

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

На правах рукописи



**АГЛИУЛЛИН ТИМУР АРТУРОВИЧ**

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ ПОДШИПНИКОВ ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ  
БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР**

Специальность 05.11.07 –  
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Сахабутдинов Айрат Жавдатович

Казань – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ.....	19
1.1 Современное состояние систем контроля параметров ступичных подшипников.....	22
1.2 Анализ применения волоконно-оптических датчиков для измерения параметров колесных подшипников. Технические требования к датчикам температуры и деформации.....	26
1.2.1 Технические требования к конструкции, размещению, скорости измерений для тензометрической системы ступичных подшипников.....	26
1.2.2 Принцип работы волоконно-оптических датчиков деформации и температуры.....	30
1.2.3 Точечные и квазираспределенные датчики деформации и температуры.....	31
1.2.4 Принцип измерительного преобразования.....	32
1.2.5 Методы мультиплексирования.....	38
1.2.6 Методы зондирования.....	40
1.3 Предпосылки к использованию радиофотонных адресных методов измерения.....	44
1.4 Волоконные брэгговские структуры как чувствительные элементы адресных радиофотонных систем тензометрии колесных подшипников.....	46
1.5 Выводы по главе.....	49
ГЛАВА 2 МАЛОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ.....	50
2.1 Постановка задачи одновременного измерения температуры и деформации.....	51

2.2	Оптико-электронные схемы и метод измерительного преобразования.....	53
2.2.1	Вариант 1: Центральные частоты АВБС разнесены друг относительно друга.....	55
2.2.2	Вариант 2: Центральные частоты АВБС совпадают .....	58
2.2.3	Преимущества оптико-электронных схем .....	60
2.3	Математическое моделирование оптико-электронных схем малосенсорных измерительных систем.....	61
2.3.1	Модель адресной волоконной брэгговской структуры .....	61
2.3.2	Определение положения адресных брэгговских структур относительно оптического фильтра.....	63
2.3.3	Математическое моделирование малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС.....	66
2.3.4	Математическое моделирование малосенсорной системы с совпадающими центральными частотами АВБС.....	70
2.3.5	Математическая модель неустойчивости положения фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой .....	75
2.4	Компьютерное имитационное моделирование оптико-электронных схем .....	76
2.4.1	Моделирование малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС .....	76
2.4.2	Моделирование малосенсорной системы с совпадающими центральными частотами АВБС .....	80
2.5	Выводы по главе .....	84
<b>ГЛАВА 3 МНОГОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ.....</b>		<b>86</b>
3.1	Постановка задачи многосенсорного контроля деформации подшипников .....	87
3.2	Оптико-электронная схема многосенсорной системы.....	89

3.3 Математическое моделирование измерительного преобразования в случае многосенсорной системы.....	91
3.4 Имитационное моделирование многосенсорной системы.....	96
3.5 Возможность применения многоадресных структур в системах контроля.....	101
3.6 Выводы по главе.....	103
<b>ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ.....</b>	<b>105</b>
4.1 Рекомендации по интегрированию волоконно-оптических датчиков в ступичные подшипники.....	106
4.2 Практические рекомендации по формированию волоконно- оптических компонентов измерительной системы.....	110
4.2.1 Влияние параметров адресной волоконной брэгговской структуры на форму ее спектрального отклика.....	110
4.2.2 Методы записи адресных волоконных брэгговских структур.....	119
4.2.3 Формирование оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой.....	122
4.3 Компенсация температурного дрейфа оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой.....	126
4.3.1 Температурная стабилизация оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой.....	126
4.3.2 Использование дополнительного измерительного канала для учета температурного дрейфа оптического фильтра.....	127
4.4 Калибровка датчиков деформации с учетом показаний датчика температуры.....	128
4.5 Требования к фотоприемнику, частотным фильтрам, источнику. Оценка погрешностей измерений.....	132
4.6 Экспериментальное исследование системы контроля деформации подшипника на основе адресных волоконных брэгговских структур.....	134

4.6.1 Структурная схема системы контроля в сенсорной системе транспортного средства .....	134
4.6.2 Экспериментальная установка .....	135
4.6.3 Результаты эксперимента. Обработка измерительной информации. Оценка погрешности. ....	139
4.7 Выводы по главе .....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	161

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Интенсивное развитие систем активной безопасности и систем управления транспортными средствами требует применения сенсорных систем новых типов, с целью получения более полной информации о динамическом состоянии транспортного средства, в частности, для определения характеристик сцепления колес с дорожным полотном. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является создание систем контроля нагрузок, действующих на колесо транспортного средства, на основе измерения упругой деформации внешнего кольца ступичного подшипника. Анализ исследований показал, что измерения деформации в тангенциальном направлении более информативны, поскольку чувствительность тангенциальной деформации к нагрузке больше, чем осевой или радиальной, и позволяют восстановить полную картину нагрузки на подшипник.

Исследованиям в области тензометрии ступичных подшипников колес транспортных средств посвящены труды зарубежных ученых: Kerst S., Shyrokau B., Holweg E., Nishikawa K., Van Leeuwen B.G., Genuchten E., Alvarez, J. и др. Как правило, такие системы строятся на основе тензорезисторов или волоконно-оптических датчиков. Волоконно-оптические датчики имеют ряд преимуществ, таких как их малая масса и габариты, простота мультиплексирования и невосприимчивость к электромагнитным воздействиям. Последнее особенно актуально при контроле деформации подшипников колес транспортных средств, оборудованных встроенным электромотором.

Исследованиям волоконно-оптических измерительных систем, строящихся на оптико-электронных принципах опроса посвящены работы российских ученых С.А. Бабина, А.В. Бурдина, В.А. Бурдина, В.А. Андреева, О.В. Иванова, А.С. Раевского, Т.И. Мурашкиной, В.А. Грачева и др., ведутся исследования в НЦВО РАН, УГАТУ, ПГУТИ, КНИТУ-КАИ, НГУ, УФ ИРЭ РАН, ННГТУ им. Р.Е. Алексеева, ПГУ, КГЭУ и др. Однако волоконно-оптические

системы с оптико-электронными методами опроса имеют недостатки, связанные с их высокой стоимостью и сложностью исполнения. Кроме того, традиционные оптико-электронные методы опроса зачастую не позволяют обеспечить высокую (до десятков килогерц) частоту и разрешающую способность (до десятых долей пикометра) съема показаний. Вследствие этого актуальной является задача улучшения метрологических, массогабаритных и экономических параметров волоконно-оптических систем контроля.

В казанской научной школе, представителями которой являются Морозов О.Г., Ильин Г.И., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И. и др., получили развитие радиотонные подходы к опросу волоконных датчиков. Исторически исследовались принципы двухчастотного и полигармонического опроса датчиков с последующей обработкой сигнала методами радиотоники. В последние годы развитие получили адресные волоконные брэгговские структуры, которые одновременно являются и формирователями радиотонного сигнала, и датчиками измерительной системы. Преимуществом этих методов по сравнению с другими радиотонными методами (Yao J., Li W. и др.), является то, что характеристики колебаний результирующего сигнала, изменяющиеся под действием приложенных физических полей, измеряются на известной частоте.

Использование адресных волоконных структур в системах контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств и подшипников качения иного назначения ранее не предлагалось. Ввиду этого, актуальными являются исследования, направленные на разработку систем контроля параметров ступичных подшипников транспортных средств, использующих с целью улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик адресные волоконные брэгговские структуры в качестве чувствительных элементов для измерения упругой деформации подшипников в мало- и многосенсорных конфигурациях, а также методов радиотонного опроса указанных датчиков, характеризующейся простотой, низкой стоимостью, и позволяющей проводить высокоточные измерения деформации с высокой частотой в

диапазоне рабочих температур, характерных для условий эксплуатации объекта контроля.

**Объект исследования** – волоконно-оптические системы контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств.

**Предмет исследования** – методы и средства создания волоконно-оптических систем контроля тангенциальной деформации ступичных подшипников транспортных средств, использующих волоконно-оптические датчики на основе адресных волоконных брэгговских структур, радиофотонные методы и средства опроса таких датчиков и измерительного преобразования.

**Цель исследования** – улучшение метрологических и технико-экономических характеристик волоконно-оптических систем контроля тангенциальной деформации ступичных подшипников транспортных средств.

**Научная задача исследования** – разработка методов анализа и построения волоконно-оптических систем контроля тангенциальной деформации ступичных подшипников в мало- и многосенсорных конфигурациях, использующих в качестве датчиков адресные волоконно-оптические структуры, позволяющих проводить одновременные измерения деформации и температуры, повысить частоту съема информации, и улучшить технико-экономические характеристики измерительной системы.

Поставленная цель диссертационной работы достигается решением следующих **задач**:

1. Аналитический обзор существующих и перспективных методов и средств контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств, в том числе основанных на применении волоконно-оптических датчиков, с целью выявления путей улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик за счет использования в них адресных волоконных брэгговских структур в качестве датчиков деформации и температуры.

2. Разработка оптико-электронных схем системы контроля деформации и температуры ступичных подшипников транспортных средств в мало- и многосенсорных приложениях; исследование методики однозначного



определения смещения центральных частот датчиков указанного класса и метода измерительного преобразования; исследование оптомеханики волоконных брэгговских решеток с малым коэффициентом связи мод и записанной в них спектрально-адресной информацией внесением в их периодическую структуру дискретных фазовых  $\pi$ -сдвигов, позволяющих формировать адресные и многоадресные волоконные брэгговские структуры и использовать их в качестве датчиков системы контроля тангенциальной деформации и температуры; исследование факторов, влияющих на методические и инструментальные погрешности измерений.

3. Разработка, исследование и верификация математических моделей волоконно-оптических систем контроля тангенциальной деформации и температуры на основе методов численного и имитационного моделирования; выявление основных закономерностей и зависимостей; проведение оценок основных методических и инструментальных погрешностей, включая погрешности изготовления отдельных элементов измерительной системы и погрешности определения амплитуд результирующего сигнала.

4. Создание экспериментальной установки, реализующей предложенный метод контроля тангенциальной деформации подшипников транспортных средств; проведение экспериментальных исследований и построение деформационных характеристик ступичного подшипника по измеряемому параметру смещения центральной частоты адресной волоконной брэгговской структуры; разработка практических рекомендаций по созданию волоконно-оптических тензометрических систем ступичных подшипников транспортных средств и выбору элементной базы.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов** обусловлена использованием методов математической физики, оптомеханики волоконных брэгговских структур с внесенными в их периодическую структуру дискретных фазовых неоднородностей в виде  $\pi$ -сдвигов, математических методов моделирования, методов обработки информации с волоконно-оптических сенсорных систем. Достоверность и обоснованность результатов

определяются использованием известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей, их адекватностью реальным физическим процессам, совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными и результатами исследований других авторов. При решении задач диссертационной работы использовались современные программные средства и специализированные лицензионные пакеты прикладных программ Optiwave OptiSystem 7.0, OptiGrating 4.0, а также PTC Mathcad и MathWorks MATLAB.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

– выявлены резервы улучшения метрологических и технико-экономических характеристик волоконно-оптических тензометрических систем подшипников транспортных средств за счет применения в них адресных волоконных брэгговских структур в качестве датчиков деформации и температуры;

– разработаны оптико-электронные схемы для системы контроля параметров ступичных подшипников, осуществляющие компенсацию температурного дрейфа адресных датчиков и ключевых пассивных оптических элементов, в мало- и многосенсорном приложении;

– получена аналитическая зависимость для определения тангенциальной деформации и температуры подшипника в точке контроля как функции изменения центральной частоты адресного датчика, вычисляемой на основе нормализованного коэффициента модуляции огибающей биений на адресной частоте;

– выявлены закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур в зависимости от длин однородных участков, величин дискретных фазовых сдвигов и наведенного показателя преломления;

– разработано алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, позволяющее однозначно определять смещение центральных частот адресных волоконных брэгговских структур в мало- и многосенсорных приложениях.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке технических решений, схемы и программного обеспечения экспериментального

стенда, реализующих предлагаемую тензометрическую систему подшипников транспортных средств и позволяющих проводить измерение с большей частотой съема информации, дополнительно осуществлять контроль температуры, а также упростить оптико-электронную схему опроса и ее реализацию; в оценках метрологических параметров и разработке практических рекомендаций.

**Реализация и внедрение результатов работы** представлены в рамках выполнения работ по государственному заданию Минобрнауки России КНИТУ-КАИ на проведение научных исследований в 2020-2022 годах (программа «Фократ», соглашение № 075-03-2020-051, fzs-2020-0020) в части разработки математических моделей систем контроля деформации материалов на основе адресных волоконных брэгговских структур и инициативных исследовательских работ с ООО НПК «ЭСТЭН» в части разработки приборов контроля деформации и температуры для эндохирургического применения, что подтверждено соответствующим актом внедрения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной молодежной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)», проведенной в 2019 г. (г. Казань), Международной научно-технической конференции «Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ», проведенной в 2019 г. (г. Казань), научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследований к внедрению - 2019» (г. Нижний Новгород), конференциях «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» КНИТУ-КАИ, проведенных в 2019 и 2020 гг. (г. Казань).

**Публикации.** Опубликовано 32 научные работы, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК по специальности 05.11.07, 16 статей в журналах, включенных в базы данных Scopus/WoS, 3 статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК по смежным специальностям, 7 работ в материалах докладов международных и Всероссийских конференций, подана 1 заявка на патент.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 97 наименований, и приложения. Работа без приложения изложена на 160 страницах машинописного текста, включая 68 рисунков, 6 таблиц и 89 формул.

**Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» по пункту 2: Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач» в части «исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических, экологических и биологических задач» (разработана система контроля тангенциальной деформации подшипников транспортных средств с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками за счет применения в ней датчиков на основе адресных волоконных брэгговских структур и радиофотонных принципов опроса, позволяющая увеличить частоту опроса и упростить оптико-электронную схему по сравнению с традиционными системами контроля и датчиками на волоконных брэгговских решетках).**

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– методы и средства улучшения метрологических и технико-экономических параметров систем контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств, полученные в результате анализа существующего состояния методов и средств контроля указанного класса, за счет применения в них адресных волоконных брэгговских структур в качестве чувствительных элементов с радиофотонным методом их опроса;

– оптико-электронные схемы опроса адресных волоконных брэгговских структур, включающие в себя средства компенсации температурного дрейфа входящего в их состав оптического фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой и позволяющие осуществлять контроль тангенциальной деформации и температуры подшипников;

– методика компенсации влияния внешнего температурного поля на показания датчиков деформации за счет включения в измерительную систему адресного волоконного брэгговского датчика температуры и способа их совместной калибровки;

– результаты компьютерного имитационного моделирования мало- и многосенсорной системы, подтверждающие возможность однозначного определения смещения центральных частот всех датчиков путем решения системы нелинейных уравнений, полученной в результате фильтрации информационного сигнала на адресных частотах, и определения нормализованного коэффициента модуляции для каждого датчика в отдельности;

– основные закономерности формирования адресных волоконных брэгговских структур с заданной формой спектрального отклика, которые могут быть использованы в качестве датчиков измерительных систем;

– практические рекомендации по разработке опико-электронных схем, основных ее элементов и выбору элементной базы;

– результаты экспериментального исследования;

– оценка основных составляющих погрешности измерений.

**Личный вклад автора** заключается в: научно-техническом обосновании разработки волоконно-оптических систем контроля тангенциальной деформации ступичных подшипников транспортных средств на основе применения в них адресных волоконных брэгговских структур с радиофотонным принципом опроса; разработке и верификации математических моделей; исследовании основных составляющих погрешностей измерений; проведении численных и натурных экспериментов; формировании практических рекомендаций; определении дальнейших направлений исследований по данной тематике; апробации, публикации и внедрении результатов исследований.

#### **Основное содержание работы.**

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, определены ее актуальность, цель, поставлены задачи исследований, определена научная новизна и практическая значимость, изложены методы

исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, приведены апробация и публикации, основные защищаемые положения, дана структура и краткое содержание диссертации.

**В первой главе** проведен аналитический обзор существующих решений по контролю деформации ступичных подшипников транспортных средств, определены направления развития. Сформулированы предпосылки к необходимости проведения исследований, посвященных разработке адресных радиофотонных измерительных систем для контроля упругой деформации подшипников в мало- и многосенсорных конфигурациях, обладающих упрощенным конструктивным исполнением и улучшенными метрологическими и технико-экономическими показателями.

В первом разделе главы рассмотрены общие вопросы построения систем измерения деформации ступичных подшипников, и методах использования получаемых метрических данных в системах управления динамикой транспортных средств.

Во втором разделе главы сформулированы технические требования к датчикам деформации и измерительным системам на их основе в применении к тензометрии ступичных подшипников. Рассматриваются принципы работы и мультиплексирования волоконно-оптических датчиков (на базе волоконной брэгговской решетки) и систем их опроса. Приведен метод измерительного преобразования, включающий преобразование сдвига центральной длины волны датчика в деформацию и последующим вычислением нагрузки на подшипник, ее вызывающей.

В третьем разделе главы приведены предпосылки к использованию адресных волоконных брэгговских структур в качестве датчиков деформации, позволяющих обеспечить прямой адресный съём информации с датчиков, сохранив при этом все преимущества радиофотонного метода их опроса.

В четвертом разделе главы предложена концепция и приведена математическая модель спектрального отклика адресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами, которые могут быть

использованы в качестве чувствительных элементов волоконно-оптической системы контроля деформации подшипников транспортных средств.

В заключительном разделе главы представлены выводы по главе. На основе исследований, проведенных в первой главе, были сформулированы объект, предмет и цель работы, поставлена научная задача и определены задачи исследований, которые приведены во введении работы.

**Во второй главе** представлены результаты исследования оптомеханических свойств волоконных брэгговских решеток, содержащих дискретные фазовые  $\pi$ -сдвиги и реализующих радиифотонный адресный метод опроса. Разработаны оптико-электронных схемы малосенсорных систем контроля ступичных подшипников транспортных средств. Проведено исследование прохождения широкополосного оптического излучения через адресные волоконные брэгговские структуры в малосенсорном приложении. Приведен метод радиифотонного измерительного преобразования, проведено компьютерное моделирование оптико-электронных схем малосенсорных измерительных систем и отдельных их компонентов.

В первом разделе главы дана постановка задачи контроля деформации в единственной точке с температурной компенсацией показаний датчика деформации, решаемой с помощью малосенсорных систем.

Во втором разделе главы представлено два варианта оптико-электронных схем малосенсорных систем: с разнесенными центральными частотами и с совпадающими центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур, описан метод измерительного преобразования. В представленных схемах используется два измерительных канала, что позволяет исключить необходимость температурной стабилизации фильтров с наклонной амплитудно-частотной характеристикой.

В третьем разделе главы представлены результаты численного моделирования измерительного преобразования малосенсорных систем, введено понятие нормализованного коэффициента модуляции, связывающего параметры колебания интенсивности выходного тока фотоприемника со смещением

центральной частоты адресных волоконных брэгговских структур, приведены оценки погрешностей определения центральных частот адресных структур, разработана математическая модель положения фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, которая позволяет оценить влияние дрейфа его частоты на погрешность определения центральной частоты адресной структуры.

