

На правах рукописи



Васецкий Станислав Олегович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Диссертационная работа выполнена на кафедре 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Бусурин Владимир Игоревич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Тимошенко Сергей Петрович,
доктор технических наук, профессор, НИУ
МИЭТ, директор Института нано- и
микросистемной техники;

Горшков Борис Георгиевич,
доктор технических наук, Институт общей
физики им. А.М. Прохорова РАН,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)»

Защита диссертации состоится «3» декабря 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 32.1.008.01 при ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» по адресу: 119361, г. Москва, ул. Озерная, д.46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ВНИИОФИ» и на веб-сайте <https://www.vniiofi.ru/disser.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2025г.

Ученый секретарь диссертационного совета
32.1.008.01, доктор технических наук



В.Л. Минаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В информационно-измерительных и управляющих системах малогабаритных подвижных объектов необходимо использовать данные о параметрах движения (угловых скоростях, линейных ускорениях). Современные малогабаритные микро-электромеханические системы (МЭМС) для определения угловой скорости используют резонаторы камертонного, балочного, роторного, рамочного и кольцевого типа. В МЭМС-структурах под действием угловой скорости происходит деформация чувствительного элемента (ЧЭ), а считывание информации о перемещениях ЧЭ, пропорциональных угловой скорости, осуществляют емкостным или индуктивным методом. В МЭМС преобразователях ЧЭ перемещается на расстояние единицы-десятки микрометров. При этом измерение малых угловых скоростей объектов ограничивается шумовыми характеристиками емкостных узлов считывания, сужается динамический диапазон преобразователя, а функция преобразования таких преобразователей существенно нелинейна. Кроме того, при уменьшении зазора между обкладками конденсатора контура считывания перемещений, при максимальных деформациях ЧЭ могут создаться условия для электрического пробоя, нарушающего работу преобразователя. Для устранения этого и обеспечения измерения малых угловых скоростей информационно-измерительными системами до долей градуса в час используются мини-резонаторы на модах «шепчущей галереи» или узлы оптического считывания (УОС) на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Метод измерения с использованием ОТЭ не требует применения перестраиваемых источников оптического излучения (ИИ), позволяет детектировать положение ЧЭ с высоким разрешением в нанометровом диапазоне, обеспечивает электрическую развязку контура съема информации от цепи возбуждения колебаний ЧЭ и измерение малых угловых скоростей при относительно небольшой амплитуде первичных колебаний ЧЭ. При построении информационно-измерительных систем с оптическим считыванием для измерения малых угловых скоростей целесообразно использовать адаптивные рамочные преобразователи на основе ОТЭ, способные обеспечить измерение по одной или нескольким осям. При этом для таких микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) преобразователей не в полной мере разработаны математические модели, учитывающие мультифизические связи и свойства применяемых материалов, действующие силы на узлы преобразователя и алгоритмы коррекции выходных сигналов для повышения точности измерений. Поэтому разработка адаптивных рамочных преобразователей информационно-измерительных систем на основе ОТЭ для измерения малых угловых скоростей является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие прецизионных измерений угловых скоростей внесен российскими и зарубежными учеными, такими как В.А. Матвеев, В.Ф. Журавлев, В.Я. Распопов, С.П. Тимошенко, В.Д. Вавилов, В.И. Галкин, Дж. Фрайден, С. Зарабади, Р. Элей, С. МакВильям, Б.Дж. Галлачер, Дж. С. Бюрдесс, А.Дж. Харрис и др.

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 МОЭМ преобразователей на основе ОТЭ в РФ и за рубежом находится на этапе разработки опытных образцов.

Объектом исследования является адаптивный рамочный МОЭМ 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.

Цель и основные задачи диссертации

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 следующего ряда **научных 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.

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 ± 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%/°С в интервале температур от -40 °С до +60 °С 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.

Теоретическая и 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 ± 90 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.

Методологии и методы исследования. При разработке математической модели адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ применялись методы волновой оптики, теории упругости и механики деформируемого твёрдого тела, теории автоматического управления, математического и полунатурного моделирования, технологические и конструкторские методы.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 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 ± 90 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.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ, 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».

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.

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, XXXII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта 2021, Дивноморское 2023; 20-я, 21-я, 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва (2021, 2022, 2023); XLVI, XLVII Академические чтения по космонавтике, Москва (2022, 2023); 29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022», Зеленоград, 2022; XXX юбилейная Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 2023.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них в ведущих научных журналах включенных в перечень ВАК РФ – 4 публикации, в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных – 1, в сборниках материалов конференций международного и всероссийского уровней – 10 тезисов докладов, получено 3 патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 165 страниц. Работа содержит 82 рисунка и 4 таблицы. Список использованных источников включает 125 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, приведены научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, приведены 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 МЭМС преобразователи обладают низкой точностью по сравнению с другими типами преобразователей угловой скорости, чувствительностью к линейным ускорениям, низкой стабильностью нуля, требуют подключения дополнительных корректирующих устройств. Показана перспективность развития направления, связанного с исследованием миниатюрных преобразователей угловых скоростей на основе ОТЭ. Сформулированы частные задачи исследования по повышению точности измерений угловой скорости в различных условиях работы, которые подлежат решению в ходе разработки адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ.

Вывод: проведенное исследование подтверждает, что использование в МЭМС преобразователях угловой скорости УОС на основе ОТЭ обеспечивает измерение индуцированных угловой скоростью перемещений в субмикрометровом диапазоне и улучшает помехозащищенность, за счет использования сигналов различной физической природы в системе возбуждения колебаний и в узле считывания информации.

Во второй главе разработана функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ, содержащая: гребенчатый привод первичных колебаний; два УОС на основе ОТЭ, состоящие из источника излучения (ИИ), фотоприемников (ФП) и призм полного внутреннего отражения (ППВО); блок обработки и управления (Рисунок 1).

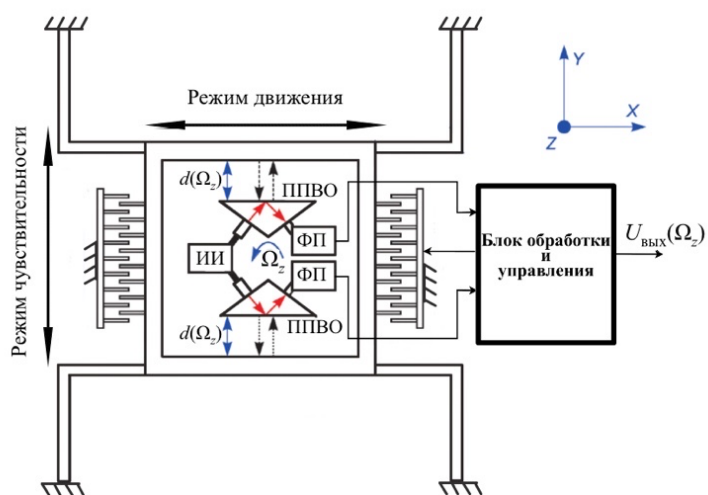


Рисунок 1 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ

Колебания в режиме движения РЧЭ возбуждаются вдоль оси OX с помощью сил электростатического взаимодействия на частоте резонанса РЧЭ. Для возбуждения колебаний в режиме движения используются гребенчатые электростатические приводы. Под действием угловой скорости Ω_z создается сила Кориолиса F_K вдоль оси OY , вызывающая колебания РЧЭ в режиме чувствительности, которые регистрируются УОС на основе ОТЭ.

