

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА**  
Д 002.226.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 04.04.22 г., № 3

О присуждении Коробкову Кириллу Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка и исследование микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов» по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» (по техническим наукам) принята к защите 31.01.2022 (протокол заседания № 1) диссертационным советом Д 002.226.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, приказ ВАК о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012 г.)

Соискатель Коробков Кирилл Андреевич, 1994 года рождения, в 2017 г. с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки магистров 27.04.04 «Управление в технических системах», работает в Московском авиационном институте на кафедре 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» в должности старшего преподавателя.

Диссертация выполнена в рамках прохождения обучения в очной аспирантуре на кафедре 301 Московского авиационного института.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана МАИ в 2021 г.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 301 Московского авиационного института **Бусурин Владимир Игоревич**.

**Официальные оппоненты:**

1. **Горшков Борис Георгиевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН),
2. **Кулабухов Владимир Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор тематического направления № 17 АО Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского, дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», в своем положительном отзыве, подписанном **Красовским Александром Борисовичем**, профессором, 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, и **Васюковым Сергеем Александровичем**, доцентом, 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, утвержденном исполняющим обязанности ректора ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н. **Гординым Михаилом Валерьевичем**, указала, что 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».

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».

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.

#### **Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

- 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.
- 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.

**Другие научные достижения**, свидетельствующие о научной новизне и значимости полученных результатов:

- 1) 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. Патент РФ на изобретение № 2758814 от 02 ноября 2021 г. Бюл. № 31. (Заявка на изобретение №2021112754 от 30 апреля 2021 г. Решение о выдаче патента от 08 октября 2021 г.)

На диссертацию и автореферат поступили отзывы, все положительные. В отзывах отмечается актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, соответствие её специальности 05.13.05, а также требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по этой специальности.

**В отзывах на диссертацию содержатся следующие замечания.**

**Из отзыва официального оппонента д.т.н. Горшкова Б.Г.:**

1. Не получена аналитическая зависимость влияния технологических погрешностей изготовления оптических компонентов на точностные характеристики чувствительного элемента преобразователя линейного ускорения (п.4.1).
2. Не рассмотрена оптическая схема считывания информации: не выработаны требования к когерентности излучения, расходимости и не обсуждены пути достижения требуемых характеристик (п.4.5).
3. При описании эксперимента не указаны ни тип источника излучения, ни длина волны и ширина спектра, ни тип фотоприёмника. Не приведены результаты количественного сравнения результатов теоретического и экспериментального исследований функции преобразования датчика линейных ускорений (п.4.5).
4. Не учтено влияние элементов фиксации («заделки») чувствительного элемента на характеристики преобразователя (п.4.2).

**Из отзыва официального оппонента к.т.н., доцента Кулабухова В.С.:**

1. Недостаточно подробно описан алгоритм проверки работоспособности и калибровки используемых электромагнитных и электростатических преобразователей перемещений (п. 3.1).
2. В диссертации разработано большое число математических моделей для элементов измерительной цепи рассматриваемого датчика (п. 2.2-2.4, Приложение Г). Вместе с тем некоторые вопросы идентификации этих моделей остались за рамками исследования.
3. При оценке влияния внешних дестабилизирующих факторов на погрешности преобразователя линейного ускорения основное внимание уделено влиянию температуры и поперечного ускорения. Желательно было бы оценить и влияние изменения давления окружающей среды и его пульсаций на характеристики оптического чувствительного элемента измерительного преобразователя (п. 4.2).
4. Не приведены значения параметров демпфирования колебаний чувствительного элемента при использовании электромагнитной обратной связи (п. 3.2).
5. Судя по результатам исследования (п. 3.2), наличие электромагнитной и электростатической обратных связей, с одной стороны, положительно влияет на характеристики измерительного преобразователя, но, с другой стороны, приводит к сужению его полосы пропускания. Для практики важен вопрос, какую полосу пропускания датчика потенциально можно ожидать без подстройки коэффициентов обратных связей в процессе его эксплуатации.
6. Не приведена величина быстродействия измерительного преобразователя, не указано время выхода на рабочий режим, время единичного измерения, время серии измерений.
7. Не приведены мощность, потребляемая измерительным преобразователем, и требования к стабильности параметров источника питания.

**Из отзыва ведущей организации – ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана:**

1. 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.

2. Не приведены сведения о влиянии изменения площади оптического туннелирования на точность измерений соответствующим измерительным каналом (п. 2.3.2).

3. 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.

4. Недостаточно обоснован выбор материалов при изготовлении оптической части макета преобразователя ускорений.

