

На правах рукописи



Коробков Кирилл Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МИКРО-ОПТО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
АДАПТИРУЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО
УСКОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДВУХКАНАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Специальность 05.13.05
Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 год

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: **Бусурин Владимир Игоревич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Официальные оппоненты: **Горшков Борис Георгиевич**
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Кулабухов Владимир Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, главный конструктор тематического направления № 17 АО Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «04» апреля 2022 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.226.03 при Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, дом 65, Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, дом 65) и на сайте www.ipu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, Д002.226.03,
кандидат технических наук

 А. А. Кулинич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Прецизионное измерение ускорения востребовано во многих прикладных задачах управления подвижными объектами, например, при построении навигационных систем, для повышения точности систем контроля положения манипуляторов и т.д. Большой вклад в его развитие внесен российскими и зарубежными учеными, такими как В.М. Ачильдиев, В.Д. Вавилов, Д.М. Калихман, Э.Г. Косцов, А.П. Мезенцев, В.Е. Мельников, В.Я. Распопов, С.П. Тимошенко, Р.Г. Джексон, М.С. Расрас, Э. Удд, Дж. Фрайден и др. Использование оптических методов считывания информации о микроперемещениях чувствительного элемента, индуцированных ускорением, в микроэлектромеханических системах (МЭМС) по сравнению с емкостным способом позволяет: избежать электростатических силовых воздействий на чувствительный элемент при считывании; снизить чувствительность преобразователя к внешним электромагнитным шумам; исключить электрический пробой между подвижными частями. Применение оптических средств позволяет также сократить диапазон механических перемещений чувствительного элемента и уменьшить чувствительность к поперечным ускорениям. При построении высокочувствительных оптических узлов считывания, которые могут быть реализованы на основе использования оптического туннельного эффекта и интерферометрических методов, предъявляются требования к отсутствию механического контакта между подвижными элементами модулятора, что может быть обеспечено средствами компенсационных обратных связей. Оптический модулятор в микро-опто-электромеханических (МОЭМ) преобразователях ускорения воспринимает изгибы чувствительного элемента и измеряет его перемещения порядка единиц-десятков микрометров. При компенсации влияния различных внешних факторов погрешность оптических способов детектирования может не превышать десятков нанометров, обеспечивая высокую чувствительность к ускорению. Поэтому разработка и исследование МОЭМ адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов прецизионного оптического считывания, способного обеспечить измерение малых линейных ускорений, является актуальной задачей.

Целью исследования является повышение чувствительности и помехозащищенности микроэлектромеханического преобразователя линейного ускорения путём применения прецизионных оптических средств считывания субмикрометровых перемещений чувствительного элемента и методов двухканальной обработки сигналов.

Объектом исследования являются структурные схемы и математические модели преобразователей линейного ускорения с адаптируемым оптическим модулем и комбинированной обратной связью, выполненных на основе высокочувствительных оптических средств считывания микроперемещений чувствительного элемента.

Предметом исследования является улучшение характеристик преобразователей линейного ускорения путём разработки новых структур, реализующих оптическое считывание, алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла, позволяющего анализировать дробную часть полосы интерференционной картины, и методики проектирования, автоматизирующей определение структуры и расчет основных параметров.

Методы исследования. При исследовании микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения применялись методы геометрической и волновой оптики, теории упругости и механики деформируемого твёрдого тела, теории автоматического управления, математического и полунатурного моделирования.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- разработан микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения, в котором использование двухканального оптического съёма информации на основе оптического туннелирования и интерферометра обеспечило повышение точности, уменьшение влияния поперечных ускорений и исключение дополнительных силовых воздействий при считывании сигналов об индуцированном перемещении;
- разработанные новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения отличаются использованием совместной обработки сигналов интерферометрического канала и канала

оптического туннелирования, что обеспечивает уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;

– разработанная математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, учитывающая динамические свойства чувствительного элемента и расположение узлов комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связи, отличается использованием модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, что позволяет повысить точность расчета характеристик;

– предложенный алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения отличается определением дробной части полосы интерференционной картины, что позволяет увеличить чувствительность к микроперемещениям чувствительного элемента.

На защиту выносятся следующие научные положения:

– структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, обеспечивающие уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;

– математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяющая повысить точность расчета характеристик;

– алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины, позволяющий увеличить чувствительность к индуцированным ускорением субмикрометровым перемещениям;

– методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение

структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям.

Практическая значимость результатов исследования:

- использование разработанной математической модели компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненной модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяет выполнять анализ влияния конструктивных параметров на характеристики и повысить точность их расчета;
- проведенное экспериментальное исследование канала считывания на эффекте оптического туннелирования и макета оптического преобразователя ускорения подтверждает возможность использования прецизионных оптических средств для детектирования микроперемещений чувствительного элемента и измерения линейного ускорения;
- разработанная методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения обеспечивает автоматизированный выбор структуры и расчёт параметров конструкции нового преобразователя, что позволяет ускорить процесс разработки.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов, экспериментальными исследованиями и соответствием полученных результатов известным.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в АО «ГосНИИП» и используются в учебном процессе МАИ.