В УОС на основе ОТЭ ИИ создает оптическое излучение длиной волны λ и мощностью P . Если кромка РЧЭ приближается к местам отражения оптического излучения на расстояние d меньше длины волны λ , то часть этого излучения будет туннелировать в РЧЭ. Туннелируемая оптическая мощность зависит от отражательной способности R границы раздела сред, поляризации излучения, ширины зазора d , угла падения

θ оптического излучения на границу раздела двух сред, обеспечивающего условие полного внутреннего отражения. Определены нормированные на длину волны λ чувствительность, диапазон измерения перемещений РЧЭ и начальный зазор для часто используемых материалов ППВО: 1 – SiO_2 , 2 – Si_3N_4 , 3 – $LiNbO_3$, 4 – Si . Показатели преломления материалов n_{1i} (где i – второй индекс, обозначающий порядковый номер материала) равны: $n_{11} = 1,42$, $n_{12} = 1,98$, $n_{13} = 2,26$, $n_{14} = 3,48$. Нормированный диапазон измерений $\Delta d/\lambda$ определяется по уменьшению нормированной чувствительности $S(d/\lambda)$ на 3 дБ. Начальный зазор d_0/λ соответствует середине полученного диапазона изменения зазоров. Диапазон субмикрометровых перемещений составил от $0,06\lambda$ до $0,52\lambda$.

Для рассмотренного набора материалов ППВО определены зависимости расчётного параметра ($S_{\text{макс}}$, $\Delta d/\lambda$, d_0/λ) от угла падения θ излучения и показателя преломления n_1 :

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

$$\Delta d/\lambda = (-0,0096n_1^2 + 0,2134n_1 - 1,026)\theta + 1,464n_1^{-1,14} - 0,1349,$$

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

Проведены экспериментальные исследования макета УОС на основе ОТЭ для длин волн источника излучения $\lambda = 1,31$ мкм и $\lambda = 1,55$ мкм, которые подтвердили возможность измерения субмикронных перемещений РЧЭ (Рисунок 2).

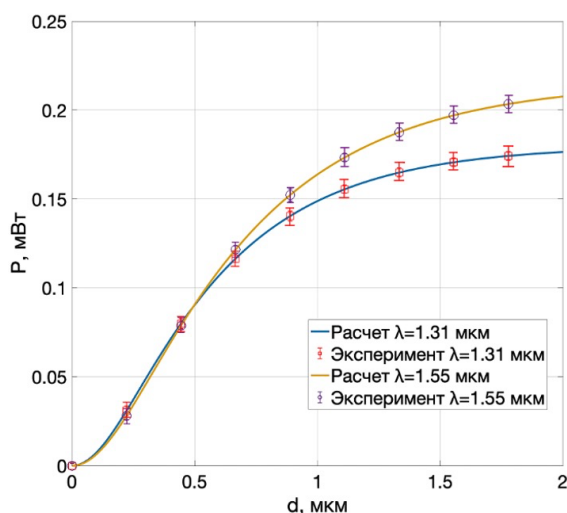


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности оптического излучения P от зазора d

приводит к значительному изменению объема газовой среды (на 30-50 %), и сдавленная газовая пленка может оказывать существенное влияние на динамику РЧЭ. Проведен анализ влияния газового демпфирования РЧЭ с учетом влияния эффектов сдавленной и скользящей газовых пленок с использованием модели Стокса. Показано, что для зазоров, образованных торцевыми областями штырей гребенок электростатического привода $H = 2$ мкм и площади перекрытия между поверхностями подвижной и неподвижной частями гребенчатого привода $A = 0,01$ мм², добротность РЧЭ незначительно изменяется в области давлений от 0,001 Па до 0,1 Па. Это позволяет сохранить добротность на уровне $7,5 \cdot 10^4$ при граничном значении среднего уровня вакуума, что упрощает задачу герметизации и поддержания необходимого разрежения внутри корпуса преобразователя.

Определено, что при работе одного УОС нелинейность функции преобразования составляет 6 % в диапазоне перемещений РЧЭ ± 420 нм, соответствующем измеряемой угловой скорости $\Omega_z = \pm 360$ град/с. Для повышения линейности функции преобразования

Проведено исследование влияния конструктивных параметров на работу МОЭМ преобразователя угловой скорости в зоне оптического туннелирования. Определены параметры РЧЭ, которые обеспечивают амплитуду колебаний РЧЭ в режиме чувствительности, равную $\Delta u_{\text{макс}} = 420$ нм, что соответствует диапазону работы УОС на основе ОТЭ с высокой чувствительностью.

При работе УОС на основе ОТЭ происходит изменение относительного зазора между РЧЭ и ППВО, что

предложено использовать четырехканальную дифференциальную схему съёма информации.

Разработана функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной дифференциальной схемой считывания, содержащая систему возбуждения колебаний (СВК), РЧЭ, два УОС на основе ОТЭ и блок обработки и управления (Рисунок 3).

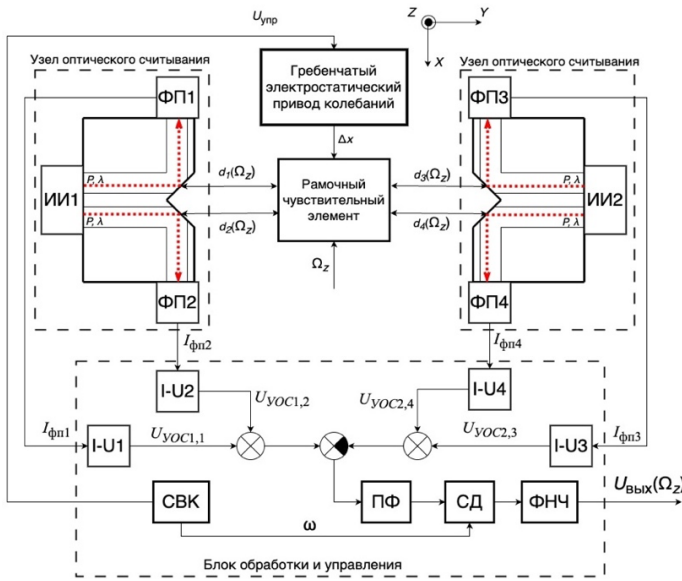


Рисунок 3 – Функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальным

дифференциальным считыванием на основе ОТЭ

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 Ω_z .

Зазоры d_1, d_2, d_3, d_4 между РЧЭ и УОС изменяются с частотой колебаний в режиме чувствительности и зависят от действующей угловой скорости Ω_z . Когда угол между поверхностью отражения ППВО и осью КОЭ равен 45° , величины зазоров d_1, d_2, d_3, d_4 равны:

$$d_1(\Omega_z, t) = d_0 - \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2}; d_2(\Omega_z, t) = d_0 - \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2};$$

$$d_3(\Omega_z, t) = d_0 + \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2}; d_4(\Omega_z, t) = d_0 + \Delta y(\Omega_z, t)/\sqrt{2}.$$

Оптические мощности $P_{\text{ФП1}}, P_{\text{ФП2}}, P_{\text{ФП3}}, P_{\text{ФП4}}$ излучения, падающего на ФП, определяются с помощью приближённой модели. Зазоры рассчитываются относительно точки падения центрального луча ИИ на модулирующую грань ППВО и изменяют отражательные способности $R_1[d_1(\Omega_z, t)], R_2[d_2(\Omega_z, t)], R_3[d_3(\Omega_z, t)], R_4[d_4(\Omega_z, t)]$ модулирующих граней ППВО. Оптические мощности излучения $P_{\text{ФП1}}, P_{\text{ФП2}}, P_{\text{ФП3}}, P_{\text{ФП4}}$ на квазилинейном участке функции преобразования с учётом возможных потерь равны:

$$P_{\text{ФП1}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ1}}R_1[d_1(\Omega_z, t)]K_1, P_{\text{ФП2}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ1}}R_2[d_2(\Omega_z, t)]K_2,$$

$$P_{\text{ФП3}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ2}}R_3[d_3(\Omega_z, t)]K_3, P_{\text{ФП4}}(\Omega_z, t) = 0,5P_{\text{ИИ2}}R_4[d_4(\Omega_z, t)]K_4,$$

где $P_{\text{ИИ1}}, P_{\text{ИИ2}}$ – оптические мощности источников излучения, K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты суммарных оптических потерь.

