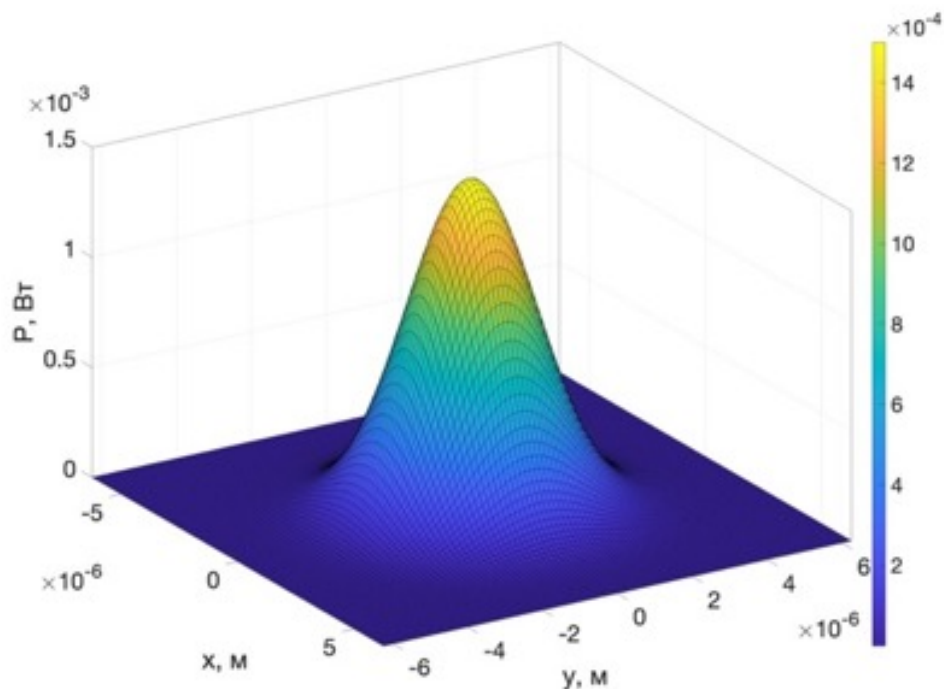


Рисунок 76 – Распределение оптической мощности по оптическому пятну на отражающей поверхности ППВО

Как видно из (8), узел оптического считывания имеет ограничение по разрешающей способности, обусловленное шумовыми характеристиками оптоэлектронных компонентов. Проведем оценку основной погрешности угловой скорости  $\Delta\Omega$  на установленном диапазоне измерений  $\Omega_{\text{макс}}$ , приняв, что источником погрешностей измерения является только узел оптического считывания. Для этого используем следующее соотношение:

$$\Delta\Omega_z = \frac{\Omega_{z \text{ макс}} I_{\text{шум}} \Sigma}{\Delta I_{\text{ФП макс}}}, \quad (75)$$

где  $\Delta I_{\text{ФП макс}}$  – максимальное изменение фототока, созданного фотоприемником при изменении рабочих зазоров  $\Delta d$ .

Тепловой шум вызван случайным тепловым движением электронов в сопротивлении шунта  $R_{\text{шунт}}$ . Например, у фотоприемников на основе *InGaAs* сопротивление шунта составляет порядка 10 МОм, в то время как у фотоприемников на основе *Ge* оно находится в диапазоне кОм. Случайное тепловое движение электронов проявляется в виде флуктуационного тока.

При увеличении температуры сопротивление уменьшается, и, следовательно, тепловой шум увеличивается.

Значение случайного шума фотоприемника можно определить как:

$$I_{\text{шум}} = \sqrt{\left[ e_0 (S_{\text{ФП}} P + 3I_{\text{темн}}) + \frac{4k_B T}{R_{\text{шунт}}} \right] \Delta f_{\text{ФП}}}, \quad (76)$$

где  $e_0$  – заряд электрона,  $S_{\text{ФП}}$  – спектральная чувствительность фотоприемника,  $I_{\text{темн}}$  – темновой ток ФП,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $R_{\text{шунт}}$  – шунтирующее сопротивление,  $\Delta f_{\text{ФП}}$  – полоса пропускания ФП.

Проведем оценку максимального изменения фототока  $\Delta I_{\text{ФП макс}}$  подставляя (76) в (75) и рассчитаем функцию преобразования  $I_{\text{ФП}}(d)$  по формуле (8) используя следующие параметры: спектральная чувствительность фотоприемника  $S_{\text{ФП}} = 0,9$  А/Вт, темновой ток ФП  $I_{\text{темн}} = 10$  нА, сопротивление шунта  $R_{\text{шунт}} = 15$  кОм, температура  $T = 297$  К, полоса ФП  $\Delta f = 100$  кГц. При расчете (75) и (8) получим максимальное изменение фототока  $\Delta I_{\text{ФП макс}} = 319$  мкА, диапазон измерения рабочих зазоров  $\Delta d_{\text{макс}} = 437$  нм.

Исходя из (8), (75), (76) основная погрешность УОС на основе ОТЭ определится как:

$$\Delta_{\text{УОС}} = I_{\text{ФП}}(d_0, \lambda, n_1, P, I_{\text{шум}}) - I_{\text{ФП}}(d_{0 \text{ ном}}, \lambda_{\text{ном}}, n_{1 \text{ ном}}, P_{\text{ном}}, I_{\text{шум}}), \quad (77)$$

где  $\lambda_{\text{ном}}$  – номинальное значение длины волны;

$n_{1 \text{ ном}}$  – номинальное значение показателя преломления призмы;

$P_{\text{ном}}$  – номинальное значение оптической мощности ФП.

Для определения основной погрешности УОС на основе ОТЭ в эквивалентной угловой скорости в град/с с учетом (77) используем:

$$\Delta\Omega_{\text{УОС}} = \Delta_{\text{УОС}} K_M \cdot 3600, \quad (78)$$

где  $K_M$  – масштабный коэффициент.

Одними из основных характеристик являются масштабный коэффициент и случайный дрейф угловой скорости. Масштабный коэффициент улучшает соотношение сигнал/шум (SNR) и стабильность смещения нулевого сигнала, а также увеличивает кориолисову связь режима движения с режимом чувствительности. Случайный дрейф угловой скорости можно представить в виде термомеханического шума, шума узла оптического считывания, дробового шума и шума квантования. Масштабный коэффициент рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости имеет линейную зависимость между выходным напряжением  $U_{\text{вых}}$  и угловой скоростью  $\Omega$ . Общий масштабный коэффициент  $K_M$  складывается из механической чувствительности  $S_{\text{мех}}$ , чувствительности узла оптического считывания  $S_{\text{УОС}}$  выразим как:

$$K_M = \frac{\Omega}{U_{\text{вых}}} = S_{\text{мех}} S_{\text{УОС}}. \quad (79)$$

Основываясь на уравнениях (9)-(11), механическую чувствительность  $S_{\text{мех}}$  можно выразить как:

$$S_{\text{мех}} = \frac{F_{\text{эл}} Q_x}{m_x \omega_0 \sqrt{(\omega_y^2 - \omega_0^2) + \omega_y^2 \omega_0^2 / Q_y^2}}. \quad (80)$$

Чувствительность узла оптического считывания  $S_{\text{УОС}}$  с учетом потерь оптической мощности запишем в виде:

$$S_{\text{УОС}} = \frac{\Delta P_{\text{ФП}}}{\Delta d} = P_{\text{ии}} \eta \frac{dR}{dd}, \quad (81)$$

где  $\eta$  – коэффициент потерь оптической мощности, возникающих в УОС при распространении, отражении, поглощении и рассеянии излучения.

Проведем моделирование статистических испытаний УОС на основе ОТЭ по методу Монте-Карло. Для параметров УОС зададим их варьирование с нормальным распределением. Моделирование статистических испытаний по методу Монте-Карло будем проводить 10000 раз, выбрав зазор между УОС и РЧЭ  $d = 420$  нм, пропорциональный угловой скорости  $\Omega = 360$  град/с. В качестве выходного параметра выберем основную погрешность  $\Delta\Omega_{\text{УОС}}$ .

Получено математическое ожидание основной погрешности УОС, равное  $M(\Delta\Omega_{\text{УОС}}) = 0,3$  мград/ч. Основная погрешность УОС в виде среднеквадратического отклонения  $3\sigma$  составила  $\Delta\Omega_{\text{УОС}} = 0,103$  град/ч. Плотность вероятности  $\phi(\Delta\Omega)$  основной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя приведена на Рисунок 77.

