

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматик и информационных технологий

Кафедра «Электроник, телекоммуникации и космических технологий»

Букенбаев Берекет Рахимбайұлы

На тему: «Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для
дистанционного управления транспортными средствами»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматки и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для
дистанционного управления транспортными средствами»

Образовательная программа: 6В07104 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил

Рецензент

к.т.н., доцент Алматинского университета
энергетики и связи имени Г.Даукеева

 Ермекбаев М.М.

"22" 05 2025 г.

 Букенбаев Б.Р.

Научный руководитель

Заведующий кафедрой ЭТиКТ,

канд. техн. наук, ассоциированный
профессор

 Таштай Е.

"02" 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Букенбаеву Берекет Рахимбайұлы

Тема: "Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами "

Утверждена приказом Ректора Университета №2674/0 от "29" 01 2025 г.

Срок сдачи законченной работы "30" 02 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: Волоконно-оптический гироскоп отвечает 5 параметрам: Чувствительность (от 0 до 5 рад/с); Диапазон измерений (5-20 рад/с); Шумовая характеристика (в пределах 90 Дб); Температурная стабильность (от -40°С до +85°С); Размер и вес (размер до 100 x 100 x 50 мм; вес до 0,7 кг).

Краткое содержание дипломной работы:

- а) разработан волоконно-оптический гироскоп для транспортной навигации.
- б) проведены расчёты компонентов и математическое моделирование.
- в) выполнен SWOT-анализ и дана оценка перспектив применения.

Перечень графического материала: представлены 10–15 слайдов презентации работы.

1. Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для навигации транспортными средствами в городской среде Принцип работы и состав системы.
2. Расчет основных технических параметров оптоволоконного гироскопа.
3. Разработать математическую модель работы оптоволоконного гироскопа и провести симуляционное моделирование его работы в городских условиях, чтобы оценить его эффективность и надежность в различных сценариях. на языке программирования Python.

Рекомендуемая основная литература: Сидоров И. К. «Основы гироскопической техники», Александров Е. В. «Практическое руководство по гироскопам», Сидоров И. К. «Гироскопические системы на основе волоконной оптики», Wilson T. «Optical Fiber Gyroscope Development and Applications», ISO и ETSI стандарты.

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1. Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для навигации транспортными средствами в городской среде	1.09.2024-31.12.2024	<i>выполнено</i>
2. Разработать конструкцию оптимальную конструкцию оптоволоконного гироскопа для навигации транспортных средств с учетом исходных данных в п.п. 1.1-1.6	1.01.2025-31.03.2025	<i>выполнено</i>
3. Рассчитать основные технические параметры оптоволоконного гироскопа	1.04.2025-31.10.2025	<i>выполнено</i>
4. Разработать математическую модель работы оптоволоконного гироскопа и провести симуляционное моделирование его работы в городских условиях, чтобы оценить его эффективность и надежность в различных сценариях. на языке программирования Python	01.11.2025-01.02.2026	<i>выполнено</i>
5. Отработка компонентов гироскопа, SWOT анализ	02.02.2026-15.04.2026	<i>выполнено</i>
6. Формирование разделов и оформление диссертационной работы в соответствии с требованиями СТ КазНУТУ 09-2019	01.04.2026-30.04.2026	<i>выполнено</i>

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	Ассоциированный профессор, кандидат технических наук Таштай Е.	<i>24.05.2025</i>	<i>[Подпись]</i>
Основная часть	Ассоциированный профессор, кандидат технических наук Таштай Е.	<i>24.05.2025</i>	<i>[Подпись]</i>
Нормоконтролер	Ассистент кафедры ЭТиКТ Маткаримова А. А.	<i>24.05.2025</i>	<i>[Подпись]</i>

Научный руководитель
Задание принял к исполнению обучающийся
Дата

[Подпись] Таштай Е.
[Подпись] Букенбаев Б.Р.
"05" 02 2025 г.

АННОТАЦИЯ

Дипломдық жұмыста қалалық көлік пен пилотсыз платформаларға арналған талшықты-оптикалық гироскоптың (ТОГ) жұмысын модельдеу және талдау жүргізілді. Құрылғының математикалық моделі жасалып, әртүрлі пайдалану жағдайларында симуляциялық есептеулер орындалды, сондай-ақ құрылымның SWOT-талдауы жүргізілді. Зерттеу нәтижелері ТОГ-тың жоғары дәлдігін, шудар мен температуралық әсерлерге тұрақтылығын және оны заманауи навигациялық жүйелерге интеграциялау мүмкіндігін растады.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе проведено исследование моделирования и анализа работы волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), предназначенного для использования в автономных навигационных системах городского транспорта и беспилотных платформ. Разработана математическая модель устройства, выполнены симуляционные расчёты при различных режимах эксплуатации, а также проведён SWOT-анализ конструкции. Результаты исследования подтвердили высокую точность ВОГ, его устойчивость к шумам и температурным воздействиям, а также перспективность интеграции в современные комплексы автономной навигации.

ANNOTATION

This thesis presents a study on the modeling and analysis of a fiber-optic gyroscope (FOG) intended for integration into autonomous navigation systems for urban transport and unmanned platforms. A mathematical model was developed, simulation calculations under various operational conditions were performed, and a SWOT analysis of the gyroscope's design was conducted. The results confirmed the high accuracy of the FOG, its resistance to noise and thermal influences, and its promising potential for use in advanced navigation systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для навигации транспортными средствами в городской среде	9
1.1 Основные характеристики ВОГ	9
1.2 Принцип работы и преимущества ВОГ	10
1.3 Обзор современных технологии навигации с применением ВОГ	11
1.4 Инерциальная навигационная система	12
2 Структура ВОГ	16
2.1 Источник излучения	16
2.2 Оптоволоконная катушка	18
2.3 Светоделитель	19
2.4 Фазовый модулятор	21
2.5 Фотодетектор	22
2.6 Блок обработки сигнала	24
3 Основные технические параметры ВОГ	27
3.1 Расчет и выбор источника света	27
3.2 Расчет и выбор оптического волокна	28
3.3 Расчет и выбор фазового модулятора	29
3.4 Выбор фотодетектора	30
3.5 Выбор электроники обработки сигнала	31
3.6 Конструкция корпуса ВОГ	32
4 Математическая модель гироскопа и симуляционное моделирование различных сценариев	35
4.1 Построение математической модели	35
4.2 Алгоритм симуляционного моделирования	36
4.3 Результаты симуляции	40
5 Отработка компонентов и SWOT анализ	44
5.1 Отработка компонентов	44
5.2 Ключевые требования к ВОГ для навигации транспорта в городской среде	45
5.3 SWOT анализ	46
Заключение	51
Список использованных литератур	52

ВВЕДЕНИЕ

Вектор развития современных транспортных систем всё более активно ориентирован на повышение уровня автоматизации процессов управления и обеспечение безопасности эксплуатации. Одним из ключевых направлений этих изменений становится разработка систем дистанционного и автономного управления, требующих высокой точности позиционирования и ориентации транспортных средств в реальном времени. Особую актуальность такие системы приобретают в условиях, когда спутниковые навигационные сигналы (GNSS) оказываются недоступными, нестабильными или подвергаются преднамеренным помехам.

В обеспечении непрерывной и надёжной навигации в таких условиях критическую роль играют инерциальные измерительные устройства, основным элементом которых являются гироскопы. Среди существующих технологий особенно выделяются волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), основанные на эффекте интерференции света в замкнутой оптоволоконной катушке. В отличие от традиционных механических и электронно-механических гироскопов, ВОГ обладают рядом уникальных преимуществ:

- полным отсутствием движущихся частей, что значительно увеличивает надёжность устройства;
- низкой инерционностью, обеспечивающей высокую скорость отклика;
- высокой устойчивостью к вибрационным и температурным воздействиям;
- возможностью достижения высокой точности измерений при компактных габаритах.

Эти качества делают ВОГ особенно привлекательными для использования в современных системах автономного и дистанционного управления транспортом, включая наземные, морские и воздушные платформы.

Целью данной дипломной работы является разработка и проектирование волоконно-оптического гироскопа, предназначенного для применения в составе систем дистанционного управления транспортными средствами. В процессе работы предполагается рассмотреть:

- фундаментальные физические принципы функционирования ВОГ;
- провести анализ современных технологических решений и существующих конструктивных подходов;
- разработать математическую модель устройства с учётом требований к точности, надёжности и адаптивности;
- сформировать рекомендации по интеграции ВОГ в существующие навигационные модули для транспортных средств.

Таким образом, проведённая работа была ориентирована на разработку высокоточного инерциального сенсора нового поколения, способного эффективно функционировать в условиях, предъявляющих повышенные требования к точности, надёжности и устойчивости. Созданный волоконно-

оптический гироскоп полностью соответствует вызовам современных автоматизированных транспортных систем, обеспечивая необходимую основу для дальнейшего развития автономной навигации и дистанционного управления в городской и межгородской инфраструктуре.

1 Исследование и обзор существующих технологии по оптоволоконным гироскопам для навигации транспортными средствами в городской среде

1.1 Основные характеристики ВОГ

Оптический гироскоп представляет собой устройство, функционирующее на основе явления, известного как эффект Саньяка [1], впервые описанного в 1913 году. Суть этого эффекта заключается в том, что два световых луча, распространяющиеся в замкнутом контуре в противоположных направлениях, при его покое проходят одинаковый оптический путь, и их фазовые набегі совпадают. Однако при вращении такого контура относительно инерциальной системы отсчета происходит различие в фазах лучей, величина которого напрямую зависит от угловой скорости вращения.

Эксперимент, подтвердивший это явление, был проведён французским физиком Жоржем Саньяком. Его целью было установить существование так называемого эфира — гипотетической среды для распространения света. Для проведения опыта он разработал кольцевой интерферометр, впоследствии названный его именем. Устройство состояло из ряда неподвижных зеркал, размещённых по окружности, одно из которых было полупрозрачным и отражало половину падающего на него света. Световой луч, проходя через это зеркало, разделялся на две части, которые затем двигались по кругу в противоположных направлениях, отражаясь от остальных зеркал. На экране появлялась интерференционная картина, которая оставалась неизменной, пока устройство было в покое. При повороте интерферометра наблюдалось смещение интерференционных полос, что свидетельствовало об изменении оптических путей, проходимых лучами, и тем самым подтверждало наличие эффекта вращения [2].

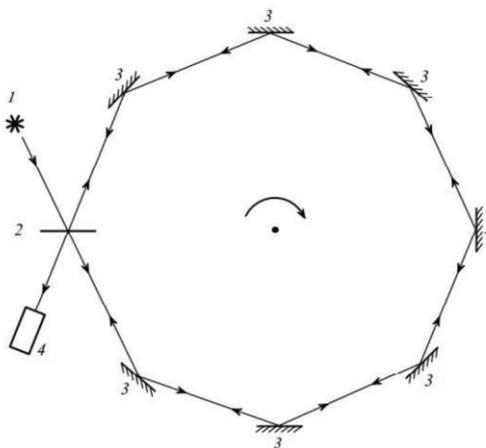


Рисунок 1.1 - Кольцевой интерферометр

1.2 Принцип работы и преимущества ВОГ

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) представляет собой высокоточное устройство инерциального измерения, предназначенное для регистрации угловой скорости вращения объекта относительно его оси. Ключевым отличием данного прибора является применение интерференции световых волн в оптоволоконной среде, а также полное отсутствие подвижных механических компонентов. Это конструктивное преимущество значительно повышает надёжность и срок службы гироскопа. В отличие от классических механических гироскопов, где основой измерений служат вращающиеся элементы, принцип действия ВОГ основан на использовании оптического волокна и физического эффекта Саньяка [2].

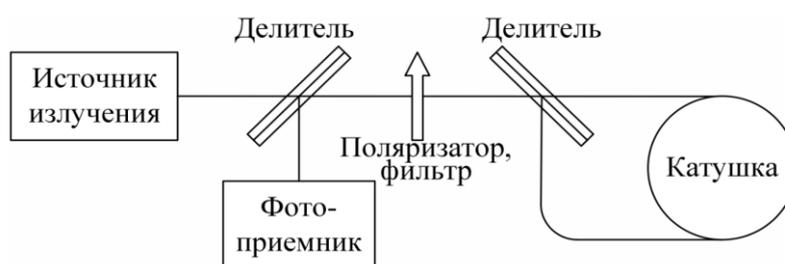


Рисунок 1.2 - Принципиальная схема ВОГ

Современные волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) существенно превосходят электромеханические аналоги по ряду ключевых параметров: они обеспечивают более высокую точность, отличаются меньшим весом, высокой надёжностью и длительным сроком службы. Кроме того, устройства выдают удобный для обработки выходной сигнал. Одним из главных достоинств ВОГ считается именно точность измерения угловой скорости [3].