В четвертом разделе главы представлены результаты компьютерного имитационного моделирования оптико-электронных схем малосенсорных систем, показана возможность однозначного определения центральных частот адресных волоконных брэгговских структур с помощью разработанного метода измерительного преобразования.

В пятом разделе приведены выводы по главе.

**В третьей главе** решена задача многосенсорного контроля деформации ступичных подшипников, которая включает в себя контроль деформации в шести точках внешнего кольца подшипника с компенсацией температурного воздействия на датчики деформации. Разработана оптико-электронная схема опроса многосенсорной системы, позволяющая в том числе компенсировать температурный дрейф оптического фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Проведено компьютерное моделирование многосенсорной оптико-электронной измерительной схемы. Выявлены закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур в зависимости от длин однородных участков, величины наведенного показателя преломления и величин дискретных фазовых сдвигов.

В первом разделе главы сформулирована постановка задачи многосенсорного контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств, что реализуется посредством шести датчиков деформации и одного датчика температуры, который используется для температурной компенсации показаний датчиков деформации.



Во втором разделе главы представлена оптико-электронная схема многосенсорной системы с близкими центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур.

В третьем разделе главы представлена математическая модель и результаты численного моделирования измерительного преобразования многосенсорной системы на основе адресных волоконных брэгговских структур, выполнена оценка погрешности определения положения центральных частот датчиков.

В четвертом разделе главы приведены результаты компьютерного имитационного моделирования многосенсорной системы, которые подтверждают возможность однозначного определения положений центральных длин волн всех датчиков по нормализованному коэффициенту модуляции.

В пятом разделе главы выявлены закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами, позволяющие формировать адресные и многоадресные структуры. Проведено математическое моделирование многоадресной структур с использованием метода матриц передач, на основе которого исследовано влияние параметров структуры на форму ее спектрального отклика.

Выводы по главе представлены в шестом разделе.

**В четвертой главе** представлены практические рекомендации по разработке систем контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств на основе адресных волоконных брэгговских структур и результаты натурального эксперимента.

В первом разделе главы даны рекомендации по установке волоконно-оптических датчиков деформации и температуры на ступичные подшипники транспортных средств.

Во втором разделе главы представлены практические рекомендации по формированию волоконно-оптических элементов измерительной системы, в том числе адресных волоконных брэгговских структур и оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой.

Третий раздел главы посвящен вопросам компенсации температурного дрейфа оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Представлена математическая модель, на основе которой дана оценка влияния температурного дрейфа оптического наклонного фильтра на погрешность определения центральных частот адресных волоконных брэгговских структур. Предложен подход, позволяющий отказаться от требования температурной стабилизации оптического фильтра, который заключается в том, что в систему опроса вводится дополнительный измерительный канал для учета температурного дрейфа фильтров с линейными наклонными амплитудно-частотными характеристиками.

В четвертом разделе главы приведена методика калибровки датчиков деформации с учетом показаний датчика температуры, что позволяет компенсировать влияние температурного воздействия на показания датчиков деформации.

В пятом разделе главы сформулированы требования к фотоприемнику, частотным фильтрам, источнику широкополосного оптического излучения. Произведена оценка погрешностей измерений.

В шестом разделе главы приведены результаты экспериментального исследования системы контроля деформации подшипника на основе адресных волоконных брэгговских структур, дана оценка метрологических характеристик.

Выводы по главе приведены в седьмом разделе главы.

# **ГЛАВА 1 ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ**

Системы активной безопасности автомобилей, среди которых наиболее распространенными являются антиблокировочная система тормозов (АБС, ABS – от англ. Anti-lock braking system) и система динамической стабилизации (ESC – от англ. Electronic stability control, или ESP – от англ. Electronic stability program), применяются в автомобилестроении более 20 лет. Эффективность таких систем в снижении количества дорожно-транспортных происшествий неоднократно подтверждалась в исследованиях, проводимых по всему миру. Так, в работах [1–5] было доказано, что системы динамической стабилизации способны распознавать критические ситуации и предотвращать потерю управления автомобилем значительно быстрее и эффективнее среднестатистического водителя. Необходимо отметить, что эти системы обладают ограниченной работоспособностью при слабо детерминированных условиях сцепления колес с дорожным полотном. Иными словами, для правильной работы систем активной безопасности необходимо получать информацию о динамическом состоянии автомобиля, свойствах поверхности дорожного полотна и условиях сцепления колес с дорогой.

В современном автомобилестроении свойства сцепления колес с дорогой определяются различными методами косвенной оценки [6, 7, 24], которые основываются на измерении таких параметров, как скорость вращения колес, скорость рыскания, поперечное ускорение и т.д.

Прямые измерения сил, действующих на колесо, позволят применять значительно более надежные и эффективные методы управления динамикой

автомобиля. Особенно актуально это становится при создании беспилотных автомобилей, разработке которых уделяется все больше внимания.

Для нахождения сил, действующих на колеса, теоретически можно использовать любые элементы конструкции автомобиля, обеспечивающие передачу нагрузки от пятна контакта шины к самому автомобилю, такие как: шина [8–12], колесо [13], ступичный подшипник [15–18, 23, 26, 27, 30] и элементы подвески [19, 20]. Вычисление сил, основанное на измерении упругой деформации подшипников, имеет ряд преимуществ по сравнению подходами, использующими другие компоненты автомобиля, что обуславливает пригодность тензометрических систем ступичных подшипников к практическому применению. Первым преимуществом является то, что измерение осуществляется на внешнем кольце подшипника, которое не является вращающимся элементом (по крайней мере в большинстве случаев), что значительно облегчает процесс получения данных. Во-вторых, подшипник, как правило, не требует замены в течение всего срока службы автомобиля. В-третьих, метод измерения сил, действующих в пятне контакта, на основе измерения деформации подшипника, невосприимчив к смене шин и колес. В-четвертых, измерение нагрузки на подшипник позволяет оценить тангенциальную тормозную силу (за счет того, что подшипник устанавливается между местом крепления тормоза и точкой приложения тормозной силы), что важно для управления динамикой автомобиля. Наконец, благодаря малому весу чувствительных элементов неподрессоренные массы увеличиваются незначительно, что практически не влияет на динамику автомобиля.

В качестве чувствительных элементов тензометрических систем подшипников чаще всего используют тензорезистивные или волоконно-оптические датчики (ВОД) [14–17]. Основными преимуществами ВОД по сравнению с тензорезистивными датчиками являются: простота мультиплексирования, компактные размеры, малый вес, высокое отношение сигнал/шум в измерительной системе, возможность одновременного мониторинга деформации и температуры, устойчивость к электромагнитным помехам, высокая

коррозионная стойкость. К недостаткам использования ВОД относится высокая стоимость традиционных устройств опроса таких датчиков (оптико-электронных интеррогаторов), а также низкая устойчивость интеррогаторов к вибрациям. Таким образом, основным препятствием широкому применению ВОД в тензометрических системах подшипников является высокая стоимость и сложность систем опроса таких датчиков.

В первом разделе главы рассмотрены общие вопросы построения систем измерения деформации ступичных подшипников, и методах использования получаемых метрических данных в системах управления динамикой транспортных средств.

Во втором разделе главы сформулированы технические требования к датчикам деформации и измерительным системам на их основе в применении к тензометрии ступичных подшипников. Рассматриваются принципы работы и мультиплексирования волоконно-оптических датчиков (на базе волоконной брэгговской решетки) и систем их опроса. Приведен метод измерительного преобразования, включающий преобразование сдвига центральной длины волны датчика в деформацию и последующим вычислением нагрузки на подшипник, ее вызывающей.

В третьем разделе главы приведены предпосылки к использованию адресных волоконных брэгговских структур в качестве датчиков деформации, позволяющих обеспечить прямой адресный съём информации с датчиков, сохранив при этом все преимущества радиофотонного метода их опроса.

В четвертом разделе главы предложена концепция и приведена математическая модель спектрального отклика адресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами, которые могут быть использованы в качестве чувствительных элементов волоконно-оптической системы контроля деформации подшипников транспортных средств.

В заключительном разделе главы представлены выводы по главе. На основе исследований, проведенных в первой главе, были сформулированы

объект, предмет и цель работы, поставлена научная задача и определены задачи исследований, которые приведены во введении работы.

### **1.1 Современное состояние систем контроля параметров ступичных подшипников**

Системы контроля нагрузок, действующих на подшипник качения, чаще всего строятся либо на основе датчиков деформации тензорезистивного типа, либо на основе волоконно-оптических датчиков [14–19, 21]. Как правило, ступичные подшипники автомобиля являются радиально-упорными подшипниками качения с двумя рядами элементов (шариков). В зависимости от конструкции внешнее кольцо подшипника может быть закреплено неподвижно [15, 26, 30, 33] или может вращаться вместе с колесом. В целях облегчения съема информации датчики могут быть закреплены на неподвижном (внешнем) кольце [26–31]. Как указано в [16], оптимальным угловым положением двух датчиков является половина углового расстояния между двумя соседними телами качения. Схема взаимного положения датчиков и их выходных сигналов, соответствующих значениям деформации, приведена на рисунке 1.1. Как видно из рисунка 1.1, деформация, действующая на одиночный датчик, имеет периодический характер, а ее максимум наблюдается при совпадении центра шарика с центром датчика деформации. Минимум значения регистрируется в момент, когда два соседних тела качения располагаются симметрично по обе стороны относительно датчика. Период изменения сигнала с датчика соответствует угловому расстоянию между соседними телами качения, а постоянный уровень сигнала соответствует приложенной нагрузке на подшипник. Вследствие периодического характера изменения амплитуды деформации становится невозможным определение ее постоянного уровня посредством единственного датчика при неподвижном подшипнике. Использование двух датчиков деформации, расположенных на указанном угловом расстоянии друг от друга, позволяет учесть различие амплитуды деформации в

зависимости от углового положения шариков даже при неподвижном (заблокированном) колесе, что важно для улучшения систем управления динамикой автомобиля [16].

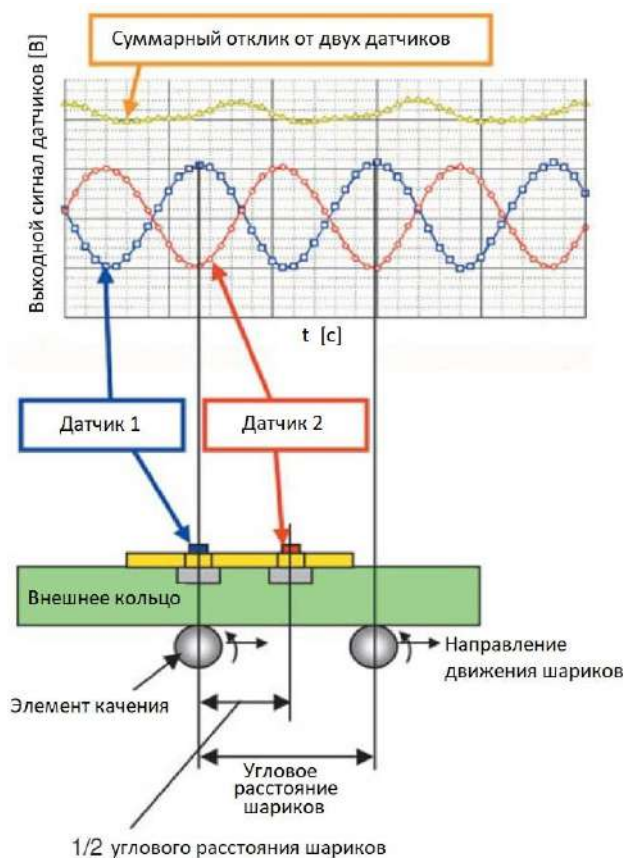


Рисунок 1.1 – Схематичное представление положения датчиков деформации на подшипнике и их сигналы во временной области (кривизна внешнего кольца не показана) [16]

Данные о величине постоянного уровня упругой деформации ступичного подшипника могут быть использованы для вычисления сил, действующих на колесо [15, 16, 18]. Одним из важнейших параметров для эффективной работы систем активной безопасности автомобиля является максимально достижимая продольная сила, действующая на колесо, возникающая при торможении или ускорении [15, 22]. Взаимодействие между колесом и дорожным полотном состоит из трения покоя одних и трения скольжения других элементов, причем соотношение этих составляющих может изменяться в широких пределах. По мере увеличения приложенного к колесу тормозного момента

или крутящего момента от двигателя, увеличивается деформации шины и растет число ее скользящих элементов. Степень скольжения колеса характеризуется коэффициентом скольжения  $k$ , который в случае торможения определяется по выражению (1.1), а в случае ускорения – по выражению (1.2):

$$k = \frac{v_x - \omega_w r_w}{v_x}, \quad (1.1)$$

$$k = \frac{\omega_w r_w - v_x}{\omega_w r_w}, \quad (1.2)$$

где  $v_x$  – продольная скорость автомобиля,  $\omega_w$  – угловая скорость колеса,  $r_w$  – динамический радиус колеса.

На рисунке 1.2 [22] представлены примеры зависимости продольной колесной силы от коэффициента скольжения  $k$  в случае торможения. При некотором (разном для различных дорожных условий) значении коэффициента скольжения  $k$  продольная сила колеса достигает предела, соответствующего максимальному значению коэффициента сцепления. Торможение (или ускорение) с таким моментом силы наиболее эффективно. При увеличении коэффициента скольжения сверх оптимального продольная сила колеса уменьшается, поскольку определяющим становится трение скольжения, меньшее, чем трение покоя.

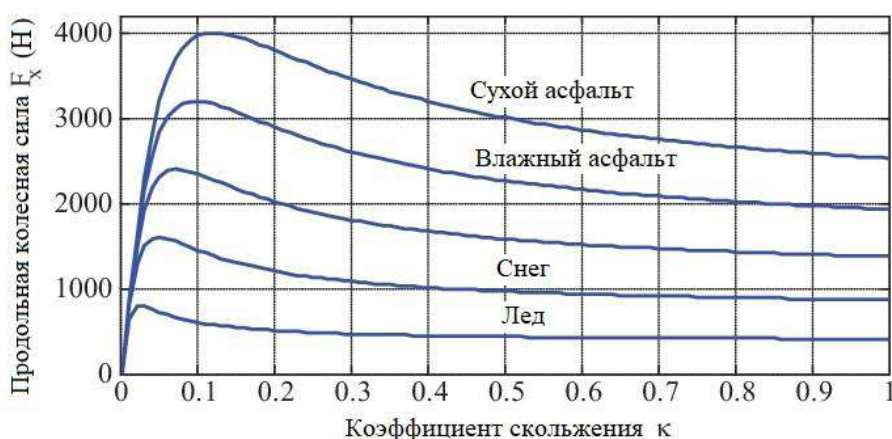


Рисунок 1.2 – Зависимость продольной колесной силы  $F_x$  от коэффициента скольжения  $k$  для различных состояний дорожного покрытия [22]



Как видно из графиков, приведенных на рисунке 1.2, наибольшее влияние на максимально достижимую продольную силу (т.е. на коэффициент сцепления) имеет состояние и тип дорожного покрытия.

При повороте автомобиля возникает угол между вектором скорости колеса и его продольной осью, называемый углом увода колес. Поперечная сила  $F_y$ , действующая на колесо в процессе поворота, растет с увеличением угла увода. Однако при больших значениях этого угла поперечная сила уменьшается, поэтому для эффективной работы систем динамической стабилизации важно контролировать величину боковой силы на каждом колесе. Пример характеристик поперечной силы от угла увода колеса при различных коэффициентах скольжения представлен на рисунке 1.3.

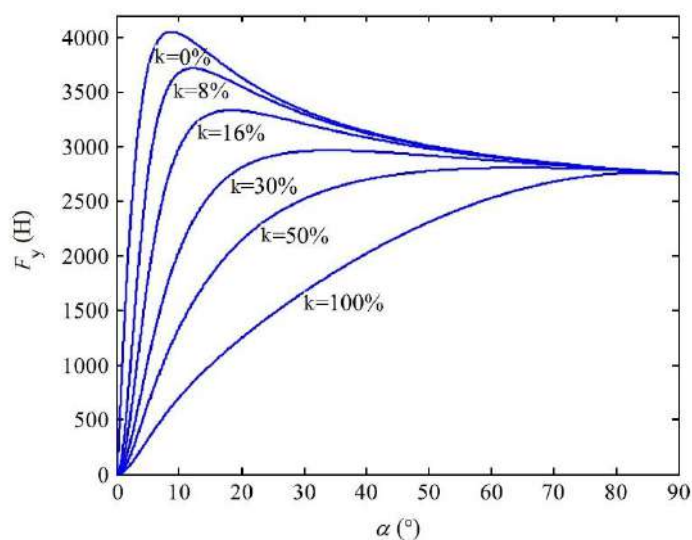


Рисунок 1.3 – Зависимость поперечной колесной силы  $F_y$  от угла увода колеса  $\alpha$  [31]

Данные о нагрузках, действующих на колеса, могут быть использованы для решения трех основных задач:

- 1) определения оптимального коэффициента скольжения  $k$ , который является задающим параметром антиблокировочной и противобуксовочной системы;

2) оценки коэффициента сцепления колеса с дорожным полотном, что необходимо при выборе дистанции до впередиидущего автомобиля и скорости движения беспилотных автомобилей;

3) получения дополнительных входных параметров для повышения эффективности систем динамической стабилизации ТС, а именно: поперечной колесной силы и вертикальной нагрузки на колесо (статическое и динамическое распределение веса).

## **1.2 Анализ применения волоконно-оптических датчиков для измерения параметров колесных подшипников. Технические требования к датчикам температуры и деформации**

### *1.2.1 Технические требования к конструкции, размещению, скорости измерений для тензометрической системы ступичных подшипников*

Технические требования к размещению и массогабаритным характеристикам датчиков определяются, исходя из конструктивных особенностей ступиц и подшипников автомобиля. Существуют различные виды конструкций ступичных подшипников, которые бывают с неподвижным внешним или неподвижным внутренним кольцом. Как правило, на ведущей оси автомобиля устанавливаются подшипники с неподвижным внешним кольцом. На рисунке 1.4 представлены схемы ступичных подшипников производства NTN [16], у которых внешнее кольцо оснащено фланцем для крепления подшипника к деталям подвески автомобиля, указаны места крепления чувствительных элементов датчиков на внешнем кольце.