Выходные напряжения преобразователей «ток-напряжения» каналов УОС на основе ОТЭ определяются как:

$$\begin{aligned}
U_{\text{УОС1,1}}(\Omega_z, t) &= (S_{\text{ФП1}} \cdot P_{\text{ФП1}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум1}})R_{\text{ОС1}}, \\
U_{\text{УОС1,2}}(\Omega_z, t) &= (S_{\text{ФП2}} \cdot P_{\text{ФП2}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум2}})R_{\text{ОС2}}, \\
U_{\text{УОС2,3}}(\Omega_z, t) &= (S_{\text{ФП3}} \cdot P_{\text{ФП3}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум3}})R_{\text{ОС3}}, \\
U_{\text{УОС2,4}}(\Omega_z, t) &= (S_{\text{ФП4}} \cdot P_{\text{ФП4}}(\Omega_z, t) + I_{\text{шум4}})R_{\text{ОС4}},
\end{aligned}$$

где $S_{\text{ФП1}}, S_{\text{ФП2}}, S_{\text{ФП3}}, S_{\text{ФП4}}$ – спектральные чувствительности ФП1, ФП2, ФП3, ФП4; $I_{\text{шум1}}, I_{\text{шум2}}, I_{\text{шум3}}, I_{\text{шум4}}$ – шумовые токи ФП1, ФП2, ФП3, ФП4; $R_{\text{ОС1}}, R_{\text{ОС2}}, R_{\text{ОС3}}, R_{\text{ОС4}}$ – сопротивления в обратных связях преобразователей «ток-напряжение» I-U1, I-U2, I-U3, I-U4 на основе операционных усилителей.

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 $U_{\text{сум м}}(\Omega_z)$:

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

Зависимости выходного напряжения $U_{\text{вых}}(\Omega_z)$ и нелинейности функции преобразования от угловой скорости Ω_z рамочного МОЭМ преобразователя с четырехканальным дифференциальным считывания на основе ОТЭ представлены на рисунках 4 и 5.

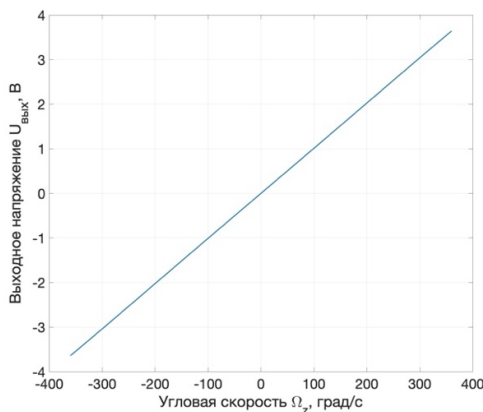


Рисунок 4 – Зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от угловой скорости Ω_z

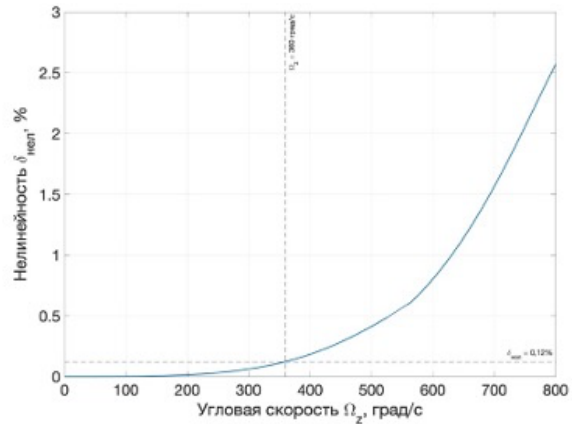


Рисунок 5 – Зависимость нелинейности функции преобразования $\delta_{\text{нел}}$ от угловой скорости Ω_z

При четырехканальном считывании и дифференциальной обработке характеризуется погрешность нелинейности составила $\delta_{\text{нел}} = 0,12\%$ в диапазоне измерения угловой скорости $\Omega_z = 0 \dots 360$ град/с. При увеличении диапазона измерения угловой скорости до 800 град/с амплитуды колебаний в режиме чувствительности $\Delta u_{\text{макс}}(\Omega_{z \text{ макс}})$ становятся более $\lambda/2$, что приводит к нелинейности функции преобразования $\delta_{\text{нел}} = 2,5\%$.

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 Δd ; $I_{\text{шум } \Sigma}$ – значение случайных шумов ФП.

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

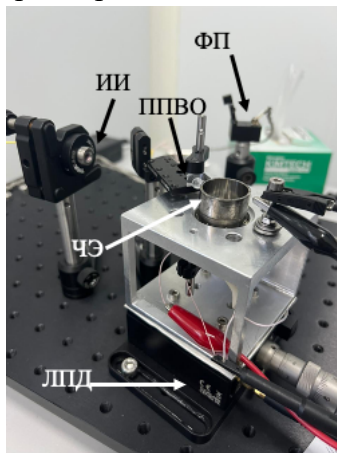
$$I_{\text{шум } \Sigma} = \sqrt{I_{\text{шум ФП1}}^2 + I_{\text{шум ФП2}}^2 + I_{\text{шум ФП3}}^2 + I_{\text{шум ФП4}}^2},$$

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

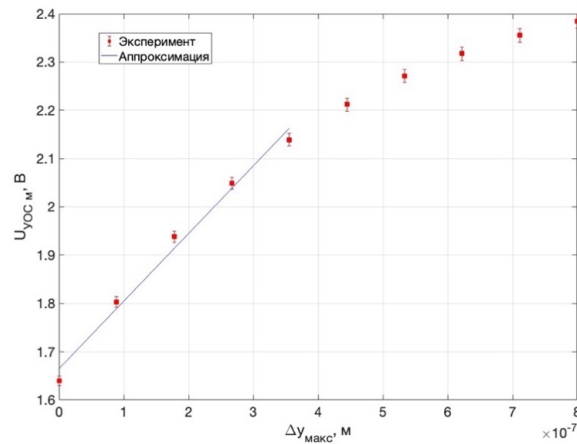
где e – заряд электрона, $I_{\text{темн}}$ – темновой ток ФП, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, $R_{\text{шунт}}$ – шунтирующее сопротивление ФП, $\Delta f_{\text{ФП}}$ – полоса пропускания ФП.