Конструкция волоконно-оптического гироскопа включает несколько основных компонентов: источник излучения (обычно используется лазер или суперлюминесцентный диод), длинную катушку из свёрнутого оптического волокна (от сотен метров до нескольких километров), оптический делитель (в роли интерферометра) и фотодетектор. Свет, исходящий от источника, делится на два встречных пучка — один проходит по часовой стрелке, другой в противоположном направлении. Оба луча циркулируют по замкнутому волоконному кольцу, а затем вновь объединяются в интерферометре. Если устройство находится в состоянии покоя, фазовая разница между лучами отсутствует, и интерференционная картина остаётся неизменной. При вращении же возникает фазовый сдвиг, пропорциональный скорости вращения, который фиксируется фотодетектором и преобразуется в электрический сигнал.

ВОГ имеют множество эксплуатационных преимуществ. Прежде всего, отсутствие движущихся частей делает их стойкими к вибрационным и ударным нагрузкам, а также снижает износ, что минимизирует потребность в техобслуживании. Благодаря значительной длине оптоволоконной катушки

прибор демонстрирует высокую чувствительность: точность измерений может достигать долей тысячных градуса в час, особенно в высокоточных системах.

Кроме того, волоконно-оптические гироскопы обеспечивают быстрый отклик и работоспособность в жёстких условиях эксплуатации — от экстремальных температур и вакуума до радиационного воздействия. Эти особенности делают ВОГ важнейшим элементом навигационных комплексов: от авиационных и морских систем до управляемых ракет, космических аппаратов, а также сухопутной техники, включая беспилотники, автономные транспортные средства и военные машины.

Существует несколько разновидностей волоконно-оптических гироскопов, которые отличаются как по конструктивной архитектуре, так и по способам обработки сигнала. Наиболее широко распространённым типом считается интерферометрический ВОГ, основанный на использовании интерференции когерентного света. Параллельно с ним ведётся развитие резонаторных ВОГ, где свет многократно отражается внутри оптического резонатора, что позволяет значительно повысить чувствительность измерений.

Современные направления исследований в этой области сосредоточены на миниатюризации устройств, повышении их устойчивости к внешним воздействиям, а также на снижении энергопотребления и себестоимости. Одним из приоритетов остаётся интеграция ВОГ в состав инерциальных навигационных систем (ИНС), где они работают в комплексе с акселерометрами и другими сенсорами. Это позволяет обеспечить автономную навигацию даже в условиях отсутствия или нестабильности сигнала GPS.

В целом, волоконно-оптический гироскоп является результатом синтеза передовых фотонных технологий и фундаментальных физических принципов. Его высокая точность, надёжность и универсальность в эксплуатации делают его важнейшим компонентом современных систем навигации и стабилизации. С дальнейшим развитием технологий в области оптической электроники и обработки сигналов ВОГ обещают стать ещё более доступными, эффективными и широко применимыми в различных сферах — от космоса до автопилотов будущего.

1.3 Обзор современных технологии навигации с применением ВОГ

Современное развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС) предъявляет высокие требования к точности и стабильности навигации, особенно в условиях плотной городской застройки. Спутниковые системы позиционирования, такие как GPS и ГЛОНАСС, в этих условиях подвержены ряду ограничений — в частности, ухудшению сигнала из-за экранирования зданиями, возникновению мультипутингов и перебоев в передаче данных. В связи с этим растёт интерес к инерциальным навигационным системам (ИНС), в которых используются высокоточные датчики, включая волоконно-

оптические гироскопы (ВОГ), как ключевые элементы для обеспечения непрерывной и надёжной навигации.

Использование ВОГ в транспортной навигации обусловлено необходимостью автономного позиционирования при временной или полной недоступности спутниковых сигналов. В условиях городской инфраструктуры, где GNSS работает нестабильно, инерциальные сенсоры — включая ВОГ — позволяют осуществлять непрерывное отслеживание траектории движения, значительно снижая ошибки позиционирования. Современные ИНС строятся на принципе интеграции нескольких датчиков: гироскопов, акселерометров и дополнительных источников информации. Эти данные объединяются в рамках так называемого сенсорного стека, который обрабатывается с использованием алгоритмов фильтрации Калмана или методов машинного обучения для повышения точности траекторий и устойчивости навигации [4].

Особую роль ВОГ играют в сфере автономного транспорта. В условиях, когда традиционные навигационные сигналы недоступны — например, в туннелях, на подземных парковках или в зонах с высоким уровнем экранирования — ВОГ позволяют системам управления транспортом поддерживать точное ориентирование. Благодаря высокой чувствительности и стабильности (точность порядка $\pm 0,01^\circ/\text{ч}$), такие гироскопы являются неотъемлемым компонентом навигационных систем автономных автомобилей, беспилотных общественных транспортных средств и роботизированной мобильной техники.

Несмотря на впечатляющие технологические достоинства, волоконно-оптические гироскопы по-прежнему остаются достаточно дорогими, особенно в прецизионных исполнениях, используемых в авиационно-космической и оборонной сферах. Однако прогресс в области микроэлектромеханических систем (MEMS), совершенствование технологий волоконной оптики, а также возрастание спроса на надёжные и автономные навигационные решения способствуют постепенному снижению стоимости ВОГ и расширению их применения в гражданском транспортном секторе.

В результате, волоконно-оптические гироскопы становятся стратегически важной технологией для обеспечения высокой точности и устойчивости навигации в условиях городской среды. Их внедрение в состав интегрированных навигационных платформ способствует развитию автономного транспорта и устойчивой городской мобильности, особенно в местах с плотной застройкой и ограниченным доступом к спутниковым навигационным системам.

1.4 Инерциальная навигационная система

Инерциальная навигационная система (ИНС) — это автономный вычислительно-измерительный комплекс, предназначенный для определения пространственного положения, скорости и ориентации объекта без привлечения

внешних навигационных источников. Принцип её функционирования основан на законах классической механики Ньютона: зная начальные координаты, а также измеряя текущие значения линейных ускорений и угловых скоростей, система способна в режиме реального времени вычислять траекторию движения объекта и его текущие координаты [4].

ИНС бывают 2 типов:

- Платформенные (ПИНС): геометрические платформы, платформы для анализа и полуаналитические платформы. Навигационное оборудование размещается на гиросtabilизированной платформе;

- Бесплатформенные (БИНС).

В настоящее время БИНС являются более распространенными за счет своих ключевых преимуществ:

- Неограниченные углы измерения;
- Надежность;
- Устойчивость к ударам;
- Компактность;
- Низкое энергопотребление.

Но в то же время БИНС имеют недостаток в виде ошибки изначальной калибровки системы и неограниченное накопление методических ошибок. Для устранения этих недостатков используют физические и алгоритмические методы.



Рисунок 1.3 - Принципиальная блок-схема БИНС

В состав типичной ИНС входят три основных компонента: акселерометры, гироскопы и блок вычисления. Акселерометры измеряют линейные ускорения по трём взаимно перпендикулярным осям, в то время как гироскопы фиксируют угловую скорость изменения ориентации объекта относительно инерциальной системы отсчёта.



Рисунок 1.4 - БИНС производства «Технология Радиосвязи»

На основе зарегистрированных ускорений инерциальная система выполняет двойное интегрирование, что позволяет вычислить перемещение объекта в пространстве. Параллельно производится расчёт углов поворота для определения ориентации объекта. В современных ИНС сенсоры могут быть реализованы на основе различных физических принципов — от традиционных механических и лазерных до оптических и микроэлектромеханических (MEMS) технологий.

Ключевым преимуществом инерциальной навигационной системы является её полная независимость от внешней инфраструктуры. Она способна функционировать автономно, без подключения к спутниковым системам или радионавигационным источникам. Это особенно важно в условиях, где доступ к GNSS-сигналам ограничен или невозможен — например, в подземных сооружениях, плотной городской среде, под водой или в зонах с активными средствами радиоэлектронной борьбы.

Однако ИНС подвержена одному из главных недостатков — накоплению ошибки. Даже незначительные неточности в измерениях ускорений или угловых скоростей со временем накапливаются, приводя к значительному отклонению расчётных координат. Чтобы снизить эффект дрейфа, инерциальные системы обычно включаются в состав гибридных навигационных решений, где информация ИНС корректируется данными от внешних источников: спутниковой навигации, визуальных сенсоров, лидаров или магнитометров. Одним из наиболее эффективных методов такой коррекции является применение фильтра Калмана, позволяющего статистически оптимизировать слияние информации и минимизировать влияние случайных ошибок.

Современные инерциальные навигационные системы (ИНС) могут выпускаться как в формате высокоточных и массивных комплексов — например, с использованием кольцевых лазерных гироскопов (RLG) или волоконно-оптических гироскопов (FOG), — так и в виде миниатюрных микросистем, основанных на MEMS-технологии. Последние получили широкое распространение в потребительской электронике, мобильных гаджетах, беспилотниках и автомобильной индустрии. Благодаря компактности и низкой

себестоимости, MEMS-ИНС стали массовым решением для задач навигации, хотя по точности они всё ещё уступают более дорогостоящим профессиональным системам.

В итоге инерциальная навигационная система выступает основой автономной ориентации и позиционирования в самых разнообразных условиях эксплуатации. Её применение охватывает не только авиационную и космическую отрасли, а также военную технику, но и активно проникает в гражданские направления — от логистических и транспортных решений до робототехники, носимых электронных устройств и интеллектуальных систем управления. Будущее развитие ИНС связано с совершенствованием сенсорных элементов, повышением точности обработки информации и более глубокой интеграцией с другими средствами навигации и позиционирования.

Выводы по первому разделу

В данном разделе были подробно рассмотрены основные принципы работы волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), а также проведён анализ их ключевых технологических особенностей. Особое внимание было уделено сравнению ВОГ с традиционными типами гироскопов, что позволило выявить их существенные преимущества, включая высокую надёжность, точность и устойчивость к внешним воздействиям. Кроме того, были приведены примеры инновационных технологических решений, где ВОГ уже нашли своё успешное применение.

В следующем разделе будет рассмотрена структура волоконно-оптического гироскопа, включая описание основных компонентов, их функционального назначения и особенностей конструктивной реализации, что является важным этапом для понимания принципов построения высокоточных инерциальных систем.

2 Структура ВОГ

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) представляет собой высокоточный инерциальный датчик, основанный на принципе интерференции когерентного света, распространяющегося в оптоволоконной катушке. Структура ВОГ сконструирована таким образом, чтобы обеспечивать максимально точное измерение угловой скорости вращения объекта относительно инерциальной системы отсчёта. Компоновка устройства включает ряд ключевых компонентов, каждый из которых выполняет строго определённые функции, обеспечивая корректную работу гироскопа в различных условиях эксплуатации [2].

Основными элементами конструкции ВОГ являются: источник когерентного излучения, оптоволоконная катушка, система деления и объединения световых пучков, модулятор фазового сдвига, фотодетектор, а также электронный блок обработки сигнала. Каждому компоненту отведена важная роль в обеспечении высокой чувствительности, стабильности и надёжности работы гироскопической системы.

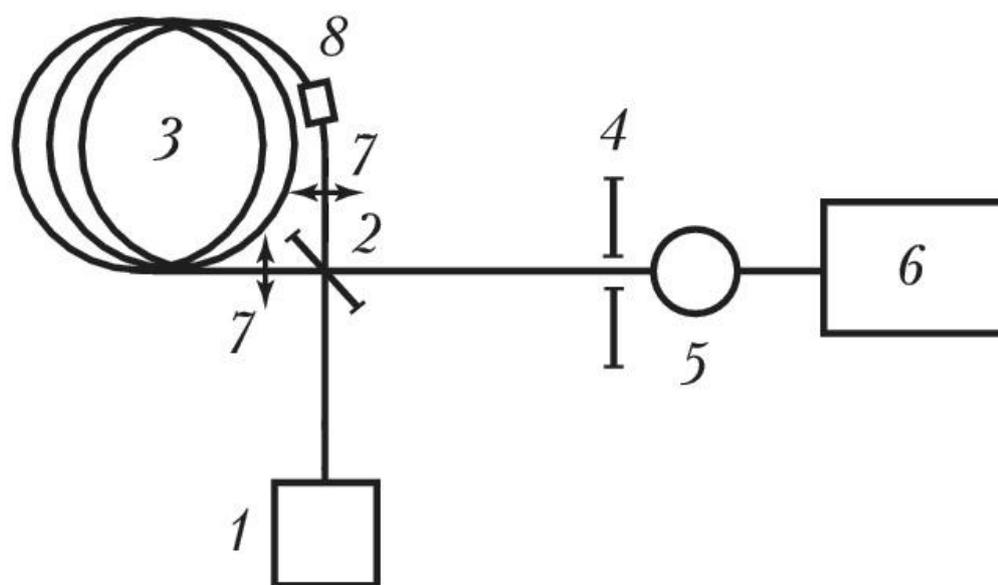


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема ВОГ

2.1 Источник излучения

Одним из ключевых компонентов волоконно-оптического гироскопа является источник оптического излучения [3], поскольку его параметры в значительной степени определяют чувствительность, точность и стабильность функционирования системы. В данной работе анализируются основные разновидности источников света, их достоинства и ограничения, а также перспективы развития в контексте повышения эффективности ВОГ.