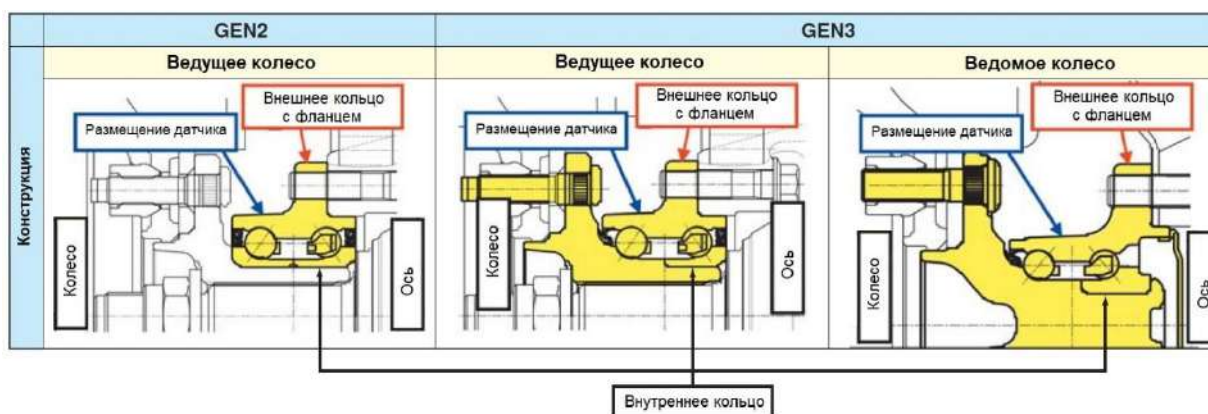


Рисунок 1.4 – Некоторые конструкции ступичных подшипников компании NTN и размещение датчиков деформации [16]

В качестве чувствительных элементов системы измерения деформации ступичных подшипников автомобиля чаще всего используются тензорезистивные датчики [15, 16, 23, 26]. Так, в [26] тензорезистивные датчики имеют следующие характеристики: диапазон измерения деформации  $\pm 3\%$  ( $\pm 3 \cdot 10^4$  мкм/м), номинальное электрическое сопротивление 350 Ом, коэффициент тензочувствительности  $2,15 \pm 0,5\%$ , размеры активной области  $1,57 \times 1,57$  мм, рабочая температура –  $-75 \sim 175^\circ\text{C}$ . Диапазон рабочих температур определим, исходя из условий эксплуатации ступичных подшипников. В качестве минимальной температуры примем  $-30^\circ\text{C}$ , а в качестве максимальной  $+50^\circ\text{C}$  – согласно исследованиям, проведенным в работе [93]. Диапазон измерения нагрузки (интервал между максимальным и минимальным значениями нагрузки, действующей на подшипник в процессе движения автомобиля) для легкового автомобиля принимается равным  $\pm 10$  кН [26] в продольном и поперечном направлениях, и  $0 \sim 10$  кН в вертикальном направлении. Положение координатных осей относительно подшипника приведено на рисунке 1.5. Указанному выше диапазону измеряемой нагрузки соответствует диапазон деформации внешнего кольца подшипника, равный порядка 800 мкм/м [30].

Точность и разрешающая способность измерения нагрузки на колесный подшипник не регламентируются какими-либо стандартами, поскольку такие системы являются перспективными и на данный момент не используются в

серийных транспортных средствах. Точность измерения характеризует степень близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины. В качестве целевого значения точности примем  $\pm 5\%$  от полного диапазона по всем трем осям (что соответствует  $\pm 1$  кН по оси  $x$  и  $y$ , и  $\pm 0,5$  кН по оси  $z$ ), аналогично [26].

Системы опроса тензорезистивных датчиков, которые чаще всего используются в прототипах измерительных систем нагрузок на подшипники, как правило, имеют разрешающую способность по деформации до 1 мкм/м [35].

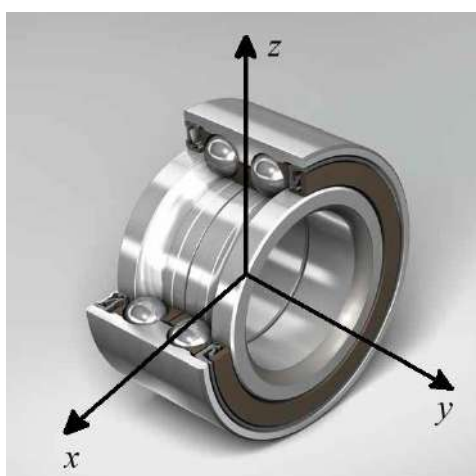


Рисунок 1.5 – Положение системы координат относительно подшипника

Минимальную частоту измерений деформации внешнего кольца подшипника определим по теореме Котельникова как вдвое большей частоты периодического изменения деформации вследствие прохождения шариков. Таким образом, минимальная частота измерений определена выражением:

$$f_{min} > \frac{v_{xmax}n}{\pi r_w} \left( 0,5 - \frac{D_r}{D + d} \right), \quad (1.3)$$

где  $v_{xmax}$  – максимальная скорость автомобиля (м/с),  $r_w$  – динамический радиус колеса (м),  $n$  – количество тел качения (шариков) на одной дорожке подшипника,  $D_r$  – диаметр шарика (мм),  $D$  – диаметр внешнего кольца подшипника (мм),  $d$  – диаметр внутреннего кольца подшипника (мм). Например, для  $v_{xmax} = 50$  м/с,  $r_w = 0,33$  м,  $n = 15$ ,  $D_r = 12,7$  мм,  $D = 90$  мм,  $d = 60$  мм, минимальная частота измерений составит  $f_{min} > 300$  Гц. Что легко

выполнимо в тензорезистивных измерительных системах, но не всегда достижимо в волоконно-оптических сенсорных системах (ВОСС) при классической оптико-электронной интеррогации ВОД. Заметим, однако, что для радиофотонных методов опроса ВОД [25], такие показатели частоты опроса не являются предельными и легко достижимы.

Существует ограничение и на длину чувствительного элемента датчика, которая не должна превышать половину длины дуги между точками контакта двух соседних шариков с внешним кольцом подшипника:

$$l_s \leq \frac{\pi D}{2n}. \quad (1.4)$$

Данное условие позволяет учесть периодическое изменение деформации вследствие прохождения шариков (см. рисунок 1.1). Так, в случае подшипника SK5377 [27], для которого диаметр  $D = 90$  мм, количество тел качения  $n = 15$ , длина чувствительного элемента не должна превышать 9,42 мм.

Поскольку в настоящее время перспективным направлением является создание автомобилей с приводом от электродвигателей, имеет место проблема обеспечения электромагнитной совместимости измерительной системы, в особенности при использовании мотор-колес. Мотор-колесо представляет собой агрегат, объединяющий в себе колесо, электрический двигатель, трансмиссию и тормозную систему [72]. Согласно ряду исследований [68 – 71], расположение тензорезистивных датчиков вблизи электрических двигателей значительно ухудшает соотношение сигнал/шум измерительной системы. Так, в работе [69] при размещении тензорезистивного датчика на расстоянии около 7 см от обмотки синхронного электромотора мощностью 11 кВт соотношение сигнал/шум составляло от 0,0035 до 0,01, что является недопустимо низким показателем для измерительных систем, рассматриваемых в настоящей работе.

В совокупности система измерения нагрузки на колесный подшипник ТС должна удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – требования к системе измерения нагрузки на ступичный подшипник ТС.

Диапазон измерения нагрузки	Диапазон измерения деформации	Точность измерения нагрузки	Разрешающая способность по деформации	Частота измерений	Длина датчика	Рабочая температура
$\pm 10$ кН (по оси $x$ и $y$ ) 0~10 кН (по оси $z$ )	800 мкм/м	$\pm 5\%$	<1 мкм/м	> 300 Гц	< 9,42 мм	-30~50 °С

### 1.2.2 Принцип работы волоконно-оптических датчиков деформации и температуры

В качестве чувствительного элемента точечных волоконно-оптических и радиофотонных систем используется волоконная брэгговская решетка (ВБР), которая представляет собой наведенное периодическое изменение показателя преломления (ПП) в сердцевине участка оптического волокна в продольном направлении, сформированное с помощью ультрафиолетового (УФ) излучения (рисунок 1.6).

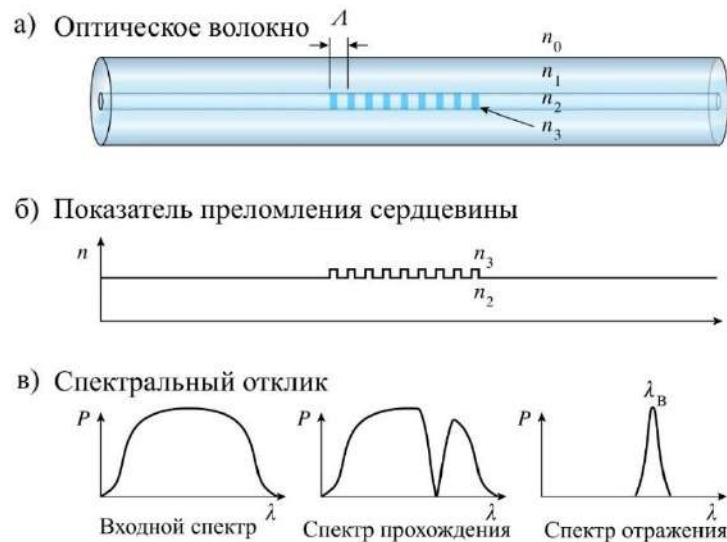


Рисунок 1.6 – Волоконная брэгговская решетка [28]: а) схема наведения показателя преломления в сердцевине волокна; б) зависимость наведенного показателя преломления по длине волокна; в) схемы спектрального отклика от широкополосного излучения

Пригодность использования ВБР в качестве чувствительного элемента обусловлена тем, что она отражает узкую полосу спектра, центральная длина волны которой называется брэгговской длиной волны  $\lambda_B$ , которая в свою очередь определяется условием Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.5)$$

где  $n_{eff}$  – эффективный (средний) ПП сердцевины волокна с ВБР,  $\Lambda$  – период решетки. Модуляция ПП связывает основную моду оптического волокна с модой, распространяющейся в обратном направлении, в результате чего проходящее по волокну излучение отражается на дискретной длине волны  $\lambda_B$ .

При механическом сжатии или растяжении оптического волокна изменяется период ВБР –  $\Lambda$  и, как следствие, длина волны отраженного света –  $\lambda_B$ . Это явление лежит в основе тензометрических измерений с помощью ВБР. При изменении температуры также происходит сдвиг спектра отражения ВБР в результате теплового изменения периода решетки. В связи с этим в тензометрических системах на основе ВБР необходима температурная компенсация путем введения отдельных ВБР-датчиков температуры, изолированных от деформации.

Благодаря ряду таких уникальных свойств, как гибкие спектральные характеристики [29], полностью волоконное исполнение, низкие вносимые потери, компактные размеры и низкая стоимость, ВБР нашли широкое применение в волоконно-оптических и радиофотонных измерительных системах и системах обработки сигналов.

### *1.2.3 Точечные и квазираспределенные датчики деформации и температуры*

На основе волоконных брэгговских решеток возможно создание двух видов измерительных систем: точечных и квазираспределенных. Точечные датчики представляют собой участок волоконного световода с ВБР и позволяют производить контроль параметров в определенной точке или локальной области объекта. Пример точечной системы измерения деформации подшипника представлен на рисунке 1.7,а), которая содержит шесть точечных

датчиков деформации, расположенных в противоположных точках вдоль окружности внешнего кольца подшипника. Шесть датчиков считается минимальным количеством датчиков для определения нагрузки на подшипник по всем трем осям [27, 30].

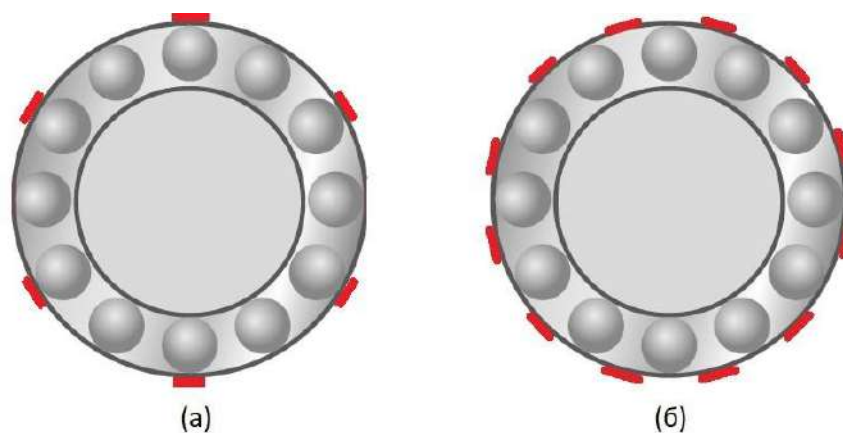


Рисунок 1.7 – Измерительная система деформации подшипника с точечными датчиками (а) и квазираспределенными датчиками (б). Красным показано положение датчиков

К квазираспределенным измерительным системам отнесем системы, использующие множество (или массив) распределенных по объекту измерения волоконно-оптических датчиков (ВОД). Такая система схематично изображена на 1.7,б), где вдоль всей поверхности внешнего кольца подшипника размещены 12 датчиков, отстоящих друг от друга на  $30^\circ$ .

#### 1.2.4 Принцип измерительного преобразования

Можно выделить два основных этапа измерительного преобразования при работе системы измерения нагрузки колесных подшипников транспортных средств на основе ВБР-датчиков: преобразование «длина волны – деформация» и преобразование «деформация – нагрузка».

Первый этап измерительного преобразования основан на определении смещения центральной (брегговской) длины волны спектра отражения ВБР вследствие изменения периода решетки при ее деформации. Как было сказано в п. 1.2.2, принцип работы ВБР-датчиков основан на изменении периода



брэгговской решетки или ее эффективного показателя преломления под действием деформации, температуры и т.д., что вызывает сдвиг центральной (брэгговской) длины волны ВБР согласно выражению (1.5). Относительный сдвиг центральной длины волны ВБР, подвергающейся воздействию деформации и температуры, определяется выражением [34]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1.6)$$

где  $\Delta\lambda_B$  – сдвиг брэгговской длины волны,  $p_e$  – коэффициент фотоупругости материала сердцевины оптоволокна,  $\varepsilon$  – продольная деформация ВБР,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения оптического волокна,  $\xi$  – термооптический коэффициент,  $\Delta T$  – изменение температуры. Коэффициент фотоупругости  $p_e$  в (1.6) определяется как [34]:

$$p_e = \frac{n_c^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})], \quad (1.7)$$

где  $n_c$  – показатель преломления сердцевины оптического волокна,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  – коэффициенты Поггеля,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Второй этап измерительного преобразования представляет собой математическое преобразование величины измеряемой упругой деформации в величину нагрузки, ее вызывающей. При этом необходимо учитывать распределение нагрузки между элементами качения.

Простейшая математическая модель внутреннего распределения нагрузки подшипника качения описана в [32]. В качестве примера рассмотрим нагрузку  $P_r$ , приложенную к внутреннему кольцу подшипника в радиальном направлении. Эта нагрузка распределяется неравномерно по элементам качения, находящимся в нагруженной области. На рисунке 1.8 цифрами отмечены пары нагруженных элементов качения, нагрузка на которых распределена симметрично.

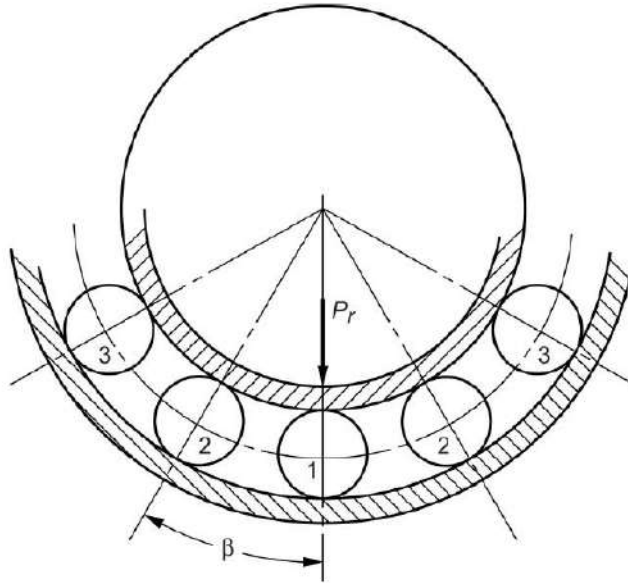


Рисунок 1.8 – Геометрия подшипника качения с приложенной нагрузкой  $P_r$  [32]

Количество таких симметричных пар шариков в нагруженной области определяется выражением:

$$N = \text{INT} \left( \frac{n-1}{4} \right), \quad (1.8)$$

где  $n$  – количество шариков в одном ряду подшипника.

На рисунке 1.8 угол  $\beta$  – угол между двумя соседними элементами качения, равен:

$$\beta = \frac{2\pi}{n}. \quad (1.9)$$

Радиальная нагрузка  $P_r$  представляет собой комбинацию нагрузок на элементах качения  $P_1, P_2, \dots, P_{N+1}$ :

$$P_r = P_1 + 2P_2 \cos \beta + 2P_3 \cos 2\beta + \dots + 2P_{N+1} \cos N\beta. \quad (1.10)$$

Согласно [32] максимальной нагрузкой на элемент качения является нагрузка  $P_1$ , которая вычисляется следующим образом:

$$P_1 = P_{\max} = 4,37 \frac{P_r}{n}. \quad (1.11)$$

Остальные пары нагрузок  $P_2, P_3, \dots, P_{N+1}$  выражаются через  $P_{\max}$  по следующей формуле:

$$P_j = P_{\max} [\cos (j - 1)\beta]^{\frac{3}{2}}, \quad (1.6)$$

где  $j$  – порядковый номер пары элементов качения.

Таким образом, следует различать общую нагрузку  $P_r$  и локальные нагрузки  $P_1, P_2, \dots, P_{N+1}$ , которые и измеряются посредством датчиков деформации. Задачей разрабатываемой измерительной системы является определение общей нагрузки  $P_r$ , действующей на подшипник.

В качестве модели деформации внешнего кольца подшипника используем балочную модель [33], выбор которой обусловлен тем, что деформация подшипника в тангенциальном направлении больше, чем в осевом или радиальном направлении [27], как и в случае балки, что проиллюстрировано на рисунке 1.9. Датчики, установленные на внешнем кольце подшипника, измеряют деформацию в тангенциальном направлении, по которой определяется действующая нагрузка [27].

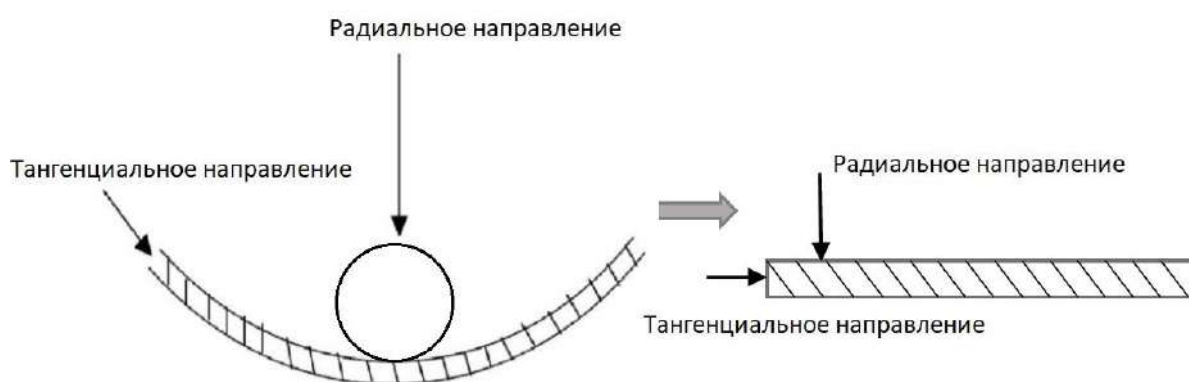


Рисунок 1.9 – Переход к балочной модели

В балочной модели, рассмотренной в [33], применялись два набора граничных условий: шарнирно-опертая балка и балка с защемленными концами. Модель с первым набором граничных условий характеризуется простотой расчетов, тогда как второй набор граничных условий позволяет более точно передать соотношение деформации и нагрузки. При этом длина балки принимается равной половине длины окружности внешнего кольца подшипника, а толщина – равной толщине внешнего кольца.

