

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому развитию,  
д.э.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

П.А. Дроговоз

« 28 » Октября 2025 г.



### Отзыв ведущей организации

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» 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.

В современных информационно-измерительных и управляющих системах малогабаритных подвижных объектов требуются данные об угловых скоростях. Традиционно используемые микроэлектромеханические (МЭМС) преобразователи угловой скорости, основанные на емкостном принципе съема информации, характеризуются рядом ограничений: высокой шумовой составляющей выходного сигнала, нелинейностью функции преобразования, чувствительностью к линейным ускорениям и температурным воздействиям. Эти факторы существенно сужают динамический диапазон и ограничивают возможности применения МЭМС преобразователей угловой скорости в условиях, требующих повышенной точности.

В диссертационной работе Васецкого С.О. предложено использование микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловой скорости

(ПУС), в котором реализована оптическая система съема информации на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Данный подход обеспечивает нанометровое разрешение измерения перемещений чувствительного элемента, электрическую развязку между узлами возбуждения и считывания, а также снижение дополнительных погрешностей.

Таким образом, исследование, направленное на разработку адаптивного рамочного МОЭМ ПУС с оптическим считыванием, является актуальным и отвечает потребностям в создании современных информационно-измерительных и управляющих систем.

Научные положения, выводы и рекомендации в рассматриваемой работе обоснованы и подтверждены в достаточном объеме.

### **Содержание работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 166 страницах, содержит 82 рисунка и 4 таблицы, список использованных источников включает 125 наименования.

Во **введении** работы обоснована актуальность темы, указана основная цель, поставлены задачи, определены научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность, приведены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о внедрении и апробации.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния разработок микроэлектромеханических и микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости. Показаны недостатки традиционных МЭМС преобразователей угловой скорости и обоснована перспективность применения оптического туннельного эффекта для считывания перемещений чувствительного элемента.

Во **второй главе** разработана функциональная схема рамочного МОЭМ преобразователя угловой скорости с четырехканальной оптической системой считывания, основанной на ОТЭ. Построены математические модели чувствительного элемента и узла оптического считывания, выполнено

численное моделирование и экспериментальные исследования макетных образцов. Полученные результаты подтвердили возможность обеспечения высокой точности измерения угловых скоростей, а также низкой нелинейности функции преобразования.

В **третьей главе** исследовано влияние линейных ускорений и температурных воздействий на характеристики преобразователя. Разработаны алгоритмы адаптации и компенсации дестабилизирующих факторов, основанные на регулировании коэффициента усиления и использовании электростатической обратной связи. Показано, что применение предложенных алгоритмов позволяет существенно снизить дополнительную погрешность.

В **четвертой главе** предложен и исследован двухволновой метод оптического считывания, позволивший расширить динамический диапазон преобразователя и снизить температурную нестабильность выходного сигнала. Разработана методика расчета, учитывающая статистические отклонения конструктивно-технологических параметров и позволяющая формировать требования к допускам на критические размеры преобразователя.

**Научная новизна** состоит в следующем:

1) Предложена новая функциональная схема рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости, отличающееся использованием оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта; показано, что использование предложенной четырехканальной оптической системы считывания обеспечивает повышение точности измерения и снижение нелинейности функции преобразования до 0,12 %.

2) Разработаны новые адаптивные алгоритмы компенсации, основанные на регулировании коэффициента усиления и использовании электростатической обратной связи, обеспечившие снижение дополнительной погрешности до 0,02 % при воздействии перегрузок  $\pm 90$  g.

3) Обосновано и реализовано применение двухволнового метода преобразования перемещений в оптической системе считывания, обеспечившего расширение динамического диапазона преобразователя в 1,7 раза и снижение температурной нестабильности выходного сигнала до 0,04 %/°C в диапазоне температур от -40 °C до +60 °C.

4) Разработана методика расчета параметров рамочного МОЭМ ПУС, основанная на статистической оценке влияния конструктивно-технологических факторов; показано, что применение данной методики позволяет определить допустимые отклонения основных параметров и обеспечить соответствие преобразователей заданным техническим требованиям.