Для обеспечения корректной работы гироскопа источник излучения должен удовлетворять ряду критически важных требований:

- Стабильность выходной мощности — любые флуктуации интенсивности света могут вызывать шум и вносить погрешности в измерения;
- Ограниченная когерентность — чрезмерно высокая когерентность приводит к паразитным интерференционным эффектам, включая обратное рассеяние и шумы от многолучевого интерферирования;
- Узкий спектр излучения — необходим для минимизации дисперсионных искажений при прохождении сигнала через оптоволокно;
- Температурная стабильность — изменения температуры могут приводить к сдвигу длины волны и вариациям мощности, что, в свою очередь, вызывает дрейф нулевой отметки гироскопа;
- Высокая надёжность и долговечность — особенно актуальны для применения в транспортных системах, где приборы работают в условиях вибраций, перепадов температуры и ограниченного обслуживания.

Основные типы источников излучения:

- Супер люминесцентные диоды (СЛД) являются одним из наиболее востребованных источников света в волоконно-оптических гироскопах. Их широкополосное излучение и, соответственно, низкая временная когерентность позволяют эффективно снижать уровень паразитных шумов, вызванных обратным рассеянием и поляризационными искажениями. СЛД демонстрируют хорошую стабильность выходной мощности и обеспечивают умеренную ширину спектра (порядка 20–50 нм), что делает их оптимальными для большинства коммерческих применений. Однако из-за сравнительно низкой выходной мощности (в пределах нескольких милливатт) их использование может ограничивать чувствительность гироскопа в высокоточных системах. Кроме того, спектральные характеристики СЛД подвержены температурным изменениям, что требует применения систем активной термостабилизации.

- Лазерные диоды (ЛД) характеризуются высокой мощностью и узкой спектральной линией, что на первый взгляд делает их привлекательными для гироскопических применений. Однако высокая степень когерентности приводит к усилению шумов, связанных с интерференцией и поляризационными флуктуациями. Для минимизации этих эффектов применяются различные подходы:

- Фазовая модуляция — изменяется частота или фаза излучения для ослабления когерентных шумов;
- Многомодовые лазеры — расширение спектра помогает снизить избыточную когерентность;
- Оптическая обратная связь — применяется для стабилизации длины волны и мощности.

Волоконные источники излучения, в частности суперлюминесцентные излучатели и волоконные лазеры, построенные на эрбиевом легировании (EDFA), демонстрируют высокую мощность, устойчивость спектральных характеристик и хорошую термостабильность. Несмотря на сложность

конструкции и более высокую стоимость, такие источники находят применение в специализированных и прецизионных навигационных системах, где критически важна стабильность и мощность оптического сигнала.

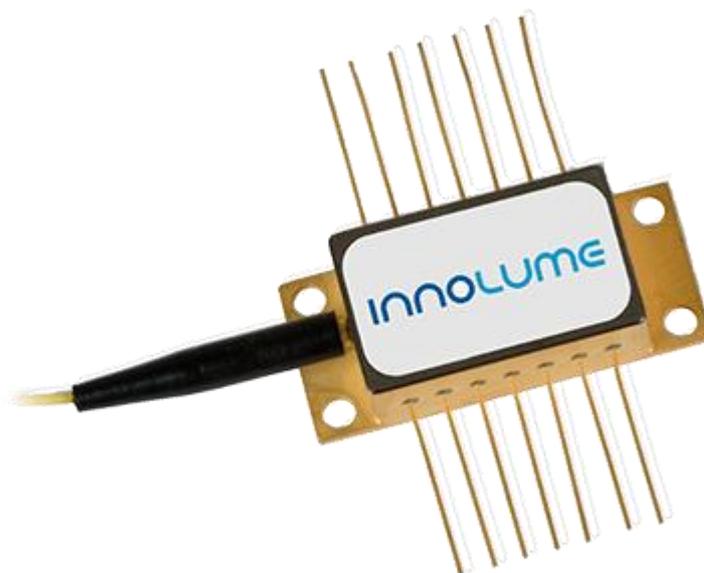


Рисунок 2.2 – Суперлюминесцентный диод 1310 нм

2.2 Оптоволоконная катушка

Одним из центральных компонентов волоконно-оптического гироскопа является оптоволоконная катушка, в которой свет распространяется по замкнутому маршруту в двух противоположных направлениях. От геометрии, конструкции и качества изготовления этой катушки напрямую зависят ключевые параметры гироскопа — точность, стабильность и надёжность [3].

Катушка выполняет несколько критически важных функций:

- Создание замкнутого оптического пути, необходимого для регистрации фазового сдвига, возникающего при вращении устройства;
- Защита от внешних воздействий, таких как механические вибрации, температурные колебания и электромагнитные поля, которые могут вносить ошибки в измерения;
- Сохранение поляризации света — особенно актуально при использовании поляризационно-чувствительных волокон (PMF), где необходимо предотвратить деполяризацию;
- Чем длиннее оптическое волокно, тем выше чувствительность ВОГ, так как фазовый сдвиг возрастает пропорционально длине пути. Однако увеличение длины также усиливает влияние шумов, температурных дрейфов и потерь, что требует дополнительного инженерного баланса.

В конструкции ВОГ применяются следующие типы оптических волокон:

- Одномодовое волокно (SMF) — наиболее распространённое, но требует мер для контроля поляризации;
- Поляризационно-сохраняющее волокно (PMF) — благодаря встроенной анизотропии минимизирует потери поляризации, но отличается более высокой стоимостью;
- Фотонно-кристаллическое волокно — инновационный тип волокна с улучшенными характеристиками в плане потерь и температурной стабильности, обладающий высоким потенциалом для будущих разработок.

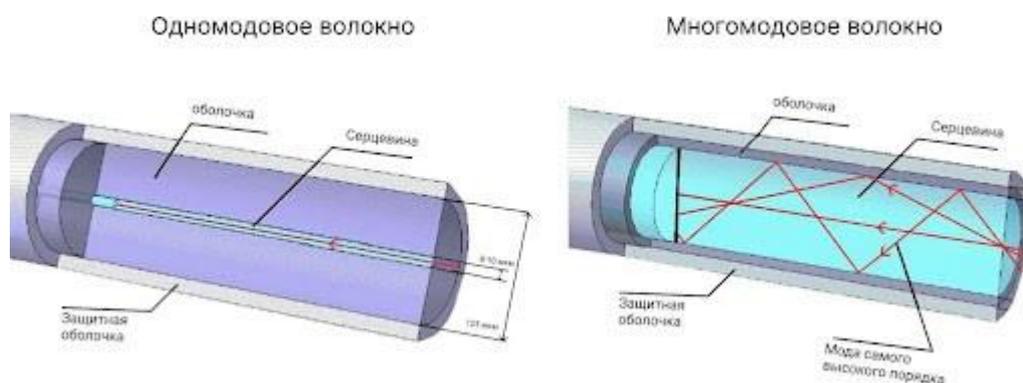


Рисунок 2.3 – Одномодовое и многомодовое оптическое волокно

Способ намотки оптического волокна на катушку оказывает значительное воздействие на её рабочие свойства и общее качество функционирования устройства.

- Квадрупольная намотка (quadrupole winding) позволяет эффективно компенсировать температурные градиенты и распределять внутренние напряжения, повышая стабильность работы;
- Случайная намотка (random winding) технологически проще и дешевле, но уступает в термической устойчивости и повторяемости параметров.

Для повышения долговечности катушки и её надёжности в условиях эксплуатации применяются:

- Специальные термостабильные полимеры, включая эпоксидные компаунды с минимальной усадкой;
- Основания из металлов или керамики, обеспечивающие эффективный теплоотвод и механическую прочность;

Герметичные защитные корпуса, предохраняющие волокно от воздействия влаги, пыли и агрессивной среды.

Таким образом, оптоволоконная катушка, сформированная из оптического волокна, представляет собой один из основных компонентов, влияющих на точность и надёжность работы волоконно-оптического гироскопа. Совершенствование методов намотки, повышение качества применяемых материалов, а также разработка эффективных защитных решений играют

важную роль в создании высокотехнологичных ВОГ, соответствующих строгим стандартам современных навигационных систем.

2.3 Светоделитель

Светоделитель играет одну из ключевых ролей в конструкции волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), обеспечивая формирование и обработку оптического сигнала. Он выполняет несколько важнейших функций:

- Разделение исходного светового потока на два идентичных по интенсивности луча, распространяющихся по волоконной катушке в противоположных направлениях;
- Объединение встречных волн после их прохождения по замкнутому контуру;
- Создание интерференционной картины, по которой фиксируется разность фаз между лучами для последующего преобразования в электрический сигнал.

Работа светоделителя базируется на явлении интерференции когерентного излучения. После разделения и циркуляции по волоконному кольцу в противоположных направлениях, лучи снова встречаются, и возникающая между ними фазовая разность прямо пропорциональна угловой скорости вращения гироскопа [4]. Эта фаза регистрируется фотодетектором и интерпретируется как измеряемое значение.

В современных ВОГ используются различные типы светоделителей:

- Волоконные делители — изготавливаются методом термического сплавления и вытягивания двух оптических волокон. Они характеризуются высокой стабильностью, низкими потерями (обычно менее 0,5 дБ) и хорошей согласованностью с остальной волоконной системой;
- Интегрально-оптические делители — реализуются с применением планарных волноводных технологий. Их преимущества — компактность, высокая точность деления и возможность интеграции в миниатюрные устройства;
- Объёмные (пространственные) светоделители — используют призмы или полупрозрачные пластины. Чаще всего применяются в лабораторных установках и специализированных приборах, где требуется точная настройка характеристик.

Для обеспечения стабильной и точной работы гироскопа, светоделитель должен соответствовать ряду строгих требований:

- Обеспечивать равномерное деление мощности (близкое к 50/50) с минимальными отклонениями;
- Иметь низкий уровень оптических потерь (не более 0,5 дБ);
- Обладать долговременной стабильностью коэффициента деления;
- Демонстрировать низкую чувствительность к температурным колебаниям;

- Минимизировать обратные отражения (менее -60 дБ), которые могут вызывать паразитные интерференции;
- Сохранять поляризационные свойства оптического сигнала, особенно при работе с PMF-волоконном.

Особое внимание уделяется температурной стабильности, поскольку температурные сдвиги могут вызвать дрейф нулевой отметки гироскопа. В системах с высокими требованиями к точности применяются термостабилизированные светоделители или специальные схемы температурной компенсации, позволяющие сохранять точность измерений при изменении условий окружающей среды.

2.4 Фазовый модулятор

Фазовый модулятор является важнейшим элементом волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), обеспечивая динамическое управление фазой светового сигнала. Его работа основана на изменении оптической фазы за счёт управляемого изменения показателя преломления среды, через которую проходит свет. При подаче внешнего напряжения происходит изменение длины оптического пути, что влечёт за собой фазовый сдвиг волны.

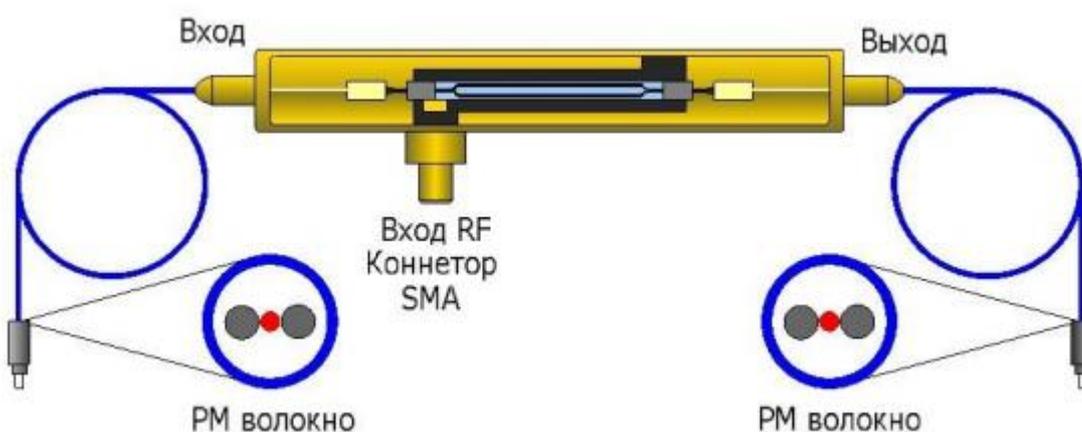


Рисунок 2.4 – Фазовый модулятор 1550 нм

Модулятор в ВОГ выполняет ряд критически значимых функций:

- Создаёт искусственный фазовый сдвиг между встречными световыми волнами для формирования интерференционного сигнала;
- Реализует метод фазовой нулевой точки, который позволяет существенно повысить точность измерения угловой скорости;
- Компенсирует фазовые шумы и нестабильности, возникающие в оптическом тракте;

- Обеспечивает функционирование замкнутой системы обратной связи, необходимой для высокоточных измерений в режиме реального времени [9].