5. Из описания алгоритма функционирования преобразователя ускорения не ясно, каким образом осуществляется этап калибровки (п. 3.1.5, Рисунок 25).

6. 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.

**На автореферат получено 9 отзывов:** ФГБОУ ВО «РГРТУ», Самарский университет, ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», НИЯУ МИФИ, ПАО «МИЭА», ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», филиал ВА РВСН, ФГБОУ ВО ТулГУ, ФАУ «ГосНИИАС».

**Все отзывы положительные, имеются замечания.**

1. **Из отзыва** д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Электронные вычислительные машины» РГРТУ **Кострова Б.В.** и к.т.н., доцента, директора Научно-образовательного центра «СпецЭВМ» РГРТУ **Никифорова М.Б. (ФГБОУ ВО «РГРТУ»):** «К сожалению, в тексте автореферата недостаточно явно отражена взаимосвязь производственных допусков и конечных характеристик преобразователя; присутствуют неточности и погрешности в оформлении, не затрагивающие основных выводов и положений работы; в положениях, выносимых на защиту отсутствуют количественные оценки полученных достижений (См. «8. Разработана структурная схема микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений, позволяющая снизить чувствительность к побочным угловым ускорениям». А на сколько? Есть фраза «В выбранном диапазоне измерений погрешность преобразования составляет десятые доли м/с<sup>2</sup> для линейного ускорения при учёте нелинейности умножителя и сотые доли м/с<sup>2</sup> – без учёта, что не превышает 0,25% и 0,05% соответственно», но нет сравнения этого показателя с конкурентными изделиями. Это расчетные значения, или экспериментально подтвержденные?»).

2. **Из отзыва** д.т.н., профессора, профессора Самарского университета **Заболотнова Ю.М. (Самарский университет):**

1. Недостаточно полно приведены исследования влияния газового демпфирования на характер переходного процесса разомкнутой системы.

2. Используется немного странная фраза «погрешности вычислений среды моделирования», которая требует пояснения.

3. В автореферате очень плохо читаются надписи на рисунках, которые надо было бы оформить более качественно.

3. **Из отзыва** к.т.н., доцента, начальника сектора информационно-измерительных устройств систем автоматического управления **Кессельмана М.Г. (ФАУ «ЦИАМ**

им. П.И. Баранова»): «В качестве недостатков можно указать, что в работе не в полной мере рассмотрено влияние таких внешних факторов, как температура и поперечное ускорение на характеристики преобразователя; не оценено влияние возможных отклонений параметров чувствительного элемента и узлов обратной связи на выходной сигнал преобразователя угловой скорости.»

**4. Из отзыва** к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» **Родина В.Г (НИЯУ МИФИ)**:

1. В автореферате недостаточно отражён вопрос о влиянии внешних полей на характеристики разработанного преобразователя ускорения.
2. Рисунок 2 и, особенно, рисунок 5 затруднены для восприятия приводимой на них информации.

**5. Из отзыва** к.т.н., с.н.с, главного специалиста **Галкина В.И., утверждённого** д.т.н., генеральным директором, главным конструктором ПАО «МИЭА» **Кузнецовым А.Г. (ПАО «МИЭА»)**:

1. Недостаточная обоснованность совместного использования разнотипных обратных связей в предлагаемом преобразователе линейных ускорений.
2. Следовало привести ожидаемые габаритные размеры преобразователя, так как введение электромагнитной компенсации внешних возмущений, безусловно, улучшает точностные характеристики преобразователя, но теряет такие преимущества, как малые габариты и малое энергопотребление.
3. Наряду с минимально детектируемым ускорением -  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$  следовало бы привести и такие параметры преобразователя, как: стабильность нулевого сигнала и масштабного коэффициента, нелинейность и шумовая составляющая выходного сигнала.

**6. Из отзыва** к.т.н., г.н.с. **Ключника Н.Т., утверждённого** генеральным директором ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС» **Яковлевым М.Я. (ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»)**:

1. В тексте автореферата недостаточно полно описаны достигнутые характеристики разработанного преобразователя линейного ускорения.
2. Не рассмотрен вопрос влияния поперечных ускорений на выходной сигнал преобразователя линейного ускорения при максимальных отклонениях балочного чувствительного элемента.

**7. Из отзыва** к.т.н., доцента, доцента кафедры «Системы управления ракет» филиала федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации в г. Серпухове **Канушкина С.В. (филиал ВА РВСН)**: «В качестве замечания можно указать, что в автореферате недостаточно полно описано улучшение характеристик разработанного адаптируемого преобразователя ускорения при использовании комбинированной силовой обратной связи.»