Апробация работы. Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на: XXVII, XXVIII, XXIX, XXX Международных научно-технических конференциях «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (2018, 2019, 2020, 2021; Алушта); 17-ой, 19-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (2018, 2020; Москва, МАИ); VIII, IX, X Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (2019, 2020,

2021; Москва, НИЯУ МИФИ); 26-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2019» (2019; Зеленоград, МИЭТ); XLVI, XLVII Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения – 2020», «Гагаринские чтения – 2021» (2020, 2021; Москва, МАИ); XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (2020; Санкт-Петербург).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ [1 – 20], из них 3 – статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [1 – 3], 1 – статья в ведущем научном журнале, входящем в международные реферативные базы данных [4]. Получено решение о выдаче патента РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и семи приложений. Общий объём диссертации составляет 186 страниц, из них 146 – основная часть, 40 – приложение. Работа содержит 74 рисунка и 1 таблицу. Список использованных источников включает 102 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении выделена проблемная область и обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулирована цель исследования, определены объект и предмет исследования, выбраны методы исследования. Показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследования, подтверждена их достоверность, приведены основные положения, выносимые на защиту. Представлены сведения о внедрении, публикациях и апробации результатов работы, раскрыта структура диссертационной работы.

В первой главе даны общие сведения о МЭМС и показана перспективность развития направления, связанного с исследованием миниатюрных преобразователей линейных ускорений и угловых скоростей.

Выполнен аналитический обзор основных методов считывания микроперемещений чувствительного элемента (ЧЭ), по результатам которого оценены положительные и отрицательные аспекты их использования, а также показана эффективность высокочувствительных оптоэлектронных систем, подтверждающая актуальность диссертационной работы. Рассмотрены используемые виды конструкций преобразователей линейных ускорений и их ЧЭ, а также средства повышения точностных характеристик. Предлагаемое совмещение МЭМС-преобразователей ускорения и оптических средств считывания, таких как модули на оптическом туннельном эффекте (ОТЭ) или интерферометры, позволит: повысить чувствительность к субмикрометровым перемещениям ЧЭ, избавиться от силовых воздействий на него со стороны элементов считывания, повысить устойчивость к электромагнитным шумам.

Выполнена постановка частных задач, которые подлежат решению в ходе разработки и исследования МОЭМ адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов.

Во второй главе предложен МОЭМ адаптируемый преобразователь линейного ускорения, использующий совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, что обеспечивает уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения.

Модуляция сигнала об ускорениях обеспечивается субмикрометровыми изгибными деформациями ЧЭ, в качестве которого используется кварцевая плоскопараллельная пластина с жёсткой заделкой. Детектирование перемещений ЧЭ осуществляется средствами комбинированного использования двух оптических информационных каналов, расположенных с двух сторон от ЧЭ на равном расстоянии от заделки.

Разработана функциональная схема преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем (Рисунок 1), включающая в себя: ЧЭ, интерферометр Фабри-Перо (ИФП), ОТЭ-датчик, источники излучения интерферометра (ИИ_{ИФП}) и ОТЭ-датчика (ИИ_{ОТЭ}), фотоприёмники двухканального интерферометра (ФП_{ИФП1}, ФП_{ИФП2}) и ОТЭ-датчика (ФП_{ОТЭ}), преобразователи «ток-напряжение» (I/U_1 , I/U_2 , I/U_3), счётчик, электронный блок управления и обработки (ЭБУиО), пьезоактюатор (ПА) и интерфейс.

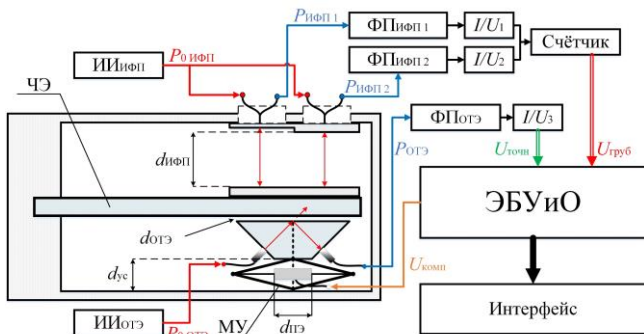


Рисунок 1 – Функциональная схема преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем

Изменение положения ЧЭ приводит к изменению зазора в резонаторе ИФП ($d_{ИФП}$), что модулирует входную оптическую мощность ($P_{0\ ИФП}$), формируя значения выходных мощностей $P_{ИФП1}$ и $P_{ИФП2}$, периоды интерференционных картин которых смещены на $\pi/2$.