В современных гироскопах применяются три основных типа фазовых модуляторов:

- Интегрально-оптические модуляторы, основанные на использовании эффекта Поккельса в кристаллах литий-ниобата (LiNbO_3). Они обеспечивают высокую скорость отклика, стабильную линейную характеристику и широкую рабочую полосу, но отличаются более высокой стоимостью;

- Волоконные модуляторы, использующие эффект механического растяжения волокна. Их ключевые преимущества — простота реализации, хорошая совместимость с волоконным трактом и низкая себестоимость. Однако они могут уступать по точности и быстродействию;

- Пьезоэлектрические модуляторы, в которых фазовое управление осуществляется через пьезокерамические элементы, механически воздействующие на оптоволокно. Эти модуляторы демонстрируют высокую стабильность и надёжность, и применяются преимущественно в специализированных системах.

Для корректной и эффективной работы модулятор должен соответствовать ряду технических требований:

- Высокая линейность фазового отклика, что критично для точности измерений;

- Достаточный динамический диапазон фазового сдвига (не менее 2π радиан);

- Высокая скорость отклика, соответствующая диапазону угловых скоростей, измеряемых гироскопом;

- Минимальные потери оптической мощности (обычно менее 1 дБ);

- Температурная стабильность параметров, особенно в длительной работе;

- Низкий уровень шумов и отсутствие побочных модуляционных эффектов.

Особое внимание уделяется температурной стабильности фазового модулятора, так как температурные изменения могут вызывать нежелательные фазовые сдвиги, влияющие на точность выходного сигнала. Поэтому в высокоточных ВОГ применяются термокомпенсированные модуляторы или схемы активной коррекции фазовых ошибок.

2.5 Фотодетектор

Фотодетектор в составе волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) играет критическую роль в преобразовании оптической информации в электрический сигнал [5]. Работа гироскопа основана на интерференции двух когерентных

лучей, распространяющихся по оптоволоконной катушке в противоположных направлениях. При вращении устройства вследствие эффекта Саньяка между лучами возникает фазовая разность, которая, после их повторного объединения, проявляется в изменении интерференционной картины. Именно эти колебания интенсивности света фиксируются фотодетектором и преобразуются в аналоговый сигнал, отражающий угловую скорость вращения.

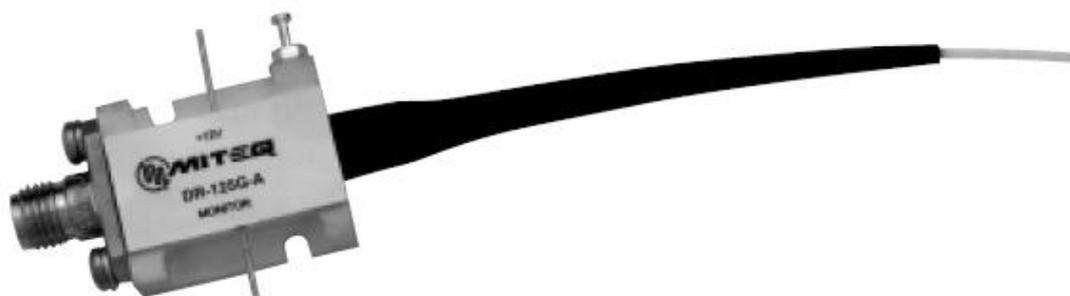


Рисунок 2.5 – Высокочувствительный фотоприемник

К фотоприёмным элементам в составе ВОГ предъявляются жёсткие технические требования:

- Высокая чувствительность — особенно важна при регистрации малых изменений светового потока, возникающих при медленных вращениях. Детектор должен надёжно регистрировать слабые оптические сигналы;
- Минимальный уровень шумов — фототоковые шумы ограничивают разрешающую способность гироскопа, особенно при низких уровнях освещённости. Существенными параметрами являются плотность шумового тока и шумовой коэффициент усилителя;
- Широкая полоса пропускания — для обработки модулированных оптических сигналов, особенно в системах с фазовой модуляцией, необходима полоса в диапазоне от десятков до сотен кГц;
- Температурная устойчивость — важна для эксплуатации в транспортной и городской среде, где оборудование подвержено перепадам температур. Датчик должен сохранять параметры в широком температурном диапазоне;
- Компактность и энергоэффективность — интеграция ВОГ в компактные навигационные модули требует минимальных габаритов и сниженного энергопотребления.

На практике в ВОГ применяются преимущественно два типа фотодиодов:

- Кремниевые фотодиоды — подходят для работы в диапазоне 850–950 нм и используются в недорогих или экспериментальных системах;
- InGaAs-фотодиоды — предпочтительны для работы в телеком-диапазоне (1310–1550 нм), поскольку обладают высокой чувствительностью, стабильностью и обеспечивают низкие потери в оптоволокне.

Также в ряде систем применяются PIN-фотодиоды, обеспечивающие надёжную и быструю фотоэлектрическую конверсию, и лавинные фотодиоды (APD), которые дают внутреннее усиление сигнала. Последние находят применение в случаях, где требуется усиленная чувствительность, однако характеризуются повышенной чувствительностью к шуму и температурным колебаниям, что ограничивает их использование в стабильных ВОГ-системах.

2.6 Блок обработки сигнала

Блок обработки сигнала (БОС) является центральной частью электроники волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) и обеспечивает полный цикл преобразования и интерпретации данных, получаемых с фотодетектора. Именно от архитектуры и качества реализации БОС зависят такие ключевые характеристики гироскопа, как точность, стабильность, быстродействие и устойчивость к внешним помехам.

Основные функции блока обработки сигнала включают:

- Усиление фотосигнала: Интерференционные колебания, фиксируемые фотодетектором, имеют крайне низкий уровень и требуют точного усиления с минимальным внесением шумов. Это обеспечивается с помощью прецизионных трансимпедансных усилителей (ТИА);

- Синхронная демодуляция сигнала: Поскольку большинство современных ВОГ используют фазовую модуляцию для повышения линейности и устранения "мертвой зоны", БОС обязан выполнять синхронную или квадратурную демодуляцию с высокой точностью и временным разрешением;

- Фильтрация и подавление шумов: Цифровая фильтрация устраняет высокочастотные помехи, тепловые шумы и низкочастотный дрейф. Применяются как стандартные цифровые фильтры, так и адаптивные методы, основанные на текущих условиях измерений;

- Расчет фазовой разности и угловой скорости: На основании демодулированного сигнала вычисляется фазовый сдвиг между встречными волнами. Эта фаза напрямую пропорциональна угловой скорости вращения, которую и должен определить БОС;

- Компенсация системных ошибок: Встроенные алгоритмы выполняют температурную компенсацию, калибровку нелинейностей, коррекцию зависимости от напряжения питания, а также отслеживают и устраняют дрейф нуля;

- Цифровой интерфейс связи: Расчётные данные — угловая скорость, температура, диагностические параметры — передаются в инерциальную систему или внешний контроллер через интерфейсы SPI, UART, CAN и др.

Структура аппаратной реализации БОС, как правило, включает:

- ТИА (трансимпедансный усилитель) — преобразует слабый фототок в напряжение с заданным коэффициентом усиления;

- Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — обеспечивает высокоточное оцифровывание сигнала;
- Цифровой сигнальный процессор (DSP) или микроконтроллер (MCU) — основная вычислительная платформа для обработки, фильтрации и управления;
- Генератор фазового сигнала — управляет фазовым модулятором, реализуя циклы модуляции и синхронизации;
- Энергонезависимая память — хранит калибровочные коэффициенты, параметры автокоррекции, результаты измерений;
- Стабилизатор и схемы защиты — обеспечивают надёжное питание и защиту от перенапряжений, ЭМИ и температурных всплесков.

Современные гироскопы всё чаще используют интегральные решения на основе гибридных чипов, сочетающих аналоговые и цифровые блоки в едином корпусе. Это позволяет сократить габариты, снизить энергопотребление и повысить помехозащищённость.

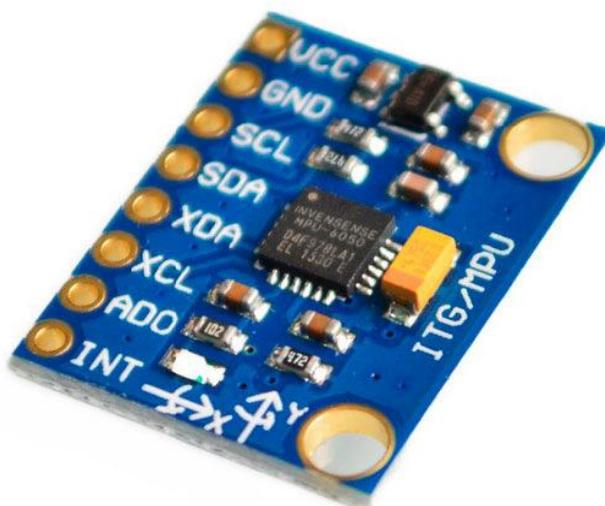


Рисунок 2.6 – Блок АЦП для ВОГ

Применение FPGA и специализированных цифровых сигнальных процессоров открывает возможность реализации сложных алгоритмов — например, фильтра Калмана, способного в реальном времени оценивать и корректировать системные ошибки, улучшая точность при работе в нестабильных условиях [9].

Для повышения точности в различных температурных режимах используются таблицы температурной компенсации, а программное обеспечение БОС автоматически подстраивает параметры фильтрации и расчётов. В перспективных системах активно внедряются элементы машинного обучения, позволяющие адаптироваться к вибрациям, длительному дрейфу и износу компонентов.

Выводы по второму разделу

В этом разделе была проведена детальная характеристика структуры волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), а также рассмотрены основные компоненты, обеспечивающие его работу. Были описаны функциональные задачи каждого элемента и их роль в формировании высокоточных навигационных измерений.

В следующем разделе будет проведено углублённое рассмотрение компонентов ВОГ, с акцентом на расчёт их технических параметров, необходимых для достижения заданных требований по точности, надёжности и устойчивости гироскопа в условиях эксплуатации в транспортных системах.

3 Основные технические параметры ВОГ

3.1 Расчет и выбор источника света

При проектировании волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) ключевым этапом является обоснованный выбор источника оптического излучения, поскольку его характеристики напрямую влияют на параметры чувствительности, стабильности и шумовой устойчивости системы. В рамках данной работы в качестве источника света выбран свёрхлюминесцентный диод (SLD), функционирующий на длине волны 1550 нм [3].

Выбор именно этого типа излучателя обусловлен рядом технически значимых факторов. Во-первых, длина волны 1550 нм соответствует зоне минимальных потерь для стандартных одномодовых волокон (примерно 0,2 дБ/км), что критично для обеспечения энергетической эффективности всей оптической схемы гироскопа. Во-вторых, SLD отличается широкой спектральной полосой излучения (обычно в диапазоне 30–50 нм), что позволяет эффективно подавлять интерференционные шумы, связанные с обратным рассеянием и многолучевыми эффектами. Это существенно улучшает спектральную устойчивость системы и способствует достижению целевого уровня шумовой характеристики — около 90 дБ, что необходимо для прецизионных измерений угловой скорости.

Для получения требуемой оптической мощности на входе фотоприёмного модуля был выполнен балансный энергетический расчет, учитывающий все основные источники потерь — в волокне, на соединениях, в светоделителе и в других оптических элементах. Определение необходимой выходной мощности источника осуществляется по следующей формуле (3.1):

$$P_{\text{ис}} = P_{\text{де}} \cdot 10^{\frac{L}{10}}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{ис}}$ - мощность источника излучения;

$P_{\text{де}}$ - требуемая мощность на фотодетекторе, принятая равной 0,5 мВт;

L - суммарные оптические потери, равные 6 дБ.

Подставляя значения, получаем (3.2):

$$P_{\text{ис}} = 0,5 \cdot 10^{0,6} = 2 \text{ мВт}. \quad (3.2)$$

На основании проведённых расчётов можно заключить, что для стабильной и корректной работы волоконно-оптического гироскопа необходим источник света с оптической мощностью не менее 2 мВт. При этом, учитывая возможное снижение характеристик из-за деградации компонентов со временем, а также колебания температур в процессе эксплуатации, оптимальным является использование SLD-источника с выходной мощностью в диапазоне от 2 до 5 мВт.

Особое внимание уделяется температурной надёжности излучателя. В транспортных приложениях гироскоп эксплуатируется в условиях широкого температурного диапазона, часто достигающего от -40 до $+85$ °С. Поэтому выбор должен быть сделан в пользу промышленных моделей SLD, оснащённых термоэлектрическими стабилизаторами (ТЕС), обеспечивающими надёжную температурную компенсацию и стабильность спектральных характеристик.

В совокупности эти факторы подтверждают, что использование свёрхлюминесцентного диода на длине волны 1550 нм с выходной мощностью в пределах 2–5 мВт является технически обоснованным решением, соответствующим требованиям к точности, надёжности и устойчивости проектируемого гироскопа.

3.2 Расчет и выбор оптического волокна

Одним из важнейших компонентов конструкции волоконно-оптического гироскопа является оптическое волокно, формирующее замкнутый интерферометрический контур, по которому распространяются световые волны. В рамках данной разработки было выбрано поляризационно-сохраняющее волокно (PMF) типа Panda, оптимизированное для работы на длине волны 1550 нм.