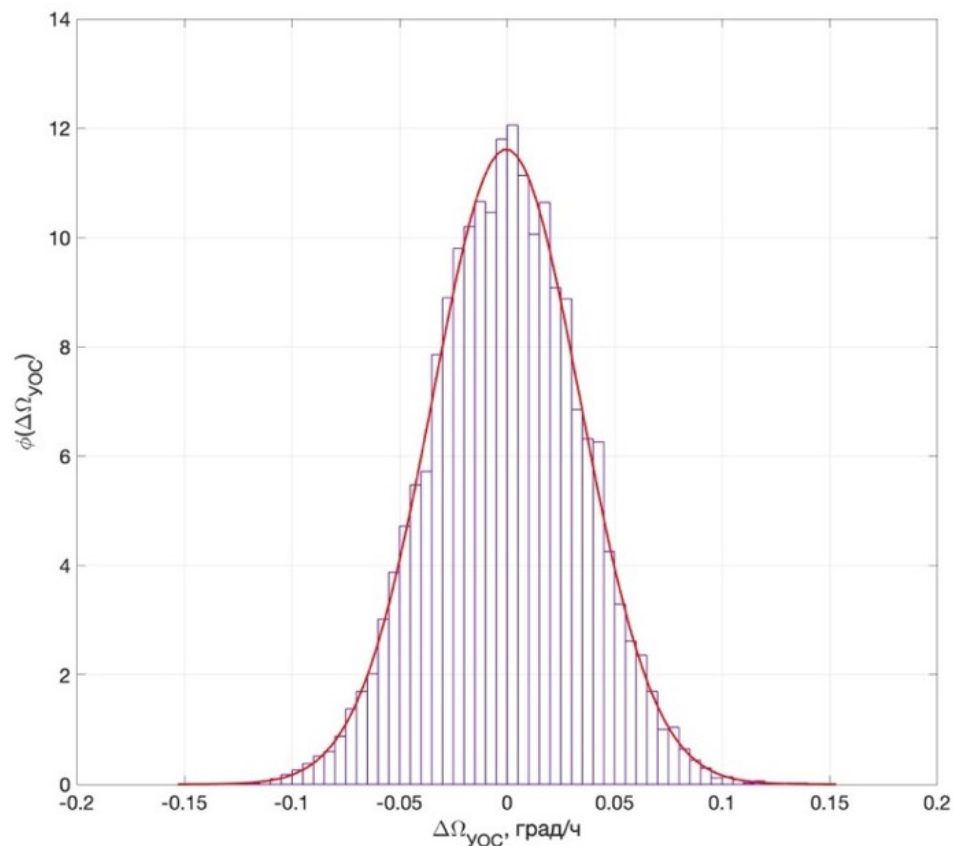


Рисунок 77 – Плотность вероятности  $\phi(\Delta\Omega_{\text{УОС}})$  основной погрешности УОС на основе ОТЭ

Оценим погрешность нелинейности функции преобразования УОС  $\delta_{\text{нел}}$ . Для этого аппроксимируем функцию преобразования  $I_{\text{ФП}}(d)$  прямой линией, и рассчитаем  $\delta_{\text{нел}}(d)$  как:

$$\delta_{\text{нел}}(d) = \left| \frac{I_{\text{ФП}}(d) - I_{\text{лин}}(d)}{I_{\text{лин}}(d)} \right| 100\%, \quad (82)$$

где  $I_{\text{лин}}(d)$  – аппроксимирующие значения фототока

При выбранных параметрах максимальная погрешность нелинейности равна  $\delta_{\text{нел макс}} = 0,12\%$ .

#### 4.4.2 Определение коэффициентов влияния на основную погрешность и допустимых отклонений параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости

Для определения коэффициентов влияния параметров на функцию преобразования, а также допустимых отклонений параметров рамочного МОЭМ преобразователя использован метод статистических испытаний Монте-Карло [117, 118].

При расчете рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости определяют номинальное значение масштабного коэффициента  $K_{\text{м ном}}$  и допуск на его отклонения.

Исходя из формулы (36), определим вектор параметров  $\mathbf{G}$ , который будем использовать для дальнейшего расчета коэффициентов влияния параметров на функцию преобразования и допустимых отклонений параметров преобразователя:

$$\mathbf{G} = [a_{\text{рчэ}}, b_{\text{рчэ}}, t_{\text{рчэ}}, L_{\text{уп1}}, L_{\text{уп2}}, b_{\text{уп}}, t_{\text{уп}}, a_{\text{эл}}, b_{\text{эл}}, t_{\text{эл}}, \lambda, \theta, S_{\text{ФП}}]. \quad (83)$$

Введем коэффициент влияния параметров на масштабный коэффициент  $k_i$  (где  $i$  – номер параметра) и проведем расчет рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости при значениях параметров для заданного диапазона измерения угловой скорости  $\Omega_{\text{макс}} = \pm 360$  град/с. Каждому исследуемому параметру  $G_i$  зададим случайные изменения с нормальным распределением. Проведем моделирование статистических испытаний с регистрацией масштабных

коэффициентов  $K_M$  для определения среднеквадратических отклонений  $\sigma_{K_M i}$ . Коэффициент влияния  $k_i$   $i$ -го параметра по результатам статистических испытаний определяется как:

$$k_i = \frac{dG_i}{dK_M} = \frac{\sigma_{K_M}/K_M}{\sigma_{G_i}/G_i}, \quad (84)$$

где  $\sigma_{G_i}$  – среднеквадратическое отклонение  $i$ -го параметра от номинального значения.

Обеспечить допустимую точность в статическом режиме можно с помощью предъявления требования к предельным отклонениям параметров узлов преобразователя, учитывая коэффициенты влияния  $k_i$ , рассчитанные по формуле (84). Максимальную абсолютную погрешность  $\Delta U_{\text{вых}}$  выходного сигнала МОЭМ преобразователя на границах диапазона определим с учетом возможных отклонений параметров:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n k_i \frac{\Delta G_i \Omega_z}{G_i K_M}, \quad (85)$$

где  $\Delta G_i$  – предельно возможное отклонение  $i$ -го параметра от номинального значения;

$k_i$  – коэффициент влияния  $i$ -го параметра.

Предельно допустимые отклонения параметров от их номинальных значений, при основной погрешности  $\Delta U_{\text{вых}}$ , определяются как:

$$\Delta G_i = \frac{\Delta U_{\text{вых}} K_M G_i}{\Omega_z k_i n}. \quad (86)$$

Используя составляющие вектора параметров  $\mathbf{G}$  рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, произведем расчет коэффициентов влияния параметров и определим допустимые отклонения от расчетных значений.

Для этого рассчитаем функцию преобразования угловой скорости в выходное напряжение преобразователя  $U_{\text{вых}}(\Omega)$  для заданного диапазона измерений угловой скорости  $\Omega = 0 \dots 360$  град/с и определим номинальное значение масштабного коэффициента  $K_{M \text{ ном}}$ .

Затем промоделируем статистические испытания методом Монте-Карло с нормальным распределением величины каждого параметра вектора  $\mathbf{G}$ , принимая

допущение, что все, кроме  $i$ -го параметра, соответствуют номинальным. По формуле (84) определим коэффициенты влияния для каждого из параметров и по формуле (86) – допустимые значения отклонений параметров от их номинальных значений.

Используя предложенный алгоритм, рассчитаем рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости. Входными данными для расчета примем: диапазон измерений угловой скорости  $\Omega = 0 \dots 360$  град/с, основную погрешность измерения угловой скорости  $\Delta\Omega = 0,3$  град/ч, погрешность нелинейности функции преобразования  $\delta_{\text{нел}}$  не более 3%, материал РЧЭ – кремний,  $n_1 = 1,48$ ,  $n_2 = 1$ . По формуле (7) получим значения  $\Delta d = 450$  нм,  $\delta_{\text{нел}} = 2,5\%$ ; по формулам (34), (35) определим значения  $a_{\text{РЧЭ}} = 1$  мм,  $b_{\text{РЧЭ}} = 30$  мкм,  $t_{\text{РЧЭ}} = t_{\text{уп}} = t_{\text{эл}} = 50$  мкм,  $L_{\text{уп1}} = L_{\text{уп2}} = 700$  мкм,  $b_{\text{уп}} = b_{\text{эл}} = 10$  мкм. С учетом формул (84)-(86) рассчитаем коэффициенты влияния и допуски на отклонения параметров (Таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты влияния и допуски на параметры  $G_i$ .

Параметр $G_i$	Статистический номинал $G_i$	Коэффициент влияния $k_i$	Отклонение $\Delta G_i$
$a_{\text{РЧЭ}}$	1000 мкм	3.1e+03	1,25 мкм
$b_{\text{РЧЭ}}$	30 мкм	6.5e+06	146 нм
$t_{\text{РЧЭ}}$	50 мкм	4.1e+06	254 нм
$L_{\text{уп1}}$	700 мкм	1.6e+03	0,42 мкм
$L_{\text{уп2}}$	700 мкм	3.9e+03	0,56 мкм
$b_{\text{уп}}$	10 мкм	3.6e+06	53 нм
$t_{\text{уп}}$	50 мкм	1.1e+06	251 нм
$a_{\text{эл}}$	100 мкм	2.5e+05	0,5 мкм
$b_{\text{эл}}$	10 мкм	3.6e+06	50 нм
$t_{\text{эл}}$	50 мкм	5.5e+06	251 нм
$\lambda$	1.55 мкм	3.6e+06	7,75 нм
$\theta$	0.78 рад	2.6e-01	0,23 рад

$d_0$	450 нм	3.9e+06	2,21 нм
$S_{\text{ФП}}$	0,95 А/Вт	6.9	4,5 мА/Вт

Наименьшие значения отклонения  $\Delta G_i$  имеют параметры  $t_{\text{рчЭ}}$ ,  $t_{\text{уп}}$ ,  $t_{\text{эл}}$ ,  $d_0$ . Толщины  $t_{\text{рчЭ}}$ ,  $t_{\text{уп}}$ ,  $t_{\text{эл}}$  могут быть обеспечены на этапе формирования заготовки [119, 120], а  $d_0$  может обеспечиваться применением травления на основе сфокусированного ионного пучка [121, 122]. Полученные параметры  $a_{\text{рчЭ}}$ ,  $b_{\text{рчЭ}}$ ,  $L_{\text{уп1}}$ ,  $L_{\text{уп2}}$ ,  $b_{\text{уп}}$ ,  $b_{\text{эл}}$  являются достижимыми при использовании современных способов микрообработки кремния [123, 124].

