

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Исполняющий обязанности ректора  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана,  
кандидат технических наук  
Михаил Валерьевич Гордин

« 03 » \_\_\_\_\_ 2022 г.



**ведущей организации на диссертационную работу Коробкова  
Кирилла Андреевича «Разработка и исследование  
микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя  
линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки  
сигналов», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления»**

***Актуальность темы работы***

Во многих отраслях техники имеется потребность в измерительных преобразователях и приборах, обеспечивающих прецизионное измерение ускорений, работу в сложных условиях эксплуатации, сильных электрических и магнитных полей, имеющих высокую чувствительность и широкий динамический диапазон. Такие измерительные преобразователи востребованы для управления подвижными объектами, при построении навигационных систем, в беспилотных автомобилях и летательных аппаратах, в системах круиз-контроля и подвески транспортных средств, в строительстве для измерения колебаний зданий и мостов, в системах контроля целостности трубопроводов, в сейсмических мониторах, в робототехнике в системах контроля положения манипуляторов, в компьютерной технике (смартфонах, планшетах, ноутбуках, серверах и пр.)

*Handwritten initials or signature in the bottom left corner.*

как для определения ориентации в пространстве, так и для определения уровня вибраций и формирования сигналов защиты механических систем (например, жестких дисков), входящих в их состав, и в других прикладных задачах.

Использование в преобразователях линейного ускорения оптических методов считывания информации позволяет повысить чувствительность и точность, избежать электростатических силовых воздействий на чувствительный элемент, снизить чувствительность преобразователя к внешним электрическим и магнитным полям, сократить диапазон механических перемещений чувствительного элемента и уменьшить чувствительность к поперечным ускорениям. Оптический модулятор в микро-опто-электромеханических (МОЭМ) преобразователях ускорения воспринимает изгибы чувствительного элемента и измеряет его перемещения. При компенсации влияния различных внешних факторов погрешность оптических способов детектирования может не превышать сотых долей процента, обеспечивается высокая чувствительность к ускорению. Поэтому разработка и исследование МОЭМ преобразователя линейного ускорения на основе методов прецизионного оптического считывания, способного обеспечить измерение в широком диапазоне линейных ускорений, является актуальной задачей.

### *Содержание диссертационной работы*

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и семи приложений.

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

В первой главе изложены перспективы развития направления, связанного с исследованием миниатюрных преобразователей линейных ускорений на основе МЭМС-технологий, и наделения таких преобразователей «интеллектуальными» свойствами. Выполнен аналитический обзор методов считывания микроперемещений чувствительного элемента (ЧЭ). Рассмотрены конструктивные особенности

преобразователей линейных ускорений и их ЧЭ. Отмечена целесообразность совмещения МЭМС-преобразователей ускорения и оптических средств считывания. Поставлены частные задачи исследования.

Во второй главе предложены структурная и функциональная схемы МОЭМ-преобразователя линейного ускорения, использующего грубо-точный метод измерения с использованием сигналов интерферометрического измерительного канала и канала оптического туннелирования, что обеспечивает повышение чувствительности и точности преобразователя. Разработаны математические модели, описывающие преобразователь при работе в различающихся условиях, разработана блок-схема алгоритма работы, проведено математическое моделирование.

В третьей главе предложен компенсационный метод стабилизации положения ЧЭ МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, реализуемый грубо-точным методом стабилизации положения ЧЭ и демпфирования его колебаний, что позволяет ускорить затухание переходных процессов и устранить последствия вибраций. Разработаны структурная и функциональная схемы, математические модели, алгоритмы функционирования и калибровки, позволяющие снизить влияние указанных выше факторов и повысить точность МОЭМ-преобразователя.

В четвертой главе проведён анализ влияния параметров узлов МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на его характеристики. Предложен алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины, позволяющий увеличить его чувствительность. Предложена методика проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям.

В заключении представлены наиболее важные результаты диссертационной работы.

В приложении приведены математические модели в среде графического программирования, алгебраические преобразования и упрощения, анализ деформаций чувствительного элемента при различных его топологиях, текст программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения.

*Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Разработан микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов, в котором использование двухканального оптического съема информации на основе оптического туннелирования и интерферометра, реализованного грубо-точного метода изменения и грубо-точного метода стабилизации положения ЧЭ обеспечили повышение чувствительности и точности преобразователя, уменьшение влияния поперечных ускорений, способность работы в сложных условиях эксплуатации.

Разработанные новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующего грубо-точный метод измерения с использованием сигналов интерферометрического измерительного канала и канала оптического туннелирования и грубо-точного метода стабилизации положения ЧЭ с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, с линеаризацией функции преобразования, обеспечивают регистрацию ускорений с высокой точностью в широком диапазоне амплитуд и частот (п. 2.1, п. 3.1.1, п. 3.1.2, п. 3.2.1, п. 3.3).

Предложена уточненная математическая модель микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, учитывающая динамические свойства ЧЭ, наличие интерферометрического измерительного канала, канала оптического туннелирования, наличие каналов электромагнитной и электростатической обратной связи, модуля линеаризации функции преобразования, что позволяет повысить точность описания преобразователя и уменьшить погрешность расчета его характеристик (п. 2.2.1, п. 2.2.2, п. 2.3.1, п. 2.3.2, п. 3.1.3, п. 3.1.4, п. 3.2.2).