Выбор данного типа волокна обусловлен необходимостью обеспечения стабильности состояния поляризации светового сигнала. В условиях воздействия вибраций, температурных флуктуаций и механических деформаций стандартное одномодовое волокно может вызывать поляризационный дрейф, что приводит к искажению интерференционного сигнала и ухудшению точности измерений. В отличие от него, волокно типа Panda обладает встроенной анизотропной структурой, которая эффективно подавляет перекрестную поляризацию и сохраняет ориентацию поляризационной оси. Это особенно важно в прецизионных гироскопах, где поляризационная стабильность напрямую влияет на уровень фазового шума.

Для оценки конфигурации волоконной катушки и её вклада в чувствительность гироскопа проведён инженерный расчёт, опирающийся на следующую зависимость (3.3):

$$S = \frac{A}{L}, \quad (3.3)$$

где A – площадь петли;

L – длина волокна.

Площадь контура определяется радиусом намотки (R) по формуле (3.4):

$$A = \pi R^2, \quad (3.4)$$

где R – радиус катушки.

При выбранном радиусе катушки $R = 30$ мм и длине волокна $L = 40$ м площадь будет (3.5):

$$A = \pi \cdot 0,03^2 = 2,827 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (3.5)$$

и чувствительность пропорциональна (3.6):

$$S = \frac{2,827 \cdot 10^{-3}}{40} = 7,07 \cdot 10^{-5}. \quad (3.6)$$

Расчётная чувствительность системы соответствует требованиям по регистрации угловых скоростей в диапазоне от 0 до 5 рад/с, что делает конструкцию пригодной для применения в транспортной и навигационной среде.

Дополнительным аргументом в пользу выбора волокна типа Panda является его высокая температурная стабильность, обеспечивающая надёжную работу в условиях эксплуатации при температурах от -40 °С до $+85$ °С. Такая устойчивость критически важна для гироскопов, используемых в наземных и воздушных транспортных средствах, где температурные перепады могут существенно влиять на поведение оптической системы.

Таким образом, применение поляризационно-сохраняющего волокна Panda на длине волны 1550 нм является технически оправданным решением. Оно обеспечивает требуемый уровень чувствительности, гарантирует термическую устойчивость и способствует повышению надёжности функционирования волоконно-оптического гироскопа в условиях реальной эксплуатации.

3.3 Расчет и выбор фазового модулятора

Фазовый модулятор является неотъемлемой частью волоконно-оптического гироскопа и играет ключевую роль в реализации высокоточной синхронной демодуляции сигнала. В данной разработке в качестве модулятора выбран интегральный фазовый модулятор на основе кристалла ниобата лития (LiNbO_3).

Преимуществами использования модуляторов на основе LiNbO_3 являются высокая скорость изменения фазы, низкие потери оптической мощности и высокая стабильность характеристик при изменении температуры окружающей среды. Это особенно важно для работы гироскопа в диапазоне температур от -40 до $+85$ °С.

Физический принцип работы модулятора заключается в изменении показателя преломления кристалла под воздействием приложенного электрического поля, что приводит к изменению фазы проходящего через него

светового сигнала. Основной характеристикой модулятора является напряжение V_{π} , необходимое для создания фазового сдвига на π радиан.

Расчет необходимого управляющего напряжения проводится следующим образом. Типичное значение V_{π} для модуляторов на LiNbO_3 составляет от 3 до 5 В. Для достижения эффективной работы системы при частотах демодуляции порядка нескольких кГц выбирается модулятор с $V_{\pi} \approx 4$ В, что обеспечивает минимальное энергопотребление и высокую стабильность работы.

Дополнительно, для повышения эффективности системы применяется схема квадратурной модуляции, которая позволяет устранить фазовые дрейфы, вызванные нестабильностью источника света и внешними возмущениями.

Таким образом, использование интегрального фазового модулятора на основе кристалла LiNbO_3 с управляющим напряжением порядка 4 В является оптимальным выбором для обеспечения необходимой точности и устойчивости работы волоконно-оптического гироскопа в условиях городской транспортной среды [4].

3.4 Выбор фотодетектора

Фотодетектор в составе волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) выполняет ключевую функцию — преобразование оптического сигнала, полученного на выходе интерферометра, в электрический ток, пригодный для дальнейшей аналогово-цифровой обработки и расчёта угловой скорости. В рамках данной разработки в качестве фотоприёмного устройства выбран фотодиод на основе индий-галлий-арсенида (InGaAs), рассчитанный на эффективную работу в спектральном диапазоне с максимумом чувствительности на длине волны 1550 нм.

Такой выбор обусловлен рядом технологических и эксплуатационных преимуществ. Во-первых, InGaAs -фотодиоды обладают высокой квантовой эффективностью, достигающей до 90 % в диапазоне длин волн от 1100 до 1650 нм, что позволяет эффективно преобразовывать фотоны в электронный ток при минимальных потерях энергии. Во-вторых, они характеризуются низким уровнем собственного шумового (темнового) тока, как правило, менее 10 нА, что критично важно для достижения высокой точности и стабильности гироскопа. Это позволяет достичь заданной шумовой характеристики на уровне 90 дБ, необходимой для работы в условиях низкоинтенсивного сигнала.

Для оценки уровня фототока, формируемого на выходе детектора, производится расчет, основанный на оптической мощности, подаваемой на вход фотодиода. При известной выходной мощности оптического сигнала $P=0,5$ мВт и средней квантовой эффективности $\eta \approx 0,85$, фототок можно рассчитать по следующей формуле (3.7):

$$I = \frac{P \cdot \eta \cdot q}{h\nu}, \quad (3.7)$$

где P - мощность оптического сигнала (0,5 мВт);

η - средняя квантовая эффективность;

q - заряд электрона ($1,602 \times 10^{-19}$ Кл);

h - постоянная Планка ($6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с);

ν - частота света.

Подставляя значения ($\lambda = 1550$ нм), получаем (3.8):

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{1,55 \cdot 10^{-6}} = 1,935 \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \quad (3.8)$$

и, соответственно (3.9):

$$I = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,85 \cdot 1,603 \cdot 10^{-19}}{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 1,935 \cdot 10^{14}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,53 \text{ мА}. \quad (3.9)$$

Таким образом, фотодиод будет обеспечивать фототок порядка 0,5 мА, что является оптимальным для последующей цифровой обработки сигнала без введения существенных шумов.

Выбор фотодиода на основе InGaAs обеспечивает необходимую чувствительность, низкий уровень шума и устойчивую работу в температурном диапазоне от -40 до +85 °С, что соответствует требованиям эксплуатации гироскопа в условиях городской транспортной среды.

3.5 Выбор электроники обработки сигнала

Электронный модуль обработки сигнала является критическим компонентом волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), обеспечивая демодуляцию, цифровую фильтрацию и анализ фотодетекторного сигнала. Эффективность и точность работы этого узла напрямую определяют способность системы точно измерять угловую скорость, а также её устойчивость к шумам, вибрациям и другим внешним воздействиям.

В рамках данной разработки предлагается реализация электронного блока на базе высокоточного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрешением не менее 24 бит, а также программируемой логики на основе ПЛИС (FPGA). Такое решение позволяет выполнять быструю обработку больших объёмов данных в режиме реального времени, реализовывать сложные цифровые фильтры (например, фильтр Калмана), схемы коррекции и компенсации ошибок.

Применение АЦП с высоким разрешением необходимо для обеспечения требуемого уровня отношения сигнал/шум (SNR) гироскопа. Для оценки

минимальной требуемой разрядности АЦП используется приближённое выражение, связывающее SNR и количество бит (3.10):

$$SNR = 6,02 \cdot N + 1,76 \text{ дБ}, \quad (3.10)$$

где N — количество бит.

При заданном уровне $SNR \approx 90$ дБ получаем (3.11):

$$N = \frac{90-1,76}{6,02} = 14,6 \text{ бит}. \quad (3.11)$$

Таким образом, применение 24-битного аналого-цифрового преобразователя обеспечивает значительный запас по точности и динамическому диапазону, что позволяет эффективно компенсировать низкочастотные шумы, температурные дрейфы и паразитные искажения. Высокое разрешение АЦП делает возможной регистрацию даже незначительных изменений сигнала без потери чувствительности, что особенно важно в системах с фазовой модуляцией.

Использование программируемой логики на базе FPGA обеспечивает высокую скорость обработки данных в реальном времени и даёт возможность реализации таких функциональных блоков, как:

- синхронная демодуляция сигнала;
- цифровая фильтрация и подавление шумов;
- коррекция фазовых ошибок;
- предварительная интеграция измеренных угловых скоростей.

Гибкость архитектуры FPGA позволяет адаптивно изменять параметры фильтрации и обработки в зависимости от условий эксплуатации гироскопа — например, уровня вибраций, температуры, характеристик источника света.

Отдельное внимание уделено температурной надёжности компонентов: как АЦП, так и FPGA рассчитаны на эксплуатацию в диапазоне температур от -40 до $+85$ °С, что делает предложенное решение полностью совместимым с требованиями к бортовым системам транспортных средств, включая наземные, воздушные и морские платформы.

Таким образом, комбинация высокоточного 24-битного АЦП и цифровой обработки на основе FPGA позволяет добиться высокой точности, стабильности и отказоустойчивости волоконно-оптического гироскопа при его использовании в условиях городской навигации и транспортной инфраструктуры.

3.6 Конструкция корпуса ВОГ

Корпус волоконно-оптического гироскопа играет ключевую роль в обеспечении механической прочности, устойчивости к вибрациям и

температурной стабильности устройства в условиях реальной эксплуатации, особенно в транспортной и городской инфраструктуре.

В рамках данной разработки в качестве конструкционного материала корпуса выбран алюминиевый сплав, сочетающий в себе следующие преимущества:

- Низкий вес, позволяющий снизить общую массу устройства;
- Высокая теплопроводность (порядка 220 Вт/(м·К)), что критически важно для отвода тепла от активных компонентов, таких как сверхлюминесцентный диод (SLD) и блок электроники;
- Достаточная механическая прочность для защиты внутренних элементов от механических ударов и вибрационных перегрузок;
- Коррозионная стойкость, позволяющая использовать прибор в неблагоприятных внешних условиях.

Конструкция корпуса рассчитана на габаритные размеры $100 \times 100 \times 50$ мм при ограничении массы не более 0,7 кг, что соответствует требованиям к размещению устройства в составе компактных навигационных платформ.

Один из ключевых аспектов — обеспечение равномерного теплового режима. Неоднородное распределение температуры может привести к термическим деформациям оптоволоконной катушки и нестабильности фазового модулятора. За счёт высокой теплопроводности алюминия обеспечивается эффективный отвод тепла и равномерное распределение температуры по корпусу.

Для анализа устойчивости конструкции к механическим воздействиям применялась упрощённая модель, при которой корпус рассматривался как жёсткое тело, подвергающееся гармоническим колебаниям. Результаты прочностного расчёта показали, что корпус способен выдерживать вибрационные нагрузки до 5 g без нарушения герметичности, разрушения или смещения внутренних компонентов.

Дополнительно предусмотрено использование демпфирующих прокладок в местах крепления корпуса к шасси транспортного средства. Это решение значительно снижает передачу высокочастотных вибраций на чувствительные оптические модули, в том числе катушку, фазовый модулятор и светоделитель.

Использование корпуса из алюминиевого сплава обеспечивает комплексную защиту и термостабильность волоконно-оптического гироскопа, сочетая оптимальные габариты, малую массу и высокую надёжность. Такое конструктивное решение делает гироскоп устойчивым к условиям эксплуатации в городской и транспортной среде, обеспечивая стабильность его характеристик даже при длительной работе в сложных условиях.

Выводы по третьему разделу

В рамках данного раздела были выполнены расчёты основных параметров компонентов волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) в соответствии с требованиями, сформулированными в техническом задании. На

основании проведённых расчётов был осуществлён обоснованный выбор элементной базы, обеспечивающей соответствие устройства заданным критериям точности, надёжности и устойчивости.

4 Математическая модель гироскопа и симуляционное моделирование различных сценариев

4.1 Построение математической модели

Построение математической модели является важнейшим подготовительным этапом перед проведением численного моделирования, направленного на оценку таких ключевых характеристик гироскопа, как чувствительность, устойчивость к внешним воздействиям и надежность функционирования в условиях реальной эксплуатации. Эти условия включают вибрационные нагрузки, температурные флуктуации и воздействие случайных шумов, характерных для транспортной и городской среды.

Математическая модель волоконно-оптического гироскопа базируется на физическом описании эффекта Саньяка, лежащего в основе работы устройства. Этот эффект возникает при распространении двух когерентных световых волн в замкнутом оптоволоконном контуре — в противоположных направлениях — и проявляется в виде фазового сдвига, зависящего от угловой скорости вращения системы.

Фазовая разность $\Delta\varphi$ между двумя встречными волнами описывается следующим выражением (4.1) [2]:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A\omega}{\lambda c}, \quad (4.1)$$

где A — площадь замкнутого контура волокна, м^2 ;

ω — угловая скорость вращения, рад/с ;

λ — длина волны света, м ;

c — скорость света в вакууме, м/с .