Проведено моделирование статистических испытаний по методу Монте-Карло с параметрами, указанными в таблице 1. Для параметров, указанных в таблице 1, задано их варьирование с нормальным распределением. Моделирование статистических испытаний по методу Монте-Карло проведено 5000 раз. В качестве выходного параметра выбрана основная погрешность измерения угловой скорости  $\Delta\Omega$ .

При изготовлении партии из 5000 МОЭМ преобразователей угловой скорости заданную основную погрешность  $\Delta\Omega = 0,3$  град/ч будут иметь 3413 (68,27%) преобразователей. Плотность вероятности  $\phi(\Delta\Omega)$  основной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя приведена на Рисунок 78. Ширина интервалов гистограммы подбиралась экспериментально.



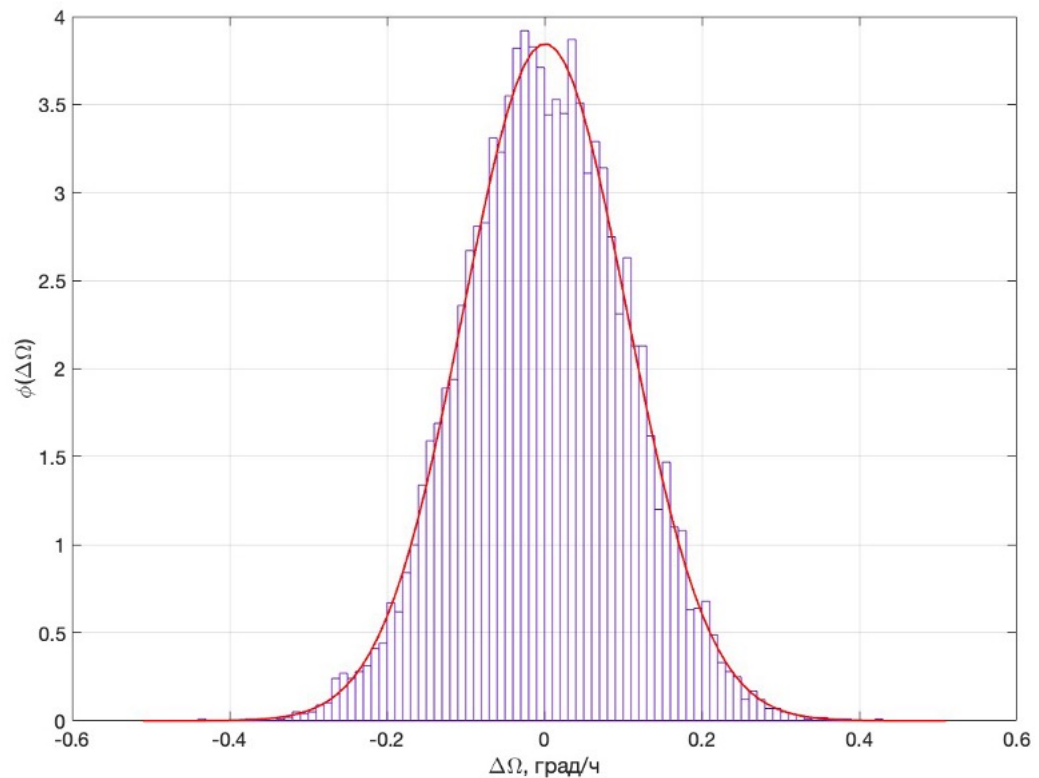


Рисунок 78 – Плотность вероятности  $\phi(\Delta\Omega)$  основной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя

Получено математическое ожидание основной погрешности преобразователя, равное  $M(\Delta\Omega) = 0,8$  мград/ч. При этом среднеквадратичное отклонение  $3\sigma$  составило  $(\Delta\Omega) = 0,3$  град/ч. Для повышения точности оставшихся 31,73% преобразователей, непопадающих в поле допуска заданной основной погрешности, необходимо проводить дополнительную калибровку.

#### 4.4.3 Разработка программного обеспечения для автоматизированного расчета конструктивных параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости

Расчет рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости предлагается проводить, следуя алгоритму, представленному на Рисунок 79.

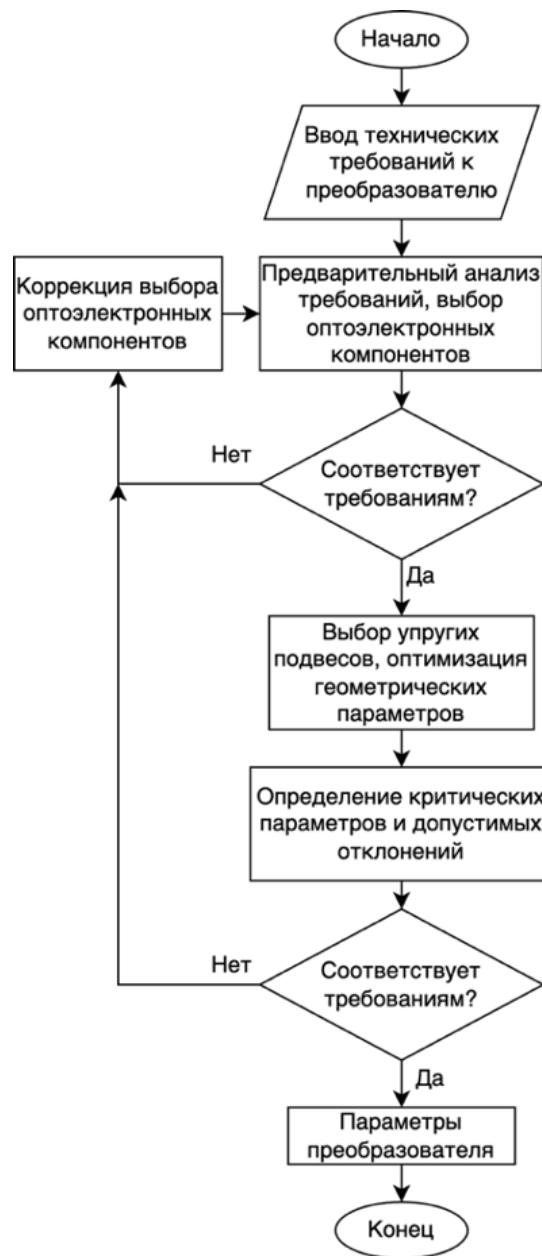


Рисунок 79 – Алгоритм расчета рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости

При расчете преобразователя угловой скорости могут быть заданы следующие технические параметры: диапазон измерения угловой скорости  $\pm\Omega_{\text{макс}}$ , основная погрешность измерения угловой скорости  $\Delta\Omega$ , погрешность нелинейности функции преобразования  $\delta_{\text{нел}}$ , температурный диапазон работы  $T_{\text{мин}} \dots T_{\text{макс}}$ .

Перед проведением расчета МОЭМ преобразователя предлагается проводить предварительный анализ технических требований [125]. Такой анализ следует проводить с учетом технологических возможностей производства изготовителя:

погрешности изготовления толщины чувствительного элемента, толщины жертвенного слоя, материала УОС, точности микрообработки. На первом этапе проектирования в качестве выходных данных получим для УОС: материал призмы полного внутреннего отражения, диапазон измерения перемещений рамочного чувствительного элемента, оптоэлектронные компоненты, обеспечивающие работу, оценки нелинейности функции преобразования и основной погрешности измерения угловой скорости.

На втором этапе выбирается форма упругих подвесов и проводится расчет амплитуды перемещений РЧЭ в режиме чувствительности на максимуме заданного диапазона измерения угловой скорости, обеспечивающей ее детектирования узлом оптического считывания.

На третьем этапе определяются критические параметры рамочного МОЭМ преобразователя и их допустимые отклонения, обеспечивающие заданную основную погрешность измерения угловой скорости.

Для исследования характеристик рамочного МОЭМ ПУС на основе ОТЭ разработано программное обеспечение (ПО).

Для расчета конструктивных параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости необходимо учитывать, что амплитуда колебаний в режиме чувствительности  $\Delta u_{\text{макс}}$ , соответствующая границе диапазона измерений угловой скорости  $\Omega_{\text{макс}}$ , не должна превышать значение  $(d_{\text{макс}} - d_0)$ . При этом, она зависит от амплитуды колебаний  $\Delta x_{\text{макс}}$  в режиме движения, массы РЧЭ  $m$  и частоты режима движения  $\omega$ . Для обеспечения максимальной чувствительности преобразователя к действующей угловой скорости частота режима движения должна согласоваться с частотами собственных колебаний РЧЭ вдоль осей движения  $\omega_x$  и чувствительности  $\omega_y$  ( $\omega = \omega_x = \omega_y$ ).

При проектировании упругого подвеса микрооптоэлектромеханического преобразователя необходимо обеспечивать возможность перемещения РЧЭ вдоль двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в одной плоскости. Предполагается, что движения по обеим осям происходят с одинаковой

резонансной частотой, что требует симметрии в геометрических и механических параметрах подвесной системы.