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

Для экспериментального исследования функции преобразования переменного зазора в выходное напряжение $U_{\text{УОС м}} = f(\Delta y_{\text{макс}})$ разработан стенд, который состоит из имитатора РЧЭ и УОС на основе ОТЭ, позволяющий определять параметры колебаний РЧЭ в субмикрометровом диапазоне (Рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6 – Экспериментальные исследования функции преобразования $U_{\text{УОС м}} = f(\Delta y_{\text{макс}})$: а) общий вид стенда, б) экспериментальная функция преобразования $U_{\text{УОС м}} = f(\Delta y_{\text{макс}})$:

В качестве имитатора РЧЭ использован чувствительный элемент (ЧЭ) в виде цилиндрического резонатора с наклеенным на его оболочку сферическим элементом, выполненным 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. ЧЭ закреплён на линейном пьезодвигателе (ЛПД) модели Thorlabs NFL5DP20, позволяющем совершать линейное перемещение на расстояние до 20 мкм с разрешающей способностью 1 нм. С его помощью выставляется начальный зазор $d_0 = 800 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$ между ЧЭ и УОС. Величина начального зазора d_0 определялась по напряжению $U_{\text{ЛПД}}$, подаваемому на ЛПД в соответствии с его градуировочной характеристикой. Стенка ЧЭ совершает колебания, находясь в воспринимающей зоне УОС. На выходе ФП формируются сигналы, соответствующие колебаниям кромки ЧЭ, которые подаются на преобразователь «ток-напряжение». Выходное напряжение УОС на основе ОТЭ $U_{\text{УОС}}(t)$ выводится на экран осциллографа.

Рабочий участок экспериментальной зависимости амплитуды выходного напряжения УОС на основе ОТЭ от амплитуды колебаний ЧЭ, оцениваемой по напряжению, подаваемому на ЛПД, линейно аппроксимирован и использован в дальнейших расчетах рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости:

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

где $\Delta y_{\text{макс}}$ – амплитуда колебаний чувствительного элемента, $U_0(d_0)$ – экспериментальное значение смещения выходного напряжения, пропорциональное начальному зазору d_0 , $U_0(d_0) = 1,6 \text{ В}$; $K_{\text{УОС}}$ – чувствительность к субмикрометровым перемещениям, $K_{\text{УОС}} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

С помощью анализатора спектра определен уровень шума в отсутствие входного оптического сигнала. Отношение сигнал/шум, рассчитанное как отношение среднего уровня выходного напряжения УОС $U_{\text{УОС м}}$ к среднему уровню шумов составило 79 дБ в полосе пропускания 1 кГц.

Полученные зависимости показывают согласование теории с экспериментом, что делает обоснованным применение математической модели УОС в дальнейшем анализе.

Вывод: таким образом, доказано первое защищаемое положение, что использование новой функциональной схемы и математической модели адаптивного рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, отличающегося использованием ОТЭ с четырехканальной системой считывания и учетом газодинамического демпфирования, обеспечивает измерение угловой скорости с основной среднеквадратичной погрешностью 0,6 град/ч. Четырехканальная система считывания обеспечивает уменьшение нелинейности функции преобразования до 0,12%. Разработанный имитатор РЧЭ подтвердил возможность применения УОС на основе ОТЭ для измерения перемещений РЧЭ с высокой чувствительностью $1,3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ в полосе пропускания 1 кГц с отношением сигнал/шум 79 дБ. Математическая модель позволяет выполнять анализ влияния конструктивных параметров на характеристики преобразователя и повысить точность их расчета, используя новые аппроксимирующие выражения.

В третьей главе проведен анализ влияния линейного ускорения и температуры на погрешность измерения угловой скорости рамочным МОЭМ преобразователем на основе ОТЭ. Разработаны алгоритм и схема компенсации низкочастотного смещения РЧЭ в условиях действия линейных ускорений.

Под действием линейного ускорения начальный зазор d_0 между РЧЭ и УОС на основе ОТЭ изменяется из-за деформаций упругих подвесов. Это приводит к возможности механического контакта, нарушающего работу УОС на основе ОТЭ, к погрешностям выходных сигналов, вызванных несимметричностью перемещений РЧЭ.

Смещения рамочного чувствительного элемента под действием линейных ускорений вдоль осей OX , OY , OZ определим как:

$$\Delta x_a = m_{\text{РЧЭ}} a_x / K_{\Sigma x}, \quad \Delta y_a = m_{\text{РЧЭ}} a_y / K_{\Sigma y}, \quad \Delta z_a = m_{\text{РЧЭ}} a_z / K_{\Sigma z},$$

где $m_{\text{РЧЭ}}$ – масса рамочного чувствительного элемента; $K_{\Sigma x}$, $K_{\Sigma y}$, $K_{\Sigma z}$ – суммарные жёсткости упругих подвесов вдоль осей OX , OY , OZ соответственно.

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

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

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

$$U_{\text{УОС2,3}}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ay}(\Delta y_a),$$

$$U_{\text{УОС2,4}}(\Omega_z, a_y, t) = K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ay}(\Delta y_a),$$

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

При ускорении a_y 100 м/с^2 относительная погрешность составляет 5,9%. При увеличении ускорения до 883 м/с^2 относительная погрешность достигает 21,5% и требует разработки средств компенсации.

Проведено моделирование осевого перемещения РЧЭ Δx_a и эквивалентного перемещения $\Delta x_{a \text{ экв}}$ КОЭ, возникающих под действия линейного ускорения a_x вдоль оси OX . Осевое перемещение РЧЭ Δx_a и эквивалентное перемещение $\Delta x_{a \text{ экв}}$ КОЭ под действием ускорения без учета электростатической силы, возбуждающей колебания вдоль оси OX , показаны на рисунке 7.

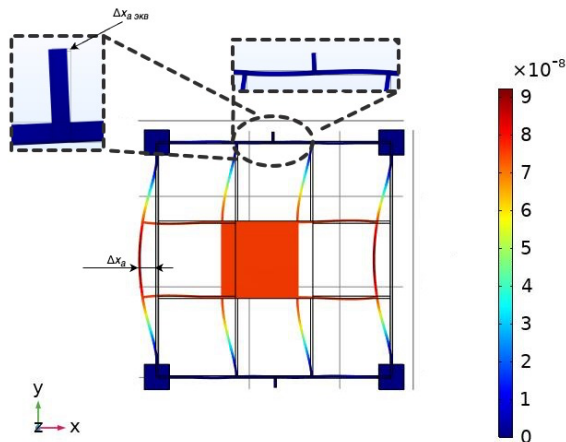


Рисунок 7 – Осевое перемещение РЧЭ Δx_a и эквивалентное перемещение $\Delta x_{a \text{ экв}}$ КОЭ при ускорении $a_x = 883 \text{ м/с}^2$

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 $\Delta x_{a \text{ экв}} = 5 \text{ нм}$. Такое отклонение Δx_a изменяет величину электростатических сил в гребенчатом приводе колебаний в режиме движения, что приводит к изменению перемещений вдоль оси OY . Влияние линейного ускорения вдоль оси OX на дополнительное смещение Δx_a учтено в уравнениях движения и формулах для электростатической силы.

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

$$\begin{aligned} U_{\text{УОС}1,1}(\Omega_z, a_x, t) &= K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \\ U_{\text{УОС}1,2}(\Omega_z, a_x, t) &= K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \\ U_{\text{УОС}2,3}(\Omega_z, a_x, t) &= K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) - U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \\ U_{\text{УОС}2,4}(\Omega_z, a_x, t) &= K_{\text{УОС}} \Delta y_{\text{макс}}(\Omega_z, a_x) \cos \omega t + U_0(d_0) + U_{ax}(\Delta x_{a \text{ экв}}), \end{aligned}$$

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

Дополнительная погрешность измерения угловой скорости вокруг оси OZ с учетом влияния линейного ускорения по оси OX достигает 5,2%.