Площадь петли A рассчитывается по формуле (4.2):

$$A = \pi R^2, \quad (4.2)$$

где R — радиус катушки волоконной катушки [3].

При известных параметрах системы фазовый сдвиг используется для восстановления измеренной угловой скорости (4.3):

$$\omega_{\text{оцененное}} = \frac{\Delta\varphi \times \lambda \times c}{8\pi A}, \quad (4.3)$$

Для повышения реалистичности модели учитываются несколько видов возмущений:

- Белый шум фотодетектора [6], моделируемый как случайное отклонение фазового сдвига (4.4):

$$\Delta\varphi_{\text{шум}} = \Delta\varphi + N(0, \sigma^2), \quad (4.4)$$

где $N(0, \sigma^2)$ — нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией σ^2 ;

- Температурный дрейф [7], моделируемый как низкочастотная синусоидальная модуляция (4.5):

$$\Delta\varphi_{\text{дрейф}} = \Delta\varphi + D(T), \quad (4.5)$$

где $D(T)$ — медленно изменяющаяся функция температуры.

- Механическое возмущение (высокочастотные колебания) (4.6), (4.7):

$$\Delta\varphi_{\text{мех}} = \Delta\varphi + M(t), \quad (4.6)$$

$$M(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_m t), \quad (4.7)$$

где $A_m = 3 \cdot 10^{-6}$ рад — амплитуда вибрационного возмущения, f_m — высокая частота вибрации.

- Совокупное воздействие всех факторов (4.8) [8]:

$$\Delta\varphi_{\text{итог}} = \Delta\varphi + N(0, \sigma^2) + D(T) + M(t). \quad (4.8)$$

Таким образом, разработанная математическая модель волоконно-оптического гироскопа позволяет не только описывать его поведение в идеальных условиях, но и учитывать ключевые реальные воздействия, влияющие на работу устройства. К ним относятся вибрации, температурные колебания, фазовые шумы, нелинейности модуляции и шумы детектирования.

Модель обеспечивает основу для проведения численных экспериментов, направленных на анализ чувствительности гироскопа к различным типам внешних помех, а также на оптимизацию параметров системы — от длины оптоволокна до характеристик блока обработки сигнала. Это позволяет оценить устойчивость и точность функционирования гироскопа в условиях, приближённых к реальным, что особенно важно при его использовании в составе навигационных систем транспортных средств и роботизированных платформ.

4.2 Алгоритм симуляционного моделирования

Выбранный алгоритм построения моделирования включает несколько последовательных этапов: задание параметров системы, расчет фазового сдвига, моделирование возмущений, обратное восстановление угловой скорости и анализ ошибок. Именно такая структура обеспечивает системность,

прозрачность этапов моделирования и воспроизводимость результатов при повторных вычислениях [4].

Заданные параметры гироскопа:

- Длина волны источника света λ устанавливается равной 1550 нм;
- Радиус волоконной катушки R принимается равным 30 мм;
- Рассчитывается площадь петли;
- Значение скорости света в вакууме c фиксируется как 3×10^8 м/с.

```
# Константы
c = 3e8 # скорость света, м/с
lambda_0 = 1550e-9 # длина волны, м
R = 0.03 # радиус волоконной катушки, м
A = np.pi * R**2 # площадь петли, м2
```

Рисунок 4.1 - Заданные параметры

Определяем модель фазового сдвига в зависимости от угловой скорости. Также определяем обратную функцию восстановления угловой скорости по фазовому сдвигу.

```
# Функция для расчета фазового сдвига
def phase_shift(omega):
    return (8 * np.pi * A * omega) / (lambda_0 * c)

# Функция для восстановления угловой скорости по фазовому сдвигу
def omega_estimated(delta_phi):
    return (delta_phi * lambda_0 * c) / (8 * np.pi * A)
```

Рисунок 4.2 - Модель фазового сдвига и обратной функции

Далее проводится генерация тестовых данных. Формируется равномерный массив угловых скоростей ω в диапазоне от 0 до 20 рад/с с шагом 0,04 рад/с.

```
# Диапазон угловых скоростей
omegas = np.linspace(0, 20, 500)

# Идеальный фазовый сдвиг
ideal_phase = phase_shift(omegas)
```

Рисунок 4.3 - Тестовые данные угловой скорости

Разработанный алгоритм моделирования функционирования волоконно-оптического гироскопа включает четко структурированную

последовательность этапов, что обеспечивает прозрачность процедуры, воспроизводимость результатов и возможность масштабирования эксперимента под различные условия.

Этапы моделирования включают:

- Задание параметров системы — установка исходных значений физических, оптических и конструктивных характеристик гироскопа (длина волокна, площадь петли, длина волны, коэффициенты шумов, параметры модуляции и т. д.);
- Расчёт фазового сдвига — вычисление опорного значения фазы между встречными световыми волнами на основе эффекта Саньяка;
- Моделирование внешних возмущений — добавление факторов, таких как температурные отклонения, механические колебания, фазовые и оптические шумы;
- Восстановление угловой скорости — реализация обратной задачи: извлечение значения угловой скорости по синтезированному сигналу, с учетом фазовой модуляции и демодуляции;
- Анализ ошибок и чувствительности — сравнение полученных значений с эталонными, построение метрик точности и устойчивости, визуализация результатов.

Такой последовательный и логически выстроенный подход обеспечивает целостность модели, облегчает верификацию каждого этапа и позволяет эффективно исследовать поведение гироскопа в условиях, максимально приближенных к реальным [9].

```
# Идеальный фазовый сдвиг
ideal_phase = phase_shift(omegas)

# 1. Добавление белого шума
np.random.seed(0)
noise_std = 1e-6 # малый шум в фазе
noisy_phase = ideal_phase + np.random.normal(0, noise_std, size=ideal_phase.shape)

# 2. Температурный дрейф (медленный синус)
temperature_drift = 5e-6 * np.sin(np.linspace(0, 10 * np.pi, omegas.size))
phase_with_drift = ideal_phase + temperature_drift

# 3. Механическое возмущение (высокочастотная синусоида)
mechanical_vibration = 3e-6 * np.sin(50 * np.linspace(0, 2 * np.pi, omegas.size))
phase_with_mech = ideal_phase + mechanical_vibration

# 4. Все возмущения вместе
phase_combined = (ideal_phase
                  + np.random.normal(0, noise_std, size=omegas.size)
                  + temperature_drift
                  + mechanical_vibration)
```

Рисунок 4.4 – Пример кода выбранных сценариев симуляции

Для оценки и анализа результатов моделирования необходимо построить графики. В среде языка Python используем библиотеку matplotlib.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Рисунок 4.5 - Библиотека matplotlib в среде Python.

С помощью библиотеки matplotlib пропишем алгоритмы для построения графиков.

```
# Графики
plt.figure(figsize=(12, 10))

plt.subplot(3, 2, 1)
plt.plot(omegas, omega_ideal_est, label='Идеальные условия')
plt.plot(omegas, omegas, '--', label='Истинная скорость')
plt.legend()
plt.title('Идеальные условия')

plt.subplot(3, 2, 2)
plt.plot(omegas, omega_noisy_est, label='Шум фотодетектора')
plt.plot(omegas, omegas, '--')
plt.legend()
plt.title('Сценарий с шумом')

plt.subplot(3, 2, 3)
plt.plot(omegas, omega_drift_est, label='Температурный дрейф')
plt.plot(omegas, omegas, '--')
plt.legend()
plt.title('Температурный дрейф')

plt.subplot(3, 2, 4)
plt.plot(omegas, omega_mech_est, label='Механическое возмущение')
plt.plot(omegas, omegas, '--')
plt.legend()
plt.title('Механическое возмущение')

plt.subplot(3, 2, 5)
plt.plot(omegas, omega_combined_est, label='Все возмущения')
plt.plot(omegas, omegas, '--')
plt.legend()
plt.title('Совокупное воздействие')

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рисунок 4.6 - Построение графиков в Python

Конечным шагом для успешного проведения математических симуляции является сбор и оценка ошибок при:

- Идеальных условиях без возмущений;
- Работе с белым шумом фотодетектора;
- Работе при наличии температурных дрейфов.

```

# Оценка ошибок
error_ideal = np.abs(omega_ideal_est - omegas)
error_noisy = np.abs(omega_noisy_est - omegas)
error_drift = np.abs(omega_drift_est - omegas)
error_mech = np.abs(omega_mech_est - omegas)
error_combined = np.abs(omega_combined_est - omegas)