Рассмотрим локальную нагрузку от одного тела качения в балочной модели. Пусть  $a_i$  – положение тела качения относительно левого конца балки в  $i$ -й момент времени,  $x$  – положение датчика деформации относительно левого конца балки,  $l_b$  – длина балки,  $P_r$  – общая нагрузка (см. рисунок 1.10), тогда локальная нагрузка  $P$  от тела качения определяется выражением:

$$P = P_r \sin \psi_i; \quad \psi_i = \frac{a_i \pi}{l_b}, \quad \psi_i \in [0, \pi]. \quad (1.7)$$

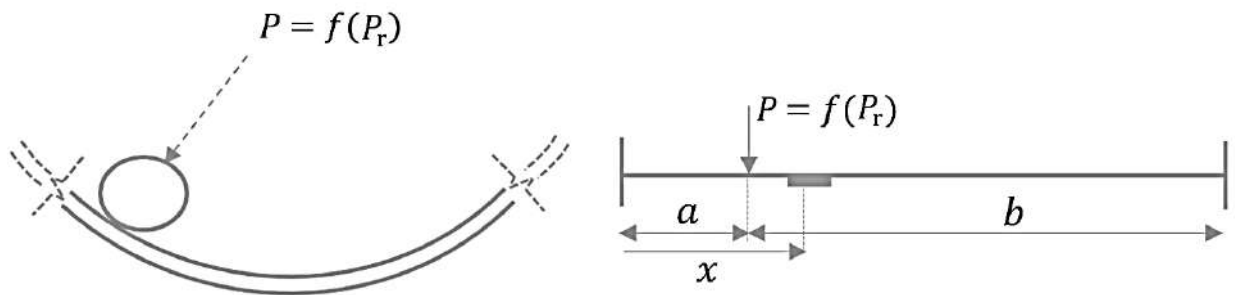


Рисунок 1.10 – Балочная модель в случае одного тела качения [33]

Рассмотрим балочную модель для двух тел качения, представленную на рисунке 1.11. Пусть  $\psi_1, \psi_2$  – угловые положения первого и второго тела качения относительно горизонтальной оси,  $a_1$  и  $a_2$  – соответствующие им положения локальных нагрузок на балочной модели ( $a_d = a_2 - a_1$ ),  $x$  – положение датчика деформации относительно левого конца балки.

Пусть сумма вертикальных составляющих нагрузок равна общей нагрузке, а сумма горизонтальных составляющих нагрузки равна нулю:

$$\begin{cases} P_1 \cos \psi_1 + P_2 \cos \psi_2 = 0 \\ P_1 \sin \psi_1 + P_2 \sin \psi_2 = P_r \end{cases} \quad (1.8)$$

Выразим локальные нагрузки  $P_1$  и  $P_2$  из (1.12):

$$P_1 = -\frac{P_r \cos \psi_2}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (1.9)$$

$$P_2 = \frac{P_r \cos \psi_1}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}. \quad (1.10)$$

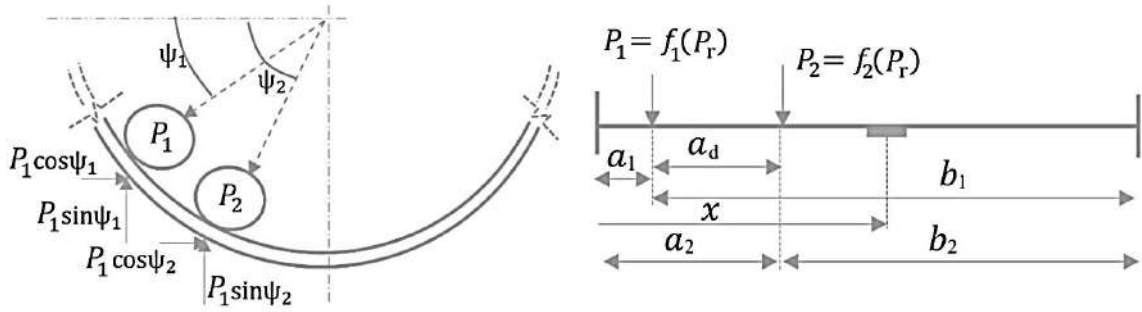


Рисунок 1.11 – Балочная модель с двумя телами качения [33]

Для нахождения соотношения деформации и нагрузки воспользуемся классической теорией Эйлера-Бернулли [33], в которой деформация связывается с нагрузкой через изгибающий момент согласно выражению:

$$S_x = M_x \frac{y}{EI}, \quad (1.11)$$

где  $S_x$  – деформация, измеряемая на расстоянии  $x$  от левого конца балки [м/м],  $M_x$  – изгибающий момент в той же точке [Н·м],  $y$  – расстояние от нейтральной оси до точки, в которой измеряется деформация (т.е. в данном случае половина толщины балки) [м],  $E$  – модуль Юнга [Н/м<sup>2</sup>],  $I$  – момент инерции поперечного сечения балки [м<sup>4</sup>].

Изгибающий момент зависит от абсолютного положения нагрузки ( $a$ ), положения нагрузки относительно точки измерения деформации ( $x - a$ ), величины нагрузки и реакций на концах балки ( $R_a$  и  $R_b$ ) (см. рисунок 1.12).

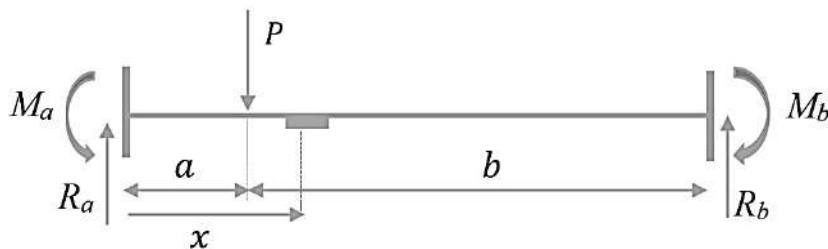


Рисунок 1.12 – Балочная модель с приложенной нагрузкой и реакциями

Изгибающий момент для шарнирно-опертой балки может быть вычислен по формулам:

$$\begin{cases} M_x = R_a x - P(x - a) = \frac{Pb}{l_b} x - P(x - a), & \text{при } a < x \\ M_x = R_a x = \frac{Pb}{l_b} x, & \text{при } a \geq x. \end{cases} \quad (1.12)$$

Объединив выражения (1.11) и (1.12), выведем формулу для вычисления нагрузки при  $a < x$ :

$$P = \frac{S_x EI}{y} \frac{1}{\left[ \frac{bx}{l_b} - (x - a) \right]} = \frac{S_x EI}{y} \frac{1}{\left[ \frac{(l_b - a)x}{l_b} - (x - a) \right]}. \quad (1.19)$$

В (1.19)  $S_x$  – измеряемая величина;  $E$  – свойство материала;  $I$ ,  $y$ ,  $l_b$  – геометрические параметры балочной модели;  $a$  – положение нагрузки;  $x$  – точка, в которой измеряется деформация (местоположение датчика). Таким образом, все величины в (1.19) являются известными, что обуславливает возможность использования данного выражения для вычисления локальной нагрузки, передающейся на внешнее кольцо подшипника от тела качения. Аналогичным образом вычисляется нагрузка при  $a \geq x$ .

Необходимо отметить, что в так называемых «точках нулевого момента скручивания» знаменатель в (1.19) равен нулю, поэтому для этих точек нагрузка не вычисляется [33]. В свою очередь, общая нагрузка вычисляется по величине локальной нагрузки по формуле:

$$P_r = \frac{P}{\sin \psi_i}. \quad (1.20)$$

### 1.2.5 Методы мультиплексирования

Для одновременного измерения множеством волоконно-оптических датчиков в рамках одной измерительной системы необходимо применять тот или иной метод мультиплексирования. Одним из наиболее распространенных методов мультиплексирования является мультиплексирование с разделением каналов (датчиков) по длине волны WDM (от англ. wavelength division multiplexing). В данном методе в измерительной системе используются ВБР с разными периодами и, соответственно, имеют разные центральные длины волн в спектре отражения. При этом спектры ВБР распределяются в широком диапазоне

и не перекрываются. Таким образом, подавая на массив датчиков широкополосное излучение и регистрируя длины волн отражения с помощью оптического спектрометра, можно определить температуру или деформацию, воздействующую на каждый датчик в отдельности. Различные рабочие длины волн ВБР-датчиков в системах на основе WDM усложняют разработку и производство таких систем и, как следствие, их стоимость. Кроме того, количество датчиков в системе WDM ограничено отношением диапазона источника излучения (порядка десятков нм) к динамическому спектральному диапазону изменения центральной длины волны каждого ВБР датчика (единицы нм).

Другим методом мультиплексирования является мультиплексирование во временной области TDM (от англ. time division multiplexing), при котором каждый датчик отдален от системы опроса участком волоконного световода, для прохождения которого сигналу требуется определенное известное время. Зондирующий сигнал представляет собой короткие импульсы. В результате, на выходе формируется ряд дифференцированных по времени импульсов, который несет информацию состояния каждого датчика в отдельности. Данный метод хорошо применим для статических измерений, но плохо подходит для измерения быстро меняющихся величин.

Мультиплексирование нескольких спектрально перекрывающихся ВБР может осуществляться с помощью интерферометрии со сдвигом по частоте (FSI, от англ. frequency-shifted interferometry) [36 – 37], которая основана на интерферометре Саньяка. В качестве параметра, по которому осуществляется измерение, выступает разность фаз между двумя составляющими зондирующего излучения. Эти составляющие проходят одинаковый путь в волокне и имеют одинаковую, смещенную относительно основного излучения, частоту. Однако данное смещение частоты происходит в различных точках волокна для разных составляющих. Таким образом, местоположение датчиков определяется по соотношению изменения фазы и величины частотного сдвига составляющих. Частота сканирования при мультиплексировании FSI ограничена тем, что в электрооптических модуляторах высоких частотах возрастает

разность в скорости распространения света в обратном направлении и радиочастотного сигнала в прямом направлении, что снижает эффективность модуляции [38]. Другим недостатком систем FSI является использование сложного интерферометрического оборудования ввиду отсутствия адресности датчиков.

### *1.2.6 Методы зондирования*

В настоящее время наиболее распространенным средством получения и преобразования информации с ВБР являются оптико-электронные интеррогаторы, поскольку ВБР датчики объединяются в массивы, как правило, методом мультиплексирования WDM, описанным выше. Существует множество разновидностей конструкции интеррогаторов: устройства на основе оптических анализаторов спектра (ОАС), перестраиваемых лазеров, оптических рефлектометров OTDR и OFDR, сканирующих фильтров Фабри-Перо (СФФП), а также комбинированного пространственного фильтра (КПФ) с дифракционными решетками и ПЗС-матрицами, оптического узкополосного фильтра (ОУФ), AWG и др. Характеристики основных видов интеррогаторов приведены в таблице 1.2 [38, 72].

Первые два метода опроса получают информацию о сдвиге длины волны непосредственно, т.е. являются прямыми частотными. Методы опроса с использованием КПФ и ОУФ представляют собой амплитудные методы, которые осуществляют преобразование в два этапа: «длина волны – амплитуда» и «амплитуда – измеряемая величина». Так, интеррогаторы на основе КПФ предварительно преобразуют сдвиг длины волны ВБР в пространственный, а затем значение этого сдвига определяется по номеру максимально засвеченного пикселя. В свою очередь, интеррогаторы с ОУФ сначала преобразуют сдвиг длины волны в изменение мощности в зависимости от положения центральной длины волны ВБР на склоне фильтра.



Таблица 1.2 – Характеристики интеррогаторов [38]

№ п/п	Метод опроса		Применение	Скорость опроса, МГц	Разрешающая способность, пм	
1	Опτικο-электронный	ОАС, СФФП (механический привод)	Частотный	Статические деформации, температура	10 <sup>-6</sup>	1..10
2		СФФП (электронный привод)		Вибрации, динамические деформации	10 <sup>-4</sup>	1..5
3		КПФ	Амплитудный	Ускорение	10 <sup>-3</sup>	1..5
4		ОУФ		Акустика	1	1..10
5	Радиофотонный	Преобразование «частота-время»	Амплитудно-фазовый	Деформации и температура	5	0,25
6		ОАЭГ		Изгиб и температура	10	0,3..0,4
7		Контроль длины ВБР		Износ, температура, ...	50	0,1
8		Контроль длины волны ВБР с вытравленного и не вытравленного участков волокна		Показатель преломления и температура	50	0,1
9		Контроль ширины окна прозрачности chirпированной ВБР с фазовым сдвигом		Изгиб и температура	50	0,1
10		Адресная ВБР		Амплитудно-частотный	Многофункциональный	100

Как видно из Таблица 1.2, опτικο-электронные методы опроса волоконно-оптических датчиков имеют ряд ограничений [45].

Первое из них – малая скорость опроса, что требуется для обеспечения высокой разрешающей способности измерений по длине волны. Так, в случае ОАС и СФФП низкая скорость опроса (до 1 Гц) обусловлена большим

временем механического сканирования для получения достаточно высокого разрешения по длине волны (1–10 пм). Использование электронного сканирования в СФФП позволяет увеличить скорость интеррогации до 100 Гц с разрешением до 1–5 пм. Дальнейшее увеличение скорости опроса достигается при использовании амплитудных методов. Так, интеррогаторы на основе КПФ и ПЗС-матриц обеспечивают сканирование со скоростью в 1 кГц при разрешении 1–5 пм. А при использовании ОУФ скорость интеррогации может достигать 1 МГц, но с ограниченным до 1–10 пм разрешением по длине волны [45].

Вторым ограничением оптико-электронных методов опроса является отсутствие возможности одновременного измерения нескольких физических величин одной ВБР. Волоконно-оптические датчики на основе ВБР имеют комплексированную природу, что объясняется комплексированной чувствительностью отклика решеток к деформации, температуре и, в некоторых случаях, к коэффициенту преломления окружающей среды [38]. Сложность одновременного измерения разных физических величин одной ВБР обусловлена тем, что несколько величин могут одновременно оказывать влияние на сдвиг центральной длины волны ВБР. Таким образом, возникает необходимость принятия мер для разделения различных физических воздействий, например, путем введения дополнительной ВБР для осуществления температурной компенсации при измерении деформации [11], что повышает сложность системы.

Еще одним ограничением традиционных оптико-электронных систем опроса является достаточно плоский или осциллирующий характер функции преобразования «длина волны – амплитуда», которая используется для оценки положения центральной длины волны ВБР в области резонанса [38]. Для решения этой проблемы часто применяются методы аппроксимации резонансных характеристик ВБР, что позволяет определить центральную длину волны с определенной вероятностью.

Значительное повышение скорости опроса одновременно с увеличением разрешающей способности достигается при использовании радиофотонных сенсорных систем (РФСС). Методы радиофотоники основаны на обработке

радиосигналов в оптическом диапазоне с использованием элементов интегральной и волоконной оптики. Первый из приведенных в таблице 1.2 радиофотонных методов основывается на спектральном и частотно-однозначном отображении сдвига длины волны по положению корреляционного пика ЛЧМ-радиосигнала [46]. Таким образом, вводится дополнительное преобразование «частота – время», что обуславливает скорость опроса порядка единиц мегагерц, а разрешающая способность составляет до 0,25 пм.

Другим радиофотонным методом является интеррогация с использованием перестраиваемого оптико-электронного автогенератора (ОАЭГ) на основе ВБР с фазовым сдвигом и фазового модулятора [47], образующим оптический полосовой радиофотонный фильтр. При деформации ВБР с фазовым сдвигом центральная частота полосового фильтра изменяется, и сгенерированный сигнал сдвигается по частоте. Поиск неизвестной информационной частоты ОЭАГ осуществляется с помощью векторного анализатора цепей. Скорость опроса составляет порядка 10 МГц, а разрешение – порядка 0,3 – 0,4 пм.

В 7 – 9 методах таблицы 1.2 интеррогаторы основываются на принципе измерительного преобразования «оптическая длина волны – амплитуда и фаза радиосигнала – измеряемая величина» [25, 48–50]. При этом зондирование ВБР осуществляется двухчастотным или четырехчастотным излучением с известной средней и разностными частотами между составляющими. Значение измеряемой величины определяется по коэффициенту амплитудной модуляции радиосигнала биений, а по разности фаз огибающих радиосигнала биений до входа в датчик и на его прямом или рефлектометрическом выходе определяется направление сдвига длины волны. Таким образом, процесс измерения исключает поиск неизвестной частоты радиосигнала как функции измеряемой величины и поиск максимума сигнала вблизи центральной длины волны ВБР (где АЧХ ВБР достаточно плоская), что повышает скорость опроса до 50 МГц, а разрешающую способность до 0,1 пм.

Радиофотонные методы опроса улучшают метрологические характеристики измерительных систем по сравнению с традиционными оптико-

электронными, однако не обеспечивают существенного снижения стоимости и массогабаритных характеристик систем опроса, поскольку основываются на дискретных оптических устройствах интеррогации и мультиплексирования ВБР, таких как высокоскоростные электрооптические модуляторы, коммутаторы, сканеры и фотоприемники. Данную проблему можно решить путем объединения радиофотонных методов опроса ВБР и обеспечения адресности волоконных датчиков, путем использования адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [38]. АВБС – это волоконная брэгговская решетка, оптический отклик которой содержит две узкополосные частотные компоненты, разность между спектральным положением которых лежит в радиочастотной области спектра и служит ее уникальным адресом, а амплитуда и центральная частота оптического отклика заключают в себе информацию о наложенном на АВБС физическом воздействии. При этом разностная (адресная) частота между частотными компонентами постоянна и не зависит от приложенных к АВБС физических полей. Такие структуры одновременно выполняют и функции чувствительного элемента, и формирователя зондирующего излучения и мультиплексора.

### **1.3 Предпосылки к использованию радиофотонных адресных методов измерения**

Как известно, вследствие высокой спектральной селективности волоконных брэгговских решеток, их объединение в массивы эффективно осуществлять по принципу спектрального уплотнения, при котором для каждого датчика выделяется свой рабочий спектральный диапазон, определяемый диапазоном измерений физической величины и профилем самой ВБР. Принцип спектрального уплотнения используется в большинстве современных волоконно-оптических сенсорных системах, в которых для опроса датчиков используются оптико-электронные интеррогаторы. Как правило, эти приборы осуществляют опрос ВБР в диапазоне от 1510 нм до 1590 нм, что позволяет

включать в массив до 40 датчиков [39]. Недостатками такого подхода являются сложность, высокая стоимость, большой размер и вес интеррогаторов, что обусловлено использованием оптических фильтров с широким диапазоном перестройки, а также достаточно низкая частота опроса, которая при обеспечении требуемого спектрального разрешения, как правило, не превышает 100 Гц [38].