Выходные напряжения двух каналов интерферометра обрабатываются счётчиком, осуществляющим подсчёт целого числа полос и формирующим цифровой сигнал, пропорциональный перемещениям ЧЭ. Выходные данные счётчика образуют «грубую» составляющую измерений, которая поступает на ЭБУиО. ЭБУиО на основании значения «грубой» составляющей формирует сигналы управления для ПА, адаптирующего положение ОТЭ-датчика. ПА, в который входят пьезоэлемент (ПЭ) и механический множитель (МУ) перемещений, позиционирует ОТЭ-датчик на расстоянии, обеспечивающем его эффективную работу. Адаптация положения выполняется за счёт изменения размеров ПЭ ($d_{ПЭ}$) и МУ ($d_{сэ}$).

ОТЭ-датчик представляет собой оптический модулятор «среда – воздушный зазор – среда», который образуют призма полного внутреннего отражения и ЧЭ. Туннелирование оптической мощности происходит через зазор между призмой и ЧЭ, размер которого сопоставим с длиной волны источника излучения. Совокупность ИФП, ОТЭ-датчика и ПА образует адаптируемый оптический модуль, позволяющий использовать метод «грубо-точного» считывания микроперемещений.

В ЭБУиО происходит уточнение результатов измерений «точной» составляющей, полученной с ОТЭ-датчика. Уточнённые результаты измерений передаются на однонаправленный интерфейс.

С учётом формулы Эйри математическая модель ИФП преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем, представляющая собой зависимость пропускания интерферометра или отражательной способности $R_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)])$ от линейного ускорения a , может быть записана в виде:

$$R_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)]) = 1 / \left(1 + \frac{(1 - R_{mir})^2}{4 \cdot R_{mir} \cdot \sin^2(\delta[d_{IFP}(a)]/2)} \right),$$

где $\delta[d_{IFP}(a)] = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_{IFP}(a)}{\lambda_{IFP}}$ – фазовый набег, R_{mir} – отражательная способность зеркал, $d_{IFP}(a) = d_{IFP0} + v_B(a)$ – зазор между зеркалами интерферометра (база интерферометра), являющийся расстоянием до ЧЭ, d_{IFP0} – начальный зазор ИФП, $v_B(a)$ – перемещения ЧЭ, вызванные ускорением, a – измеряемое ускорение, λ_{IFP} – длина волны излучения в среде между зеркалами.

При реализации оптического туннелирования в преобразователе ускорения использованы три среды: среда, в которую вводится излучение (призма ПВО), с показателем преломления (ПП) n_1 ; среда, через которую будет происходить туннелирование (зазор), с ПП n_2 ; среда, в которую излучение будет переходить (ЧЭ), с ПП n_1 . В общем виде зависимость отражательной способности $R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)])$ от величины зазора d_{OTE} , изменяющегося под действием линейного ускорения a , может быть записана как:

$$R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)]) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\perp} - \varphi_{23\perp})}{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\perp} + \varphi_{23\perp})} + \frac{1}{2} \cdot \frac{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\parallel} - \varphi_{23\parallel})}{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\parallel} + \varphi_{23\parallel})};$$

$$b[d_{OTE}(a)] = -\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_{OTE}(a) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2},$$

где λ – длина волны излучения в вакууме, $d_{OTE}(a) = d_{OTE0} - v_B(a)$ – величина зазора, d_{OTE0} – начальный зазор ОТЭ-модулятора, θ – угол падения коллимированного оптического излучения на границу сред, n_1 – ПП первой и третьей сред (призмы ПВО и ЧЭ), n_2 – ПП второй среды (зазора), $\varphi_{12\perp}$, $\varphi_{23\perp}$, $\varphi_{12\parallel}$, $\varphi_{23\parallel}$ – фазы волны при отражении от границ сред (индексы \parallel и \perp

указывают на параллельную и перпендикулярную поляризации соответственно).

Проведено исследование изменения средней линии ЧЭ, показано, что микроперемещения линейно зависят от ускорения a и могут быть детектированы интерферометрическим методом.

Построены временные диаграммы МОЭМ-преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем (Рисунок 2): с нуля до 4 секунд измеряемое ускорение a (пунктирная линия «real») линейно изменяется от 0 до 100 м/с^2 .

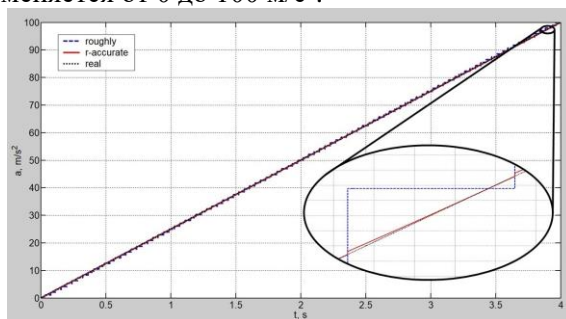


Рисунок 2 – Временные диаграммы МОЭМ-преобразователя ускорения

Являющиеся эквивалентом ускорения результаты измерений «грубо-точным» методом представлены непрерывной линией «*r-accurate*», а их «грубая» составляющая, изменяющаяся ступенчато, – штриховой «*roughly*». В выбранном диапазоне измерений погрешность преобразования составляет десятые доли м/с^2 для линейного ускорения при учёте нелинейности умножителя и сотые доли м/с^2 – без учёта, что не превышает 0,25% и 0,05% соответственно. Например, при подаче на вход ускорения $a = 100 \text{ м/с}^2$, производящего перемещение $x = 4,4 \text{ мкм}$, результат измерений без учёта нелинейности умножителя составляет $a_{RoAc} = 99,99 \text{ м/с}^2$.