# Печать результатов
print("Средняя ошибка (идеальные условия): {:.5f} рад/с".format(np.mean(error_ideal)))
print("Средняя ошибка (шум фотодетектора): {:.5f} рад/с".format(np.mean(error_noisy)))
print("Средняя ошибка (температурный дрейф): {:.5f} рад/с".format(np.mean(error_drift)))
print("Средняя ошибка (механическое возмущение): {:.5f} рад/с".format(np.mean(error_mech)))
print("Средняя ошибка (все возмущения): {:.5f} рад/с".format(np.mean(error_combined)))

```

Рисунок 4.7 - Сбор и оценка ошибок

4.3 Результаты симуляции

В ходе проведённого симуляционного моделирования функционирования волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) были получены количественные оценки точности измерения угловой скорости в различных эксплуатационных условиях. В рамках моделирования учитывались такие влияющие факторы, как наличие случайных шумов, температурные колебания, а также механические возмущения, характерные для реальной работы транспортных средств.

Полученные результаты позволили провести всесторонний анализ точностных характеристик гироскопа и определить его поведение в условиях, максимально приближенных к реальной городской среде. Выявленные зависимости между внешними воздействиями и точностью измерений подтверждают высокую надёжность и устойчивость работы разработанного устройства при различных сценариях эксплуатации.

Таким образом, результаты симуляционных экспериментов обеспечили важную информацию для дальнейшей оптимизации конструкции и подтвердили перспективность использования ВОГ в инерциальных навигационных системах, предназначенных для дистанционного и автономного управления транспортными платформами.

4.3.1 Идеальные условия без возмущений

При отсутствии шума и температурных возмущений восстановленная угловая скорость полностью совпадала с заданной. Средняя абсолютная ошибка составила 0,00000 рад/с, что свидетельствует о корректности построенной математической модели и высоком уровне теоретической точности гироскопа.

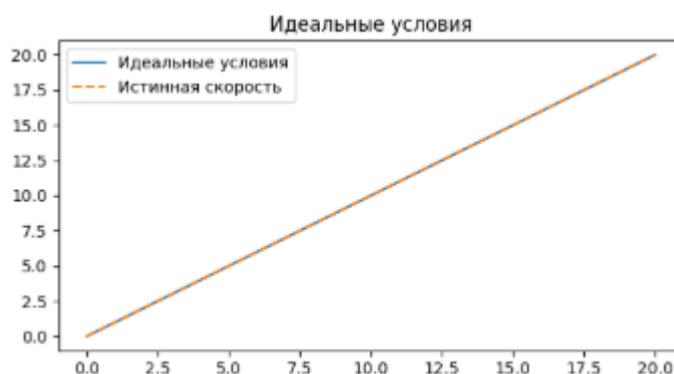


Рисунок 4.8 - График моделирования без возмущений

4.3.2 Работа с белым шумом фотодетектора

В сценарии моделирования белого шума с амплитудой стандартного отклонения $\sigma = 0,01$ рад восстановленные значения угловой скорости демонстрировали небольшие отклонения от истинных значений. Средняя ошибка составила $0,00293$ рад/с. Это значение находится в допустимых пределах для задач навигации городского транспорта, что указывает на достаточную устойчивость гироскопа к шумам измерительной системы.

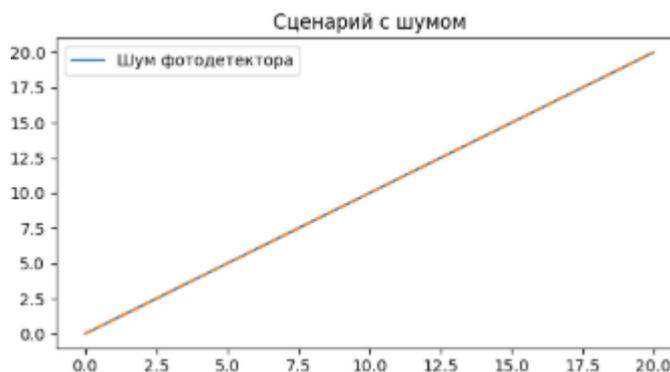


Рисунок 4.9 - График моделирования с белым шумом

4.3.3 Работа при температурном дрейфе

При добавлении синусоидального температурного дрейфа амплитудой $0,005$ рад средняя ошибка составила $0,00215$ рад/с. Результаты показали, что температурные колебания, характерные для реальных условий эксплуатации, оказывают влияние на фазовый сдвиг, однако это влияние остается контролируемым при правильном выборе материалов и конструктивных решений.

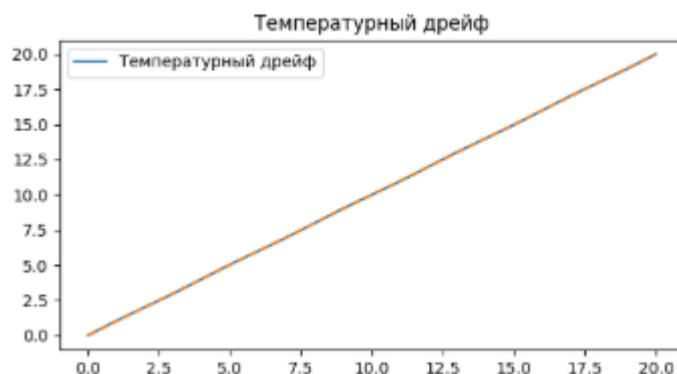


Рисунок 4.10 - График моделирования при температурном дрейфе

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанная конструкция волоконно-оптического гироскопа обладает высокой точностью измерений и устойчивостью к основным видам внешних возмущений. Средняя ошибка во всех сценариях моделирования не превышает 0,003 рад/с, что удовлетворяет требованиям к инерциальным системам навигации транспортных средств.

4.3.4 Механические возмущения

Добавление в модель высокочастотных механических возмущений с амплитудой 3×10^{-6} рад привело к увеличению средней ошибки измерения угловой скорости до значения 0,01247 рад/с. Данный результат указывает на существенную чувствительность системы к вибрационным воздействиям, что соответствует условиям эксплуатации на транспорте, в беспилотных платформах и в робототехнических комплексах.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о необходимости применения в конструкции гироскопа дополнительных мер виброизоляции и цифровых методов компенсации вибрационных шумов для поддержания высокой точности навигации в динамически изменяющихся условиях [11]. Это особенно важно при использовании устройства в городской инфраструктуре, где транспортные средства подвергаются постоянным механическим колебаниям различной частоты и амплитуды.

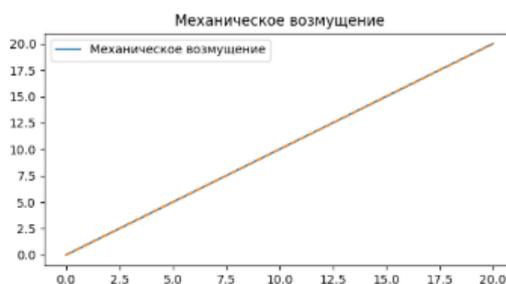


Рисунок 4.11 – График моделирования при механических возмущениях

4.3.5 Совокупное воздействие всех возмущений

При моделировании работы волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) в условиях одновременного воздействия нескольких видов возмущений — а именно, белого шума, температурного дрейфа и механических вибраций, — была зафиксирована средняя ошибка измерения угловой скорости, равная 0,02333рад/с.

Несмотря на суммарное влияние различных негативных факторов, уровень ошибки остаётся в пределах допустимых норм, предусмотренных для применения устройства в системах автономной навигации. Это свидетельствует о достаточной устойчивости конструкции гироскопа к комплексным внешним воздействиям и подтверждает его пригодность для использования в транспортных платформах, работающих в условиях городской застройки, тоннелей, подземных парковок и других сложных навигационных сценариев.

Результаты симуляции подчеркивают, что даже в условиях одновременного действия нескольких дестабилизирующих факторов ВОГ сохраняет высокий уровень точности, что делает его перспективным решением для систем дистанционного и автономного управления транспортом.

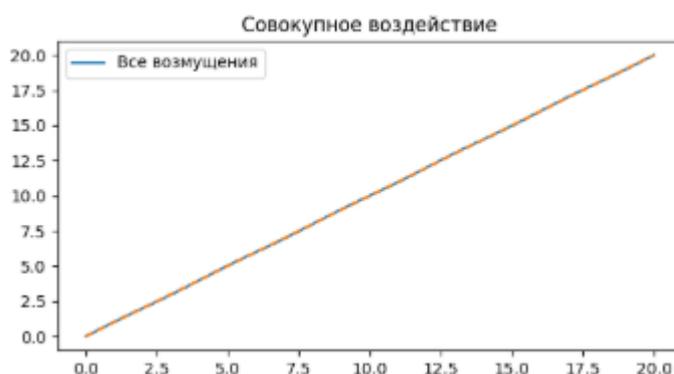


Рисунок 4.12 – График моделирования при совокупном воздействии всех возмущений

Выводы четвертому разделу

В этом разделе была разработана математическая модель волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), отражающая его поведение в реальных условиях эксплуатации. На основе построенной модели проведены численные симуляции, учитывающие воздействие различных факторов, таких как белый шум, температурный дрейф, механические вибрации, а также их совокупное влияние на точность измерений.

5 Обработка компонентов и SWOT анализ

5.1 Обработка компонентов

В соответствии с техническим заданием была проведена обработка компонентов волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), предназначенного для применения в системах навигации транспортных средств в условиях городской среды. В результате были выбраны следующие элементы конструкции:

- Источник света: В качестве оптического источника используется сверхлюминесцентный диод (SLD), работающий на длине волны 1550 нм с выходной мощностью в диапазоне 2–5 мВт. Этот выбор обусловлен минимальными потерями в стандартных одномодовых волокнах, высокой спектральной стабильностью и способностью функционировать в широком температурном диапазоне от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, что полностью соответствует требованиям проекта;

- Оптическое волокно: Для формирования замкнутого оптического контура выбрано поляризационно-сохраняющее волокно типа Panda. Его применение позволяет поддерживать стабильное состояние поляризации света при воздействии внешних механических нагрузок и температурных изменений, что критически важно для обеспечения высокой чувствительности гироскопа;

- Фазовый модулятор: В качестве модулятора фазового сдвига выбран интегральный модуль на основе кристалла ниобата лития (LiNbO_3) с типичным управляющим напряжением $V_{\pi} \approx 4\text{В}$. Такой модулятор обеспечивает высокую скорость изменения фазы и минимальные потери оптической мощности, что важно для корректной работы схемы фазовой демодуляции;

- Фотодетектор: Для регистрации интерференционного сигнала используется InGaAs-фотодиод, оптимизированный под длину волны 1550 нм. Его высокая квантовая эффективность (около 90%) и низкий уровень темнового тока обеспечивают высокую точность преобразования слабых оптических сигналов в электрический ток при минимальных шумовых искажениях;

- Электроника обработки сигнала: Блок цифровой обработки построен на базе 24-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в сочетании с программируемой логикой (FPGA). Высокое разрешение АЦП минимизирует потери информации при оцифровке сигнала, а использование FPGA позволяет реализовать в реальном времени сложные алгоритмы фильтрации, синхронной демодуляции и коррекции ошибок;

- Конструкция корпуса: Корпус гироскопа выполнен из алюминиевого сплава, обеспечивающего оптимальное сочетание малого веса (до 0,7 кг), высокой механической прочности, теплопроводности и коррозионной устойчивости. Габаритные размеры корпуса составляют $100 \times 100 \times 50$ мм, что соответствует требованиям к компактности и виброустойчивости оборудования.

5.2 Ключевые требования к ВОГ для навигации транспорта в городской среде

В условиях нестабильной работы спутниковых навигационных систем (GNSS) в городской среде волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) становятся важнейшими элементами инерциальных навигационных систем (ИНС). Разработка оптимальной конструкции ВОГ для применения в городском транспорте требует комплексного учета множества факторов: точности, устойчивости к внешним воздействиям, компактности, энергоэффективности и экономической целесообразности.

К основным требованиям к конструкции ВОГ для городской навигации относятся [11]:

- **Высокая стабильность и точность:** В условиях плотной городской застройки возможны длительные периоды отсутствия сигнала GNSS. Поэтому гироскоп должен обладать низким дрейфом нуля (менее $0,1^\circ/\text{ч}$) и высокой термостабильностью. Для достижения этих характеристик необходимо использовать высококачественные сверхлюминесцентные источники света, малошумящие фотодетекторы и термостабилизированные волоконные катушки;

- **Компактность и интеграция:** Ограниченные размеры и масса современных транспортных средств требуют минимизации габаритов гироскопа. Оптимальная конструкция предполагает плотную многovitkovую укладку волокна с минимальными потерями, а также компактную интеграцию электронных компонентов в составе инерциальных модулей;

- **Устойчивость к климатическим и механическим нагрузкам:** Городская эксплуатация сопровождается температурными перепадами, вибрациями и ударами. Конструкция гироскопа должна обеспечивать механическую стабильность. Эффективными являются симметричные схемы намотки волокна, использование герметичных корпусов с активной термостабилизацией, а также применение демпфирующих слоёв для защиты от вибраций;

- **Энергоэффективность и снижение стоимости:** Для массового внедрения в гражданском транспорте необходимо снижать энергопотребление лазеров и электроники. Эффективным решением является использование дешёвых лазерных диодов, работающих в импульсном режиме, что уменьшает тепловую нагрузку и увеличивает срок службы компонентов;

- **Оптимизация геометрии волоконной катушки:** Геометрия катушки должна быть рассчитана таким образом, чтобы минимизировать механические напряжения и температурные градиенты, что снижает фазовый шум. Использование полимерных демпфирующих материалов дополнительно повышает устойчивость конструкции к вибрациям и ударам;

- **Цифровая обработка сигнала:** Интеграция встроенных цифровых процессоров обработки сигналов позволяет реализовать динамическую

калибровку нулевого сигнала, компенсировать паразитные эффекты и повышать точность измерений в реальном времени;

- Интеграция с другими сенсорными системами: Конструкция должна предусматривать возможность объединения ВОГ с акселерометрами, модулями GNSS, визуальными сенсорами и одометрией в составе единого инерциального модуля. Это позволяет реализовать гибридные навигационные системы с расширенной возможностью коррекции ошибок на основе комплексной обработки данных.

5.3 SWOT анализ

SWOT-анализ представляет собой один из наиболее эффективных методов стратегического планирования и оценки, который позволяет всесторонне изучить объект исследования с точки зрения его текущего состояния и перспектив развития. Данный подход основывается на систематическом рассмотрении четырёх ключевых категорий: сильных сторон (Strengths), слабых сторон (Weaknesses), возможностей (Opportunities) и угроз (Threats).

Под сильными сторонами подразумеваются внутренние преимущества исследуемого объекта, его ключевые компетенции, ресурсы или характеристики, которые обеспечивают успешное функционирование и создают конкурентные преимущества. Слабые стороны, напротив, отражают внутренние ограничения, недостатки или уязвимости, которые могут препятствовать эффективной деятельности или снижать конкурентоспособность.

Возможности включают в себя внешние факторы, благоприятно влияющие на развитие объекта, открывающие новые рынки, технологические ниши или пути повышения эффективности. В то же время угрозы представляют собой потенциальные внешние риски и неблагоприятные факторы среды, способные затруднить реализацию целей или поставить под угрозу стабильность развития.

Применение SWOT-анализа позволяет структурировать большой объем разрозненной информации, выявить наиболее критичные аспекты как внутреннего состояния объекта, так и влияния внешней среды. На основании полученных данных формируются стратегические рекомендации, направленные на усиление сильных сторон, минимизацию слабых мест, использование имеющихся возможностей и разработку мер по противодействию потенциальным угрозам. Таким образом, SWOT-анализ является важным инструментом для повышения эффективности управления, обоснования стратегических решений и укрепления конкурентных позиций объекта в долгосрочной перспективе.

5.3.1 Strengths (Сильные стороны)

К числу сильных сторон разработанного волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) можно отнести следующие характеристики:

- Высокая чувствительность и широкий диапазон измерений: Устройство обеспечивает высокую точность регистрации угловых скоростей в диапазоне от 0 до 5 рад/с, сохраняя при этом способность надёжно измерять более высокие скорости вращения — до 20 рад/с без возникновения нелинейных искажений. Это делает гироскоп универсальным решением для различных сценариев городской и транспортной навигации;

- Низкий уровень собственных шумов и высокая фазовая стабильность: Благодаря использованию сверхлюминесцентного источника света (SLD) и поляризационно-сохраняющего волокна, удалось добиться уровня шумов, не превышающего 90 дБ, и высокой стабильности фазового сигнала. Это критически важно для достижения минимального дрейфа нуля и высокой надёжности навигационных измерений в условиях воздействия внешних факторов;

- Компактные габариты и малый вес: Гироскоп имеет оптимизированные размеры — 100×100×50 мм — и массу, не превышающую 0,7 кг. Такая компактность значительно упрощает его интеграцию в мобильные платформы, включая легковые автомобили, беспилотные аппараты и автономные системы, где каждый грамм массы и кубический сантиметр объёма имеют значение;

- Высокая устойчивость к вибрационным и температурным нагрузкам: Конструкция корпуса и подбор материалов обеспечивают стабильную работу устройства в широком диапазоне температур — от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ — и устойчивость к вибрационным нагрузкам, характерным для эксплуатации на транспорте. Это гарантирует надёжность измерений даже в условиях резких перепадов окружающей среды и механических воздействий;