Радиофотонные методы опроса ВБР, в частности, полигармоническими методами зондирования, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными спектральными подходами, особенно по скорости опроса и разрешающей способности измерений. В то же время, существенное улучшение экономических и массогабаритных характеристик систем опроса становится возможным при использовании адресных волоконных брэгговских структур (АВБС). Данные брэгговские структуры позволяют производить формирование полигармонического (двухчастотного) зондирующего излучения не на источнике, а непосредственно в самом волоконном датчике [38, 40–44]. При этом адрес чувствительных элементов обеспечивается за счет инвариантности их разностных частот при воздействии температуры и деформации. Мультиплексирование таких датчиков осуществляется благодаря тому, что каждый датчик имеет свою уникальную адресную частоту. Таким образом, АВБС одновременно является как чувствительным элементом, так и формирователем зондирующего излучения и мультиплексором, реализуя радиофотонный подход к опросу ВБР.

В работе [38] предложено два метода формирования АВБС:  $2\pi$ -ВБР и  $2\lambda$ -ВБР. Структура  $2\pi$ -ВБР представляет собой классическую ВБР с двумя дискретными фазовыми сдвигами. Такая АВБС предназначена для работы на прохождение оптического излучения, и мультиплексирование нескольких датчиков осуществляется путем их параллельного подключения. Вторым подходом ( $2\lambda$ -ВБР) является использование двух идентичных сверхузкополосных ВБР, разнесенных по частоте, которые работают на отражение и могут подключаться последовательно.

Оба типа АВБС формируют оптический отклик, содержащий две узкополосные частотные компоненты, разностная частота между которыми лежит в радиочастотной части спектра и служит уникальным адресом АВБС. Центральная длина волны адресной структуры несет информацию о приложенном к датчику физическом воздействии.

#### 1.4 Волоконные брэгговские структуры как чувствительные элементы адресных радиопотонных систем тензометрии колесных подшипников

Исходя из требований к длине чувствительного элемента, определенных в п. 1.2.1 настоящей главы, наиболее подходящей разновидностью адресных волоконных брэгговских структур является АВБС с двумя дискретными фазовыми сдвигами ( $2\pi$ -ВБР). Такая структура представляет собой три последовательно сформированные волоконные брэгговские решетки, интервал между которыми соответствует пропуску периода (рисунок 1.13) [51, 52].

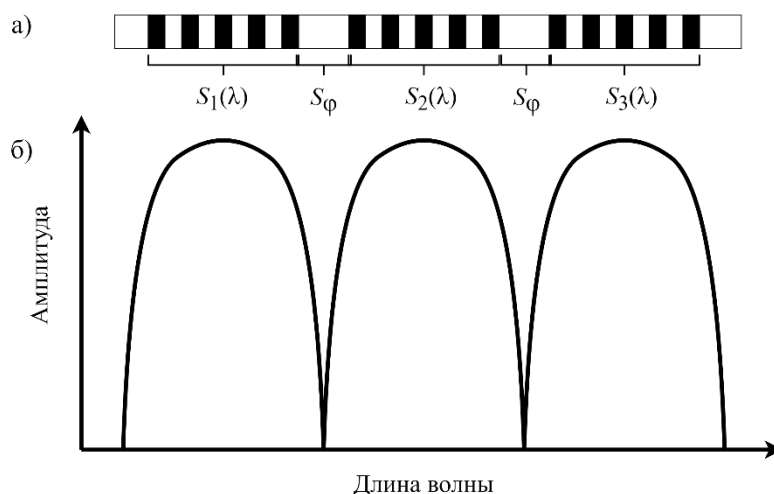


Рисунок 1.13 – АВБС с двумя дискретными фазовыми сдвигами: (а) – структура АВБС, (б) – форма спектральной характеристики

Вследствие наличия в адресной брэгговской структуре двух симметричных фазовых  $\pi$ -сдвигов, широкополосное излучение, проходящее через  $2\pi$ -ВБР, при соблюдении ряда параметров брэгговской структуры формирует

двухчастотное излучение в области окон прозрачности этой структуры [51–54]. Неизменность расстояния между фазовыми сдвигами в амплитудно-частотной плоскости обуславливает возможность использования фазовых сдвигов для формирования адреса  $2\pi$ -ВБР.

Математическая модель, описывающая спектральный отклик АВБС с двумя симметричными фазовыми  $\pi$ -сдвигами, строится на основе метода матриц передач. При этом каждой однородной секции соответствуют матрицы коэффициентов отражения и передачи сонаправленных и встречно направленных мод. Матрица передачи каждой однородной секции записывается в виде [38]:

$$S_m(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{iq(\lambda)l} - r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{-r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)l} + e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)l} - e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-iq(\lambda)l} - r(\lambda)^2 e^{iq(\lambda)l}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix}, \quad (1.21)$$

где  $l$  – длина однородной секции, а параметры  $r(\lambda)$  и  $q(\lambda)$  определяются следующим образом:

$$r(\lambda) = [q(\lambda) - \sigma_\beta(\lambda)]/\kappa, \quad q(\lambda) = \sqrt{\sigma_\beta(\lambda)^2 - \kappa^2}. \quad (1.13)$$

В (1.22)  $\sigma_\beta(\lambda) = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_B)$  – расстройка резонансного контура,  $\lambda_B$  – центральная (брэгговская) длина волны,  $\kappa = \pi\sigma_n/\lambda_B$  – постоянная распространения,  $\sigma_n = n_{\text{mod}}/n_{\text{eff}}$  – индекс модуляции коэффициента преломления,  $n_{\text{mod}}$  – значение наведенного показателя преломления,  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления сердцевины волокна.

Дискретный фазовый сдвиг описывается матрицей передачи, которая имеет вид:

$$S_\varphi = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

где  $\varphi$  – величина фазового сдвига.

Результирующая матрица, которая описывает всю структуру АВБС, записывается как произведение матриц передачи трех однородных секций и двух матриц фазовых сдвигов:

$$S_{res}(\lambda) = S_1(\lambda) \times S_\varphi(\varphi) \times S_2(\lambda) \times S_\varphi(\varphi) \times S_3(\lambda). \quad (1.24)$$

Отклик оптического излучения, прошедшего через адресную брэгговскую структуру, согласно методу матриц передач, записывается в виде:

$$T_{res}(\lambda) = \left( S_{res}(\lambda)_{11} - \frac{S_{res}(\lambda)_{12}S_{res}(\lambda)_{21}}{S_{res}(\lambda)_{22}} \right)^2. \quad (1.25)$$

Используя выражение (1.25), можно подобрать такие параметры моделирования, при которых АВБС удовлетворяла бы следующим требованиям:

1) профиль адресной волоконной брэгговской структуры достаточно широк (до 4 нм), чтобы обеспечить возможность опроса в необходимом диапазоне измеряемых физических величин;

2) спектр содержит два сверхузких окна прозрачности (полная ширина на половине высоты порядка 100 МГц);

3) разностная частота между окнами прозрачности лежит в радиочастотной области (до 30 – 40 ГГц).

АВБС с такими характеристиками обеспечивает формирование двухчастотного оптического излучения, прием которого на фотодетекторе приводит к возникновению радиочастотного сигнала.

Регистрация смещения центральной длины волны АВБС с двумя фазовыми сдвигами осуществляется путем пропускания излучения от адресной структуры через оптический фильтр с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, прежде чем оно поступает на фотоприемник. Мультиплексирование датчиков  $2\pi$ -ВБР производится благодаря тому, что каждый датчик имеет свою разностную (адресную) частоту, при этом центральная длина волны может быть одинакова у всех датчиков.



## 1.5 Выводы по главе

На основе проведенного анализа существующих методов и средств контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств были выявлены пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик за счет применения в них адресных волоконных брэгговских структур. Сформулированы предпосылки к необходимости проведения исследований, посвященных разработке: адресных радиодифракционных измерительных систем для контроля упругой деформации подшипников в мало- и многосенсорных конфигурациях; системы опроса, позволяющих упростить их исполнение и улучшить технико-экономические показатели, при этом обеспечивающих измерение деформации подшипников качения с высокой частотой. Показано, что помимо прочего необходимо решить задачу компенсации влияния внешней температуры на датчики деформации в условиях большого диапазона рабочих температур, характерных для ступичных подшипников транспортных средств. На основе исследований, проведенных в первой главе, были сформулированы объект, предмет и цель исследования, поставлена научная задача и определены основные направления исследований, которые приведены во введении работы.

## ГЛАВА 2 МАЛОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В главе решена задача малосенсорного контроля параметров ступичных подшипников транспортных средств. Разработаны оптико-электронные схемы малосенсорных систем контроля ступичных подшипников транспортных средств. Проведено исследование прохождения широкополосного оптического излучения через адресные волоконные брэгговские структуры в малосенсорном приложении. Приведен метод радиофотонного измерительного преобразования, проведено компьютерное моделирование оптико-электронных схем малосенсорных измерительных систем и отдельных их компонентов.

В первом разделе главы дана постановка задачи контроля деформации в единственной точке с температурной компенсацией показаний датчика деформации, решаемой с помощью малосенсорных систем.

Во втором разделе главы представлено два варианта оптико-электронных схем малосенсорных систем: с разнесенными центральными частотами и с совпадающими центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур, описан метод измерительного преобразования. В представленных схемах используется два измерительных канала, что позволяет исключить необходимость температурной стабилизации фильтров с наклонной амплитудно-частотной характеристикой.

В третьем разделе главы представлены результаты численного моделирования измерительного преобразования малосенсорных систем, введено понятие нормализованного коэффициента модуляции, связывающего параметры колебания интенсивности выходного тока фотоприемника со смещением центральной частоты адресных волоконных брэгговских структур, приведены оценки погрешностей определения центральных частот адресных структур,

разработана математическая модель положения фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, которая позволяет оценить влияние дрейфа его частоты на погрешность определения центральной частоты адресной структуры.

В четвертом разделе главы представлены результаты компьютерного имитационного моделирования оптико-электронных схем малосенсорных систем, показана возможность однозначного определения центральных частот адресных волоконных брэгговских структур с помощью разработанного метода измерительного преобразования.

В пятом разделе приведены выводы по главе.

## **2.1 Постановка задачи одновременного измерения температуры и деформации**

В качестве малосенсорной системы с минимальным количеством датчиков, необходимым для контроля параметров ступичного подшипника автомобиля, примем систему, включающую в себя один датчик деформации и один датчик температуры (рисунок 2.1). Поскольку максимум продольной силы, действующей на колесо, достигается, как правило, при малых значениях коэффициента скольжения колеса, измерение силы при полной блокировке колеса не требуется. Следовательно, использование единственного датчика деформации в большинстве случаев является достаточным для определения продольной силы, действующей на колесо. Таким образом, задача состоит в одновременном измерении деформации в одной точке внешнего кольца подшипника и температуры, воздействующей на датчик деформации, для обеспечения температурной компенсации его показаний [58–60]. Результаты исследований других авторов [93] свидетельствуют о том, что изменение температуры на всем внешнем кольце подшипника в процессе эксплуатации можно считать равномерным, поэтому расположение датчика температуры должно выбираться, исходя из обеспечения его минимальной деформации под действием

приложенных на подшипник нагрузок. Практические рекомендации по размещению датчика температуры на внешнем кольце подшипника даны в Главе 4 настоящей работы.

Малосенсорная система измерения продольной силы, действующей на колесо автомобиля, представляет собой ступичный подшипник, оснащенный датчиком деформации внешнего (неподвижного) кольца и датчиком температуры, изолированным от деформации. Центр датчика деформации расположен на горизонтальной оси, проходящей через ось вращения внутреннего кольца подшипника.

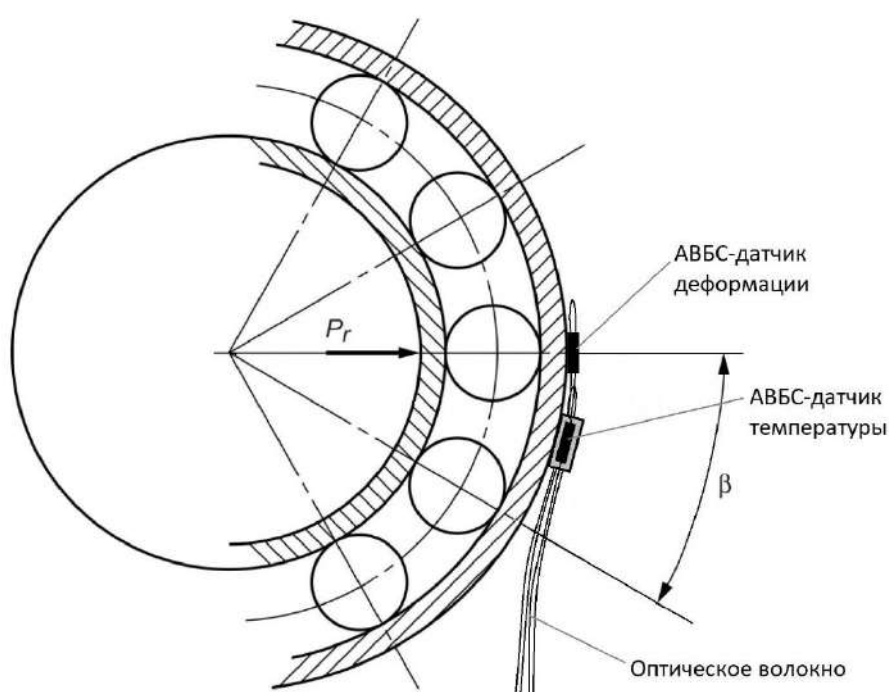


Рисунок 2.1 – Схема установки датчиков деформации и температуры на ступичный подшипник автомобиля (малосенсорный вариант)

Как было определено в Главе 1, требуемый диапазон измерения деформации составляет от 0 до 800 мкм/м с разрешающей способностью  $<1$  мкм/м, что соответствует диапазону измерения продольной нагрузки от 0 до  $\sim 10$  кН, частота измерений  $>300$  Гц, длина датчика деформации не превышает 9,42 мм, диапазон рабочих температур  $-30\sim 50$  °С.

Одна из задач данной работы состояла в том, чтобы максимально упростить и удешевить систему опроса двух и более волоконно-оптических датчиков на основе ВБР.

Поставленная задача может быть решена с помощью адресных волоконных брэгговских структур, настроенных на одну центральную частоту, либо имеющих разнесенные центральные частоты.

Оптическое излучение адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) можно представить как сумму двух гармонических колебаний на частотах спектральных составляющих АВБС:

$$E(t) = Ae^{j\omega t + \varphi_A} + Be^{j(\omega + \Omega)t + \varphi_B}, \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – частота первой спектральной составляющей АВБС,  $\Omega$  – адресная частота,  $A$  и  $B$  – амплитуды первой и второй спектральных составляющих, соответственно,  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  – начальные фазы гармонического колебания, описывающего оптическое излучение.

Электрический сигнал биений на выходе фотоприемника представляет собой произведение выражения (2.1) на комплексно сопряженное:

$$\begin{aligned} E(t)\bar{E}(t) &= (Ae^{j\omega t + \varphi_A} + Be^{j(\omega + \Omega)t + \varphi_B})(Ae^{-j\omega t + \varphi_A} + Be^{-j(\omega + \Omega)t + \varphi_B}) = \\ &= A^2 + B^2 + 2AB\cos(\Omega t + \varphi_A - \varphi_B). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Поскольку фазы гармонических колебаний, описывающих оптическое излучение и, соответственно, их разность ( $\varphi_A - \varphi_B$ ), остаются неизменными, то их запись может быть исключена в последующих формулировках.

## **2.2 Оптико-электронные схемы и метод измерительного преобразования**

Радиофотонный метод измерительного преобразования, который лежит в основе данной работы, заключается в том, что формирование двухчастотного оптического сигнала осуществляется непосредственно в ВБР-структуре, а разностная частота такой структуры является ее уникальным отличительным

параметром, неизменность которого обеспечивает адресность при использовании этой структуры в качестве чувствительного элемента.

В качестве адресных волоконных брэгговских структур в данной работе используются ВБР с двумя дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами. Неизменность адресной частоты между спектральными компонентами такой АВБС при воздействии на нее деформационных или температурных полей позволяет определить разностную частоту в качестве адреса АВБС.

Рассмотрим спектр прохождения оптического излучения через АВБС, которая представляет собой волоконную брэгговскую решетку с двумя дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами. На рисунке 2.2 показан спектр такой АВБС, соответствующий требованиям, приведенным в [38].

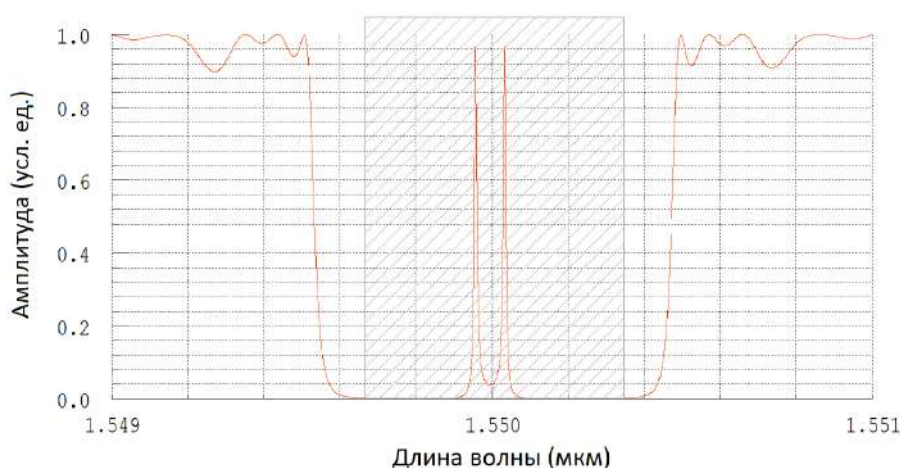


Рисунок 2.2 – Спектр прохождения светового излучения через АВБС с двумя дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами. Штриховкой выделена та часть излучения, которая поступает на фотоприемник.

На фотоприемник должна поступать та часть спектра светового излучения, которая содержит только две центральные спектральные компоненты при любом смещении центральной длины волны АВБС (заштрихованная область на рисунке 2.2).

Абсолютные значения частот спектральных составляющих АВБС значительно больше разностной частоты между ними, вследствие чего на фотоприемнике будут возникать биения оптического сигнала, частота которых равна

разностной частоте между составляющими этого оптического сигнала. Поскольку амплитуды оптических составляющих предварительно модифицируются путем их пропускания через фильтр с известной линейной наклонной АЧХ, то глубина и амплитуда модуляции результирующих биений на фотоприемнике несут в себе информацию о центральной длине волны АВБС [38].

Для того, чтобы использовать разностную частоту (адрес) АВБС в качестве отличительного характерного параметра такой структуры, необходимо, чтобы адрес не изменялся при смещении центральной длины волны АВБС и не совпадал с адресами других АВБС в системе.

Благодаря свойству адресности АВБС в одной системе возможно использовать несколько таких структур, имеющих одинаковую центральную (брэгговскую) длину волны [38]. В данной работе предлагается два варианта построения схемы опроса малосенсорной измерительной системы: с АВБС-датчиками, у которых центральные длины волн совпадают, и с датчиками, у которых они разнесены.

