

Заключение диссертационного совета Д002.226.03 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 02.03.2020г. № 1

О присуждении Йин Наинг Вин, гражданину Республики Союз Мьянма, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка и исследование кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннелирования» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05. – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» – по техническим наукам принята к защите 12 декабря 2019 г., протокол № 5, диссертационным советом Д002.226.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) (117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, приказ ВАК о создании диссертационного совета №105/нк от 11.04.2012).

Соискатель Йин Наинг Вин, 1987 года рождения, в 2014 г. с отличием окончил факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет) (МАИ) с присвоением степени «Магистр» по направлению «Управление в технических системах».

Диссертация выполнена соискателем Йин Наинг Вин в 2015 – 2019 гг. в рамках прохождения обучения в очной аспирантуре на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано МАИ в 2019 г.

Научный руководитель – доктор технических наук, Бусурин Владимир Игоревич, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ.

Официальные оппоненты:

1. Васюков Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»;

2. Мышляев Юрий Игоревич, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории НПЦ автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» в своем положительном отзыве, подписанном Владимиром Яковлевичем Распоповым, доктором технических наук, заведующим кафедрой "Приборы управления" ТулГУ и утвержденном проректором по научной работе ТулГУ, доктором технических наук, доцентом М. С. Воротилиным, дала положительную оценку диссертационной работы и указала, что в целом диссертационная работа содержит новые результаты, имеющие научное значение и важную практическую значимость. Полученные соискателем результаты являются актуальными для создания элементов и устройств систем управления подвижными объектами. Диссертационная работа Ёин Наинг Вин 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».

Соискатель имеет 22 опубликованных работы, все по теме диссертации. Работ, опубликованных в перечне ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, – 3; работ, опубликованных в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования WoS/Scopus (считаются как журналы ВАК), – 1.

Соискателем 17 работ опубликованы в материалах научных конференций, из них 1 статья в издании, входящим в международные реферативные базы данных и 16 публикаций в виде тезисов докладов на международных конференциях, совещаниях и семинарах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Бусурин В. И., Коробков В. В., Ёин Наинг Вин. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости// Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5, с. 340–346.

2. Бусурин В. И., Казарьян А. В., Коробков В. В., Ёин Наинг Вин. Исследование влияния деформаций первого и второго режима кольцевого резонатора на характеристики датчика угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта// Труды МАИ, 2016, № 91.

3. Бусурин В.И., Коробков В.В., Ёин Наинг Вин. Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трёх осевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости// Доклады ТУСУРа. Т. 20, № 4, 2017, с. 43–49.

4. V. I. Busurin, Y. N. Win and M. A. Zheglov, "Effect of Linear Acceleration on the Characteristics of an Optoelectronic Ring Transducer of Angular Velocity and Its Compensation," *Avtometriya* 55 (3), 120–128 (2019) [Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing volume 55, pages 309–316 (2019)]. DOI: 10.15372/AUT20190314.

5. V.I. Busurin, V.V.Korobkov, P. V. Mulin, Yin Naing Win. Investigation of the Characteristics of the Three-axis Ring Typed Angular Velocity Transducer Based on Optical Tunneling Effect// KnE Energy & Physics. 2018. DOI10.18502/ken.v3i3.2046.

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

1. Патент на изобретение №2702703 «Микро-опто-электро-механический датчик угловой скорости с кольцевым резонатором», от 09 октября 2019, Бюл. № 28// Бусурин В. И., Жеглов М.А., Булычев Р.П., Коробков К.А., Йин Наинг Вин.

На диссертацию и автореферат поступило 9 отзывов, все положительные: Рязанский государственный радиотехнический университет «РГРТУ», ПАО «МИЭА», АО «ГосНИИП», АО Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского, НИЯУ «МИФИ», ФГУП «ГосНИИГА», Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Филиал военной академии РВСН имени Петра Великого в г. Серпухове, ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС».

Во всех отзывах отмечается актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, соответствие ее специальности 05.13.05, а также требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по этой специальности.

В отзывах содержались следующие замечания.

Из отзыва ведущей организации ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», подписанного д.т.н., заведующим кафедрой «Приборы управления» Распоповым В. Я. и утвержденного проректором по научной работе д. т. н. Воротилиным М.С.: - не в полной мере оценено поведение чувствительного элемента преобразователя в условиях наличия среды, создающей газовое демпфирование, - предлагаемая структурная схема одноканального преобразователя угловой скорости с оптическим съемом информации на основе ОТЭ могла быть представлена более подобно, - не приведены схема стабилизации возбуждаемых первичных колебаний, величины возможных отклонений параметров колебаний и их влияние на выходной сигнал преобразователя угловой скорости.