Толщина как самого РЧЭ, так и упругих подвесов определяется исходя из общего конструктивного ограничения на толщину слоя преобразователя, обусловленного технологическими и эксплуатационными требованиями. Ширина и длина упругих подвесов, а также линейные размеры РЧЭ должны быть минимизированы с целью снижения габаритов и инерционных характеристик конструкции, при этом обеспечивая необходимый уровень механической прочности и требуемую амплитуду колебаний в пределах чувствительности устройства, соответствующих диапазону оптического туннелирования.

Условия прочности упругих подвесов формулируются отдельно для каждой из осей: оси основного (рабочего) движения, обозначаемой индексом, и оси чувствительности, обозначаемой индексом  $y$ . Эти условия задаются с учётом максимальных изгибающих напряжений в подвесах и критических значений механических деформаций, допустимых для используемого материала. Расчёт должен учитывать как статические, так и динамические нагрузки, возникающие в процессе функционирования устройства, а также резонансные условия.

Условие прочности упругих подвесов для осей режима движения (индекс  $x$ ) и режима чувствительности (индекс  $y$ ) определяется с учетом [83]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\text{макс } x} = \frac{M_{\text{макс } x}}{W_x} < [\sigma_x] \\ \sigma_{\text{макс } y} = \frac{M_{\text{макс } y}}{W_y} < [\sigma_y] \end{array} \right\},$$

где  $\sigma_{\text{макс } x, y}$  – максимальные нормальные напряжения упругих подвесов,  $M_{\text{макс } x, y}$  – максимальные изгибающие моменты деформации упругих подвесов,  $W_{x, y}$  – осевые моменты сопротивлений сечений упругих подвесов,  $[\sigma_{x, y}]$  – предельно допустимые напряжения упругих подвесов, определяемые запасом прочности и текучестью материала РЧЭ.

МОЭМ преобразователь угловой скорости содержит рамочный чувствительный элемент с четырьмя одинаковыми  $L$ -образными подвесами, два узла оптического считывания на основе ОТЭ, электростатический привод

колебаний и блок обработки и управления (рис. 3). При вращении МОЭМ преобразователя с угловой скорости вокруг оси  $OZ$  вдоль оси  $OY$  возникает сила Кориолиса, индуцирующая режим чувствительности, в котором амплитуда вторичных колебаний  $\Delta y$  РЧЭ пропорциональна действующей угловой скорости  $\Omega$ . Узлы оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта формируют сигналы, соответствующие субмикронным перемещениям РЧЭ по оси чувствительности  $OY$ , и передают их в блок обработки и управления. Блок обработки и управления обрабатывает фототоки, поступающие от УОС, и формирует выходное напряжение  $U_{\text{вых}}(\Omega)$  о значении угловой скорости и управляющее напряжение  $U_{\text{упр}}$  для электростатического привода колебаний, обеспечивающего колебания РЧЭ в режиме движения.

Амплитуда первичных колебаний  $\Delta x_{\text{макс}}$  определяется материалом чувствительного элемента, амплитудой электростатической силы, обеспечивающей режим движения, суммарной жесткостью  $L$ -образных упругих подвесов и с учетом [97] равна:

$$\Delta x_{\text{макс}} = \frac{N \epsilon \epsilon_0 t_{\text{э}} U_{dc} U_{ac} L_{\text{уп1}}^3 (L_{\text{уп2}} + L_{\text{уп1}})}{4 E h_{\text{уп}} b_{\text{уп}}^3 d_{0 \text{ ш}} (L_{\text{уп2}} + 4 L_{\text{уп1}})} Q_x.$$

Амплитуда вторичных колебаний  $\Delta y_{\text{макс}}$  РЧЭ определяется с учетом [97] как:

$$\Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) = \frac{2 m \Omega_z \Delta x_{\text{макс}} \omega L_{\text{уп2}}^3 (L_{\text{уп1}} + L_{\text{уп2}})}{4 E b_{\text{уп}} h_{\text{уп}}^3 (L_{\text{уп1}} + 4 L_{\text{уп2}})} Q_y.$$

Исходя из геометрии РЧЭ и упругих подвесов, их суммарная масса  $m$  равна:

$$m = 4 b_{\text{РЧЭ}} h_{\text{РЧЭ}} (a_{\text{РЧЭ}} - b_{\text{РЧЭ}}) \rho + + \frac{33}{35} b_{\text{уп}} h_{\text{уп}} (L_{\text{уп1}} + b_{\text{уп}} [L_{\text{уп2}} - b_{\text{уп}}]) \rho,$$

где  $a_{\text{РЧЭ}}$ ,  $b_{\text{РЧЭ}}$ ,  $t_{\text{РЧЭ}}$  – длина, ширина и толщина РЧЭ соответственно;  $b_{\text{уп}}$ ,  $t_{\text{уп}}$  – ширина и толщина упругого подвеса,  $\rho$  – плотность материала РЧЭ.

Определим вектор параметров  $\mathbf{G}$  в виде:

$$\mathbf{G} = [a_{\text{РЧЭ}}, b_{\text{РЧЭ}}, t_{\text{РЧЭ}}, L_{\text{уп1}}, L_{\text{уп2}}, b_{\text{уп}}, t_{\text{уп}}, a_{\text{эл}}, b_{\text{эл}}, t_{\text{эл}}, \lambda, \theta, S_{\text{ФП}}],$$

который будем использовать для дальнейшего расчета коэффициентов влияния параметров на функцию преобразования и допустимых отклонений параметров преобразователя.

Разработано программное обеспечение (ПО) предназначено для комплексного расчёта и моделирования характеристик микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости. Оно включает в себя модули, позволяющие проводить анализ и оптимизацию конструктивных и эксплуатационных параметров преобразователя, что критически важно для обеспечения его высокой точности и надёжности.

В рамках функционала программы осуществляется определение параметров узла оптического считывания колебаний рамочного чувствительного элемента, включающее расчёт характеристик фотодетекторов и светодиодов, используемых в оптической системе, определение чувствительности считывающего тракта к микродеформациям, а также оптимизацию оптической схемы для повышения точности измерения угловой скорости.

В ПО выбрать вкладку «УОС» и внести параметры в соответствующие поля (Рисунок 80).

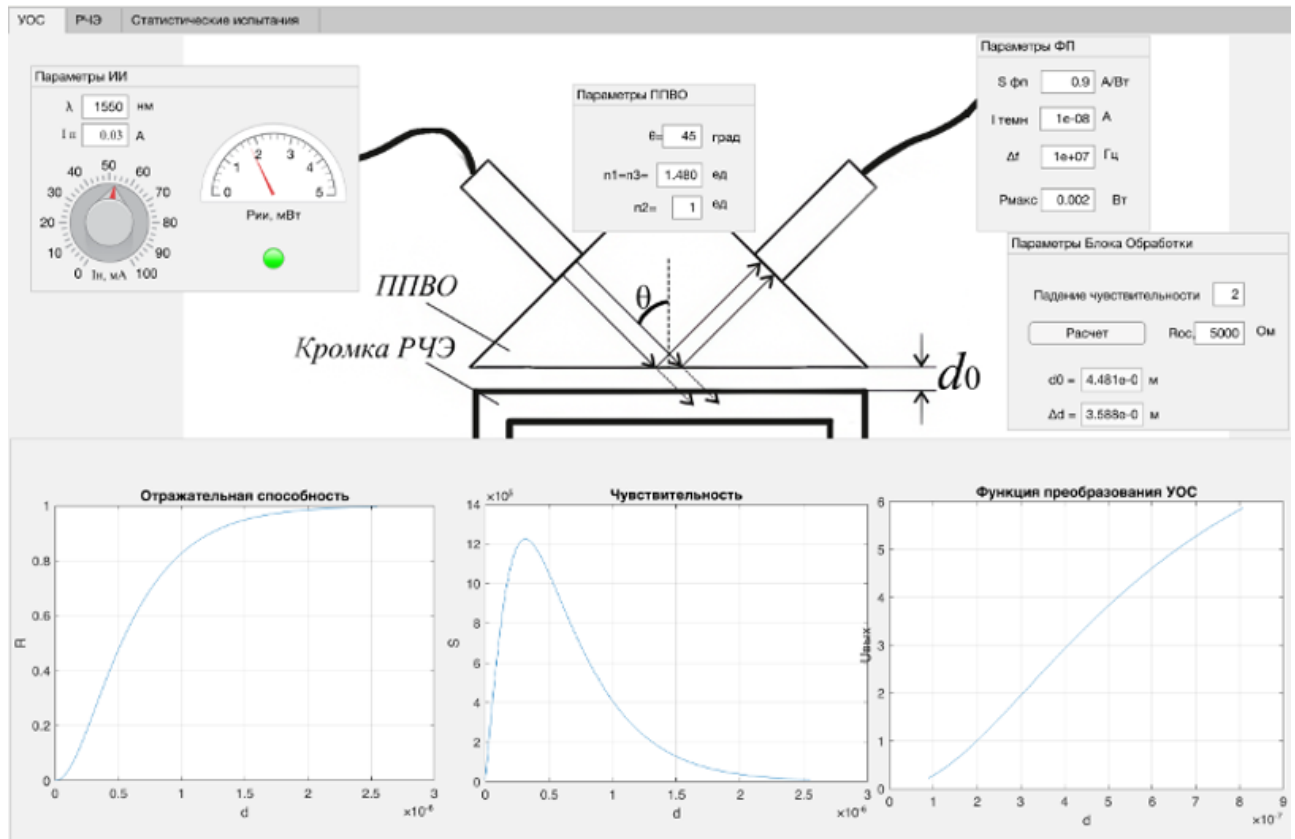


Рисунок 80 – Окно программы для расчета узла оптического считывания на основе ОТЭ

Изменяя положение регулятора тока накачки ИИ  $I_n$  определяется диапазон токов  $\Delta I_n$ , в котором обеспечивается генерация оптического излучения и выходные оптические мощности  $P_{\text{ИИ}}$ .