Предложен алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, предусматривающие определение дробной части полосы интерференционной картины, что позволяет существенно увеличить чувствительность и точность преобразователя без внесения изменений в конструкцию ЧЭ (п. 4.4).

#### ***Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов***

Использование уточненной математической модели микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя

линейного ускорения с интерферометрическим измерительным каналом, каналом оптического туннелирования, каналами электромагнитной и электростатической обратной связи, дополненной модулем линеаризации функции преобразования, позволяет повысить точность расчета характеристик преобразователя и проводить анализ влияния конструктивных параметров на характеристики преобразователя.

Проведенное экспериментальное исследование характеристик канала считывания измерительной информации на эффекте оптического туннелирования и макета преобразователя ускорения с оптическим считыванием информации подтверждает корректность сформулированных предположений и возможность реализации прецизионных акселерометров для высокоточного детектирования линейных ускорений.

Предложенный алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, предусматривающий определение дробной части полосы интерференционной картины, позволяет реализовать требование, предъявляемое к высокой чувствительности и точности преобразователей данного класса без внесения изменений в конструкцию ЧЭ.

Предложенная методика проектирования микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения позволяет осуществить выбор структуры и расчёт параметров конструкции преобразователя в автоматизированном режиме.

### ***Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации***

Предложенные схемы, алгоритмы и математические модели микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения имеют высокую практическую ценность. Использование результатов диссертационной работы возможно в таких организациях, как АО «ГосНИИП», ФГУП «ГосНИИАС», ПАО «МИЭА», АО МНПК «Авионика». Исследования в области микро-опто-электромеханических преобразователей линейного ускорения следует продолжать в МАИ и АО «ГосНИИП».

### ***Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений***

Обоснованность и достоверность полученных результатов и научных положений подтверждается приемлемостью допущений, корректностью

используемого автором математического аппарата при разработке математических моделей микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов, корректностью математических моделей, экспериментальными исследованиями и соответствием полученных результатов известным решениям.

Теоретические и практические результаты исследований по теме диссертации изложены в 3 работах, опубликованных в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 1 работе, опубликованной в журнале, входящем в международные реферативные базы данных, в 1 работе, опубликованной в издании, входящем в международные реферативные базы данных, и 15 работах, опубликованных в сборниках тезисов конференций, получен патент РФ на изобретение.

#### ***Краткая характеристика представленной диссертационной работы***

Диссертационная работа охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, имеет непротиворечивую методологическую платформу и взаимосвязанность выводов.

Структура работы соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования, а также научной специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Автором полностью раскрыты все основные проблемы и выводы проведенного исследования.

Каждая из частей диссертационной работы составляет органичное единство с другими частями, характеризуется последовательностью изложения и написана грамотным научно-техническим языком.

В диссертационной работе чётко отражены все полученные автором новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, а предложенные решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

#### ***Замечания***

По рассмотренной диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

- не в полном объеме оценено влияние дестабилизирующих факторов и помех на точностные характеристики преобразователя, в частности, влияние электрических и магнитных полей на контуры с электромагнитной и электростатической обратными связями;
- не приведены сведения о влиянии изменения площади оптического туннелирования на точность измерений соответствующим измерительным каналом (п. 2.3.2);
- не оценена возможность повышения скорости демпфирования вынужденных колебаний ЧЭ преобразователя и повышения чувствительности в области малых сигналов за счет перевода электромагнитных и электростатических исполнительных элементов из поочередного в дифференциальный режим работы;
- недостаточно обоснован выбор материалов при изготовлении оптической части макета преобразователя ускорений;
- из описания алгоритма функционирования преобразователя ускорения не ясно, каким образом осуществляется этап калибровки (п. 3.1.5, Рисунок 25);
- не приведены геометрические размеры основных узлов преобразователя (зазоры между чувствительным элементом и призмами, размеры магнитов электромагнитного и электродов электростатического датчиков момента и т.п.), что не позволяет оценить возможность его технической реализации и провести сравнение с существующими МЭМС-акселерометрами, имеющими сопоставимые массогабаритные характеристики.

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, в полной мере решающее поставленные автором задачи, и заслуживает положительной оценки.

### ***Общее заключение о диссертации***


В целом диссертационная работа содержит новые результаты, имеющие научное значение и важную практическую значимость. Путём применения прецизионных оптических средств считывания субмикрометровых перемещений чувствительного элемента и методов двухканальной обработки сигналов решена задача повышения чувствительности и помехозащищенности микроэлектромеханического преобразователя линейного ускорения. Результаты, полученные автором, являются актуальными для создания элементов и устройств систем управления подвижными объектами. Диссертационная работа Коробкова Кирилла

Андреевича является законченной научно-квалификационной работой, отвечает всем критериям, изложенным в постановлении ВАК «О присуждении учёных степеней» (в текущей редакции), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на заседании кафедры «Электротехника и промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» протокол № 7 от «2» марта 2022 года.

**Отзыв составили:**

Красовский Александр Борисович, профессор, д.т.н. по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы», ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. кафедрой Электротехники и промышленной электроники, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Тел. +7 499 2636399, e-mail: [fn7@bmstu.ru](mailto:fn7@bmstu.ru)

 А. Б. Красовский

Васюков Сергей Александрович, доцент, д.т.н. по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, проф. кафедры Электротехники и промышленной электроники, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Тел. +7 499 2636399, e-mail: [fn7@bmstu.ru](mailto:fn7@bmstu.ru)



С.А. Васюков