Результаты моделирования действия линейного ускорения вдоль оси OZ показали, что смещения РЧЭ Δz_a не превышают 15 нм, что значительно меньше высоты ППВО, и не приводят к изменению выходного сигнала преобразователя с выбранными упругими подвесами.

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

Для компенсации дополнительной погрешности измерений угловой скорости введём коэффициент усиления $K_{\text{ус}}$, зависящий от напряжения $U_{ay}(a_y)$. Тогда при действии 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 РЧЭ (десятки килогерц), а дополнительная модуляция от линейного ускорения происходит на частотах менее 1 кГц.

Для определения зависимости коэффициента усиления $K_{\text{ус}}$ от напряжения U_{ay} получим

значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при воздействии угловой скорости Ω_z . Затем определим значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при воздействии угловой скорости Ω_z и линейного ускорения a_y , зафиксировав значения $U_{ay}(a_y)$. Далее определим коэффициент усиления K_{yc} :

$$K_{yc} = U_{\text{ВЫХ}}(\Omega_z) / U_{\text{ВЫХ}}(\Omega_z, a_y).$$

Построим градуировочную характеристику $K_{yc} = f[U_{ay}(a_y)]$ и аппроксимируем полученный результат. Для формирования скорректированного значения выходного сигнала коэффициент $K_{yc}(U_a)$ определим для каждого диапазона угловых скоростей. Количество диапазонов определяется с учётом требуемой точности преобразования.

Для уменьшения дополнительной погрешности от линейного ускорения в диапазоне $a_y = 0 \dots 883 \text{ м/с}^2$ определены зависимости изменения коэффициента усиления $K_{yci} = f[U_{ay}(a_y)]$ (где $i = 1 \dots 7$ – номер диапазона) для диапазонов угловых скоростей:

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

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

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

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

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

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

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

По результатам моделирования работы рамочного МОЭМ преобразователя с блоком коррекции выходного напряжения, в котором использован алгоритм на основе поиска аппроксимирующих уравнений, относительная погрешность составила $\delta U_{\text{вых скор}} = 0,15 \%$ (Рисунок 8).

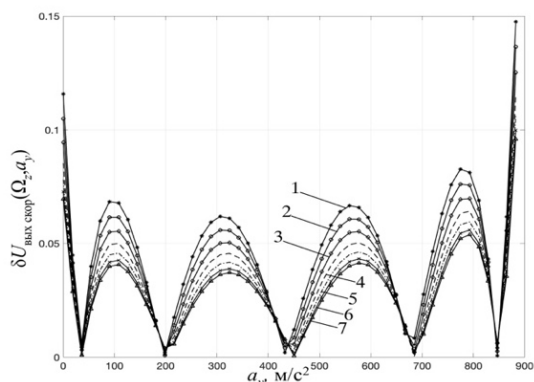


Рисунок 8 – Зависимости относительной погрешности рамочного МОЭМ преобразователей с блоком коррекции выходного напряжения $\delta U_{\text{вых скор}}$ от линейного ускорения a_y при различной угловой скорости $\Omega_z = 360; 300; 250; 200; 150; 100; 50 \text{ град/с}$ – кривые соответственно 1–7

По предложенному способу коррекции выходного напряжения на основе управления коэффициентом усиления разработан алгоритм работы блока обработки, который обеспечивает определение необходимого аппроксимирующего полинома коэффициента усиления.

Снижение дополнительной погрешности за счет управления выходным напряжением с помощью коэффициента усиления ограничено диапазоном действия линейного ускорения $\pm 883 \text{ м/с}^2$, так как зазор $d(\Omega_z, a_y)$ между РЧЭ и УОС

становится 38 нм при угловой скорости $\Omega_z = 360$ град/с. При более высоком значении линейного ускорения a_y возможен механический контакт одного из УОС с РЧЭ. Для обеспечения измерения угловой скорости в условиях высоких перегрузок предлагается использовать электростатическую компенсацию низкочастотных смещений РЧЭ.

Для компенсации низкочастотных смещений РЧЭ, вызывающих дополнительную погрешность от линейного ускорения, в рамочный МОЭМ преобразователя вводится электростатическая система с электродами компенсации (ЭК), расположенными перпендикулярно приводам СВК.

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 Ω_z с полосой пропускания ± 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, формирующий напряжение обратной связи для ЭК. Система компенсации низкочастотного смещения преобразует напряжение, соответствующее линейному ускорению $U_{ay}(a_y)$, в компенсирующее смещение РЧЭ $\Delta u_{\text{комп}}$. Результат моделирования работы рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с парой компенсационных электростатических приводов вдоль оси чувствительности ОУ показан на рисунке 9.

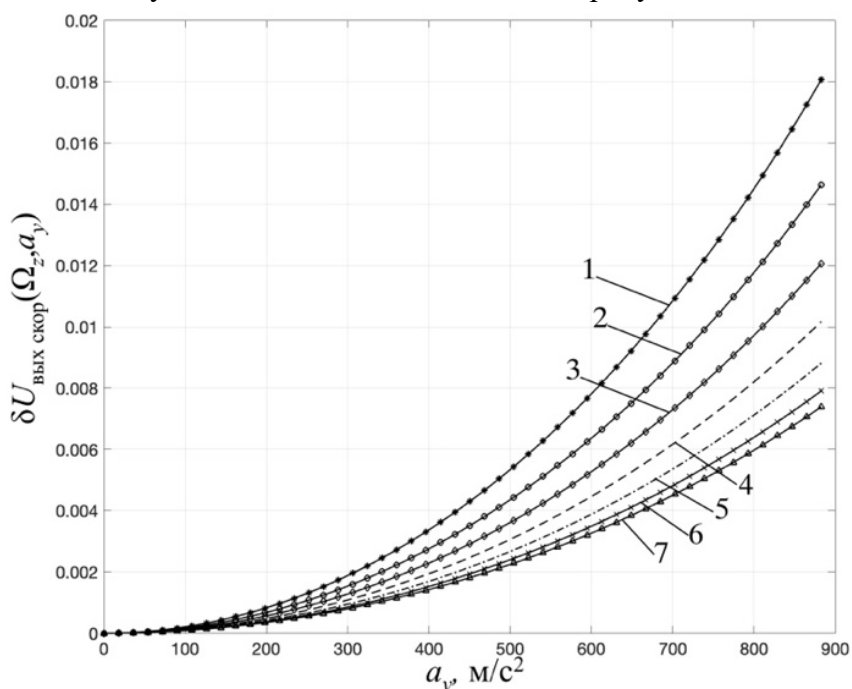


Рисунок 9 – Зависимости относительной погрешности $\delta U_{\text{вых скор}}$ рамочного МОЭМ преобразователя с ЭК от линейного ускорения a_y при различной угловой скорости $\Omega_z = 360; 300; 250; 200; 150; 100; 50$ град/с – кривые 1–7 соответственно

чувствительности (Рисунок 10).

Погрешность измерения угловой скорости при компенсации влияния линейного ускорения $a_y = \pm 883 \text{ м/с}^2$ составила не более 0,02 %.

Метод компенсации с применением силовой обратной связи повышает точность измерения угловой скорости и уменьшает риск механического контакта между РЧЭ и УОС.