Установив регулятор тока накачки ИИ  $I_n$  в положение 50 мА и нажав клавишу «Расчет» в блоке «Параметры блока обработки» определится значения  $d_0$ ,  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$ ,  $\Delta d$  и максимальное значение чувствительности  $S_{\max}$ .

В ПО реализуется расчёт статических характеристик рамочного чувствительного элемента, включающий определение собственных частот и форм колебаний, анализ влияния геометрических параметров на механические характеристики конструкции, а также расчёт демпфирования и жёсткости в различных режимах работы. Программа позволяет проводить моделирование испытаний на воздействие угловой скорости.

В ПО выбирается вкладка «РЧЭ» для внесения параметров, полученных из вкладки «УОС» (Рисунок 81).

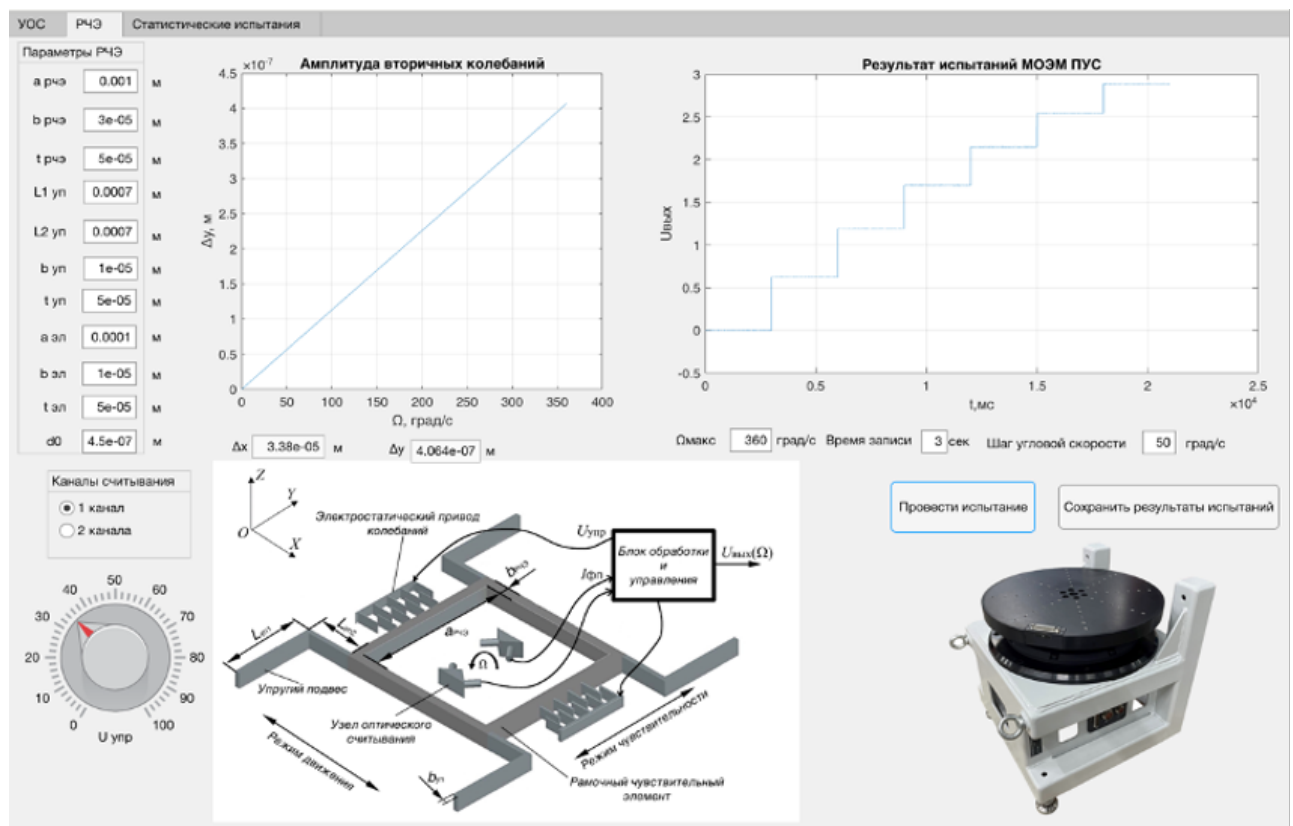


Рисунок 81 – Окно программы для выполнения расчет конструктивных параметров и моделирования функции преобразования преобразователя

Изменяя управляющее напряжение  $U_{упр}$  можно определить значения  $\Delta d$ . Выбрав 1, 2 каналы считывания и задавав время записи, шаг изменения угловой скорости нажать кнопку «Провести испытания». Получить экспериментальную зависимость  $U_{вых}(t)$ . Нажав кнопку «Сохранить результаты испытаний» получить файл *result.txt*. Используя данные из файла *result.txt* можно анализировать функцию преобразования  $U_{вых}(\Omega)$ .

Реализован модуль моделирования статистических испытаний методом Монте-Карло, обеспечивающий определение допусков на конструктивные параметры преобразователя, определение критически значимых параметров, оказывающих влияние на точностные характеристики преобразователя, а также оптимизацию конструкции с учётом технологических разбросов и возможных отклонений в процессе производства. В ПО выбрать вкладку «Статистические испытания» и внести параметры, полученные из вкладки «РЧЭ» в соответствующие поля (Рисунок 82).

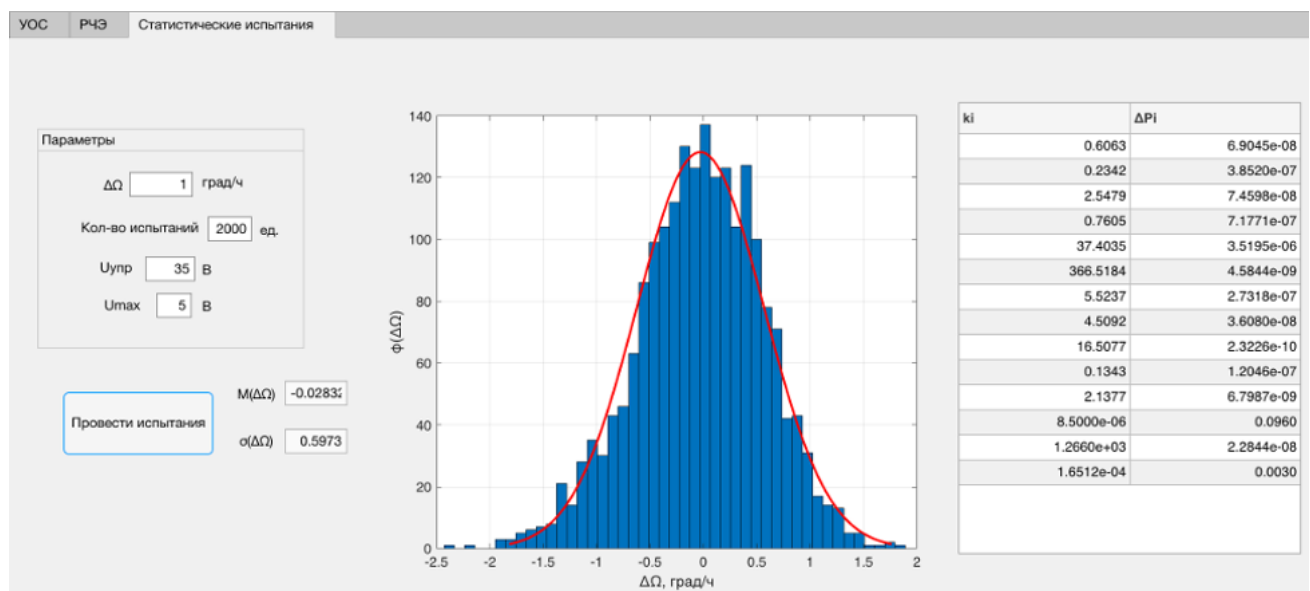


Рисунок 82 – Окно программы для выполнения моделирования статистических испытаний методом Монте-Карло

Разработанное программное обеспечение ориентировано на применение в научных исследованиях и инженерных разработках



микрооптоэлектромеханических систем, обеспечивая анализ конструкции и определение допусков на параметры преобразователей.

Разработана методика расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ по заданным техническим требованиям. Алгоритм расчета позволяет определить основные параметры преобразователя и их допустимые отклонения, выход изготовленных преобразователей, удовлетворяющих заданным техническим требованиям. Результаты численного моделирования МОЭМ преобразователей с рассчитанными допусками на отклонения параметров показали возможность технической реализации МОЭМ преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.