**Соответствие автореферата диссертационной работе.** Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что разработанные функциональные схемы, математические модели, алгоритмы адаптации и двухволновой метод оптического считывания обеспечивают повышение точности измерений, расширение динамического диапазона и снижение влияния внешних дестабилизирующих факторов, что делает возможным применение рамочного микроптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости в высокоточных информационно-измерительных и управляющих системах.

**Значимость результатов диссертации для науки и производства.**

Предложенные математические модели, алгоритмы и методики расчёта допустимых отклонений параметров обеспечивают разработку микроптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости по техническим требованиям. Использование предложенного рамочного МОЭМ преобразователя обеспечивает улучшение характеристик информационно-измерительных систем при воздействии дестабилизирующих факторов.

Значимость научных результатов работы подтверждена двумя актами о внедрении – в производственный процесс в АО «ГосНИИП» и в образовательный процесс МАИ.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Предложенные математические модели, алгоритмы и схемы могут быть применены в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах по созданию измерительных преобразователей управляющих систем. Использование результатов диссертационной работы возможно в таких организациях как НИУ «МИЭТ», ПАО «МИЭА», АО «РПКБ», ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». Исследования в области создания МОЭМ преобразователей угловой скорости следует продолжить в МАИ, АО «ГосНИИП», АО «ГИРООПТИКА».

**Достоверность** подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей, согласованностью результатов экспериментов и имитационного моделирования.

**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 имеются следующие **замечания**.

1. Не пояснена выбранная конфигурация призм и источников излучения в схеме узла оптического считывания, в то время как возможны альтернативные варианты (раздел 2.2).

2. При рассмотрении алгоритма адаптации не обосновано, почему в основу положена именно электростатическая компенсация, а не иные методы (например, электромагнитные или пьезоэлектрические воздействия) (раздел 4.2).

3. В уравнении (34) для амплитуды первичных колебаний содержатся обозначения геометрических параметров подвесов, при этом они не описаны непосредственно в тексте (стр. 65).

4. При описании экспериментальной установки для исследования узла оптического считывания упоминается эллиптическая воспринимающая зона, но в формулах не уточнены её параметры, что делает описание неполным (стр. 77–78).

5. Концепция компенсации линейных ускорений ограничена приведением алгоритма, однако не раскрыт принципиальный выбор именно такого подхода (разделы 3.2 и 3.3).

6. При использовании фильтра Баттерворта, параметры фильтра, такие как частота среза и полоса пропускания не указаны разделе 3.2 (стр. 91).

7. В разделе 3.3 (стр. 95–96) при описании компенсации с помощью дополнительных электростатических приводов отсутствует пояснение к коэффициентам обратной связи в уравнениях.

8. При рассмотрении двухволнового метода, коэффициент балансировки вводится сразу в расчётной форме, однако его физическая интерпретация дана лишь кратко и требует пояснения (стр. 115–116).

9. В описании методики расчёта рамочного МОЭМ-преобразователя приведены ссылки на литературные источники с указанием технологических параметров изготовления, однако конкретные численные допуски на технологические процессы не представлены (стр. 140).

**Заключение.** Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа представляет собой законченную научно-техническую квалификационную работу. Научная новизна и положения, выносимые на защиту, доказаны и обоснованы. Диссертационная работа 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).

Отзыв на диссертацию Васецкого Станислава Олеговича «Разработка адаптивного рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта» обсужден и утвержден на заседании кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Присутствовало на заседании 24 чел. Результаты голосования: «за» – 24 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 4 от 9 октября 2025 г.