Из отзыва официального оппонента д. т. н., профессора кафедры «Электротехники и промышленной электроники» (ФН-7) МГТУ им. Н.Э. Баумана Васюкова С.А.: 1. В настоящее время практически все серийные микромеханические измерители угловой скорости используют емкостный способ съема информации по измерительной оси. Соискатель предлагает, как альтернативу, оптический съем информации на основе ОТЭ, утверждая, что этим обеспечивается повышенная точность и линейность преобразования, особенно при измерении малых угловых скоростей. Однако, данное положение в диссертации в полной мере не раскрыто. Этому вопросу следовало бы уделить дополнительное внимание, путем сравнения коэффициентов преобразования и шумовых характеристик преобразователей с емкостным и оптическим съемом информации. 2. В диссертации, по мнению оппонента,

недостаточно внимания уделено технологическим вопросам. Зазоры между поверхностью кольцевого резонатора и оптического элемента составляют сотни нанометров. В этих условиях технологические погрешности могут оказывать существенное влияние на масштабный коэффициент и смещение нуля преобразователя. Следовало бы сформулировать требования к точности изготовления кольца, качеству его поверхности, точности позиционирования оптических элементов для удовлетворения требований по точности и стабильности преобразователя. 3. Соискатель утверждает, что при отсутствии измеряемой угловой скорости, смещения в направлениях осей чувствительности (под углами 45° , 135° , 225° и 315° относительно главной оси), вызванные колебаниями первого радиального режима, можно считать нулевыми. Это положение, особенно при сверхмалых начальных зазорах между поверхностью кольца и оптического элемента, требует тщательного изучения и подтверждения. 4. Расчет минимальной детектируемой угловой скорости преобразователя (раздел 4.2.5), а это, по существу, определяет предельную чувствительность преобразования, опирается только на шумовые характеристики фотоприемника. Здесь следовало бы учесть и другие шумы, например, преобразователя ток-напряжение, излучателя и т.п. Иначе значение чувствительности получается завышенным. 5. Содержание некоторых разделов диссертации опирается на статьи соискателя. Безусловно, соискатель имеет на это полное право. Но перенос их содержания в текст диссертации без дополнительного анализа, привел к тому, что постановка задачи, описание принципа работы преобразователя, рисунки несколько раз дублируются в тексте диссертации (стр. 26, 35, 37, 48, 52). Повторяются некоторые формулы, например (2.1) и (2.14). На некоторые формулы, например (2.5), нет ссылок и расшифровки их составляющих.

Из отзыва официального оппонента к. т. н., начальника лаборатории, ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н. А. Пилюгина» Мышляева Ю. И.,: 1) не указана конкретная область применения преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ и не проведено его сравнение с другими типами датчиков угловых скоростей; 2) при выборе корректирующего сигнала с помощью переключателя (п.4.1.3) на стр. 125 приведены 11 выражений для формирования значения выходного сигнала переключателя, но отсутствуют конкретные условия переключения; 3) в работе приведено два алгоритма компенсации влияния линейного ускорения на выходной сигнал преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ (п. 4.1.2 и п.4.1.3), однако не определены области предпочтительного использования каждого из них; 3) при расчете минимальной детектируемой угловой скорости преобразователя не произведён учёт помех электронного блока обработки. 4) Не приведены результаты количественного сравнения данных экспериментального и теоретического исследования функции преобразования пьезоэлектрического преобразователя при различных начальных зазорах (п. 3.3, рис. 3.19); 5)

имеются погрешности в оформлении работы, например, рисунок 4.4 требует более полного пояснения, на рис. 3.12 из восьми зависимостей различимы только четыре.

1. Из отзыва АО «ГосНИИП», подписанного д.т.н., научным руководителем АО «ГосНИИП» Гаврилиным Б. Н., к. т. н., ученым секретарем секции №5 АО «ГосНИИП» Манбековым Д.Р. и утвержденного генеральным директором Медведевым В. М.: 1) в тексте автореферата недостаточно обоснован выбор резонатора кольцевого типа, а не камертонного, балочного, роторного или рамочного; 2) не рассмотрен вопрос компенсации влияния линейных ускорений на выходной сигнал преобразователя угловой скорости при их величине более 5 g (см. стр. 19).

2. Из отзыва д.т.н., ведущего научного сотрудника Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН Горшкова Б. Г.: встречаются следующие недочёты в оформлении автореферата: - не приведены численные данные по сравнению предложенного автором преобразователя угловой скорости с оптическим съёмом информации с преобразователями с ёмкостным съёмом, - не оценено поведение чувствительного элемента преобразователя в условиях наличия среды, создающей газовое демпфирование.