#### **Выводы по Главе 4**

Исследован двухволновый режим в УОС на основе ОТЭ. Показана возможность управления параметрами УОС без изменения его структуры. Предложенный двухволновый УОС на основе ОТЭ расширяет динамический диапазон рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на 2,33 дБ при использовании наиболее спектрально удаленных друг от друга длин волн. Определено, что с помощью двухволнового преобразования можно компенсировать технологические погрешности при изготовлении рамочных МОЭМ преобразователей, устанавливая величину балансирующего коэффициента  $B_P$  на этапе калибровки. Исследована возможность использования тонкопленочных структур для реализации двухволнового УОС на основе ОТЭ.

Разработана функциональная схема адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с двухволновым УОС на основе ОТЭ.

Разработан алгоритм адаптации рамочного МОЭМ преобразователя к воздействию линейного ускорения, позволяющий уменьшить погрешность измерения угловой скорости до 0,02%.

Проведено исследование изменения показателей преломления призм УОС от температурных воздействий. Для компенсации температурной погрешности предложено использовать термооптический эффект в УОС на основе ОТЭ, что

позволяет уменьшить дополнительную температурную погрешность с  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне  $-40^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$ .

Разработан алгоритм расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта, позволяющая определять коэффициенты влияния основных параметров на выходную характеристику по среднему квадратическому отклонению основной погрешности и допустимые отклонения, обеспечивающие выполнение заданных технических требований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные результаты.

1. Разработана функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной оптической измерительной системой на основе ОТЭ. Определены параметры преобразователя, обеспечивающие работу УОС на основе ОТЭ и уменьшение нелинейности функции преобразования до  $0,12 \text{ } \%$ . В диапазоне перемещений ( $80 \dots 800$ ) нм основная среднеквадратичная погрешности определения положения рамочного чувствительного элемента составила  $26 \text{ пм}$ .

2. Разработана уточненная математическая модель рамочного чувствительного элемента, в которой учтено газодинамическое демпфирование, влияющее на работу УОС на основе ОТЭ. Показано, что добротность РЧЭ, работающего совместно с УОС на основе ОТЭ, незначительно изменяется в области давлений от  $0,001 \text{ Па}$  до  $0,1 \text{ Па}$ . Это дает возможность сохранить добротность на уровне  $7,5 \cdot 10^4$  при граничном значении среднего уровня вакуума, что упрощает задачу поддержания необходимого разрежения внутри корпуса преобразователя.

3. Разработана новая функциональная схема и математическая модель узла оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта. Проведённое экспериментальное исследование УОС на основе ОТЭ показало

согласование результатов математического моделирования с экспериментальными данными. Получены новые выражения для расчета максимальной чувствительности, начального зазора и диапазона измерения перемещений УОС на основе ОТЭ.

4. Согласно проведенному исследованию, влияние линейного ускорения на рамочный МОЭМ преобразователь угловой скорости увеличивает погрешность измерения угловой скорости до 21,5 %. Исследованы два метода компенсации погрешности от линейного ускорения, основанные на управлении коэффициентом усиления и использовании силовой обратной связи. Получены выражения для управления коэффициентом усиления в заданных диапазонах угловых скоростей и линейных ускорений. Предложен алгоритм компенсации погрешности, основанный на управлении коэффициентом усиления и использовании силовой обратной связи, который позволяет уменьшить погрешность измерений до 0,018 % в диапазоне действия линейного ускорения  $\pm 90 g$  вдоль осей движения и чувствительности.

5. Исследовано двухволновое преобразование в УОС на основе ОТЭ. Определены длины волн источников излучения, позволяющие расширить динамический диапазон в 1,7 раза. Диапазон измерения перемещений рамочного чувствительного элемента узлом оптического считывания с двухволновым преобразованием составляет 20 нм...800 нм. Применение режима двухволнового преобразования в узлах оптического считывания на основе ОТЭ обеспечивает возможность изменения параметров рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости за счет регулирования соотношения мощностей спектральных составляющих.

6. Исследовано влияние температурных воздействия на характеристики рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости. Предложена модель оценки влияния температуры на пороговую чувствительность преобразователя угловой скорости в температурном диапазоне  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Предложен алгоритм температурной коррекции выходного сигнала, использующий термооптический

эффект в УОС на основе ОТЭ, с дополнительной погрешностью измерения угловой скоростью не более 0,04 %/°C.

7. Разработана методика расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, позволяющая определить основные параметры, влияющие на основную погрешность преобразователя, их допустимые отклонения и выход изготовленных преобразователей, удовлетворяющих заданным техническим требованиям. Определены допустимые отклонения параметров рамочного МОЭМ преобразователя, обеспечивающие смещение нулевого сигнала скорости 0,6 град/ч.

Таким образом, решена научно-техническая задача повышения точности измерения угловой скорости микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости, за счет применения четырехканальной оптической измерительной системы, алгоритмов адаптации к внешним дестабилизирующим факторам и двухволнового узла оптического считывания на основе ОТЭ, обеспечивающего прецизионное считывание нанометровых перемещений рамочного чувствительного элемента, имеющая важное значение для определения параметров движения объектов информационно-измерительными системами.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- |     |      |   |
|-----|------|---|
| 1.  | АЦП  | аналогово-цифровой преобразователь                |
| 2.  | БО   | блок обработки                                    |
| 3.  | ГС   | генератор сигналов                                |
| 4.  | ИИ   | источник оптического излучения                    |
| 5.  | ИИУ  | информационно-измерительная и управляющая система |
| 6.  | КОЭ  | клиновидный оптический элемент                    |
| 7.  | ЛПД  | линейный пьезодвигатель                           |
| 8.  | МОЭМ | микрооптоэлектромеханический                      |
| 9.  | МЭМС | микроэлектромеханическая система                  |
| 10. | ОТЭ  | оптический туннельный эффект                      |
| 11. | ОУ   | операционный усилитель                            |
| 12. | ПА   | пьезоактюатор                                     |
| 13. | ПЗУ  | постоянное запоминающее устройство                |
| 14. | ПУС  | преобразователь угловой скорости                  |
| 14. | ППВО | Призма полного внутреннего отражения              |
| 15. | ПУС  | преобразователь угловой скорости                  |
| 16. | ПФ   | полосовой фильтр                                  |
| 17. | РЧЭ  | рамочный чувствительный элемент                   |
| 18. | СВК  | система возбуждения колебаний                     |
| 19. | СД   | синхронный детектор                               |
| 20. | УОС  | узел оптического считывания                       |
| 21. | ФНЧ  | фильтр низкой частоты                             |
| 22. | ФП   | фотоприемник                                      |
| 23. | ЧЭ   | чувствительный элемент                            |
| 24. | ЭК   | электроды компенсации                             |
| 25. | I-U  | «ток-напряжение»                                  |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, and C. Campanella, "Gyroscope technology and applications: a review in the industrial perspective," *Sensors*, 2017, 17(10): 2284.
2. Faisal I. A., Purboyo T. W., Ansori A. S. R. A review of accelerometer sensor and gyroscope sensor in IMU sensors on motion capture // *J. Eng. Appl. Sci.* – 2019. – Т. 15. – №. 3. – С. 826-829.
3. Jarmola A. et al. Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope // *Science advances*. – 2021. – Т. 7. – №. 43. – С. eabl3840.
4. Soshenko V. V. et al. Nuclear spin gyroscope based on the nitrogen vacancy center in diamond // *Physical Review Letters*. – 2021. – Т. 126. – №. 19. – С. 197702.
5. Larkin K. et al. A review on vibrating beam-based micro/nano-gyroscopes // *Microsystem Technologies*. – 2021. – С. 1-25.
6. Qin Z. et al. The effect of the anisotropy of single crystal silicon on the frequency split of vibrating ring gyroscopes // *Micromachines*. – 2019. – Т. 10. – №. 2. – С. 126.
7. Jia J. et al. Overview and analysis of MEMS Coriolis vibratory ring gyroscope // *Measurement*. – 2021. – Т. 182. – С. 109704.
8. Чекмарев Е. А., Звижинский А. И. ОБЗОР РОССИЙСКИХ РАЗРАБОТОК МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ // *Инновации технических решений в машиностроении и транспорте*. – 2022. – С. 256-260.
9. Волчихин И. А. и др. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – №. 9-2. – С. 59-78.
10. Маслов А. А. и др. Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций // *Гироскопия и навигация*. – 2023. – Т. 31. – №. 1. – С. 120.
11. Прохорцов А. В., Балабаев О. С. ОБЗОР БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И

ИМПОРТНОГО ПРОИЗВОДСТВА //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №. 7. – С. 350-355.

12. Greiff P. et al. Silicon monolithic micromechanical gyroscope //TRANSDUCERS'91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers. – IEEE, 1991. – С. 966-968.

13. Alper S. E., Akın T. A planar gyroscope using a standard surface micromachining process. – 2000.

14. Maenaka K. et al. Design, fabrication and operation of MEMS gimbal gyroscope //Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Т. 121. – №. 1. – С. 6-15.

15. Norgia M., Donati S. Hybrid opto-mechanical gyroscope with injection-interferometer readout //Electronics Letters. – 2001. – Т. 37. – №. 12. – С. 756-758.

16. Sheikhaleh A., Jafari K., Abedi K. Design and analysis of a novel MOEMS gyroscope using an electrostatic comb-drive actuator and an optical sensing system //IEEE Sensors Journal. – 2018. – Т. 19. – №. 1. – С. 144-150.