Заведующий кафедрой  
системы автоматического управления  
доктор технических наук, профессор

К.А. Неусыпин

## СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Сокращенное наименование в соответствии с Уставом	МГТУ им. Н.Э. Баумана
Руководитель организации Ф.И.О., ученое звание, ученая степень	Ректор Гордин Михаил Валерьевич, кандидат технических наук
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Место нахождения	г. Москва
Полный Почтовый адрес	105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1
Адрес электронной почты	bauman@bmstu.ru
Телефон	+7 (499) 263 63 91
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	<a href="https://bmstu.ru/">https://bmstu.ru/</a>
Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет (не более 15)	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чжан, Л. Перспективные исследования в области визуально-инерциальной навигации / Л. Чжан, В. В. Лукьянов // Автоматизация. Современные технологии. – 2025. – Т. 79, № 1. – С. 14-19. – DOI 10.36652/0869-4931-2025-79-1-14-19.</li> <li>2. Методы нелинейной фильтрации для оценки состояния динамических систем и применения в навигации / С. Шэнь, В. В. Лукьянов, К. А. Неусыпин, Г. У // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 3. – С. 49-57. – DOI 10.25791/pribor.3.2024.1486.</li> <li>3. Растрепин, Д. Е. Система детектирования и отслеживания объектов с коррекцией по оптическому потоку / Д. Е. Растрепин, К. А. Неусыпин, И. Д. Хомутский // Авиакосмическое приборостроение. – 2025. – № 2. – С. 56-64. – DOI 10.25791/aviakosmos.2.2025.1464.</li> <li>4. Куприянов, А. О. Коррекция навигационных систем с использованием</li> </ol>	

- адаптивного нелинейного фильтра Калмана / А. О. Куприянов, М. С. Селезнева, К. А. Неусыпин // Авиакосмическое приборостроение. – 2025. – № 1. – С. 22-31. – DOI 10.25791/aviakosmos.1.2025.1454.
5. Лобусов, Е. С. Основные факторы, влияющие на точность алгоритмов навигации в автономном режиме, способы их оценки и компенсации / Е. С. Лобусов, Г. Н. Румянцев // Труды "НПЦАП". Системы и приборы управления. – 2022. – № 2(60). – С. 48-61.
  6. Подчуфаров, А. А. Методика разработки алгоритмов управления группой космических аппаратов дистанционного зондирования земли / А. А. Подчуфаров, А. В. Фомичев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 150-156. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-150-156.
  7. Оптимизация управления скоростью квадрокоптера при полете по маршруту / В. В. Лукьянов, А. Н. Алексеев, Е. С. Земляной и др. // Автоматизация. Современные технологии. – 2023. – Т. 77, № 5. – С. 229-234. – DOI 10.36652/0869-4931-2023-77-5-229-234.
  8. Исследования коррекции интегрированной навигационной системы при отсутствии спутникового сигнала / Ч. Синькэ, К. А. Неусыпин, М. С. Селезнева, В. Цзыжуй // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 11. – С. 510-515. – DOI 10.36652/0869-4931-2021-75-11-510-515.
  9. Применение волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток при исследовании напряженно-деформированного состояния кольцевых, трубчатых образцов и баллонов давления из органопластика / Д. А. Ягодников, А. Н. Барышев, Л. П. Таирова и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2024. – № 2(174). – С. 47-57. – DOI 10.52190/2073-2562\_2024\_2\_47.
  10. Сравнительный анализ МЭМС акселерометров / В. П. Жалнин, К. В. Селиванов, М. С. Блохин и др. // Датчики и системы. – 2024. – № 5(277). – С. 67-76. – DOI 10.24412/1992-7185-2024-5-67-76.
  11. Лунин, Б. С. Влияние диссипативных свойств пьезокерамических датчиков на характеристики волновых твердотельных гироскопов / Б. С. Лунин, М. А. Басараб // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 3. – С. 31-35. – DOI 10.25791/pribor.3.2025.1565.
  12. Киселев, Р. М. Разработка и верификация энергетического метода расчета расщепления частот собственных колебаний кольцевых резонаторов гироскопических приборов / Р. М. Киселев, Ф. Д. Сорокин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2025. – № 4(160). – DOI 10.18698/2308-6033-2025-4-2436.

Проректор по науке и цифровому  
развитию МГТУ им. Н.Э. Баумана  
д.э.н., профессор



П.А. Дроговоз

« 12 » 09

2025 г.