Разработан алгоритм адаптации рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ, реализующий компенсацию погрешности линейных ускорений вдоль осей движения и

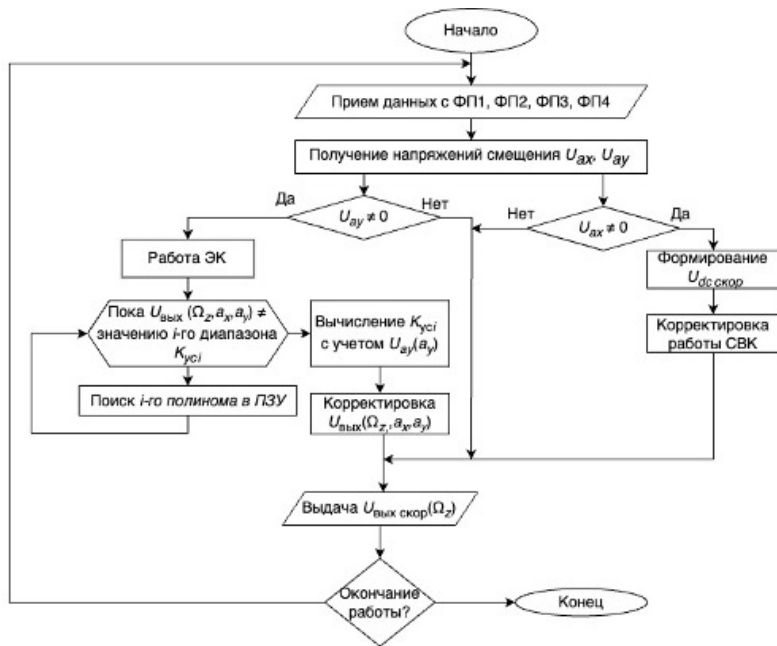


Рисунок 10 – Алгоритм адаптации рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости

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 напряжению 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 этого 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 K_{yci} . Относительная погрешность $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z)$ измерения угловой скорости представлена на рисунке 11.

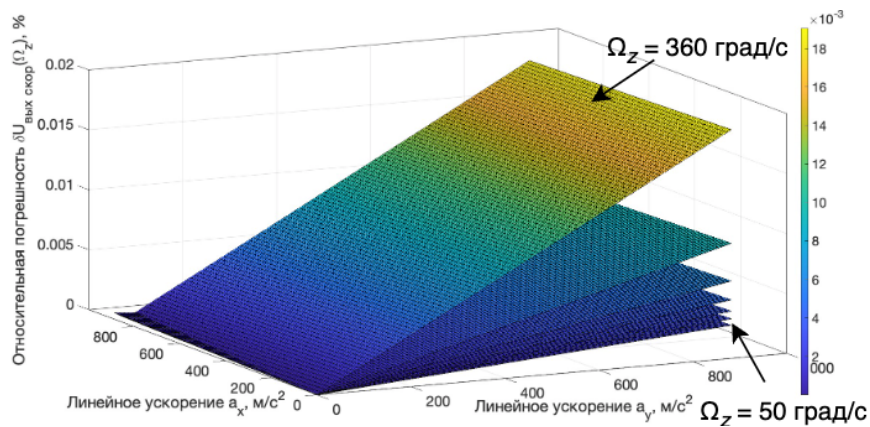


Рисунок 11 – Зависимость относительной погрешности $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z)$ от воздействия линейных ускорения a_x , a_y по осям OX , OY с применением алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя для различных угловых скоростей

Наибольший вклад в относительную погрешность измерения угловой скорости вносит линейное ускорение a_y , действующее по оси OY . Применение разработанного алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя уменьшает относительную погрешность до $\delta U_{\text{вых скор}}(\Omega_z) = 0,018$ % при $\Omega_z = 360$ град/с.

Проведено исследование дополнительной температурной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, в котором учитывались температурные изменения параметров, влияющих на функцию преобразования.

Изменение показателя преломления ППВО при вариациях температуры можно описать линейным уравнением $n(T_0 + \Delta T) = n_0 + \beta \Delta T$, где β – термооптический коэффициент волноводной среды.

Флуктуационная сила, возникающая от термомеханического шума, для системы с полосой пропускания Δf определяется как $F_{\text{терм}}(T) = \sqrt{4k_B T c \Delta f}$, где c – коэффициент демпфирования.

Проведена оценка пороговой чувствительности рамочного МОЭМ преобразователя по угловой скорости $\Omega_{\text{шум}}$, эквивалентной температурным шумам:

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

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

$$\Omega_{\text{терм}} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_y \Delta f}{m \omega_x^2 A_x^2 Q_y}},$$

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

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

где K_M – масштабный коэффициент МОЭМ преобразователя угловой скорости.

Расчетные значения пороговой чувствительности преобразователя в диапазоне температур $-40 \dots +60$ °С не превышают $\Omega_{\text{шум}} = 0,27$ мград/с.

Угловая скорость $\Omega_{\text{терм}}$, эквивалентная термомеханическому шуму, может быть уменьшена за счет использования большей массы m , высокой частоты первичных колебаний ω_x , большой амплитуды первичных колебаний A_x , малой полосы пропускания Δf и высокой добротности Q_y .

В соответствии с температурными характеристиками материалов, размеры УОС и РЧЭ будут изменяться с температурной. Дополнительная температурная погрешность δ_T зависит от изменения начального зазора d_0 и шумовых характеристик ФП:

$$\delta_T = \left| \frac{U_{\text{вых}}(d_0, I_{\text{шум}}(T)) - U_{\text{вых}}(d_0, I_{\text{шум}}(T_0))}{U_{\text{вых}}(d_0, I_{\text{шум}}(T_0))} \right| \cdot 100\%.$$

Дополнительная температурная погрешность δ_T измерения угловой скорости в диапазоне угловых скоростей до $\Omega_z = 0 \dots 360$ град/с достигает 6,5% в диапазоне температур $-40 \dots +60$ °С.

Вывод: таким образом, доказано второе защищаемое положение, что использование алгоритма адаптации рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта, обеспечивает уменьшение относительной погрешности до 0,02% за счет введения обратных связей по управлению коэффициентом усиления и электростатическим приводом, позволяющих определять и компенсировать действующее линейное ускорение вдоль оси чувствительности преобразователя. Показана возможность исключения механического контакта РЧЭ с УОС.

В четвертой главе разработан двухволновой УОС на основе ОТЭ, позволяющий расширить динамический диапазон измерения угловой скорости.

Использовано входное оптическое излучение содержащее две спектральные компоненты с длинами волн λ_1 и λ_2 . Тогда суммарная мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ на фотоприемнике запишется в виде:

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

где P_1, P_2 – мощности входного излучения на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно.

Для управления оптическими мощностями с различными длинами волн введен параметр балансировки B_M , определяющийся как доля мощности оптического излучения на длине волны λ_1 от суммарной оптической мощности двух излучателей P_0 . Тогда для оптических мощностей запишем:

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

С учетом разных значений спектральной чувствительности выходной фототок УОС на основе ОТЭ $I_{УОС}$ запишем в виде:

$$I_{УОС} = I_{шум} + B_T S_{ФП1} P_1 R_1(d, \lambda_1) + (1 - B_T) S_{ФП2} P_2 R_2(d, \lambda_2),$$

где $S_{ФП1}, S_{ФП2}$ – чувствительность фотодиода на длинах волн λ_1, λ_2 соответственно, B_T – параметр балансировки по току.

При определении параметра балансировки B_T учтена спектральная чувствительность ФП для разных длин волн, которая изменяется в диапазоне от 0,2 А/Вт до 0,95 А/Вт, где меньшая чувствительность соответствует меньшей длине волны.