В третьей главе предложен компенсационный МОЭМ-преобразователь линейного ускорения с комбинированной электромагнитной (ЭМ) и электростатической (ЭС) обратной связью (ОС), позволяющей стабилизировать положение ЧЭ и демпфировать колебания вблизи свободного края.

Для уменьшения влияния погрешностей, вызванных нелинейностью функции преобразования узла считывания, выполненного на основе ОТЭ-датчика, предложено использовать

модуль линейризации, входящий в состав электронного блока обработки (ЭБО). Математическая модель модуля линейризации, содержащая коэффициенты K_b , $K_{\phi TE}$, $K_{\phi TM}$, является функциональной зависимостью зазора d_{OTE} от отражательной способности R_{OTE} :

$$d_{OTE} = \frac{\ln(\sqrt{R_{IF}} + \sqrt{R_{IF} + 1})}{K_b}, \text{ где } R_{IF} = -\frac{(2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\phi TE} + K_{\phi TM})}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)} - \frac{\sqrt{((2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\phi TE} + K_{\phi TM}))^2 - 16 \cdot R_{OTE} \cdot (R_{OTE} - 1) \cdot K_{\phi TE} \cdot K_{\phi TM}}}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)}.$$

При использовании модуля линейризации выходная функция имеет линейный характер, а значение нелинейности находится на уровне погрешности вычислений среды моделирования.

Разработана структурная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 3), позволяющая реализовать метод комбинированной стабилизации ЧЭ при помощи ЭС и ЭМ ОС.

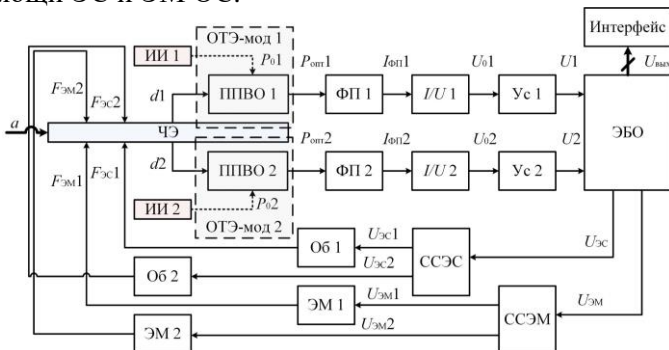


Рисунок 3 – Структурная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием

Структурная схема компенсационного преобразователя ускорения включает в себя: два ОТЭ-модулятора (ОТЭ-мод 1, ОТЭ-мод 2), образованных ЧЭ и призмами полного внутреннего отражения (ПВО) (ППВО 1, ППВО 2); два источника оптического излучения (ИИ) (ИИ 1, ИИ 2); два фотоприёмника (ФП 1, ФП 2); два преобразователя «ток-напряжение» (I/U 1, I/U 2); два усилителя ($Ус$ 1, $Ус$ 2); электронный блок обработки (ЭБО); схемы селекции для ЭС (ССЭС) и ЭМ (ССЭМ) обратных связей; обкладки (Об 1, Об 2) и два электромагнита (ЭМ 1, ЭМ 2). ЧЭ и прямоугольная призма ПВО, через катетную грань которой вводится

коллимированное инфракрасное излучение от ИИ, образуют ОТЭ-модулятор «среда – воздушный зазор – среда». Изменения субмикрометровых зазоров модулируют значения выходных оптических мощностей ($P_{\text{опт}1}$, $P_{\text{опт}2}$), детектируемых ФП1 и ФП2, преобразуя оптические мощности в фототоки ($I_{\text{фп}1}$, $I_{\text{фп}2}$). I/U_1 и I/U_2 преобразуют фототоки в аналоговые напряжения (U_{01} , U_{02}), усиливаемые и подаваемые на ЭБО.

ЭБО обрабатывает результаты измерений и формирует сигналы управления для ЭМ ($U_{\text{ЭМ}}$) и ЭС ($U_{\text{ЭС}}$) контуров обратной связи, стабилизирующих положение ЧЭ. Сигналы управления поступают на ССЭС и ССЭМ, линеаризующие характеристики, связывающие значения стабилизирующих напряжений и сил, и подающие напряжения на требуемые пары электродов ($U_{\text{ЭС}1}$, $U_{\text{ЭС}2}$) ЭС и электромагнит ($U_{\text{ЭМ}1}$, $U_{\text{ЭМ}2}$) ЭМ стабилизаций. ЭС силы между обкладками ($F_{\text{ЭС}1}$, $F_{\text{ЭС}2}$) и ЭМ сила между сердечником и подвижным магнитопроводом ($F_{\text{ЭМ}1}$, $F_{\text{ЭМ}2}$), являющимся якорем в магнитной цепи, демпфируют колебания и смещают ЧЭ к положению покоя соответственно. ЭБО формирует выходное значение на основе измерений ОТЭ-модуляторов и стабилизирующих напряжений ОС, а затем передаёт его на однонаправленный интерфейс.