17. Trigona C., Andò B., Baglio S. Development of integrated vibratory-gyroscopes based on photonic bandgap materials //2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). – IEEE, 2015. – С. 114-117.

18. Trigona C., Andò B., Baglio S. Fabrication and characterization of an MOEMS gyroscope based on photonic bandgap materials //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2016. – Т. 65. – №. 12. – С. 2840-2852.

19. Li M., Ding X., Qin S. Design of a novel lower-noise tunneling magnetoresistance micromachined gyroscope //Microsystem Technologies. – 2019. – Т. 25. – С. 1447-1454.

20. Ковалёва К. М., Поздьяев В. И. Анализ перспективных конструктивных схем осевых микроакселерометров //Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации. – 2023. – С. 210-216.

21. Сайпулаев М. Р. и др. Исследование свободных колебаний микромеханического гироскопа с учетом неортогональности осей торсионов

//Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 231-238.

22. Пауткин В. Е. Формообразование элементов МЭМС //Датчики и системы. – 2018. – №. 8-9. – С. 56-61.

23. Bernstein J. et al. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope // [1993] Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems. – IEEE, 1993. – С. 143-148.

24. Endean D. et al. Near-navigation grade tuning fork MEMS gyroscope //2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). – IEEE, 2019. – С. 1-4.

25. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп : А Wave Solid-State Gyroscope / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов. – Москва : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 1985. – 126 с

26. Басараб М. А. и др. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение». – 2014. – №. 4 (97). – С. 80-96.

27. Лунин Б. С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. – М.:Изд-во МАИ, 2005. – 224 с

28. Cho J. et al. High-Q navigation-grade fused-silica micro birdbath resonator gyroscope //2021 IEEE sensors. – IEEE, 2021. – С. 1-4.

29. Cho J. Y., Najafi K. A high-q all-fused silica solid-stem wineglass hemispherical resonator formed using micro blow torching and welding //2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – IEEE, 2015. – С. 821-824.

30. Nagourney T. et al. 259 second ring-down time and 4.45 million quality factor in 5.5 kHz fused silica birdbath shell resonator //2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). – IEEE, 2017. – С. 790-793.



31. Li M., Ding X., Qin S. Design of a novel lower-noise tunneling magnetoresistance micromachined gyroscope //Microsystem Technologies. – 2019. – Т. 25. – С. 1447-1454.
32. Li M. et al. Structural design and simulation of a micro-gyroscope based on nano-grating detection //Microsystem Technologies. – 2019. – Т. 25. – С. 1627-1637.
33. Xie K. et al. Micro-opto-electro-mechanical gyroscope based on the Talbot effect of a single-layer near-field diffraction grating //Applied Optics. – 2021. – Т. 60. – №. 13. – С. 3724-3731.
34. Ус Н. А., Задорожний С. П. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности конструктивно-технологического решения //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – №. 2. – С. 65-71.
35. Закиров Р. Г. и др. Преимущества волоконно-оптического гироскопа на основе эффекта саньяка //Проблемы автоматики и управления. – 2017. – №. 1. – С. 64-68.
36. Усманова З. С., Умарова Л. Х. ГИРОСКОП И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ //Актуальные проблемы естественных наук. – 2021. – С. 362-370.
37. Венедиктов В. Ю., Филатов Ю. В., Шалымов Е. В. Современное состояние оптических резонаторных гироскопов //Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31. – №. 1. – С. 120.
38. Пешехонов В. Г. Перспективы гироскопии //XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. – 2019. – С. 36-38.
39. Sa-Ngiamsak W. et al. Micro-optical gyroscope using a PANDA ring resonator //IEEE Sensors Journal. – 2012. – Т. 12. – №. 8. – С. 2609-2613.
40. Niesel T., Dietzel A. Micro-clamps for precise positioning of 120 silicon double mirrors in a MOEMS gyroscope //Microelectronic Engineering. – 2016. – Т. 159. – С. 27-31.
41. Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И. И. Зеемановские лазерные гироскопы //Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 2. – С. 171-179.

42. Chow W. W. et al. The ring laser gyro //Reviews of Modern Physics. – 1985. – Т. 57. – №. 1. – С. 61.
43. Вареник А. И. и др. Цифровая система регулирования и стабилизации частоты четырехчастотного зеемановского лазерного гироскопа //Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 3. – С. 276-282.
44. LEFÈRE H. C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope //Optical review. – 1997. – Т. 4. – №. 1A. – С. 20-27.
45. Драницына Е. В., Егоров Д. А., Унтилов А. А. Современное состояние разработок волоконно-оптических гироскопов и перспективы их развития //Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31. – №. 4. – С. 123.
46. Lloyd S. W., Fan S., Digonnet M. J. F. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope //Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Т. 31. – №. 13. – С. 2079-2085.
47. Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Волоконно-оптический гироскоп с фазовым информационным сигналом //Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2021. – №. 2. – С. 23-35.
48. Song N. et al. Advanced interferometric fiber optic gyroscope for inertial sensing: A review //Journal of lightwave technology. – 2023. – Т. 41. – №. 13. – С. 4023-4034.
49. Dell'Olio F. et al. Miniaturization of interferometric optical gyroscopes: a review //IEEE Sensors Journal. – 2023. – Т. 23. – №. 24. – С. 29948-29968
50. Wang Z. et al. Recent advancements in resonant fiber optic gyro—A review //IEEE Sensors Journal. – 2022. – Т. 22. – №. 19. – С. 18240-18252.
51. Terrel M. A., Digonnet M. J. F., Fan S. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber //Journal of lightwave technology. – 2011. – Т. 30. – №. 7. – С. 931-937.
52. КРИШТОП В. В. Характеристики различных чувствительных элементов миниатюрного резонансного оптического гироскопа //Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – №. 4. – С. 59-69.
53. Zarinetchi F., Smith S. P., Ezekiel S. Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope //Optics letters. – 1991. – Т. 16. – №. 4. – С. 229-231.

54. Li J., Suh M. G., Vahala K. Microresonator brillouin gyroscope //Optica. – 2017. – Т. 4. – №. 3. – С. 346-348.
55. Lai Y. H. et al. A chip-based Brillouin laser gyroscope //2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). – IEEE, 2020. – С. 1-8.
56. Shiozawa T. et al. A dual axis thermal convective silicon gyroscope //Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society, 2004. – IEEE, 2004. – С. 277-282.
57. Yazdi N., Ayazi F., Najafi K. Micromachined inertial sensors //Proceedings of the IEEE. – 1998. – Т. 86. – №. 8. – С. 1640-1659.
58. Бердюгин А. В., Лычев Д. И. Стенд для оценки частотных характеристик малогабаритных датчиков угловых скоростей //Навигация и управление движением. – 2006. – С. 107-112.
59. Северов Л. А. и др. Структура и характеристики волнового микромеханического датчика угловой скорости с кольцевым резонатором //Гироскопия и навигация. – 2014. – №. 3. – С. 59-72.
60. Тимошенков С. П. и др. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления //Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №. 1. – С. 58-67.
61. Волков В. Л., Хрисанова М. В. Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости //Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева. – 2013. – №. 2 (99). – С. 329-338.
62. 3-axis gyroscope for industrial applications, digital output, extended operating temperature range // STMicroelectronics URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/i3g4250d.html> (дата обращения: 04.06.2024).
63. Data sheet BMG160 Digital, triaxial gyroscope sensor // Micro-semiconductor URL: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/a7-BMG160.pdf> (дата обращения: 04.06.2024).
64. Data sheet BMG250 Low noise, low power triaxial gyroscope // Micro-semiconductor URL: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/42-BMG250.pdf> (дата обращения: 05.06.2024).

65. Data sheet ADXRS453 High Performance, Digital Output Gyroscope // Infinite electronic URL: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/4a-ADXRS453BRGZ.pdf> (дата обращения: 05.06.2024).
66. Инерциальные МЭМС-датчики производства АО «ГИРООПТИКА» // СТА URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2018/2018-5/116443/> (дата обращения: 05.06.2024).
67. ТГ-19 // Лаборатория микроприборов URL: <https://mp-lab.ru/products/uglovye-dus/tg-19/> (дата обращения: 05.06.2024).
68. Данильцев Д., Кабанов А., Пономарёв Ю. Инерциальные МЭМС-системы от НПП «ГИРОНАВ» // Компоненты и технологии. – 2021. – №. 1. – С. 16-17.
69. Gustavson T. L., Bouyer P., Kasevich M. A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope // Physical review letters. – 1997. – Т. 78. – №. 11. – С. 2046.
70. Gustavson T. L., Landragin A., Kasevich M. A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope // Classical and Quantum Gravity. – 2000. – Т. 17. – №. 12. – С. 2385.
71. Meyer D., Larsen M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation // Gyroscopy and Navigation. – 2014. – Т. 5. – №. 2. – С. 75-82.
72. Noor R. M., Shkel A. M. MEMS components for NMR atomic sensors // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2018. – Т. 27. – №. 6. – С. 1148-1159.
73. Воронов А. С., Ривкин Б. С. Гироскоп на волнах де Бройля. Просто о сложном // Гироскопия и навигация. – 2021. – Т. 29. – №. 2. – С. 126-139.
74. Бусурин В. И. и др. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта // Измерительная техника. – 2023. – №. 5. – С. 50-55.
75. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд., испр.: Пер. с англ. С. Н. Бреуса и др. / Под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1973. 719 с.