**8. Из отзыва** д.т.н., профессора кафедры «Приборы управления» **Матвеева В.В. (ФГБОУ ВО ТулГУ)**:

1. Временные диаграммы МОЭМ-преобразователя ускорения, приведенные на рис. 2 являются не информативными. Следовало бы привести абсолютные погрешности измерения ускорения.
2. Вопрос о сравнении реакций преобразователя ускорения на ступенчатое воздействие без обратных связей и с обратными связями (стр. 15-16, рис. 5) является спорным, так как все современные акселерометры строятся по компенсационной схеме. Более важным был бы вопрос сравнения акселерометров с оптической и емкостной системами съема информации о

перемещении чувствительного элемента.

3. В автореферате приведено только минимально детектируемое линейное ускорение и диапазон измерения преобразователя ускорения. Не приведены такие важные характеристики акселерометров, как шум выходного сигнала (*VRW – velocity random walk*), смещение нулевого сигнала, нелинейность характеристики и др.

**9. Из отзыва** к.т.н., начальника подразделения 0500 **Князя В.А. (ФАУ «ГосНИИАС»):**

1. Не приведена методика оценки минимально детектируемых линейных ускорений для разработанного преобразователя линейных ускорений.

2. Не приведены результаты моделирования алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** следующими обстоятельствами:

– д.т.н., ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН Горшков Б.Г. является крупным специалистом в области разработки измерительных устройств систем управления;

– к.т.н., доцент, главный конструктор тематического направления № 17 АО МНПК «Авионика» Кулабухов В.С. является крупным специалистом в области элементов и устройств систем управления;

– ведущая организация – ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана выполняет фундаментальные исследования в области измерительных устройств систем управления.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– **разработан** микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения, в котором использование двухканального оптического съема 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;

– **разработаны** новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, отличающиеся использованием совместной обработки сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования и обеспечивающие уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;

– **разработана** математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, отличающаяся использованием модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования и позволяющая повысить точность расчета характеристик;

– **предложен** алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, отличающийся определением дробной части полосы интерференционной картины и позволяющий увеличить чувствительность к микроперемещениям чувствительного элемента;

– **предложена** методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям.

### **Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

- **доказана** математически возможность повышения чувствительности микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения за счет использования оптического туннельного эффекта для измерения субмикрометровых перемещений балочного чувствительного элемента;
- **показана** возможность повышения точности расчетов характеристик микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения при использовании разработанной математической модели, учитывающей динамические свойства чувствительного элемента и расположение узлов комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связи и использующей модуль линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования;
- **предложен** метод комбинированной стабилизации чувствительного элемента микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейного ускорения, использующий совместно электромагнитную и электростатическую обратные связи.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены для практического использования** 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, использование которой позволяет выполнять анализ влияния конструктивных параметров на характеристики и повысить точность их расчета, и методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированный выбор структуры и расчёт параметров конструкции нового преобразователя, что позволяет ускорить процесс разработки. Результаты исследований внедрены в работы, проводимые в АО «ГосНИИП», и используются в учебном процессе кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- **применительно к проблематике диссертационного исследования** результативно использованы методы геометрической и волновой оптики, теории упругости и механики деформируемого твёрдого тела, теории автоматического управления, математического и полунатурного моделирования;
- **идея** построения микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с повышенной чувствительностью основана на использовании оптического туннельного эффекта для считывания субмикрометровых перемещений, модуля линеаризации функции преобразования и двухканальной обработки сигналов;
- **при проведении экспериментальных исследований** канала считывания на эффекте оптического туннелирования и макета оптического преобразователя ускорения использовались современные средства измерений и методы обработки результатов;
- **результаты и выводы диссертационной работы** подтверждаются 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.

**Личный вклад соискателя** состоит в самостоятельном получении всех новых научных и практических результатов работы, которые включают:

- **структурные и функциональные схемы** микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования;
- **математическую модель** компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненную модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования;
- **алгоритм** повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины;
- **методику** проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения.

Соискатель Коробков К.А. достаточно полно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы.

Диссертационная работа Коробкова К.А. является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научная задача разработки и исследования микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, актуального при создании современных систем автоматического управления, навигации и стабилизации положения подвижных объектов.

На заседании 04 апреля 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Коробкову К.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.13.05, участвующих в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. директора по научной работе

д.т.н.



*[Handwritten signature]*

С.А. Краснова

Председатель

диссертационного совета Д 002.226.03,

д.т.н.

*[Handwritten signature]*

О.П. Кузнецов

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.226.03,

к.т.н.

*[Handwritten signature]*

А.А. Кулинич

04 апреля 2022 г