Компенсационный преобразователь ускорения с оптическим считыванием содержит: ОТЭ-модуляторы, включающие ЧЭ и призмы ПВО; электромагниты, состоящие из катушки, сердечника и якоря; обкладки (Рисунок 4).

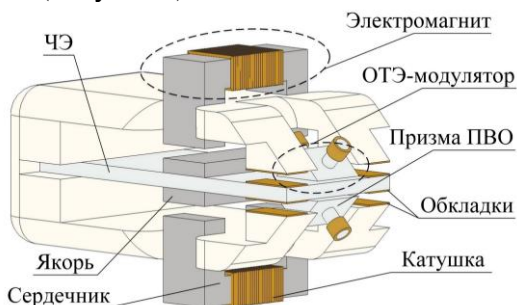


Рисунок 4 – Компенсационный преобразователь ускорения с оптическим считыванием

Математическая модель оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью является совокупностью моделей ЧЭ, ОТЭ-модулятора,

обкладок ЭС ОС и электромагнита ЭМ ОС. Измеряемое ускорение a действует на ЧЭ и индуцирует распределённую силу q_{SE} . На ЧЭ действуют и две сосредоточенные силы, стабилизирующие его положение: ЭС F_{ES} и ЭМ F_{EM} , приложенные к краю и середине ЧЭ соответственно.

Перемещения свободного края ЧЭ v_B при статических значениях сил и ускорения или после завершения всех переходных процессов могут быть описаны уравнением:

$$v_B = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left(-\frac{L^4}{8} \cdot q_{SE} + \frac{5 \cdot L^3}{48} \cdot F_{EM} + \frac{L^3}{3} \cdot F_{ES} \right),$$

где E – модуль Юнга материала ЧЭ, J_{SE} – момент инерции сечения ЧЭ, L – длина ЧЭ.

Для более точного отражения динамики ЧЭ составлены передаточные функции (ПФ), связывающие перемещение с ускорением W_{FSE} , электромагнитной W_{FEM} и электростатической силами W_{FES} , а также ПФ ЧЭ W_{SE} в целом:

$$W_{FSE}(s) = \frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}; \quad W_{FEM}(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}};$$

$$W_{FES}(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}}; \quad W_{SE}(s) = -W_{FSE}(s) + W_{FEM}(s) + W_{FES}(s),$$

где m – масса ЧЭ, $K_D = \frac{2 \cdot \mu_{ADV} \cdot L^3 \cdot b^3}{d_{body}^3 \cdot (L^2 + b^2)}$ – коэффициент

демпфирования, μ_{ADV} – коэффициент динамической вязкости среды в зазоре между ЧЭ и корпусом, b – ширина ЧЭ, d_{body} – значение зазора, $G_{FSE} = (8 \cdot E \cdot J_{SE}) / L^3$, $G_{FEM} = (48 \cdot E \cdot J_{SE}) / (5 \cdot L^3)$,

$G_{FES} = (3 \cdot E \cdot J_{SE}) / L^3$ – коэффициенты жесткости ЧЭ при действии сил, соответствующих индексам, определяемые по значениям коэффициентов перед слагаемыми в уравнении перемещения свободного края ЧЭ.

Для ЭС стабилизации ЧЭ преобразователя ускорения, демпфирующей колебания, используются обкладки, сила взаимодействия между которыми определяется через силу Лоренца как:

$$F_{ES} = \left(\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pl} \cdot U_{ES}^2 \right) / \left(2 \cdot d_{ES}^2 \right),$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная, S_{pl} – площадь поверхности каждой из обкладок,

d_{ES} – расстояние между обкладками, U_{ES} – напряжение между обкладками.

Для ЭМ стабилизации ЧЭ, минимизирующей его перемещения, использованы электромагниты. С учётом формулы Максвелла силу тяги F_{EM} электромагнита цепи ОС преобразователя ускорения с оптическим считыванием определим как:

$$F_{EM} = (n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core} \cdot I^2) / (16 \cdot d_{EM}^2),$$

где n_{turn} – число витков в катушке, μ_0 – магнитная постоянная, S_{core} – площадь поперечного сечения сердечника, d_{EM} – расстояние между сердечником и якорем, I – сила тока, проходящего через катушку.

Получена ПФ компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью и показано, что система нейтрально устойчива.

Выполнено исследование характеристик компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ. Статическая ошибка преобразователя в выбранном диапазоне измерений составляет сотые доли м/с², что не превышает 0,05%. Например, при подаче на вход ускорения $a_{out} = 98,1$ м/с² результат измерений составляет $a_{meas} = 98,13$ м/с².