### *2.2.1 Вариант 1: Центральные частоты АВБС разнесены друг относительно друга*

На рисунке 2.3 представлена оптико-электронная схема опроса двух АВБС, центральные частоты которых разнесены относительно друг друга на значительное расстояние (1,0 – 1,2 ТГц и более). На схеме использованы следующие обозначения: 1 – широкополосный оптический источник, формирующий двухдиапазонное излучение с шириной полос, соответствующих диапазонам изменения оптических частот АВБС; 2.1 и 2.2 – АВБС-датчики; 6 – волоконно-оптический разветвитель; 3.1 и 3.2 – оптические фильтры с двумя линейными склонами АЧХ; 4.1, 4.2 – измерительные фотоприемники; 7 – опорный фотоприемник; 5.1, 5.2 – измерительные аналого-цифровые преобразователи (АЦП); 8 – опорный АЦП.

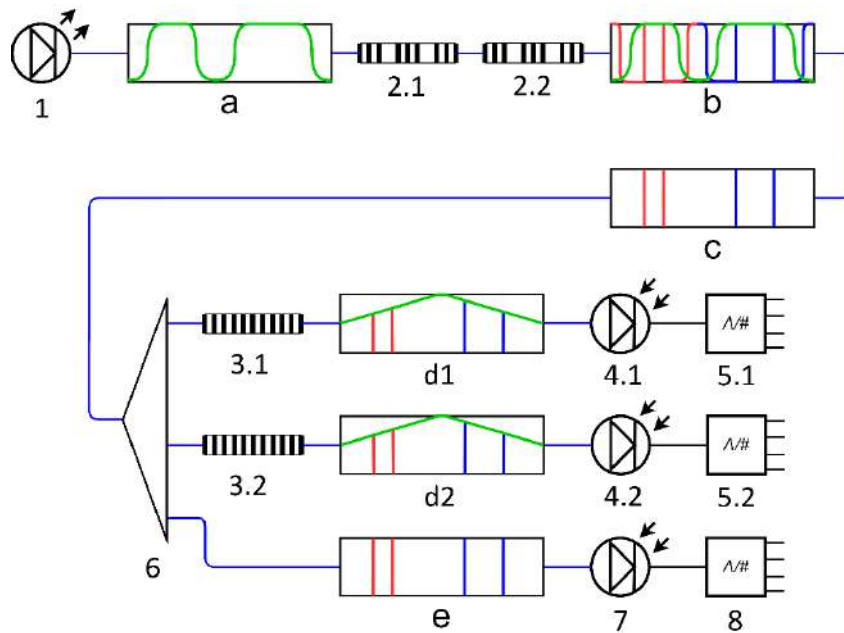


Рисунок 2.3 – Оптико-электронная схема малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС

Широкополосный оптический источник 1 в сочетании с полосовым и режекторным фильтром формирует двухдиапазонное широкополосное оптическое излучение (диаграмма а), ширина полос которого соответствует диапазонам измерений адресных брэгговских структур. Излучение проходит через две последовательно соединенные АВБС – 2.1 и 2.2. Сформированное после прохождения через адресные структуры четырехчастотное излучение (диаграммы б и с) разделяется с помощью разветвителя 6 на два измерительных и один опорный канал. В каждом измерительном канале излучение проходит через фильтр с двумя линейными склонами АЧХ, который модифицирует амплитуды четырех частотных составляющих адресных структур в соответствии со своей известной АЧХ. Отличия измерительных каналов заключается в том, что оптические фильтры с наклонными АЧХ имеют различные известные температурные чувствительности своих спектральных откликов. Излучения во всех каналах принимаются на свои фотоприемники 4.1, 4.2 и 7, а сигналы с фотоприемников оцифровываются на АЦП 5.1, 5.2 и 8. Последующее измерительное преобразование осуществляется для отношения мощности каждого измерительного канала к мощности в опорном канале. Это позволяет



исключить влияние флуктуаций источника оптического излучения на показания системы опроса.

Благодаря тому, что температура фильтров с наклонными АЧХ принимается одинаковой (ввиду их близкого расположения в конструкции системы), становится возможным определить их температуру по известным температурным характеристикам и разности определенных с их помощью центральных частот одной и той же АВБС. Это, в свою очередь, позволяет учесть влияние температурных дрейфов наклонных фильтров на определение центральной частоты АВБС. Методика учета температуры фильтров с наклонными АЧХ подробно рассмотрена в Главе 4 настоящей работы. Следует отметить, что второй измерительный канал может отсутствовать в схеме опроса, однако в этом случае должна обеспечиваться температурная стабилизация фильтра с линейной наклонной АЧХ. Требования по температурной стабилизации фильтра также приведены в Главе 4.

Пусть адресная частота первой АВБС больше адресной частоты второй структуры:

$$\Omega_1 > \Omega_2. \quad (2.3)$$

Тогда оптический сигнал, прошедший через два АВБС-датчика и фильтр с линейными склонами АЧХ, можно представить в виде:

$$F(t) = \left( \begin{array}{l} A_1 \exp(j(\omega^* + \omega_1)t) + B_1 \exp(j(\omega^* + \omega_1 + \Omega_1)t) \\ + A_2 \exp(j(\omega^* + \omega_2)t) + B_2 \exp(j(\omega^* + \omega_2 + \Omega_2)t) \end{array} \right)^2, \quad (2.4)$$

где  $\omega^*$  – произвольно заданная опорная частота;  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды левых и  $B_1$  и  $B_2$  – амплитуды правых спектральных составляющих, формирующих адреса АВБС;  $(\omega^* + \omega_1)$  и  $(\omega^* + \omega_2)$  – частоты левых и  $(\omega^* + \omega_1 + \Omega_1)$  и  $(\omega^* + \omega_2 + \Omega_2)$  – частоты правых спектральных компонент АВБС,  $j$  – мнимая единица. Выбор  $\omega^*$  не имеет значения для корректности вычисления  $\omega_i$ , так как положение составляющих  $\omega_i$  каждой АВБС задается относительно  $\omega^*$ .

Переведем анализ сигнала в низкочастотный диапазон, исключив из (2.4) все оптические высокочастотные слагаемые. Электрический сигнал на выходе фотоприемника будет иметь вид:

$$P(t) = \left( \frac{A_1^2 + B_1^2 + A_2^2 + B_2^2}{2} \right) + (A_1 B_1 \cos(\Omega_1 t) + A_2 B_2 \cos(\Omega_2 t)) + \left[ \begin{array}{l} A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t) \\ + A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2 - \Omega_2)t) \\ + B_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1)t) \\ + B_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1 - \Omega_2)t) \end{array} \right]. \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) позволяет однозначно определить положение спектральных составляющих обеих АВБС, поскольку ни одно из четырех слагаемых в квадратных скобках (подчеркнуто в выражении (2.5)) не может совпасть с адресными частотами АВБС, т.к. в данном случае спектры АВБС существенно разнесены друг от друга (т.е.  $(\omega_2 - \omega_1) > 1$  ТГц или  $(\omega_2 - \omega_1) > \Omega_1 > \Omega_2$ ). Данный факт является одним из преимуществ варианта малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС по сравнению с решением, в котором центральные частоты АВБС совпадают.

Помимо вышеназванного преимущества, схема с разнесенными центральными частотами АВБС позволяет включать два (и более в общем случае) АВБС-датчика последовательно в одном оптическом волокне, что невозможно в случае близких или совпадающих центральных частот АВБС ввиду блокировки излучения от источника предыдущими адресными структурами.

### 2.2.2 Вариант 2: Центральные частоты АВБС совпадают

Рассмотрим второй подход к созданию малосенсорной системы измерения параметров ступичных подшипников, в котором используются АВБС-датчики с близкими центральными частотами. Оптико-электронная схема опроса такой системы с двумя датчиками представлена на рисунке 2.4: 1 – источник широкополосного оптического излучения с шириной спектра, соответствующей диапазону изменения частот оптических составляющих обеих АВБС; 9 и 6 – волоконно-оптические разветвители, 10 – объединитель мощности; 2.1 и

2.2 – АВБС-датчики; 3.1 и 3.2 – оптические фильтры с известными линейными наклонными АЧХ; 4.1 и 4.2 – фотоприемники измерительных каналов; 7 – фотоприемник опорного канала; 5.1 и 5.2 – аналого-цифровые преобразователи (АЦП) измерительных каналов; 8 – АЦП опорного канала.

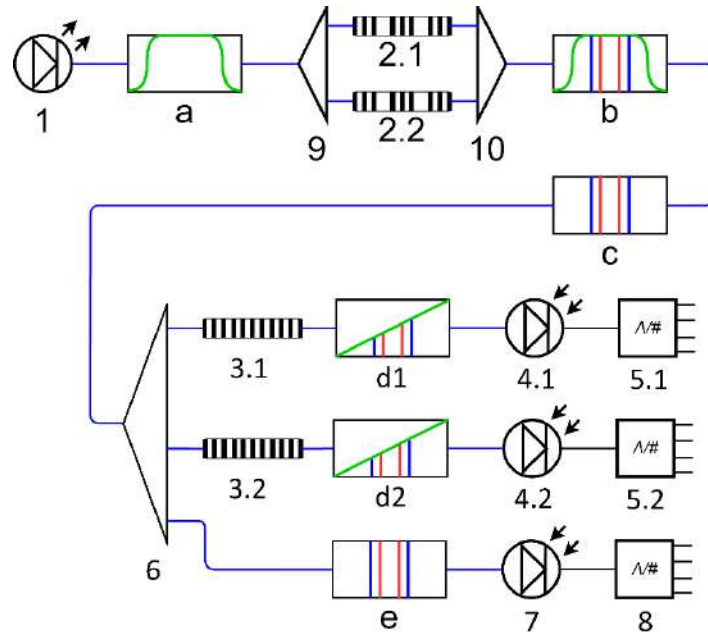


Рисунок 2.4 – Оптико-электронная схема малосенсорной системы с близкими центральными частотами АВБС

Оптический источник 1 формирует излучение с диапазоном длин волн, соответствующим диапазону изменения оптических частот АВБС (диаграмма а). Излучение поступает на оптоволоконный делитель 9, где распределяется одинаково по мощности на два АВБС-датчика 2.1 и 2.2. В результате прохождения оптического излучения через АВБС, на выходе каждой структуры формируются двухчастотные излучения, которые затем объединяются в сумматоре 10. Далее полученное четырехчастотное излучение (диаграммы b, c) делится разветвителем 6 на два измерительных и один опорный канал. В каждом измерительном канале излучение проходит через фильтр с линейной наклонной АЧХ (3.1 и 3.2, соответственно) (диаграммы d1 и d2) и поступает на фотоприемники 4.1 и 4.2, сигналы биений на выходе которых обрабатываются АЦП 5.1 и 5.2. В опорном канале излучение в неизменном виде (диаграмма e)

принимается соответствующим фотоприемником 7 и преобразуется в АЦП 8. Так же, как и в случае схемы с совпадающими центральными частотами АВБС, измерительное преобразование производится для отношения мощностей в измерительных и опорном каналах. Учет влияния температурного дрейфа линейных наклонных фильтров на определение центральных частот АВБС производится также аналогично схеме с разнесенными центральными частотами, что подробно рассмотрено в Главе 4.

Оптический сигнал от двух АВБС, прошедший через фильтр с линейной наклонной АЧХ, и электрический сигнал на выходе фотоприемника описываются формулами (2.2) и (2.3), аналогично варианту с разнесенными центральными частотами АВБС. Однако в отличие от предыдущего варианта, при совпадении или близком расположении центральных частот АВБС слагаемые в квадратных скобках выражения (2.3) могут совпасть по частоте с адресными частотами  $\Omega_1$  или  $\Omega_2$ . Всего возможно 12 таких частных случаев, затрудняющих определение положений АВБС, что можно разрешить с помощью алгоритма, приведенного в [38].

Как было отмечено выше, в схеме с совпадающими центральными частотами АВБС возможно только параллельное включение датчиков, что требует использования волоконно-оптических разветвителей. Этот недостаток компенсируется унификацией элементной базы, которая достигается при использовании одинаковых центральных частот АВБС.

### *2.2.3 Преимущества оптико-электронных схем*

Предложенные оптико-электронные схемы, реализующие радиофотонный метод опроса адресных волоконных брэгговских структур, обеспечивают ряд преимуществ разрабатываемых систем по сравнению с существующими системами опроса и мультиплексирования датчиков на основе волоконных брэгговских структур. Частота опроса датчиков в предложенных схемах ограничивается лишь производительностью аналого-цифровых преобразователей и процессора, осуществляющего вычисления центральных частот АВБС.

Улучшение технико-экономических параметров систем контроля деформации обеспечивается тем, что АВБС одновременно выполняет функции формирователя двухчастотного лазерного излучения, чувствительного элемента и мультиплексора, благодаря чему достигается существенное упрощение конструктивного исполнения системы опроса волоконно-оптических датчиков и, как следствие, ее стоимость и массогабаритные параметры.

### **2.3 Математическое моделирование оптико-электронных схем малосенсорных измерительных систем**

В разделе рассмотрены основные вопросы математического моделирования оптико-электронных схем двух видов малосенсорных измерительных систем: с разнесенными центральными частотами АВБС и с совпадающими центральными частотами АВБС. Приведены математические модели отдельных элементов оптико-электронных схем, а также моделирование схем в целом.

#### *2.3.1 Модель адресной волоконной брэгговской структуры*

Спектр АВБС с двумя симметричными фазовыми  $\pi$ -сдвигами имеет два окна прозрачности, каждый из которых описывается лоренцевским контуром [58–61]:

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma}\right)^2}, \quad (2.6)$$

где  $A_0$  – максимальная амплитуда,  $\gamma$  – добротность,  $\omega_0$  – центральная частота контура.

Спектр излучения, формируемого одним окном прозрачности с лоренцевским контуром, записывается как предельная сумма (интеграл) излучений на всех частотах, входящих в этот контур [62]:

$$A(t) = A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma}\right)^2} d\omega, \quad (2.7)$$

где  $\omega_0$  и  $\varphi$  – это, соответственно, центральная частота и начальная фаза гармоники, описывающей оптическое излучение.

Математическая модель светового отклика центральной части спектра АВБС представляет собой сумму гармоник излучений двух окон прозрачности:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{A \cos(\omega t + \varphi_A)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 - \Omega/2)}{\gamma}\right)^2} + \frac{B \cos(\omega t + \varphi_B)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 + \Omega/2)}{\gamma}\right)^2} \right] d\omega. \quad (2.8)$$

В (2.6)  $\omega_0$  – центральная частота АВБС,  $\Omega$  – разностная (адресная) частота,  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  – начальные фазы,  $A$  и  $B$  – амплитуды левой и правой спектральных составляющих,  $\gamma$  – добротность контуров, описывающих окна прозрачности.

На рисунке 2.5 показана форма спектра оптического излучения АВБС, вычисленная согласно (2.6) для трех значений добротности.

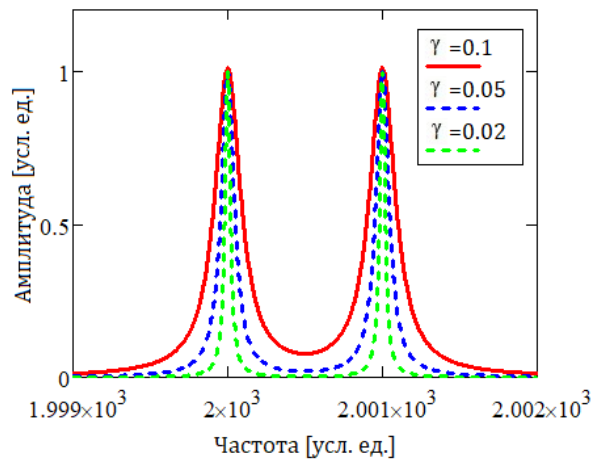


Рисунок 2.5 – Спектр отклика АВБС для различных значений добротности

Для сверхузких окон прозрачности в предельном случае можно выполнить переход от лоренцевского контура к дельта-функции:

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow 0} A(t) &= \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left( A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma}\right)^2} d\omega \right) = \\ &= A_0 \delta(\omega_0) \sin(\omega_0 t + \varphi). \end{aligned} \quad (2.9)$$

В соответствии с (2.7) отклик одного окна прозрачности АВБС представляется в виде гармонического колебания на единственной частоте  $\omega_0$ . Таким образом, суммарный отклик АВБС будет представлять собой сумму двух гармонических колебаний на частотах окон прозрачности, а анализ преобразования сигнала на фотоприемнике будет осуществляться аналогично выражениям (2.4) – (2.5).

Необходимо отметить, что преимуществом адресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами ( $2\pi$ -ВБР) по сравнению с АВБС на основе двух последовательных ВБР ( $2\lambda$ -ВБР) является значительно меньшая ширина ( $\sim 50$  МГц) спектральных компонент, формирующих их адрес, что повышает точность измерений посредством таких структур.

### 2.3.2 Определение положения адресных брэгговских структур относительно оптического фильтра

Математическую модель фильтра с линейной наклонной АЧХ представим в виде уравнения прямой в частотной области:

$$L(\omega) = u \cdot \omega + v, \quad (2.10)$$

где  $u$  – угол наклона прямой,  $v$  – смещение по оси ординат.

Амплитуды  $A(\omega_0)$  и  $B(\omega_0)$  при прохождении оптического излучения от АВБС через фильтр с линейной наклонной АЧХ будут меняться в зависимости от положения центральной длины волны АВБС  $\omega_0$ :

$$A(\omega_0) = L(\omega_0 - \Omega/2) = u \cdot (\omega_0 - \Omega/2) + v, \quad (2.11)$$

$$B(\omega_0) = L(\omega_0 + \Omega/2) = u \cdot (\omega_0 + \Omega/2) + v. \quad (2.12)$$

Мощность светового потока на фотоприемнике выражается в виде:

$$P(t, \omega_0) = (u \cdot (\omega_0 - \Omega/2) + v)^2 + (u \cdot (\omega_0 + \Omega/2) + v)^2 + 2 \cdot (u \cdot (\omega_0 - \Omega/2) + v) \cdot (u \cdot (\omega_0 + \Omega/2) + v) \cdot \cos(\Omega t). \quad (2.13)$$

Постоянная составляющая в (2.13) исключается путем фильтрации электрического сигнала на адресной частоте:

$$P_{\Omega}(t, \omega_0) = 2 \cdot (u \cdot (\omega_0 - \Omega/2) + v) \cdot (u \cdot (\omega_0 + \Omega/2) + v) \cdot \cos(\Omega t). \quad (2.14)$$

Для связи параметров колебания интенсивности выходного тока фотоприемника со смещением центральной частоты АВБС в [38] был использован коэффициент модуляции. Коэффициент модуляции определяется согласно классическому выражению – как отношение разности максимальной и минимальной амплитуд колебаний к их сумме [38]:

$$M(\omega_0) = \frac{2A(\omega_0)B(\omega_0)}{A(\omega_0)^2 + B(\omega_0)^2} = \frac{2 \left( u \cdot \left( \omega_0 - \frac{\Omega}{2} \right) + v \right) \left( u \cdot \left( \omega_0 + \frac{\Omega}{2} \right) + v \right)}{\left( u \cdot \left( \omega_0 - \frac{\Omega}{2} \right) + v \right)^2 + \left( u \cdot \left( \omega_0 + \frac{\Omega}{2} \right) + v \right)^2}. \quad (2.15)$$

На рисунке 2.6 представлена характерная зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты АВБС [38]. Как видно из рисунка 2.6, эта зависимость является монотонной, что позволяет вывести обратную функцию  $\omega_0(M)$ , определяющую смещение центральной частоты АВБС, исходя из измеренного коэффициента модуляции  $M$ .