Определены динамические диапазоны УОС на основе ОТЭ в двухволновых режимах по спаду чувствительности на 3 дБ в зависимости от параметра балансировки B_{Ti} (i – второй индекс первой спектральной компоненты) для различных длин волн λ_{1i} при постоянном значении второй спектральной компоненты $\lambda_2 = 1,55$ мкм (Рисунок 12).

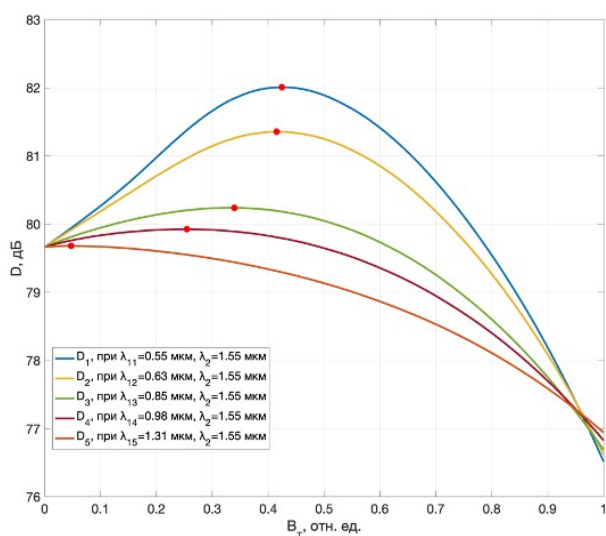


Рисунок 12 – Зависимость динамического диапазона D от параметра балансировки B_T для двухволнового режима УОС (красной точкой показано максимальное значение динамического диапазона D)

Для случая использования различных комбинаций двух длин волн λ_{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 λ_{1i} и λ_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. С помощью двухволнового преобразования можно компенсировать технологические неточности при изготовлении рамочных МОЭМ преобразователей, устанавливая величину балансировочного коэффициента B_T на этапе калибровки.

Для компенсации дополнительной температурной погрешности предложено использовать термооптический эффект и ввести температурный коэффициент $K_T(T)$, позволяющий определять температурные флуктуации. Использовано два УОС, работающие в двухволновом режиме, ППВО которых имеют различные термооптические коэффициенты.

Получаемое значение $K_T(T)$ используется для управления коэффициентом усиления $K_y = f[K_T(T)]$ для получения скорректированного выходного напряжения $U_{\text{вых скор}}(\Omega_z, T)$:

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

где $U_{\text{УОС1}}$ – выходное напряжение УОС с низким термооптическим коэффициентом:

$$U_{\text{УОС1}}(\Omega_z, T) = R_{\text{ОС}}[I_{\text{шум}}(T) + B_T S_{\text{ФП1}} P_1 R_1(\Omega_z, n(T), \lambda_1) + (1 - B_T) S_{\text{ФП2}} P_2 R_2(\Omega_z, n(T), \lambda_2)].$$

Для получения зависимости коэффициента усиления $K_y = f[K_T(T)]$ от температурного коэффициента $K_T(T)$ определено выходное напряжение УОС с низкой чувствительностью к термооптическому эффекту $U_{\text{УОС1}}$ для различных угловых скоростей Ω_z при температуре $T=293$ К. Затем определено выходное напряжение $U_{\text{УОС1}}$ при вариации температур в диапазоне $-40 \dots +60$ °С.

Коэффициент $K_T(T)$ предложено определять в виде отношения выходных сигналов двух термочувствительных УОС:

$$K_T(T) = U_{\text{УОС2}}(\Omega_z, T) / U_{\text{УОС1}}(\Omega_z, T).$$

Значение коэффициента K_y определится в виде:

$$K_y = U_{\text{УОС1}}(\Omega_z) / U_{\text{УОС1}}(\Omega_z, T).$$

Градуировочная характеристика $K_y = f[K_T(T)]$, по результатам моделирования аппроксимируется линейным выражением:

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

Моделирование МОЭМ преобразователя с блоком коррекции выходного напряжения представлено на рисунке 13.

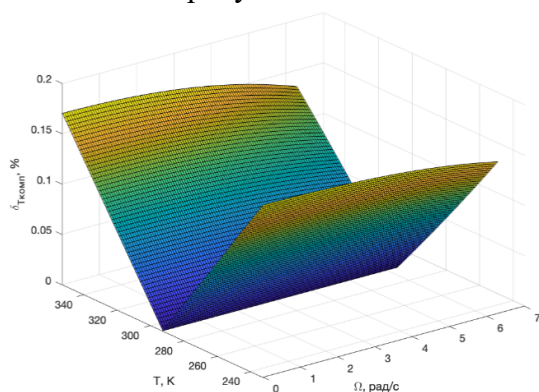


Рисунок 13 – Зависимость дополнительной температурной погрешности $\delta_{\text{Ткомп}}$ с учетом применения алгоритма компенсации для различной угловой скорости в диапазоне температур 233-333 К

Используя введенный температурный коэффициент $K_T(T)$ скомпенсированная дополнительная температурная погрешность $\delta_{\text{Ткомп}}$ составила $0,02\%/K$ в диапазоне температур 233-333 К.

В условиях отсутствия угловой скорости Ω_z на выходе преобразователя сохраняется ненулевое напряжение U_0 , обусловленное изменением начального зазора Δd_0 остаточными ускорениями после компенсации, температурными флуктуациями и шумами ФП $I_{\text{шум } \Sigma}$. Смещение нуля U_0 можно описать:

$$U_0 = K_{\text{УОС}} \Delta d_0 (\Delta T) + U_{ay}(a_y) + I_{\text{шум } \Sigma} R_{\text{ОС}}.$$

Принимая изменение начального зазора Δd_0 равным $\Delta d_0 = 0,285$ нм, остаточное ускорение $a_y = 0,185$ м/с² и шумы ФП $I_{\text{шум } \Sigma} = 13$ пА, $R_{\text{ОС}} = 5$ кОм получим $U_0 = 0,85$ мкВ. Угловая скорость Ω_0 , эквивалентная ненулевому напряжению U_0 , определяется как $\Omega_0 = U_0 / K_M$. Используя масштабный коэффициент K_M равный $K_M = 0,01$ В/град/с получим $\Omega_0 = 0,3$ град/ч.

Предложена методика расчета рамочных МОЭМ преобразователей угловой скорости. Для расчета необходимо задать следующие технические параметры: диапазон измерения

угловой скорости $\pm\Omega_z$ макс, основную погрешность измерения угловой скорости $\Delta\Omega_z$, минимально детектируемую угловую скорость, погрешность нелинейности функции преобразования $\delta_{\text{нел}}$, температурный диапазон работы $T_{\text{мин}} \dots T_{\text{макс}}$. Далее проводится предварительный анализ технических требований с учетом технологических возможностей: погрешности изготовления толщины чувствительного элемента, толщины жертвенного слоя, материала УОС на основе ОТЭ, точности микрообработки. Затем определяем материал ППВО, диапазон измерения перемещений РЧЭ, параметры оптоэлектронных компонентов, обеспечивающие работу в зоне оптического туннелирования, оценку нелинейности функции преобразования и погрешности УОС. После этого выбирается форма упругих подвесов и проводится расчет амплитуды перемещений РЧЭ в режиме чувствительности для заданного максимального значения угловой скорости, обеспечивающей ее детектирование УОС на основе ОТЭ. Определяются параметры рамочного МОЭМ преобразователя и их допустимые отклонения, обеспечивающие заданную основную погрешность измерения угловой скорости.