Проведено исследование реакции модели компенсационного преобразователя ускорения на ступенчатое воздействие (Рисунок 5). Значение амплитуды входного измеряемого ускорения $a_{max} = 98,1$ м/с² $\approx 10g$.

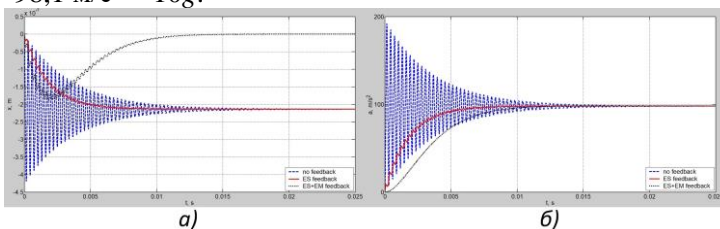


Рисунок 5 – Реакция модели компенсационного преобразователя ускорения на ступенчатое воздействие: а) координата перемещения свободного края ЧЭ; б) значение измеренного ускорения

Результаты измерений, эквивалентные ускорению, без использования стабилизации ЧЭ представлены штриховой линией «no feedback», с использованием только ЭС стабилизации и дифференциального закона управления – непрерывной

«*ES feedback*», а с использованием метода комбинированной стабилизации, т.е. совместным использованием ЭС и ЭМ стабилизаций, и пропорционально-интегрально-дифференциального закона управления – пунктирной «*ES+EM feedback*».

Показано, что диапазоны микроперемещений свободного края ЧЭ, т.е. той области, в которой происходит считывание информации, (Рисунок 5-а) составляют $\pm 0,42$ мкм, $\pm 0,22$ мкм и $\pm 0,19$ мкм, в случаях отсутствия стабилизации, при наличии только ЭС стабилизации и при совместном использовании ЭС и ЭМ стабилизаций соответственно. При совместном использовании ЭС и ЭМ стабилизаций ЧЭ стремится вернуться к своему исходному положению. Использование метода комбинированной стабилизации делает преобразователь более устойчивым к ударным нагрузкам и позволяет расширить диапазон амплитуды измеряемых ускорений. Система в рассмотренных случаях остаётся устойчивой, а переходные процессы – сходящимися. Результаты измерений (Рисунок 5-б) стремятся к реальному измеряемому значению. Система без стабилизации ЧЭ обладает большими перерегулированием (около 95%) и колебательностью. Введение только ЭС стабилизации позволяет почти в 2 раза увеличить диапазон значений измеряемых ускорений и быстрее демпфировать колебательность, а совместно с ЭМ – исключить её. Законы регулирования таковы, что перерегулирование, при наличии ОС, мало. Также сокращается время переходного процесса.

В четвертой главе проведён анализ влияния параметров узлов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием. Толщина h влияет на чувствительность преобразователя, изменяя диапазон деформаций ЧЭ. Перемещение крайней точки ЧЭ связано гиперболической зависимостью с толщиной h . Для корректировки параметров чувствительности преобразователя могут изменяться такие параметры ЧЭ, как его топология или профиль. Проведено исследование максимального перемещения свободного края ЧЭ при изменении его топологии и профиля.

Исследования зависимостей отражательной способности и чувствительности от величины зазора между призмой и ЧЭ при варьировании длины электромагнитной волны λ и угла падения θ показали, что при увеличении θ или уменьшении λ : уменьшается диапазон допустимого участка работы, но возрастает

максимальное значение чувствительности; происходит смещение пика чувствительности в сторону меньших перемещений.

Проведены исследования влияния газового демпфирования на характер переходного процесса разомкнутой системы. Проведены исследования влияния значения коэффициента ОС K_{FB} на характер переходного процесса замкнутой системы.

Определены минимально детектируемое линейное ускорение $a_{\min}=0,002 \text{ м/с}^2$ и динамический диапазон $D_{\text{sens}}=94,4 \text{ дБ}$ компенсационного МОЭМ-преобразователя.

Предложен алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины (Рисунок 6), позволяющий увеличить чувствительность к субмикрометровым перемещениям.

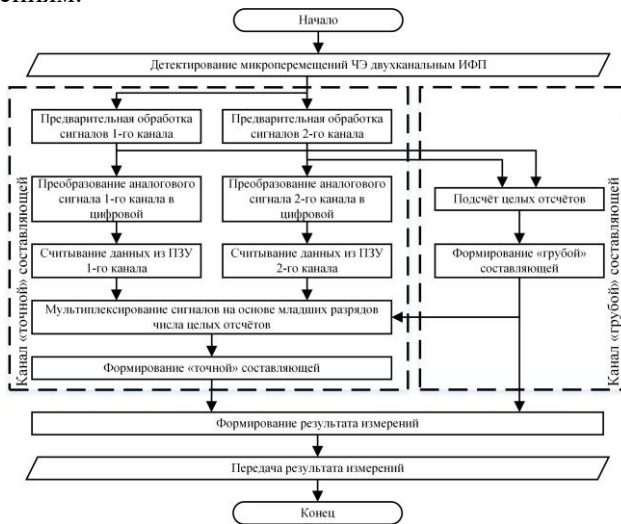


Рисунок 6 – Алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла

Сигналы фотоприёмников преобразуются в напряжения, которые усиливаются и поступают в блок для подсчёта целых отсчётов с помощью компараторов. С выхода счётчика двоичный код поступает в блок формирования выходного результата (БФВР), и является его грубой составляющей. Дополнительно анализируется каждый интервал между максимумами и подсчитывается промежуточный результат внутри него.