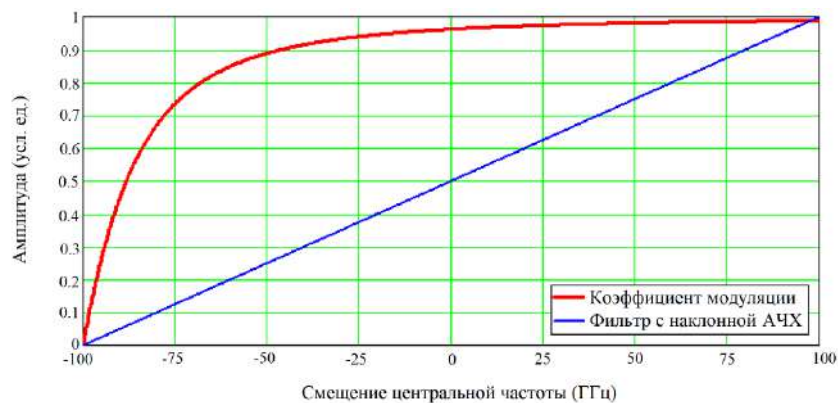


Рисунок 2.6 – Пример зависимости коэффициента модуляции от смещения центральной частоты АВБС [38]



Задачи обеспечения равномерности шкалы измерений и независимости определения центральной частоты АВБС от возможных флуктуаций мощности светового потока, не связанных с изменением ее центральной частоты, были решены в [38] и в настоящей работе не рассматриваются. Первая задача решается путем использования фильтра с нелинейной наклонной АЧХ, а вторая – введением опорного светового канала без фильтра с наклонной характеристикой и отдельным фотоприемником, благодаря чему достигается нормализация мощности сигнала за счет вычисления отношения мощностей в опорном и измерительном каналах.

Следует отметить, что в случае малой адресной частоты АВБС (порядка единиц ГГц) и, как следствие, малой разности между амплитудами  $A$  и  $B$  спектральных составляющих АВБС, коэффициент модуляции  $M$  близок к единице почти во всем диапазоне измерений, что затрудняет его использование для определения центральной частоты АВБС. Наличие опорного канала в схеме опроса АВБС позволяет ввести понятие нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$ , который определяется по выражению:

$$M_n(\omega) = \frac{2A(\omega)B(\omega)}{A_0^2 + A_0^2} = \frac{1}{A_0^2} \left( u \cdot \left( \omega - \frac{\Omega}{2} \right) + v \right) \left( u \cdot \left( \omega + \frac{\Omega}{2} \right) + v \right), \quad (2.16)$$

где  $A_0$  – амплитуда оптических спектральных составляющих в опорном канале. На рисунке 2.7 показаны примеры зависимостей коэффициента модуляции  $M$  (синяя и пурпурная линии) и нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$  (оранжевая и черная линии) для двух АВБС с различными адресными частотами (5 ГГц и 20 ГГц, соответственно) от положения центральной частоты АВБС.

Как видно из рисунка 2.7, коэффициент модуляции  $M$  близок к единице на большей части диапазона изменений центральной частоты АВБС, тогда как значения нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$  существенно различаются.

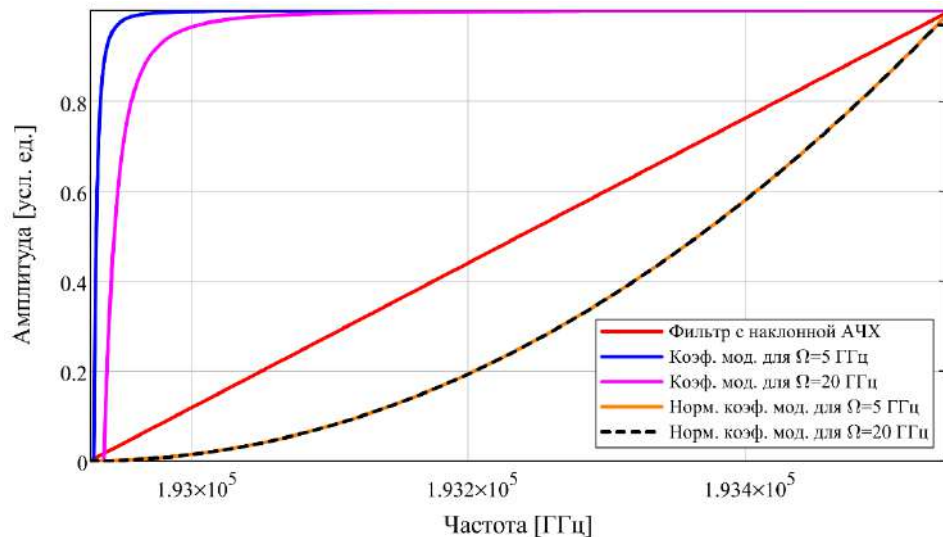


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента модуляции и нормализованного коэффициента модуляции от центральных частот АВБС, имеющих разные адресные частоты

Кроме того, нормализованный коэффициент модуляции близок для адресных структур с разными адресными частотами (на рисунке 2.7 разность нормализованных коэффициентов составляет  $\sim 2,4 \times 10^{-4}$ ), что позволяет использовать его для определения смещения центральных частот АВБС с близкой разрешающей способностью при различных адресных частотах брэгговских структур.

### 2.3.3 Математическое моделирование малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС

Рассмотрим результаты численного моделирования малосенсорной измерительной системы с разнесенными центральными частотами АВБС. Данный вариант системы исключает совпадение частот спектральных компонент оптических излучений от адресных структур, а также формирование кратных частот, равных адресной частоте какого-либо датчика, при любых взаимных положениях центральных частот АВБС. В связи с этим ограничимся рассмотрением одного случая произвольного взаимного положения спектральных компонент адресных структур.

Для проведения математического моделирования возьмем две АВБС с адресными частотами  $\Omega = \{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед., что соответствует адресным частотам 6 и 8 ГГц. Поскольку в данном случае центральные частоты АВБС разнесены, то образование кратных или совпадающих с адресными частотами составляющих исключено при любом взаимном расположении спектров АВБС, поэтому ограничимся рассмотрением общего случая взаимного положения спектральных компонент. Примем положение левых спектральных составляющих АВБС  $\omega = \{\omega_i\} = \{75, 150\}$  усл. ед. относительно любой наперед заданной опорной частоты  $\omega^*$ . Взаимное расположение спектров АВБС и фильтра с двумя линейными склонами АЧХ показано на рисунке 2.8, а на рисунке 2.9 представлен результирующий оптический отклик.

Амплитуды составляющих оптического спектра  $A_i$  и  $B_i$  ( $i = 1, N; N = 2$ ) зависят от параметров фильтра с двумя линейными склонами АЧХ:

$$A_i = L_0 \cdot (u_n \cdot \omega_i) + v_n, \quad B_i = L_0 \cdot (u_n \cdot \omega_i + \Omega_i) + v_n, \quad i=1, N; n=1, N, \quad (2.17)$$

где  $N = 2$ ;  $u_n$  и  $v_n$  – угловой коэффициент и свободный член уравнений, описывающих соответствующий склон АЧХ оптического фильтра;  $L_0$  – амплитуда оптических составляющих перед прохождением через фильтр с линейными склонами АЧХ.

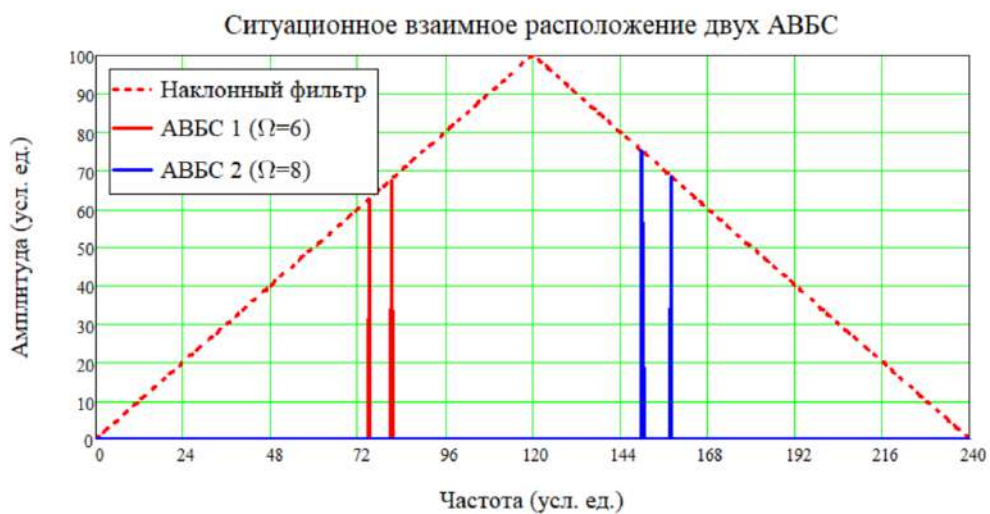


Рисунок 2.8 – Взаимное положение спектров двух АВБС и фильтра с линейными склонами АЧХ при  $\{\omega_i\} = \{75, 150\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

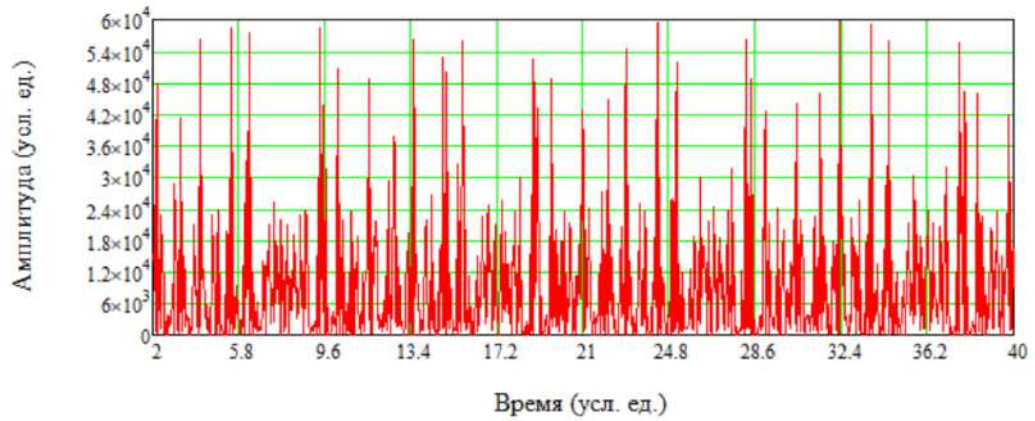


Рисунок 2.9 – Оптический отклик от двух АВБС при  $\{\omega_i\} = \{75, 150\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

Проведем фильтрацию результирующего сигнала выходного тока фотоприемника на адресных частотах, что в общем случае можно представить следующим образом:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left[ \begin{aligned} & A_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ & A_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ & B_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ & B_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k) \end{aligned} \right] = \quad (2.18)$$

$$= D_j \cos(\Omega_j + \varphi_j), \forall j = \overline{1, N},$$

где  $N = 2$ ,  $D_j$  – амплитуда выходного тока фотоприемника на фильтруемой адресной частоте  $\Omega_j$ , функция  $F(\Omega, \omega)$  описывает полосовой фильтр электрического сигнала на адресной частоте  $\Omega$ , представленный в виде фильтра Гаусса:

$$F(\Omega, \omega) = e^{-\frac{(\Omega - \omega)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.19)$$

где  $\sigma$  определяет добротность фильтра. На рисунке 2.10 красной линией показан спектр электрического сигнала биений на фотоприемнике, синей линией обозначены полосовые фильтры на адресных частотах АВБС.

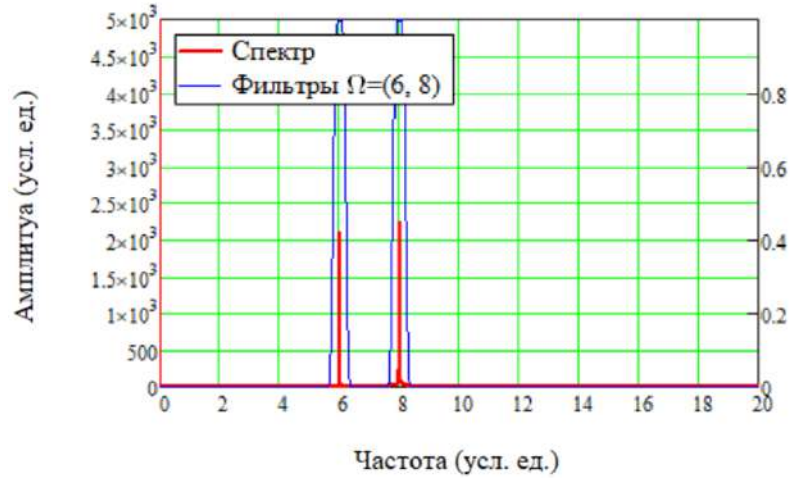


Рисунок 2.10 – Спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника (красная линия), фильтры адресных частот (синяя линия) при  $\{\omega_i\} = \{75, 150\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

В системе уравнений (2.18) неизвестными являются амплитуды составляющих АВБС  $A_j$  и  $B_j$ . Для того, чтобы количество уравнений соответствовало количеству неизвестных, используем выражения (2.17), установив однозначную связь между  $A_j$  и  $B_j$ :

$$B_j = A_j + u_j \cdot \Omega_j, \quad \forall j = \overline{1, N}. \quad (2.20)$$

Таким образом, получаем систему уравнений для нахождения неизвестных  $A_j$  и  $B_j$  по измеренным значениям  $D_j$  и угловому коэффициенту АЧХ оптического фильтра [63, 64]:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left[ \begin{array}{l} A_i A_k \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ A_i (A_k + u_k \Omega_k) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ A_k (A_i + u_i \Omega_i) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ (A_i + u_i \Omega_i) (A_k + u_k \Omega_k) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k) \end{array} \right] = D_j, \quad \forall j = \overline{1, N}. \quad (2.21)$$

Решение системы уравнений (2.19) может быть найдено только численными методами, например, методом Левенберга-Марквардта. Поскольку итерационные методы требуют задания начальных условий, примем в качестве начальных значений  $\{\omega_i\}$  с погрешностью 10%. В качестве решения системы

уравнений (2.21) получим положение левых спектральных составляющих оптического отклика обеих АВБС ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ):

$$\omega = \begin{pmatrix} 75 \\ 150 \end{pmatrix}, \quad z = \begin{pmatrix} 71,26 \\ 142,52 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 75 \\ 150 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} -1,1487 \times 10^{-3} \\ -1,7133 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Вектор  $\{\omega_i\}$  обозначает точные положения левых спектральных составляющих АВБС;  $\{z_i\}$  – начальные приближения, определенные случайным образом с погрешностью 10% от точных значений;  $\{s_i\}$  – вычисленные значения положений спектральных составляющих;  $\{E_i\}$  – абсолютная погрешность вычислений.

Как видно из приведенных данных, абсолютная погрешность определения положения левых спектральных компонент АВБС (и, соответственно, центральных частот АВБС) составляет примерно  $1,15 \times 10^{-3}$  усл. ед. (1,15 МГц), что соответствует величине ошибки определения брэгговской длины волны в 0,0092 пм, что свидетельствует об очень высокой точности измерений для подобных систем.

#### *2.3.4 Математическое моделирование малосенсорной системы с совпадающими центральными частотами АВБС*

Рассмотрим математическую модель малосенсорной измерительной системы с совпадающими центральными частотами АВБС. В такой конфигурации системы возможно возникновение частот, кратных или совпадающих с адресными, в третьей сумме выражения (2.5). В связи с этим рассмотрим общий случай взаимного положения спектральных составляющих АВБС, при котором не возникает кратных или совпадающих частот, а также два частных случая: при совпадающих правых спектральных составляющих АВБС и при возникновении частоты, близкой к адресу одной из АВБС.

Прежде всего рассмотрим общий случай взаимного положения спектров АВБС. Примем положение левых спектральных составляющих  $\{\omega_i\} = \{110, 130\}$  усл. ед. относительно любой наперед заданной опорной частоты  $\omega^*$  и адресные частоты  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед., что соответствует 6 и 8 ГГц. На рисунке

2.11 представлено взаимное расположение спектров АВБС и оптического фильтра с линейной наклонной АЧХ. Низкочастотная часть спектра электрического сигнала, возникающая на выходе фотоприемника, содержит четыре гармоники колебаний, две из которых на адресных частотах, что показано на рисунке 2.12.

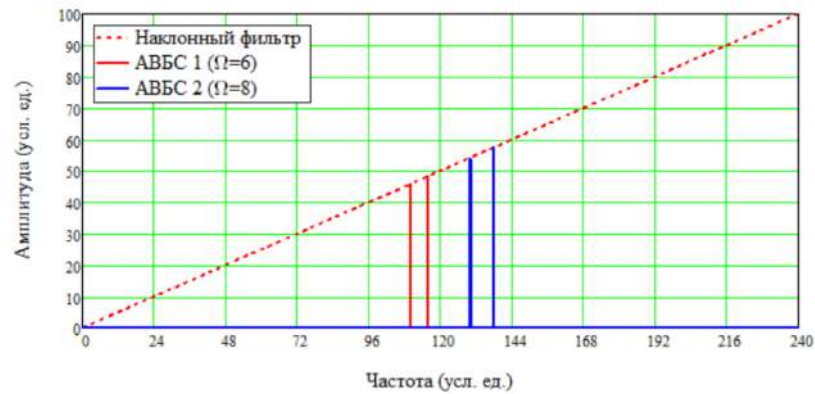


Рисунок 2.11 – Взаимное положение спектров двух АВБС и фильтра с линейной наклонной АЧХ при  $\{\omega_i\} = \{110, 130\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

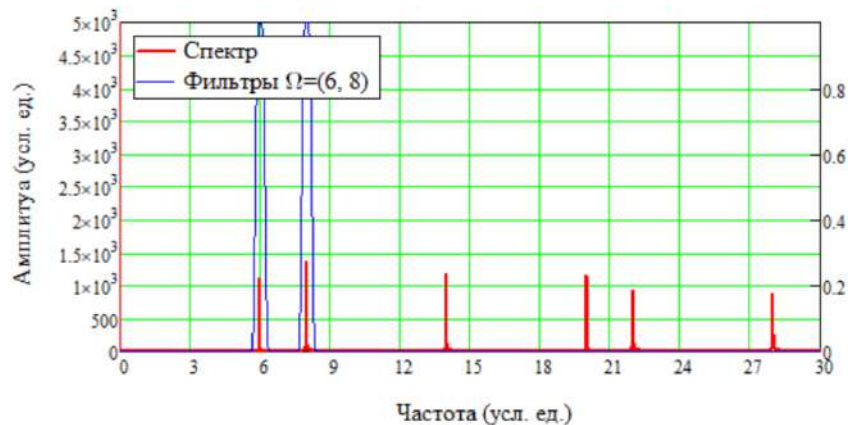


Рисунок 2.12 – Спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника (красная линия), фильтры адресных частот (синяя линия) при  $\{\omega_i\} = \{110, 130\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

Решим систему уравнений (2.21), используя в качестве начальных условий положения левых оптических составляющих  $\omega_i$ , заданные случайным образом с погрешностью 10%:



$$\omega = \begin{pmatrix} 110 \\ 130 \end{pmatrix}, \quad z = \begin{pmatrix} 104,51 \\ 123,52 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 110 \\ 130 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} -1,6653 \times 10^{-3} \\ 2,6761 \times 10^{-4} \end{pmatrix}. \quad (2.23)$$

В (2.23), как и выше, вектор  $\{\omega_i\}$  описывает точные положения левых составляющих спектров АВБС;  $\{z_i\}$  – начальные приближения;  $\{s_i\}$  – вычисленные значения частот левых спектральных составляющих;  $\{E_i\}$  – абсолютная погрешность вычислений. Таким образом, абсолютная погрешность измерения центральных частот АВБС не превышает  $1,67 \times 10^{-3}$  усл. ед. (1,67 МГц), что соответствует величине ошибки определения центральной длины волны АВБС в 0,0134 пм.

