

ОТЗЫВ

официального оппонента Горшкова Бориса Георгиевича на диссертационную работу Васецкого Станислава Олеговича на тему «Разработка адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

Актуальность выбранной темы.

Современные тенденции развития информационно-измерительных и управляющих систем направлены на интеграцию оптических методов регистрации микроперемещений чувствительных элементов преобразователей угловой скорости и линейных ускорений, обеспечивающих более высокую чувствительность. Одним из перспективных направлений является использование оптического туннельного эффекта, при котором зависимость отражённых оптических сигналов от зазора между поверхностями позволяет регистрировать нанометровые перемещения. Применение этого эффекта в микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) преобразователях угловой скорости открывает возможность создания компактных и высокоточных преобразователей угловой скорости нового поколения.

Диссертационная работа Васецкого Станислава Олеговича направлена на развитие данного направления и связана с формированием адаптивной рамочной структуры МОЭМ преобразователя, в которой информация считывается по изменению оптического сигнала, а не электрических параметров узла считывания. Это обеспечивает повышение чувствительности и снижение электромагнитных помех, что делает предложенный подход значимым для информационно-измерительных и управляющих систем.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 166 страницах, содержит 82 рисунка и 4 таблиц, список литературы содержит 125 наименований.

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Во **введении** диссертации определены цель и основные задачи исследования, изложены положения, отражающие научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор современных МЭМС и МОЭМ преобразователей угловой скорости. Рассмотрены их типы, принципы действия и основные ограничения, связанные с точностью. Особое внимание уделено оптическим методам регистрации, в том числе оптическому туннельному эффекту, обеспечивающему высокую чувствительность при измерении нанометровых перемещений. Обоснована целесообразность разработки рамочного МОЭМ преобразователя с оптическим считыванием на основе оптического туннельного эффекта.

Во **второй** главе разработана функциональная схема рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости, в которой измерительная система основана на оптическом туннельном эффекте. Предложен четырёхканальный оптический узел считывания, обеспечивающий регистрацию субмикрометровых перемещений чувствительного элемента. С использованием уравнений распространения и отражения излучения построена модель зависимости отражательной способности от зазора между элементами оптической системы. Проведено численное моделирование, позволившее определить параметры узла считывания для обеспечения максимальной чувствительности и линейности преобразования. Учтено газодинамическое демпфирование в полости чувствительного элемента.

В **третьей** главе проведено исследование влияния внешних дестабилизирующих факторов – линейных ускорений и температурных воздействий на характеристики микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости. Разработаны алгоритмы адаптации и компенсации, реализующие управление коэффициентом усиления выходного

сигнала и стабилизацию положения чувствительного элемента с помощью гребенчатых электростатических приводов. Показано, что применение предложенных методов позволяет снизить дополнительную погрешность, вызванную воздействием линейных ускорений, при сохранении устойчивости работы преобразователя в широком диапазоне внешних условий.

В **четвёртой** главе исследовано использование двухволнового метода оптического считывания, основанного на регистрации сигналов на двух длинах волн, различающихся по чувствительности к изменению зазора. Показано, что сочетание оптических каналов с различными спектральными характеристиками позволяет компенсировать температурную погрешность и расширить динамический диапазон преобразователя. Разработана методика расчёта параметров рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя, включающая статистическую оценку влияния отклонений параметров преобразователя на чувствительность и линейность преобразования, что обеспечивает возможность удовлетворения исходным требованиям и определения выхода годных преобразователей на этапе проектирования.

В **заключении** диссертационной работы приведены основные научные результаты.

В качестве **научной новизны** диссертационной работы стоит отметить следующее:

1) разработана функциональная схема рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости, в которой реализовано оптическое считывание на основе оптического туннельного эффекта по четырём оптическим каналам, что обеспечило повышение чувствительности и точности измерений;

2) предложены адаптивные алгоритмы компенсации линейных ускорений, использующие регулирование коэффициента усиления и электростатическую обратную связь, позволяющие снизить дополнительную погрешность преобразования;

3) предложен и реализован двухволновой метод оптического считывания перемещений чувствительного элемента, основанный на регистрации отражённых сигналов на двух длинах волн, различающихся по спектральной чувствительности к изменению зазора; такое решение позволило повысить линейность функции преобразования и снизить температурную погрешность выходного сигнала;

4) разработана методика расчёта параметров рамочного МОЭМ преобразователя, основанная на статистическом анализе влияния отклонений параметров преобразователя и обеспечивающая определение допустимых отклонений параметров для гарантирования требуемых технических характеристик.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные функциональные схемы, математические модели и алгоритмы обработки сигналов обеспечивают повышение чувствительности и стабильности микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости. Предложенные решения, основанные на использовании оптического туннельного эффекта и двухволнового метода считывания, могут быть применены при создании высокоточных оптических преобразователей для информационно-измерительных, навигационных и управляющих систем подвижных объектов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием корректных математических моделей, согласованных с результатами численного моделирования и экспериментальными данными.

Апробация работы подтверждена обсуждением основных ее результатов на конференциях всероссийского и международного уровней.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки) по пунктам 2 – Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных,

экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений; 4 – Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования.