Формирование добавки происходит путём подачи сигналов на АЦП, с которых двоичный код, являющийся адресом, поступает на ПЗУ. Данные ячеек ПЗУ по выбранным адресам в виде двоичного кода поступают на мультиплексоры, на выходе которых, в зависимости от участка работы, формируется добавка. Двоичный код с блока мультиплексоров поступает в БФВР, дополняя грубую составляющую точной.

Разработан макет преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 7), и проведены исследования, подтверждающие его работоспособность.



Рисунок 7 – Макет преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием

Предложена методика проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям. Данная методика предполагает использование ЧЭ балочного типа. На основании методики разработана программа синтеза, вид основного окна которой представлен на иллюстрации (Рисунок 8).

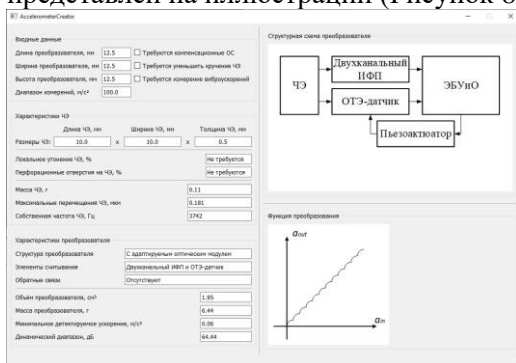


Рисунок 8 – Внешний вид основного окна программы

Вначале из массогабаритных ограничений определяются длина и ширина ЧЭ. Далее происходит выбор: требуются ли компенсационные обратные связи, стабилизирующие положение ЧЭ. Использование обратных связей рекомендуется при наличии возмущений, дестабилизирующих ЧЭ, влияние которых требуется минимизировать, например, сил, направленных вдоль основной оси чувствительности, или моментов кручения вокруг продольной оси ЧЭ. При этом определяется и вид оптического модулятора, влияющий на точность измерений. Предлагается выбирать модуляторы на основе оптического туннельного эффекта при наличии ОС – для перемещений ЧЭ в пределах длины волны оптического излучения; интерферометрические модуляторы – при отсутствии ОС, для перемещений порядка единиц-десятков длин волн оптического излучения.

Затем по требуемым статическим параметрам преобразователя определяются конструктивные параметры ЧЭ, влияющие на чувствительность преобразователя: толщина ЧЭ, его топология и профиль. Далее происходит выбор: требуется ли уменьшение влияния моментов кручения вокруг продольной оси ЧЭ у преобразователя с ОС или требуется ли измерение виброускорений преобразователем без ОС. Если измерение виброускорений не требуется, то рекомендуется использование адаптируемого оптического модуля, в противном случае приоритетным является выбор алгоритмов повышения точности ИФП. При наличии ОС, стабилизирующих ЧЭ, могут быть дополнительно сформированы рекомендации по: количеству оптических модуляторов; типам ОС; местам их расположения в корпусе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные научные результаты:

1. Разработан микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов.
2. Разработаны новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования.

3. Разработан алгоритм функционирования преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, позволяющий наиболее эффективно использовать совокупность двух разнотипных оптических преобразователей перемещения.
4. Разработана математическая модель преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, отличающаяся совместной обработкой дискретных сигналов интерферометрического канала считывания и непрерывных сигналов канала считывания с датчиком на эффекте оптического туннелирования.
5. Разработаны новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейного ускорения; предложен метод комбинированной стабилизации ЧЭ, использующий совместно электромагнитную и электростатическую обратные связи.
6. Разработана математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования.
7. Разработан алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием, отличающийся наличием дополнительной калибровки и позволяющий уменьшить влияние технологических погрешностей узлов на выходные характеристики преобразователя.
8. Разработана структурная схема микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений, позволяющая снизить чувствительность к побочным угловым ускорениям.
9. Проведён численный эксперимент, показавший правильность разработанных математических моделей; исследовано влияние параметров узлов и внешних дестабилизирующих факторов на характеристики микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.
10. Разработан алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного

ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины; выбрано значение отражательной способности зеркал.

11. Определены минимально детектируемое линейное ускорение и динамический диапазон микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения; проведены полунатурные исследования оптического канала считывания.

12. Предложена методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, представленная в виде алгоритма, на основе которого разработана программа синтеза, позволяющая автоматизировать определение структуры и расчёт параметров преобразователя по требуемым характеристикам.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, включенных в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. Бусурин В.И., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод «грубо-точного» считывания для преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем // Датчики и Системы. 2020. № 8. С. 27–34. DOI: 10.25728/datsys.2020.8.4.

