

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Йин Наинг Вин на тему «Разработка и исследование кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннелирования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Актуальность темы диссертации.

Проблемы создания микромеханических датчиков угловой скорости многогранны. За рубежом работы над созданием таких датчиков идут с 1990 г., в России же исследования в этой области начались с десятилетним опозданием. Несмотря на несомненные успехи, имеются ограничения, препятствующие получению высокой точности в микромеханических датчиках. Первое, это малые массы чувствительных элементов и, как следствие, сверхмалые кориолисовы силы, вызывающие в относительно жестких упругих подвесах чрезвычайно малые деформации. Второе, сложность создания средств регистрации малых перемещений, которые требуют сверхвысокой чувствительности измерительных датчиков. Традиционный подход заключается в измерении с помощью емкостных датчиков очень малых амплитуд вторичных колебаний, несущих информацию об измеряемой угловой скорости. Для того чтобы получить точность микромеханического датчика угловой скорости близкую к $0,01^\circ/\text{с}$, необходимо с помощью емкостных датчиков измерять колебания его ротора с погрешностью на уровне $0,1\text{А}^\circ$ во всем диапазоне изменения амплитуд этих колебаний. Причем следует учитывать паразитные емкости, превосходящие на несколько порядков измеряемые изменения емкостей.

В связи с этим, в первую очередь необходимо проведение исследований, направленных на повышение точности системы съема информации в микромеханических датчиках. И здесь альтернативой емкостному съему информации, является оптический съем. В частности, применение преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта.

Микрооптоэлектромеханические (МОЭМ)-преобразователи угловых скоростей имеют потенциально высокую чувствительность к малым

перемещениям, приемлемые массогабаритные показатели и низкий уровень энергопотребления. Однако исследования по преобразователям такого типа практически отсутствуют. Поэтому разработка конструктивных схем МОЭМ-преобразователей, исследование их погрешностей и выработка рекомендаций по повышению точности и линейности преобразования, особенно в диапазоне измерения малых угловых скоростей подвижных объектов, является актуальной проблемой в области построения современных приборов для систем автоматического управления и навигации.

Диссертация Йин Наинг Вин посвящена решению актуальной научной задачи разработки одно и трехосевых МОЭМ-преобразователей угловых скоростей на основе кольцевых резонаторов и оптического считывания субмикронных перемещений с помощью оптического туннельного эффекта.

Рассмотрение содержания диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, основных результатов работы, списка используемых источников и 3-х приложений. Работа изложена на 170 страницах, в том числе 140 страниц основного текста, включающего 82 рисунка и 2 таблицы и списка используемых источников из 99 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и решаемые задачи, обоснованы научная новизна, практическая значимость и основные положения диссертации.

В первой главе автором рассмотрены особенности существующих датчиков угловой скорости и их классификация, выявлено перспективное направление исследования малогабаритных МОЭМ-преобразователей с оптическим считыванием выходных сигналов, и также сформированы частные задачи исследования.

Во второй главе произведена разработка функциональных схем и математических моделей одноканального и трехканального преобразователей угловой скорости. Исследовано влияние геометрических параметров кольцевого резонатора на второе радиальное движение. В частности, получен ряд оригинальных математических выражений для резонансных частот кольцевого чувствительного элемента и амплитуд вторичных колебаний в функции измеряемого параметра.

Проведено исследование влияния геометрических параметров резонатора (диаметра и толщины кольца) на коэффициент преобразования измерителя. Обоснован выбор величины начального зазора между поверхностью оптического считывающего элемента и деформируемой поверхностью кольца. Также обоснован выбор угла падения светового потока излучателя с целью минимизации нелинейности преобразования. Разработаны оригинальные структурные схемы преобразователей, формирующие выходное напряжение по четырем каналам измерения. Полученные аналитические выражения и рекомендации по выбору параметров преобразователей составили основу методики проектирования.