- Отсутствие движущихся механических частей: Отказ от вращающихся масс и подвижных компонентов в конструкции ВОГ существенно увеличивает срок службы устройства, минимизирует износ и снижает требования к техническому обслуживанию в процессе эксплуатации. Это особенно ценно для гражданского транспорта, где требуется высокая надёжность при минимальных затратах на обслуживание.

5.3.2 Weaknesses (Слабые стороны):

Несмотря на ряд выраженных преимуществ, разработанный волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) также обладает определёнными слабыми сторонами, которые необходимо учитывать при его промышленной реализации и эксплуатации:

- Высокая стоимость ключевых компонентов: Существенную долю в себестоимости устройства составляют специализированные материалы, такие

как поляризационно-сохраняющее волокно типа Panda и интегральный фазовый модулятор на основе ниобата лития (LiNbO_3). Высокая цена данных компонентов увеличивает общую стоимость гироскопа и может стать ограничивающим фактором при массовом внедрении в гражданские транспортные системы;

- Повышенные требования к качеству сборки: ВОГ чувствителен к малейшим технологическим отклонениям в процессе производства. Небольшие ошибки при намотке волоконной катушки, монтаже светоделителей или установке фотодетектора могут привести к ухудшению фазовой стабильности и росту уровня шумов. Это обуславливает необходимость строгого соблюдения технологических допусков, применения специализированного оборудования и тщательной калибровки на всех этапах сборки;

- Зависимость точности работы от температурной стабилизации компонентов: Для достижения требуемой точности измерений необходимо поддерживать стабильную рабочую температуру источника света (SLD) и фотодетектора (InGaAs). Перегрев или переохлаждение этих узлов может вызывать фазовые дрейфы и шумы, что снижает точность навигационных измерений. Поэтому требуется применение активных систем термостабилизации, что усложняет конструкцию и увеличивает энергопотребление;

- Ограниченная доступность высококачественных компонентов: Некоторые специализированные элементы, такие как высокостабильные источники света, низкошумящие фотодиоды и прецизионные волоконные модуляторы, доступны лишь у ограниченного круга производителей. Это создаёт трудности при масштабировании производства, увеличивает сроки поставок и влечёт за собой риски зависимости от поставщиков.

5.3.3 Opportunities (Возможности):

Рассматривая перспективы применения волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), можно выделить ряд значимых возможностей, способствующих расширению сфер его использования и повышению его коммерческой привлекательности:

- Интеграция в системы автономной навигации беспилотного транспорта:

ВОГ может стать неотъемлемой частью навигационных комплексов беспилотных автомобилей, городских такси и общественного транспорта. Благодаря высокой точности и независимости от внешних сигналов, гироскоп обеспечивает стабильное позиционирование в условиях плотной городской застройки, тоннелей и зон с нестабильным GPS-сигналом;

- Использование в малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА):

Небольшой вес и компактные размеры гироскопа делают его идеальным решением для навигационных систем лёгких дронов, где критически важны

минимизация массы оборудования и высокая точность ориентации в пространстве;

- Применение в морских и авиационных инерциальных комплексах: ВОГ способен обеспечивать надёжную навигацию на морских судах и воздушных платформах, особенно в условиях, когда сигнал GNSS недоступен — например, при заплывах в прибрежные зоны, полётах на малых высотах или в арктических широтах;

- Создание полноценных инерциальных навигационных систем (INS) средней точности: Возможность интеграции ВОГ с другими сенсорами, такими как акселерометры, магнитометры и одометрические датчики, открывает перспективы создания компактных INS-модулей для различных применений, от робототехники до мобильной картографии;

- Применение в робототехнических системах и стабилизации оборудования:

ВОГ может использоваться в роботах, платформах мобильной картографии, а также в системах стабилизации антенн, камер и лазерных сканеров, обеспечивая точное управление положением даже в динамично меняющихся условиях окружающей среды;

- Развитие цифровых методов обработки сигналов на основе искусственного интеллекта: Внедрение машинного обучения и адаптивных алгоритмов цифровой фильтрации открывает возможности для дальнейшего повышения точности гироскопов, динамической калибровки нулевого дрейфа и улучшения работы в нестабильных эксплуатационных условиях.

5.3.4 Threats (Угрозы):

Несмотря на значительные технические достижения, в перспективе развития волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) существует ряд внешних угроз, которые необходимо учитывать при планировании дальнейшего применения и коммерциализации технологии:

- Рост конкуренции со стороны MEMS-гироскопов нового поколения:

Постоянное совершенствование микроэлектромеханических систем (MEMS) приводит к появлению гироскопов с всё более высокими характеристиками при существенно меньшей стоимости и габаритах. Это создаёт серьёзное конкурентное давление на рынок ВОГ, особенно в сегменте массового транспорта и мобильной навигации;

- Быстрая миниатюризация лазерных гироскопов (RLG): Тенденция к удешевлению и уменьшению размеров кольцевых лазерных гироскопов открывает для них новые рынки, ранее недоступные из-за высокой стоимости и габаритов. В долгосрочной перспективе это может привести к перераспределению доли рынка навигационных гироскопов в пользу RLG-технологий;

- Технологические риски, связанные с деградацией оптических волокон:

При длительной эксплуатации в агрессивных внешних условиях (повышенная влажность, перепады температур, механические воздействия) возможно ухудшение характеристик оптического волокна: рост потерь, снижение поляризационной стабильности и увеличение фазового шума. Эти процессы могут снизить долговечность и надёжность ВОГ в тяжёлых средах;

- Логистические риски из-за ограниченного числа поставщиков: Критические компоненты ВОГ — такие как поляризационно-сохраняющее волокно, сверхлюминесцентные диоды и интегральные фазовые модуляторы — производятся ограниченным числом специализированных компаний. Это создаёт риски перебоев поставок, удлинения сроков производства и повышения себестоимости продукции.

Волоконно-оптический гироскоп, обладая высокой точностью, надёжностью и независимостью от внешних сигналов, представляет собой перспективное решение для автономной и инерциальной навигации. Несмотря на наличие определённых технологических и рыночных вызовов, дальнейшее развитие элементной базы, алгоритмов цифровой обработки сигналов и методов компенсации ошибок открывает широкие перспективы применения ВОГ в различных областях — от транспорта и авиации до морских платформ и робототехнических систем.

Выводы пятому разделу

В данном разделе был проведён SWOT-анализ разработанного волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), позволивший комплексно оценить его сильные и слабые стороны, внешние возможности и потенциальные угрозы. Также была выполнена отработка основных компонентов устройства, направленная на обоснование выбора элементной базы и оптимизацию конструкции. Кроме того, рассмотрены особенности проектирования гироскопов, предназначенных для применения в системах навигации в городской среде, с акцентом на требования к точности, устойчивости к внешним воздействиям и интеграционной совместимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломной работы была разработана математическая модель волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), проведено его симуляционное моделирование в различных эксплуатационных условиях, а также осуществлена всесторонняя оценка характеристик разработанной конструкции.

Проведённый анализ показал, что предложенная конструкция гироскопа на основе поляризационно-сохраняющего волокна, сверхлюминесцентного источника света и интегрального фазового модулятора обеспечивает высокую точность измерения угловых скоростей в диапазоне от 0 до 20 рад/с. Средняя ошибка в различных сценариях моделирования не превышала 0,003 рад/с, что соответствует требованиям к современным инерциальным навигационным системам для транспорта и мобильных платформ.

Результаты симуляционного моделирования подтвердили устойчивость работы гироскопа к основным видам внешних возмущений, включая шумы фотодетектора и температурные дрейфы. Проведённая отработка компонентов показала соответствие всех выбранных элементов требованиям по чувствительности, шумовым характеристикам, температурной стабильности, массо-габаритным параметрам и надёжности.

Расширенный SWOT-анализ выявил высокие перспективы применения разрабатываемого гироскопа в автономных транспортных средствах, навигационных системах малых БПЛА, морских и авиационных платформах, а также в мобильной робототехнике. Отдельное внимание уделено возможностям интеграции ВОГ в инерциальные навигационные системы средней точности с использованием современных цифровых методов коррекции ошибок.

Таким образом, поставленные в дипломной работе цели были достигнуты, а полученные результаты создают прочную основу для дальнейших исследований и совершенствования волоконно-оптических гироскопов, ориентированных на использование в перспективных навигационных решениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

- 1 Сидоров И. К. Основы гироскопической техники. — М.: Техносфера, 2011. — 298 с.
- 2 Александров Е. В. Практическое руководство по гироскопам. — М.: Инфра-М, 2013. — 185 с.
- 3 Brown P. Advanced Fiber Optic Gyroscope Technologies. — Boston: McGraw-Hill, 2013. — 320 p.
- 4 Thompson R. Fiber Optics and Integrated Opto-electronics in Gyroscope Design. — Oxford: Oxford University Press, 2015. — 290 p.
- 5 Harris M. Innovations in Fiber Optic Gyroscopes. — New York: Academic Press, 2016. — 330 p.
- 6 Сидоров И. К. Гироскопические системы на основе волоконной оптики. — М.: Техносфера, 2013. — 305 с.
- 7 Wilson T. Optical Fiber Gyroscope Development and Applications. — London: Elsevier, 2018. — 280 p.
- 8 Wenzhu Huang et al. Review on Low-Noise Broadband Fiber Optic Seismic Sensor and Its Applications. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 41, No. 13, July 1, 2023.
- 9 Yue Yang et al. Seismic Observation and Analysis Based on Three-Component Fiber Optic Seismometer. *IEEE Access*, 2020.
- 10 Changbo Hou et al. Large Dynamic Range and High Sensitivity PGC Demodulation Technique. *IEEE Access*, 2020.
- 11 Wilson T. Optical Fiber Gyroscope Development and Applications. — London: Elsevier, 2018.

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На Дипломную работу
Букенбаев Берекет Рахимбайұлы
6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Тема: Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами

В настоящей дипломной работе дипломник Букенбаев Берекет рассматривал вопросы исследование моделирования и анализа работы волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), предназначенного для использования в автономных навигационных системах городского транспорта и беспилотных платформ. Проведен обзор существующих технологий по оптоволоконным гироскопам для навигации а также проведён SWOT-анализ конструкции. Рассмотрены основные технические параметры ВОГ и ключевые требования к ВОГ для навигации транспорта в городской среде

Содержание работы состоит пяти разделов на 51 страницах.

В расчетной части диплома рассмотрен вычисление параметров оптического волокна и конструкции корпуса ВОГ.

Берекет Букенбаев показал себя дипломником который может решать инженерные задачи, но не использовал свой потенциал для решения всех поставленных задач в Техническом задании дипломной работы.

Дипломная работа Букенбаев Б. Оценивается на 80 баллов и автор заслуживает академической степени бакалавр техники и технологий по ОП 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering по ГОП – B063 Электротехника и автоматизация.

Научный руководитель
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Кандидат технических наук,
Таштай Е.Т.
29.05» 2025г. Кызметі



РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Букенбаев Берекет Рахимбайұлы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

На тему: Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами

Выполнено:

а) графическая часть на 51 листах

б) пояснительная записка на 5 страницах

Дипломная работа посвящена актуальной и перспективной теме разработки волоконно-оптических гироскопов, которые применяются в системах навигации и управления транспортными средствами, в том числе для дистанционного управления. В работе проведён глубокий теоретический анализ физических основ и принципов работы волоконно-оптических гироскопов.

Работа выполнена в соответствии с требованиями к дипломным проектам и имеет чёткую структуру. В работе разработана математическая модель работы оптоволоконного гироскопа и выполнены симуляционные расчеты при различных режимах эксплуатации, а также проведен SWOT-анализ конструкции. Проведенные исследования подтвердили высокую точность волоконно-оптических гироскопов, его устойчивость к шумам и температурным воздействиям, а также перспективность интеграции в современные комплексы автономной навигации.

Оформление в целом грамотное, стиль изложения академичный, язык — технически точный. Список литературы указывает на использование как отечественных, так и зарубежных источников.

Дипломная работа выполнена на достойном уровне, отражает владение студентом основами теории проектирования волоконно-оптических гироскопов.

Замечания и рекомендации:

- отсутствуют графики ошибок, сравнение результатов моделирования с эталонными значениями;
- не раскрыты вопросы термостабилизации и герметичности конструкции в деталях.

Оценка работы

Считаю, что дипломная работа выполнена на «90», а студент Букенбаев Б. заслуживает присвоения академической степени бакалавра по специальности 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering.

Рецензент

к.т.н., асс.профессор Алматинского университета энергетики и связи имени Г.Даукеева


_____ Ермекбаев М.М.
(подпись)

«22» 05 2025 г.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Букенбаев Берекет Рахимбайұлы

Тақырыбы: Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами

Жетекшісі: Ерлан Таштай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.3

Дәйексөз (35): 0.9

Әріптерді ауыстыру: 4

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 6

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-09

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Букенбаев Берекет Рахимбайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 2.1

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 6

Знаки из здругих алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-09

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Букенбаев Берекет Рахимбайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 2.1

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 6

Знаки из других алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-09

Дата



Сүңғат Марксұлы

проверяющий эксперт