2. Бусурин В.И., Коробков В.В., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод комбинированной стабилизации чувствительного элемента компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 10. С. 5–13. DOI: 10.25791/pribor.10.2020.1211.

3. Бусурин В.И., Штек С.Г., Коробков В.В., Жеглов М.А., Коробков К.А. Исследование компенсационного преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 3. С. 29–38. DOI: 10.25791/pribor.3.2021.1247.

В журнале, входящем в международные реферативные базы данных:

4. Busurin V.I., Korobkov V.V., Korobkov K.A., Koshevarova N.A. Micro-Opto-Electro-Mechanical System Accelerometer Based on Coarse-Fine Processing of Fabry–Perot Interferometer Signals. Measurement Techniques, 2021. Vol. 63. № 11. Pp. 883–890. doi: 10.1007/s11018-021-01869-6.

В издании, входящем в международные реферативные базы данных:

5. Busurin V.I., Korobkov K.A., Shleenkin L.A., Makarenkova N.A. Compensation Linear Acceleration Converter Based on Optical Tunneling. 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 25 – 27 May 2020, Saint Petersburg, Russia. Pp. 1–4, doi: 10.23919/ICINS43215.2020.9133810.

В других изданиях:

6. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Коробков К.А. Разработка преобразователя ускорений на эффекте оптического туннелирования // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сб. тр. XXVII Междунар. научн.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2018 г., Алушта. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. с. 182.

7. Нгуен В.В., Бусурин В.И., Коробков К.А. Анализ характеристик микро-опто-электрическо-механического компенсационного преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». 19 – 23 ноября 2018 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2018. с. 187-188.

8. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Коробков К.А. Булычев Р.П. Разработка метода «грубо-точной» обработки информации в преобразователе ускорений с оптическим считыванием // VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. с. 643-644.

9. Бусурин В.И., Коробков К.А., Нгуен В.В. Анализ характеристик микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя ускорений на основе оптического туннельного эффекта // Микроэлектроника и информатика – 2019. 26-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2019. с. 79.

10. Бусурин В.И., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Микрооптоэлектромеханический преобразователь ускорения на основе «грубо-точного» метода измерения // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления,

автоматики и обработки информации», Сборник трудов. Алушта, 14 – 20 сентября 2019 г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2019. с. 30-31.

11. Бусурин В.И., Штек С.Г., Жеглов М.А., Коробков К.А., Булычев Р.П. Разработка контура «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента преобразователя ускорений с оптическим считыванием // IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. с. 605-606.

12. Коробков К.А. Разработка оптического преобразователя ускорений с резервированием канала считывания микроперемещений // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 248-249.

13. Дубицкий В.А., Коробков К.А. Разработка имитационной модели микроэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 234.

14. Кошеварова Н.А., Коробков К.А. Разработка алгоритма работы преобразователя ускорений на основе интерферометра Фабри-Перо // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 249-250.

15. Коробков К.А., Шлеёнкин Л.А., Бусурин В.И. Разработка адаптируемого узла «грубо-точного» измерения ускорений с оптическим считыванием // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб.: ГУАП, 2020. с. 113-114.

16. Коробков В.В., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Разработка алгоритма работы преобразователя ускорений на основе интерферометра Фабри-Перо // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб.: ГУАП, 2020. с. 114-115.

17. Коробков К.А., Бусурин В.И. Методика определения параметров преобразователя линейных ускорений // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2020. с. 275-276.

18. Бусурин В.И., Штек С.Г., Жеглов М.А., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Анализ погрешностей компенсационного

преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием // X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. с. 419-420.

19. Кошеварова Н.А., Коробков К.А. Преобразователь ускорения на основе интерферометра Фабри-Перо и электромагнитной обратной связи // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – Мб. [Электронное издание]. с. 269-270.

20. Бусурин В.И., Горбачев Н.П., Макаренко Н.А., Коробков К.А., Александров Д.Н. Разработка микрооптоэлектромеханического интеллектуального преобразователя ускорения с дифференциальным считыванием // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Тезисы докладов XXX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2021 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2021. с. 91.

Решение о выдаче патента РФ на изобретение: Бусурин В.И., Коробков К.А., Кошеварова Н.А., Штек С.Г., Жеглов М.А. Микро-опто-электромеханический компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента. Заявка на изобретение №2021112754 от 30 апреля 2021 г. Решение о выдаче патента от 08 октября 2021 г.

Личный вклад автора в работы, написанные в соавторстве, заключается в разработке новых структурных и функциональных схем микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения [1; 8; 15], математической модели компенсационного преобразователя с модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования [2; 3; 5 – 7; 9; 11; 13; 18; 20], алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла [4; 10; 14; 16; 19], методики проектирования преобразователя линейного ускорения [17], получении результатов исследований, составляющих научную новизну работы и выносимых на защиту.