76. Шварцбург А. Б. Туннелирование электромагнитных волн—парадоксы и перспективы //Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – №. 1. – С. 43-58.
77. Jian A. Q., Zhang X. M. Resonant optical tunneling effect: recent progress in modeling and applications //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2013. – Т. 19. – №. 3. – С. 9000310-9000310
78. Balcou P., Dutriaux L. Dual optical tunneling times in frustrated total internal reflection //Physical review letters. – 1997. – Т. 78. – №. 5. – С. 851.
79. Jian A. et al. Optical and quantum models of resonant optical tunneling effect //Optics Communications. – 2018. – Т. 428. – С. 191-199.
80. Sharp J. S., Poole S. F., Kleiman B. W. Optical measurement of contact forces using frustrated total internal reflection //Physical Review Applied. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 034051
81. Патент № 2804679 С1 Российская Федерация, МПК G01В 11/02, G02В 6/34. волоконно-оптический датчик перемещений : № 2023106942 : заявл. 23.03.2023 : опубл. 03.10.2023 / С. Г. Штек, М. А. Жеглов, В. В. Беляков [и др.] ; заявитель Акционерное общество "Государственный научно-исследовательский институт приборостроения".
82. Экспериментальное исследование характеристик преобразователя перемещений на основе оптического туннельного эффекта / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, С. Г. Штек, М. А. Жеглов // X международная конференция по фотонике и информационной оптике : Сборник научных трудов X Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Москва, 27–29 января 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2021. – С. 423-424.
83. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие / В. Я. Распопов. – Москва : Машиностроение, 2007. – 400 с. – ISBN 5-217-03360-6.
84. Younis M. I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. – Springer Science & Business Media, 2011. – Т. 20.

85. Tausiff M., Ouakad H. M., Alqahtani H. Global nonlinear dynamics of MEMS arches actuated by fringing-field electrostatic field //Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – Т. 45. – С. 5959-5975.
86. Tajaddodianfar F., Yazdi M. R. H., Pishkenari H. N. Nonlinear dynamics of MEMS/NEMS resonators: analytical solution by the homotopy analysis method //Microsystem Technologies. – 2017. – Т. 23. – С. 1913-1926.
87. Мигранов А.Б. Разработка методами полунатурного моделирования перспективных микроэлектромеханических систем (МЭМС) //Труды Института механики УНЦ РАН. – 2006. – Т. 4. – С. 288-305.
88. Veijola T. et al. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer //Sensors and Actuators A: Physical. – 1995. – Т. 48. – №. 3. – С. 239-248.
89. Starr J. B. Squeeze-film damping in solid-state accelerometers //IEEE 4th Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop. – IEEE, 1990. – С. 44-47.
90. Acar C., Shkel A. MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness. – Springer Science & Business Media, 2008.
91. Lifshitz R., Roukes M. L. Thermoelastic damping in micro-and nanomechanical systems //Physical review B. – 2000. – Т. 61. – №. 8. – С. 5600.
92. He C. et al. A Single-Loop Narrow-Band Force Rebalance Control Method with Temperature Self-Compensation for a MEMS Gyroscope //2025 IEEE 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – IEEE, 2025. – С. 924-927.
93. Hu H. et al. Design, Analysis, and Simulation of a MEMS Tuning Fork Gyroscope with a Mechanical Amplification Structure //Micromachines. – 2025. – Т. 16. – №. 2. – С. 195.
94. Белоусов Е.О. Метод подавления шумов схемы обработки микроэлектромеханического датчика угловой скорости //Труды МАИ. – 2016. – №. 90. – С. 14.

95. Тимошенков С.П. и др. Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика //Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28. – №. 5. – С. 642-648.

96. Тимошенков С.П. и др. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления //Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №. 1. – С. 58-67.

97. Legtenberg R., Groeneveld A. W., Elwenspoek M. Comb-drive actuators for large displacements //Journal of Micromechanics and microengineering. – 1996. – Т. 6. – №. 3. – С. 320.

98. Разработка рамочного преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта / Бусурин В.И., Казарьян А.В., Васецкий С.О., Чжи П.Л. // XXX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2021 года

99. Патент № 2790042 С1 Российская Федерация, МПК G01С 19/56. Микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости : № 2022129761 : заявл. 16.11.2022 : опубл. 14.02.2023 / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, С. Г. Штек, М. А. Жеглов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт.

100. Васецкий С. О. Исследование характеристик рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта //Авиация и космонавтика. – 2022. – С. 203-204.

101. Исследование преобразователя наноперемещений на основе оптического туннельного эффекта / Бусурин В.И., Коробков В.В., Васецкий С.О. // XXX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2021 года.

102. Single-Axis Flexure Translation Stages: 5 mm Travel // Thorlabs URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=720](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=720) (дата обращения: 12.06.2024).

103. Васецкий С.О., Бусурин В. И., Чжи П. Л. Анализ влияния линейного ускорения на рамочный МОЭМ-преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта //Авиация и космонавтика. – 2021. – С. 189-190.

104. Shtek S. G. et al. Development of a Sensitive Element of a Micro-Opto-Electromechanical Accelerometer //2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2023. – С. 1-2.

105. Васецкий С.О. Компенсация влияния линейного ускорения на рамочный микро-опто-электромеханический преобразователь угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта / С. О. Васецкий, В. И. Бусурин, П. Л. Чжи // XLVI Академические чтения по космонавтике : Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах, Москва, 25–28 января 2022 года. Том 3. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – С. 429-431.

106. Бусурин, В. И. Компенсация влияния линейного ускорения на параметры рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, К. А. Коробков // Измерительная техника. – 2023. – № 4. – С. 31-37. – DOI 10.32446/0368-1025it.2023-4-31-37.

107. Патент № 2806242 С1 Российская Федерация, МПК G01С 19/56, G01Р 3/44. Компенсационный микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости : № 2023123201 : заявл. 06.09.2023 : опубл. 30.10.2023 / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, А. В. Казарьян ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт.

108. Васецкий С.О. Исследование влияния температуры на рамочный МОЭМ-преобразователь угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта / В.И. Бусурин, С.О. Васецкий, П.Л. Чжи // 29-я Всероссийская



межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022»: тезисы докладов, Зеленоград, 21-22 апреля 2022 года

109. Passaro V. M. N. et al. Recent advances in integrated photonic sensors //Sensors. – 2012. – Т. 12. – №. 11. – С. 15558-15598.

110. Васецкий С. О., Бусурин В. И., Казарьян А. В. Двухволновой узел оптического считывания датчика угловой скорости //XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика СП Королёва и других выдающихся отечественных ученых—пионеров освоения. – 2023. – Т. 24. – С. 252.

111. Бусурин В.И. Использование двухволнового преобразования для расширения диапазона измерения и температурной компенсации рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, А. В. Казарьян // Датчики и системы. – 2023. – № 6(272). – С. 40-45. – DOI 10.25728/datsys.2023.6.7.

112. Васецкий С.О. Компенсация температурной погрешности микрооптоэлектромеханического датчика угловой скорости с помощью термооптического эффекта / С. О. Васецкий // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : Сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции, Алушта, 14–20 сентября 2023 года. – Москва, 2023. – С. 79.

113. Zang J. et al. The resonance frequency shift in an SOI nano-waveguide microring resonator //Journal of Semiconductors. – 2013. – Т. 34. – №. 4. – С. 044009.

114. Xu H. et al. Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures //Optics Express. – 2014. – Т. 22. – №. 3. – С. 3098-3104.

115. Arbabi A., Goddard L. L. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub> using microring resonances //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 19. – С. 3878-3881.

116. Gray M. B. et al. Photodetector designs for low-noise, broadband, and high-power applications //Review of scientific instruments. – 1998. – Т. 69. – №. 11. – С. 3755-3762.

117. Орлов А. И. Метод статистических испытаний в прикладной статистике //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №. 5. – С. 67-79.
118. Васецкий С.О. Определение критических параметров рамочных микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости методом статистических испытаний / С. О. Васецкий // Авиация и космонавтика : Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 126-127.
119. Pal P. et al. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review //Micro and Nano Systems Letters. – 2021. – Т. 9. – С. 1-59
120. Lerond T. et al. Surface micromachining of chip-edge silicon microcantilevers using xenon difluoride etching of silicon-on-insulator //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2021. – Т. 31. – №. 8. – С. 085001.
121. Xia D. et al. Neon and helium focused ion beam etching of resist patterns //Nanotechnology. – 2020. – Т. 31. – №. 47. – С. 475301.
122. Tan S. et al. Nanomachining with a focused neon beam: A preliminary investigation for semiconductor circuit editing and failure analysis //Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2011. – Т. 29. – №. 6.
123. Huang J. C., Hu Y., Liu H. S. Study of ultrasound-assisted nanomachining on monocrystalline silicon //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1176. – №. 5. – С. 052055
124. Huff M. Recent advances in reactive ion etching and applications of high-aspect-ratio microfabrication //Micromachines. – 2021. – Т. 12. – №. 8. – С. 991.
125. Бусурин В.И. Алгоритм расчета микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости с оптическим считыванием / В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, Р. П. Булычев // Датчики и системы. – 2024. – № 3(275). – С. 23-30. – DOI 10.25728/datsys.2024.3.4.