3. Из отзыва к.т.н., с.н.с., начальника отдела ПАО «МИЭА» Галкина В. И., утвержденного генеральным директором – главным конструктором ПАО «МИЭА» Кузнецовым А. Г.: - в работе не рассмотрена динамика движения кольцевого резонатора при воздействии угловой скорости; - не оценено влияние возможных отклонений параметров колебаний резонатора на выходной сигнал преобразователя угловой скорости.

4. Из отзыва д.т.н., заведующего кафедрой «Электронные вычислительные машины» РГРТУ Кострова Б. В. и к. т. н., директора научно-образовательного центра «СпецЭВМ» РГРТУ Никифорова М. Б.: В качестве недостатков можно отметить, что предлагаемая структурная схема одноканального преобразователя угловой скорости с оптическим съёмом информации на основе оптического туннельного эффекта представлена очень укрупненно (рис. 2), а также на подписях некоторых рисунков используется слишком мелкий шрифт, что затрудняет восприятие материала.

5. Из отзыва к.т.н., доцента, зам. главного конструктора ТН-17 АО Московского научно-производственного комплекса «Авионика» Кулабухова В. С., к. т. н., начальника сектора Булкакова В. В., утвержденного управляющим директором АО МНПК «Авионика» Зацом В. Ф.: в автореферате не представлен расчет оптических потерь при определении значений выходной мощности, а также то, что при определении минимально детектируемой угловой скорости не произведен учет помех электронного блока обработки. В функции преобразования не учтено возможное наличие смещения нуля и не рассмотрено влияние его нестабильности.

6. Из отзыва к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры лазерной физики НИЯУ «МИФИ» Родина В.Г.: не пояснено, как контролируются наноперемещения пьезоэлектрического преобразователя при

проведении экспериментального исследования модуля на основе оптического туннельного эффекта; также имеются неточности и погрешности в оформлении, не затрагивающие основных выводов и положений работы.

7. Из отзыва д.т.н., ведущего специалиста отдела №818 «ГосНИИГА» Попова Ю. В., утвержденного заместителем генерального директора ФГУП ГосНИИГА Акоюном К. Э.: в работе не рассмотрена динамика движения кольцевого резонатора во втором режиме (при воздействии угловой скорости); имеются некоторые неточности в тексте и опечатки (например, на рис. 11а индекс в обозначении оси ОХ написан на английском языке, в то время как в подрисуночной подписи – на русском языке- $U_{згм}$).

8. Из отзыва к.т.н., доцента кафедры «Системы управления ракет» Филиала военной академии РВСН имени Петра Великого в г. Серпухове Канушкина С. В.: - не ясно, почему при теоретическом исследовании функции преобразования МОТЭ угол падения излучения выбран $\theta = 47^\circ$ (рис. 9 автореферата), а расчет амплитуды выходного напряжения преобразователя угловой скорости при воздействии линейного ускорения произведен для угла $\theta = 42^\circ$ (рис. 12 автореферата); - имеются недочёты в оформлении автореферата, например, в формуле (4) не пояснено, что такое I_T .

9. Из отзыва к.т.н., главного научного сотрудника ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС» Ключника Н. Т., утвержденного генеральным директором ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС» Яковлевым М. Я.: в автореферате не приведены данные о достижимой линейности функции преобразования оптического модуля съема информации на основе ОТЭ; не пояснено, как производился расчет жёсткости упругого подвеса, на котором закреплен кольцевой резонатор.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующими обстоятельствами:

1. Д.т.н., профессор кафедры ФН-7 Васюков С.А. является крупным специалистом в области элементов и устройств систем управления.
2. К.т.н., доцент, начальник лаборатории НПЦАП Мышляев Ю.И. является крупным специалистом в области разработки измерительных устройств систем управления.
3. Ведущая организация ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» выполняет фундаментальные исследования в области элементов и устройств систем управления.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости с кольцевым резонатором, в котором использован оптический съём информации на основе оптического туннелирования, блок обработки и коррекции, что обеспечило повышение точности, уменьшение влияния линейных ускорений и измерение малых угловых скоростей;

разработаны новые функциональные схемы одно-, и трехосевого кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей, которые содержат элемент считывания на основе оптического туннельного эффекта и обеспечивают регистрацию наноперемещений второго режима кольцевого резонатора, что позволяет уменьшить амплитуду первичных колебаний резонатора и получить квазилинейную характеристику;