Оценка влияния изменения значений параметров преобразователя угловой скорости на его погрешность проводится методом статистических испытаний. Для этого параметры преобразователя записываются в виде вектора \mathbf{G} :

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

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 Ω_z макс = ± 360 град/с. Каждому исследуемому параметру G_i задаются случайные изменения с нормальным распределением. Проведем моделирование статистических испытаний с регистрацией масштабных коэффициентов K_M для определения среднеквадратичных отклонений $\sigma_{K_M i}$. Коэффициент влияния k_i i -го параметра по результатам статистических испытаний определяется как:

$$k_i = \frac{dG_i}{dK_M} = \frac{\sigma_{K_M} / K_M}{\sigma_{G_i} / G_i},$$

где σ_{G_i} – среднеквадратичное отклонение i -го параметра от номинального значения.

Максимальную абсолютную погрешность $\Delta U_{\text{вых}}$ выходного сигнала МОЭМ преобразователя на границах диапазона определим с учетом возможных отклонений параметров:

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

где ΔG_i – предельно возможное отклонение i -го параметра от номинального значения.

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

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

Используя составляющие вектора параметров \mathbf{G} рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, проводится расчет коэффициентов влияния параметров и определяются допустимые отклонения от расчетных значений. Входными данными для расчета примем: диапазон измерений угловой скорости $\Omega_z = 0 \dots 360$ град/с, основную погрешность измерения угловой скорости $\Delta\Omega_z = 0,15$ град/ч, погрешность нелинейности функции преобразования $\delta_{\text{нел}}$ не более 3%, материал РЧЭ – кремний, $n_1 = 1,48$, $n_2 = 1,0$. Используя полученные аппроксимирующие выражения во второй главе, определим параметры: $\Delta d = 450$ нм, $\delta_{\text{нел}} = 2,5\%$; 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. Рассчитаем коэффициенты влияния и допуски на отклонения параметров.

Так при изготовлении партии из 5000 преобразователей угловой скорости заданную основную погрешность $\Delta\Omega_z = 0,15$ град/ч будут иметь 3413 (68,27%) преобразователей. Плотность вероятности $\phi(\Delta\Omega_z)$ основной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя приведена на рисунке 14.

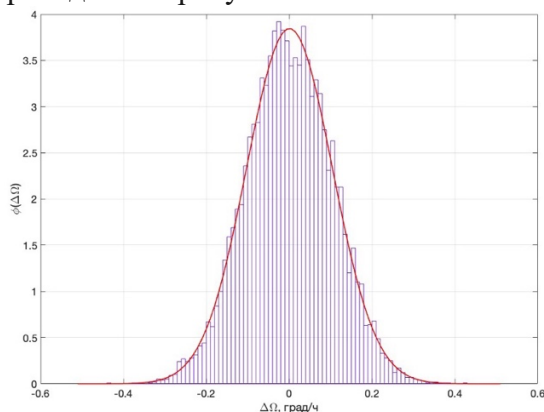


Рисунок 14 – Плотность вероятности $\phi(\Delta\Omega)$ основной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя

Получено математическое ожидание основной погрешности преобразователя, равное $M(\Delta\Omega) = 38,2$ мград/ч. При этом среднеквадратичное отклонение 3σ составило $3\sigma(\Delta\Omega) = 0,4$ град/ч. Для повышения точности оставшихся 31,73% преобразователей, непопадающих в поле допуска заданной основной погрешности, необходимо проводить дополнительную калибровку.

Вывод: таким образом, доказано третье защищаемое положение, что использование двухволнового УОС на основе ОТЭ позволяет расширить динамический диапазон в 1,7 раза.

Применение режима двухволнового преобразования в УОС на основе ОТЭ обеспечивает возможность изменения динамического диапазона и чувствительности рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости, регулируя соотношение мощностей спектральных составляющих. Диапазон перемещений РЧЭ расширяется и составляет ± 715 нм. Уменьшение температурной погрешности рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости до $0,02\ \%/^{\circ}\text{C}$ в температурном диапазоне $-40\ ^{\circ}\text{C} \dots 60\ ^{\circ}\text{C}$ достигнуто с помощью разработанного алгоритма компенсации на основе термооптический эффект. Доказано четвертое защищаемое положение, что использование новой методики расчета рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ, позволяющей определять коэффициенты влияния основных параметров на выходную характеристику по среднеквадратичному отклонению основной погрешности и их допустимые отклонения, обеспечивает выполнение заданных технических требований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 нелинейность функции преобразования до 0,12 %. В диапазоне перемещений (80...800) нм основная среднеквадратичная погрешности определения положения рамочного чувствительного элемента составила 26 пм

2. Разработана уточненная математическая модель РЧЭ, 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 Па до 0,1 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 ± 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 °С... $+60$ °С. Предложен алгоритм температурной коррекции выходного сигнала, использующий термооптический эффект в УОС на основе ОТЭ, с дополнительной погрешностью измерения угловой скоростью не более 0,04 %/°С.

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 важной значение для определения параметров движения объектов информационно-измерительными системами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта / В. И. Бусурин, А. В. Казарьян, С. Г. Штек, М.А. Жеглов, **С.О. Васецкий**, Ч. П. Линн // Измерительная техника. – 2022. – № 5. – С. 50-55. – DOI 10.32446/0368-1025it.2022-5-50-55.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных:

5. S.G. Shtek, M.A. Zheglov, V.V. Belyakov, O.G. Andreyan, **S.O. Vasetsky** and P.S. Kuznetsov / Development of a Sensitive Element of a Micro-Opto-Electromechanical Accelerometer, 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-2, doi: 10.23919/ICINS51816.2023.10168511.

В других изданиях:

6. 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.

7. 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, автоматизации и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2021 года. – С. 167

8. 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, автоматизации и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2021 года

9. **Васецкий С.О.** Анализ влияния линейного ускорения на рамочный МОЭМ-преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта / **С.О. Васецкий**, В.И. Бусурин, П.Л. Чжи // Авиация и космонавтика : Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 189-190.

10. **Васецкий С.О.** Компенсация влияния линейного ускорения на рамочный микроопто-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.

11. **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. – С. 87

12. **Васецкий С.О.** Исследование характеристик рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта / **С.О. Васецкий** // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 203-204.

13. **Васецкий С.О.** Двухволновой узел оптического считывания датчика угловой скорости / **С.О. Васецкий**, В.И. Бусурин, А.В. Казарьян // XLVII Академические чтения по космонавтике 2023: Сборник тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 24–27 января 2023 года. Том 3. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2023. – С. 252-253.

14. **Васецкий С.О.** Компенсация температурной погрешности микрооптоэлектромеханического датчика угловой скорости с помощью термооптического эффекта / **С.О. Васецкий** // XXXII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации, сборник трудов, пос. Дивноморское, 14–20 сентября 2023 года.

15. **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.

Патенты на изобретения:

16. Патент № 2790042 С1 Российская Федерация, МПК G01C 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.

17. Патент № 2804679 С1 Российская Федерация, МПК G01B 11/02, G02B 6/34. Волоконно-оптический датчик перемещений: № 2023106942: заявл. 23.03.2023: опубл. 03.10.2023 / С.Г. Штек, М. А. Жеглов, В.В. Беляков, **С.О. Васецкий**, Д.Б. Жмурова, В.И. Бусурин, А.В. Казарьян.

18. Патент № 2806242 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56, G01P 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.