В третьей главе разработаны уточненные математические модели преобразователей с учетом деформаций поверхности кольцевого резонатора в первом и втором режимах. Исследованы погрешности преобразования по уточненным моделям и приведены рекомендации по их минимизации. Проведен анализ погрешностей преобразователей при изменении температуры окружающей среды. Экспериментальные исследования, проведенные на лабораторной установке, подтвердили полученные автором теоретические соотношения по мощности оптического излучения и чувствительности преобразователя при изменениях зазора между призмой и кромкой имитатора кольцевого резонатора.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов компенсации влияния линейного ускорения на коэффициент преобразования. Показано, что погрешности при воздействии ускорения можно минимизировать за счет коррекции коэффициента усиления

и применения дифференциальной схемы обработки сигнала четырех каналов преобразователя. Предложена автоматизированная методика расчета МОЭМ-преобразователей с оптическим считыванием выходных сигналов, позволяющая на основе набора данных технического задания выбирать габаритные и электро-механические параметры преобразователей. Получены оригинальные аналитические выражения для определения минимальной детектируемой скорости и динамического диапазона измерения на основе анализа шумовых характеристик фотоприемника.

В основных результатах работы приведен перечень основных результатов и выводов диссертационной работы.

Содержание диссертации соответствует указанной специальности.

Научная новизна полученных результатов. К новым научным результатам, полученным в работе, следует отнести:

- разработку новых функциональных схем МОЭМ-преобразователей с оптическим элементом считывания на основе ОТЭ, обеспечивающих повышенную точность измерения малых угловых скоростей подвижных объектов в широком температурном диапазоне и воздействии линейных ускорений;
- математическую модель перемещений поверхности кольцевого резонатора в направлении осей чувствительности при действии угловой скорости с учетом вибрации кольцевого резонатора в первом режиме;
- математические модели погрешностей МОЭМ-преобразователей, вызванные изменением температуры окружающей среды и воздействием линейного ускорения;
- алгоритмы компенсации погрешностей МОЭМ-преобразователей на основе коррекции коэффициентов усиления каналов преобразователя и дифференциальной схемы обработки сигналов, позволяющие обеспечить линейность и температурную стабильность преобразователей;
- методику проектирования, позволяющую в автоматизированном режиме рассчитывать электромеханические параметры МОЭМ-преобразователей с заданными техническими характеристиками.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Предложенные в диссертации методы и алгоритмы теоретически обоснованы и не противоречат известным положениям. Достоверность полученных в работе результатов и выводов подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований характеристик лабораторного макета МОЭМ-преобразователя.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, прошли **апробацию** на международных и всероссийских конференциях и форумах, достаточно **опубликованы** в 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, в

том числе 1 статье в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение.

Практическая ценность выводов и результатов. Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные структурные схемы, математические модели и алгоритмы компенсации погрешностей являются основой для проектирования МОЭМ-преобразователей повышенной точности. Разработанная методика расчета кольцевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ позволяет определять основные параметры преобразователя по требованиям технического задания. Практическая значимость научных результатов подтверждена актом внедрения в учебный процесс кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ.

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

Замечания по диссертации и автореферату:

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 тока-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.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не являются определяющими при оценке диссертационного исследования.

Заключение оппонента о соответствии работы требованиям ВАК. В целом, диссертационная работа Йин Наинг Вин «Разработка и исследование кольцевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости на основе оптического туннелирования» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Диссертационная работа Йин Наинг Вин является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной научной задачи разработки микрооптоэлектро-

механических преобразователей угловых скоростей, имеющей существенное значение для создания элементов систем управления подвижными объектами; автор диссертационного исследования Йин Нианг Вин заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Официальный оппонент

Васюков Сергей Александрович,
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 ФН-7,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1,
Тел. +7 499 2636399,
e-mail: sa_vasyukov@mail.ru

«27» 01 2020 г.

С.А. Васюков

Подпись официального оппонента Васюкова С.А., д.т.н., доцента, профессора кафедры "Электротехники и промышленной электроники" (ФН-7) МГТУ им. Н.Э.Баумана «заверяю».

Заместитель начальника управления

Кадров МГТУ им. Н.Э. Баумана

Назарова О.В.



ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
НАЗАРОВА О.В.
ТЕЛ. 8-499-263-60-48