предложена скорректированная математическая модель изменения зазора для различных точек оптического пятна модулятора на основе оптического туннельного эффекта при деформации кольцевого резонатора эллиптического типа, которая учитывает изменения выходных оптических мощностей из-за вибрации кольцевого резонатора в первом режиме и при действии угловой скорости, что уменьшает погрешность расчетов кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей;

предложен алгоритм коррекции изменения чувствительности при влиянии дестабилизирующего линейного ускорения на кольцевой резонатор, который использует дифференциальную обработку сигналов оптических узлов считывания преобразователя угловой скорости;

получены аналитические зависимости коэффициента коррекции чувствительности от линейного ускорения, обеспечивающие измерение угловых скоростей с повышенной точностью во всем диапазоне без введения дополнительных средств измерения ускорения;

реализована методика расчета кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта, позволяющая определять его основные параметры, обеспечивающие заданные технические требования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность работы микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости с кольцевым резонатором, в котором использован оптический съем информации на основе оптического туннелирования, что обеспечило повышение уменьшение диапазона рабочих зазоров и измерение малых угловых скоростей;

доказана эффективность использования предложенных скорректированных математических моделей модулятора на основе оптического туннельного эффекта микрооптоэлектромеханических преобразователей угловой скорости с кольцевым резонатором по сравнению с приближенной моделью;

предложен компенсационный метод коррекции изменения чувствительности функции преобразования модулятора на основе оптического туннельного эффекта из-за смещения кольцевого резонатора от линейного ускорения за счет коррекции коэффициента усиления по дифференциальному сигналу противоположащих пар модуляторов на основе оптического туннельного эффекта.

9

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

разработана и внедрена для практического использования методика расчета основных параметров кольцевых микрооптоэлектромеханических преобразователей угловых скоростей с заданными точностными характеристиками. Результаты исследований в виде программного комплекса внедрены в учебный процесс кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации». Изложенные в диссертационной работе результаты являются новыми научно обоснованными техническими решениями, которые могут быть использованы в проектных организациях и промышленности (АО «ГосНИИП», АО «НИИ ТП», МНПК «Авионика», ФГУП «ГосНИИАС» и других) при проектировании микромеханических датчиков угловых скоростей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

применительно к проблематике диссертационного исследования результативно использованы методы теории упругости материалов, теории колебаний, основные положения волновой и геометрической оптики, методы математического моделирования;

установлено, что при проведении экспериментальных исследований использовались положения теории измерений, формирование наноперемещений с помощью пьезоэлектрического преобразователя, модуль на основе оптического туннельного эффекта, обеспечивающий съем информации о наноперемещениях имитатора кромки резонатора преобразователя угловых скоростей, современные средства измерений и методы обработки результатов;

идея построения преобразователей угловых скоростей с кольцевым резонатором и оптическим съемом информации основана на использовании оптического туннельного эффекта, учете переменности зазора для различных точек в области оптического контакта при деформациях кольцевого резонатора и коррекции изменения чувствительности функции преобразования модулятора на основе оптического туннельного эффекта из-за смещения кольцевого резонатора от линейного ускорения;

реализация с учетом этой идеи методики расчета микрооптоэлектромеханических кольцевых преобразователей угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта подтверждает получение квазилинейной функции преобразования и возможность измерения малых угловых скоростей.

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

– функциональные схемы одно- и трехосевого кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей с оптическим

элементом считывания на основе оптического туннельного эффекта, обеспечивающие уменьшение требуемых амплитуд вынужденных колебаний кольцевого резонатора для измерения малых угловых скоростей и получение квазилинейных функций преобразования,

– скорректированные математические модели отражательной способности области оптического контакта модулятора на основе оптического туннельного эффекта при деформации кольцевого резонатора эллиптического типа, обеспечивающие уменьшение погрешностей расчета кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей,

– структурные схемы и алгоритмы компенсации влияния линейного ускорения на изменение амплитуды выходного напряжения преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта,

– методику расчета кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта, позволяющая определять его основные параметры, обеспечивающие заданные технические требования.

Диссертационная работа Йин Наинг Вин является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научная задача разработки и исследования кольцевых преобразователей угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов, важных для создания современных систем автоматического управления, навигации и стабилизации углового положения подвижных технических объектов.

На заседании 2 марта 2020 г. Диссертационный совет принял решение присудить Йин Наинг Вин ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.13.05, участвующих в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. директора по научной работе			И.Н. Барabanов
Председатель диссертационного совета Д002.226.03	д.т.н.		О.П. Кузнецов
Ученый секретарь диссертационного совета Д002.226.03	к.т.н.		А.А. Кулинич

3 марта 2020 года