По диссертационной работе Васецкого Станислава Олеговича могут быть сделаны следующие **замечания**:

1) в модели оптического узла отсутствует анализ влияния шероховатости и качества оптических поверхностей на туннелирование излучения, хотя этот фактор может вносить заметную погрешность при субмикронных зазорах (раздел 2.2.1);

2) при анализе четырёхканальной схемы оптического считывания приведены выражения для выходных напряжений, однако не пояснено, каким образом производится калибровка каналов при различной мощности оптического излучения и неравномерности отклика фотоприёмников (стр. 73);

3) в разделе 2.4 при описании схемы имитатора чувствительного элемента упоминается пьезопривод, однако не указано, каким образом контролируется амплитуда перемещения;

4) при расчёте амплитуды колебаний рамочного чувствительного элемента по формуле (34) не указано, как учитываются допуски на геометрию подвесов (стр. 65).

Указанные замечания не затрагивают основные идеи и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение оппонента о соответствии работы требованиям ВАК.
Диссертационная работа «Разработка адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта» соответствует требованиям, указанным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном

постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Васецкий Станислав Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Официальный оппонент

Горшков Борис Георгиевич

д.т.н. по специальности 20.02.25 «Военная электроника, аппаратура комплексов военного назначения»,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН),

ведущий научный сотрудник

119991 ГСП-1, Москва, Вавилова, д. 38

Тел. + 7 (499) 503-8734

e-mail: bggorshkov@gmail.com

«31» октября 2025 г.



Горшков Б.Г.

Подпись официального оппонента Горшкова Бориса Георгиевича, д.т.н., ведущего научного сотрудника ИОФ РАН «подтверждаю».

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН

д.ф.-м.н.



В.В. Глушков

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Васецкого Станислава Олеговича на тему «Разработка адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки).

Фамилия, имя, отчество (полностью)	Горшков Борис Георгиевич
Ученая степень (с указанием отрасли науки)	Доктор технических наук
Шифр и наименование специальности, по которым защищена диссертация	20.02.25 – «Военная электроника, аппаратура комплексов военного назначения»
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования российской федерации
Занимаемая должность	Ведущий научный сотрудник
Адрес организации, телефон, адрес электронной почты	119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38 +7 (499) 503-8734 +7 (903) 271-0783 office@gpi.ru bgorshkov@gmail.com
Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет, не более 15 публикаций	
1. Симикин Д. Е., Алексеев А. Э., Горшков Б. Г., Потапов В. Т., Таранов М. А. Улучшение линейности отклика фазового волоконного рефлектометра с помощью усреднения откликов по множеству волокон в волоконном кабеле // Квантовая электроника, 2022г. Т. 52. №7. С. 625–630.	
2. Таранов М.А., Горшков Б.Г., Алексеев А.Э., Потапов В.Т. Распределенные измерения натяжения и температуры оптического волокна с помощью рэлеевского рефлектометра с низкокогерентным источником излучения // Нелинейный мир. 2020 г. Т. 18. № 1. С. 69-72.	
3. Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М. Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе регистрации бозонных компонент рамановского рассеяния света для криогенных применений // Квантовая электроника. 2020 г. Т. 50. № 5. С. 506-509.	
4. Таранов М.А., Горшков Б.Г., Жуков К.М., Гринштейн М.Л. О минимальной неопределенности измерения коэффициента затухания в одномодовом оптическом волокне, достижимой с использованием рэлеевской рефлектометрии // Приборы и техника эксперимента. 2020 г. № 4. С. 90-95.	
5. Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М. Прецизионное измерение потерь в оптических волокнах малой длины рефлектометрическим методом без использования рэлеевского рассеяния света // Квантовая электроника. 2019 г. Т. 49. № 6. С. 581-584.	
6. Волоконный фазовый рефлектометр с низким уровнем шума выходного сигнала для применения в сейсмологии / А. Э. Алексеев, Б. Г. Горшков, Д. А. Ильинский [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 5. – С. 134-140. – DOI 10.31857/S0032816223050014.	

7. Taranov, M. A., Gorshkov, B. G., & Alekseev, A. E. (2020). Achievement of an 85 km distance range of strain (temperature) measurements using low-coherence Rayleigh reflectometry. *Instruments and Experimental Techniques*, 63(4), 527-531.

8. Kalman filter based demodulation in a dual-pulse phase-OTDR / A. E. Alekseev, V. T. Potapov, M. A. Taranov [et al.] // *Laser Physics*. – 2021. – Vol. 31, No. 3. – P. 035101. – DOI 10.1088/1555-6611/abd936

9. Taranov, M. A., Gorshkov, B. G., Alekseev, A. E., & Potapov, V. T. (2021). Distributed strain and temperature sensing over 100 km using tunable-wavelength OTDR based on MEMS filters. *Applied Optics*, 60(11), 3049-3054.

Официальный оппонент, 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), Центр естественно-научных исследований, Лаборатория биофотоники.

_____ Б.Г. Горшков

Подпись официального оппонента Горшкова Бориса Георгиевича д.т.н., в.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) заверяю.

Заместитель директора по научно-организационной работе,
ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН, д.ф.-м.н.



_____ В.В.Глушков _____