Рассмотрим первый частный случай, в котором частоты правых спектральных составляющих обеих АВБС совпадают. Зададим частоты левых спектральных составляющих  $\{\omega_i\} = \{110, 108\}$  усл. ед. относительно любой наперед заданной опорной частоты  $\omega^*$  и адресные частоты  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед., что соответствует 6 и 8 ГГц. Взаимное расположение спектров АВБС для данного случая представлены на рисунке 2.13, а результирующий спектр выходного тока фотоприемника показан на рисунке 2.14.

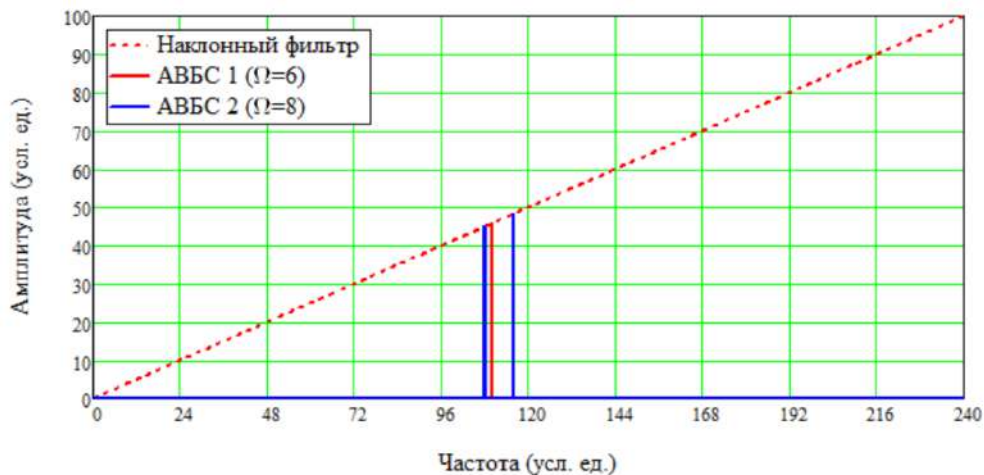


Рисунок 2.13 – Взаимное положение спектров двух АВБС и фильтра с линейной наклонной АЧХ при  $\{\omega_i\} = \{110, 108\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.



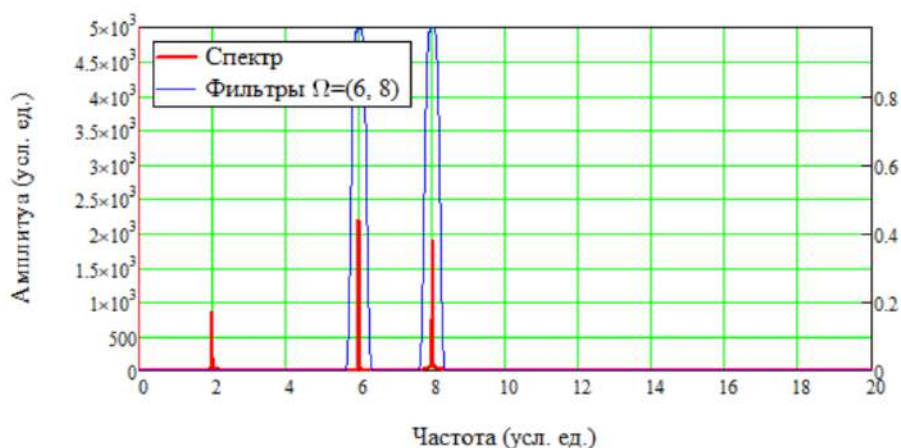


Рисунок 2.14 – Спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника (красная линия), фильтры адресных частот (синяя линия) при  $\{\omega_i\} = \{110, 108\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

Найдем положение каждой АВБС, решив систем уравнений (2.21). Как и в предыдущем случае, в качестве начальных условий зададим положения левых спектральных составляющих с погрешностью 10%.

$$\omega = \begin{pmatrix} 110 \\ 108 \end{pmatrix}, \quad z = \begin{pmatrix} 104,51 \\ 102,61 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 110 \\ 108 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} -3,5162 \times 10^{-3} \\ 1,3027 \times 10^{-3} \end{pmatrix}. \quad (2.24)$$

В (2.24), как и в предыдущем случае,  $\{\omega_i\}$  – точные положения левых составляющих спектров АВБС;  $\{z_i\}$  – начальные приближения;  $\{s_i\}$  – вычисленные значения частот левых составляющих АВБС;  $\{E_i\}$  – абсолютная погрешность вычислений. Как видно из приведенных данных, абсолютная погрешность измерения центральных частот АВБС не превышает  $3,52 \times 10^{-3}$  усл. ед. (3,52 МГц), что соответствует величине ошибки определения центральной длины волны АВБС в 0,0282 пм.

Рассмотрим второй частный случай взаимного положения спектров адресных структур, в котором правая спектральная составляющая первой АВБС и левая составляющая второй АВБС формируют разностную частоту, близкую к адресной частоте первой АВБС. Для моделирования данного частного случая зададим частоты левых составляющих  $\{\omega_i\} = \{110, 122.1\}$  усл. ед. относительно любой наперед заданной опорной частоты  $\omega^*$  и адресные частоты  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед., что соответствует 6 и 8 ГГц. Ситуационное расположение

спектров адресных структур показано на рисунке 2.15. Низкочастотная часть спектра, возникающая на выходе фотоприемника, представлена на рисунке 2.16.

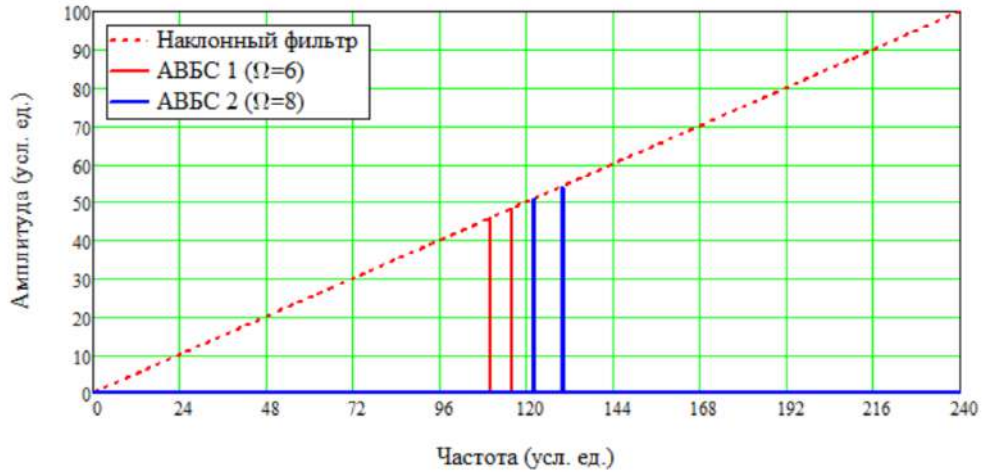


Рисунок 2.15 – Взаимное положение спектров двух АВБС и фильтра с линейной наклонной АЧХ при  $\{\omega_i\} = \{110, 122.1\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

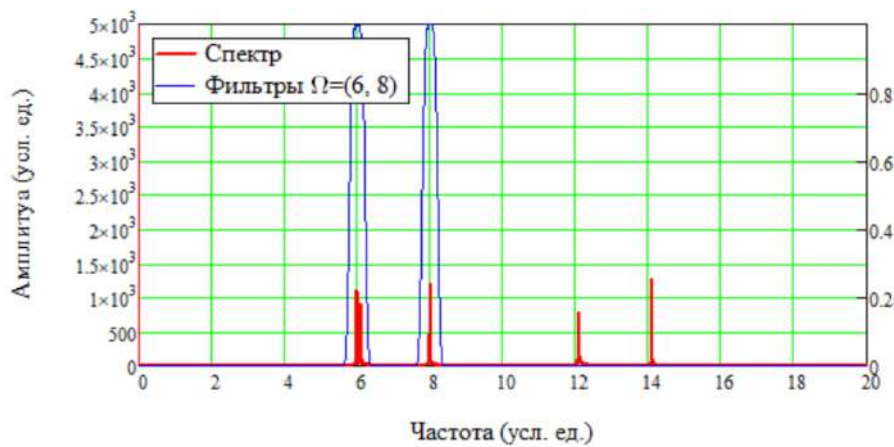


Рисунок 2.16 – Спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника (красная линия), фильтры адресных частот (синяя линия) при  $\{\omega_i\} = \{110, 122.1\}$  усл. ед. и  $\{\Omega_i\} = \{6, 8\}$  усл. ед.

Как видно из рисунка 2.15, в область первого фильтра помимо адресной частоты попадает и гармоника на частоте 6.1 усл. ед., что негативно влияет на точность определения амплитуды биений, так как сигнал фильтрации на адресной частоте будет представлять собой совокупность биений на частотах 6 и 6.1 усл. ед.

Найдем положение левых составляющих согласно методике, использованной в предыдущих случаях:

$$\omega = \begin{pmatrix} 110 \\ 122,1 \end{pmatrix}, \quad z = \begin{pmatrix} 108,35 \\ 120,27 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 110,208 \\ 122,1 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} -0,2081 \\ 9,2431 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

В (2.25)  $\{\omega_i\}$  – истинные положения левых составляющих спектров АВБС;  $\{z_i\}$  – начальные приближения;  $\{s_i\}$  – вычисленные значения;  $\{E_i\}$  – абсолютная погрешность вычислений. В данном случае абсолютная погрешность измерения центральных частот АВБС не превышает 0,2081 усл. ед. (208,1 МГц), что соответствует величине ошибки определения центральной длины волны АВБС в 1,665 пм, что также является высоким показателем точности измерений для сенсорных систем на основе ВБР.

### *2.3.5 Математическая модель неустойчивости положения фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой*

Фильтр с линейной наклонной АЧХ является ключевым элементом системы опроса АВБС, поэтому важно оценить влияние случайного смещения его частоты на погрешность определения центральной частоты АВБС. Согласно выражению (2.14), амплитуда электрического сигнала на выходе фотодетектора на адресной частоте АВБС определяется как удвоенное произведение амплитуд спектральных составляющих АВБС:

$$D(\omega) = 2 \cdot \left( u \cdot \left( \omega - \frac{\Omega}{2} + \varepsilon_F \right) + v \right) \cdot \left( u \cdot \left( \omega + \frac{\Omega}{2} + \varepsilon_F \right) + v \right) + \varepsilon_D, \quad (2.26)$$

где  $\varepsilon_D$  – погрешность определения амплитуды электрического сигнала на фотодетекторе,  $\varepsilon_F$  – случайное смещение по частоте линейной наклонной АЧХ оптического фильтра,  $\omega$  – положение центральной частоты АВБС,  $\Omega$  – адресная частота АВБС,  $u$  и  $v$  – параметры прямой, описывающей линейную АЧХ оптического фильтра. Выражение (2.26) представляет собой квадратное уравнение относительно центральной частоты АВБС  $\omega$ . Оно имеет два корня, один из которых заведомо положительный, второй – заведомо отрицательный.

Отрицательное значение частоты не имеет физического смысла, следовательно, нас интересует только его положительное значение:

$$\omega = \sqrt{\Omega^2 + \frac{2(D + \varepsilon_D)}{u^2}} - 2\varepsilon_F - \Omega - \frac{2v}{u}. \quad (2.27)$$

Как видно из выражения (2.27), определяемое положение центральной частоты АВБС зависит линейно от случайного смещения по частоте наклонной АЧХ оптического фильтра  $\varepsilon_F$ , а от погрешности определения амплитуды электрического сигнала  $\varepsilon_D$  – как функция квадратного корня.

## 2.4 Компьютерное имитационное моделирование опико-электронных схем

### 2.4.1 Моделирование малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС

На рисунке 2.17 показана модель системы на основе двух АВБС-датчиков с разнесенными центральными частотами, реализованная в программном пакете Optiwave OptiSystem 7.0 в соответствии со схемой опроса, приведенной в п. 2.2.1 настоящей работы. Поскольку использование обоих измерительных каналов при опросе АВБС идентично, в рассматриваемой модели с целью упрощения представлен только один измерительный канал. В программе Optiwave OptiGrating 4.2.2 предварительно были получены спектральные характеристики двух АВБС с адресными частотами  $\Omega_1 = 6,05$  ГГц и  $\Omega_2 = 7,9$  ГГц. Исходные параметры обеих АВБС, использованные при моделировании, перечислены в Таблице 2.1. Как видно из приведенных данных, длина каждой АВБС составляет не более 5,7 мм, что соответствует требованиям по длине чувствительного элемента ( $<9,42$  мм) для контроля деформации внешнего кольца подшипника.

Таблица 2.1 – Основные исходные параметры моделей АВБС

Параметр	Значение для АВБС-1	Значение для АВБС-2
Период ВБР $\Lambda$ (центральная длина волны $\lambda_B$ ), нм	528,358 (1550)	528,358 (1550)
Эффективный показатель преломления сердцевинны оптического волокна $n_{eff}$	1,4682	1,4682
Величина наведенного показателя преломления $n_{mod}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Длина однородных участков ВБР $L_1:L_2:L_3$ , мм	2:1,643:2	2:1,498:2
Величина фазового сдвига $\phi$ , рад	$\pi/2$	$\pi/2$

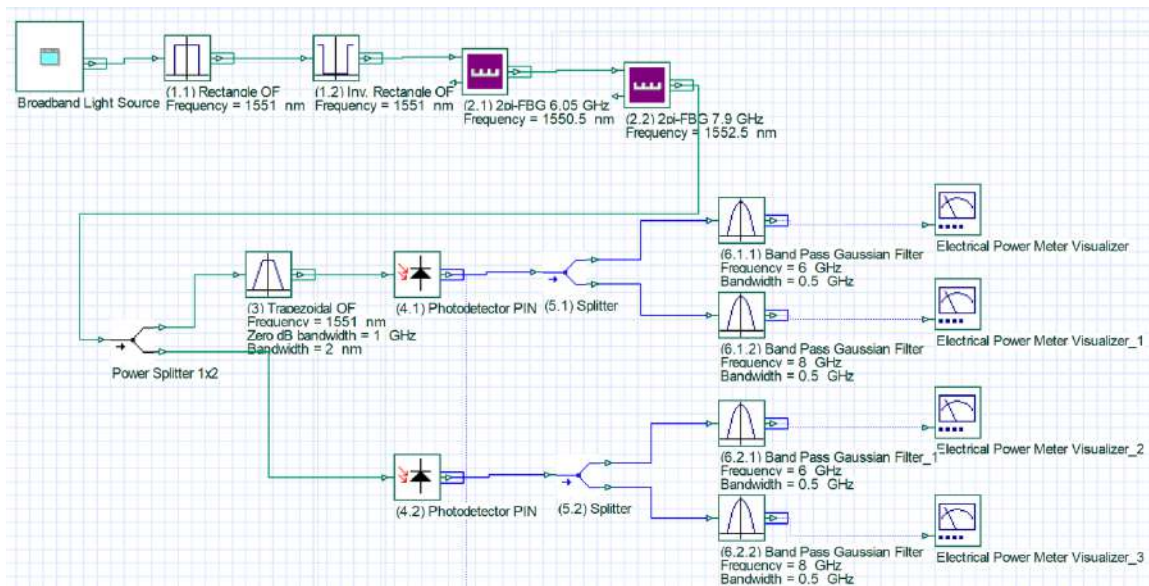


Рисунок 2.17 – Компьютерная модель оптоэлектронной схемы опроса двух АВБС-датчиков с разнесенными центральными частотами.

Широкополосное оптическое излучение от источника проходит через полосовой и режекторный фильтры, преобразующие его в двухдиапазонное излучение, которое затем поступает на две последовательно включенные АВБС с разнесенными центральными длинами волн. Результирующее четырехчастотное излучение с выхода второй АВБС проходит через трапецеидальный фильтр с двумя линейными склонами АЧХ, после чего детектируется фотоприемником.

Смоделируем изменение центральных длин волн обоих датчиков в диапазоне 1 нм, что соответствует диапазону измерения деформации около 830 мкм/м (принимая чувствительность к деформации равной типовому значению

для ВБР в  $1,2 \text{ пм}/(\text{мкм}/\text{м})$  [65]) и измерения температуры в  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (при чувствительности  $10 \text{ пм}/^\circ\text{C}$  [65]). Спектральные характеристики адресных структур для 5 различных положений центральных длин волн каждого датчика, а также АЧХ линейного наклонного фильтра показаны на рисунке 2.18.

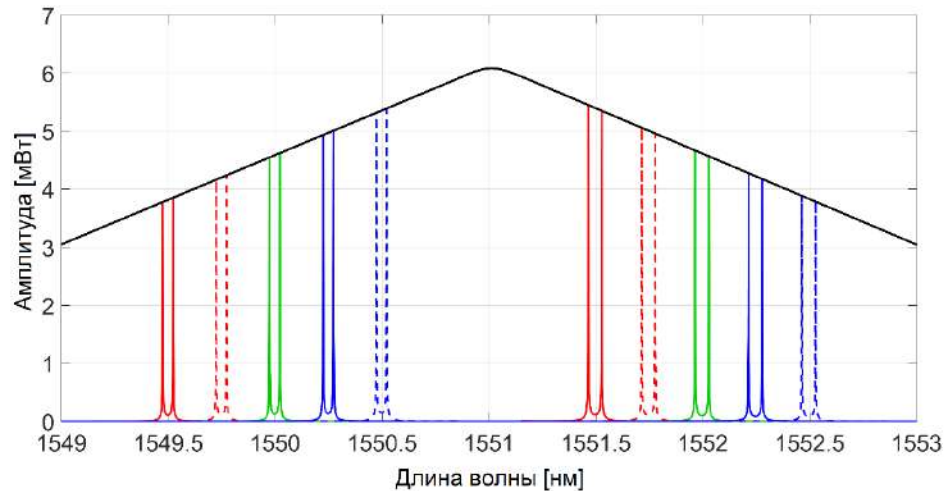


Рисунок 2.18 – Ситуационное взаимное положение спектров АВБС (красные, зеленые, синие линии) и фильтра с линейными склонами АЧХ (черная линия) для 5 случаев центральных длин волн каждой АВБС.

На рисунке 2.19 представлены спектры результирующего электрического сигнала на фотоприемнике измерительного канала, соответствующие приведенным выше положениям центральных длин волн обеих АВБС.

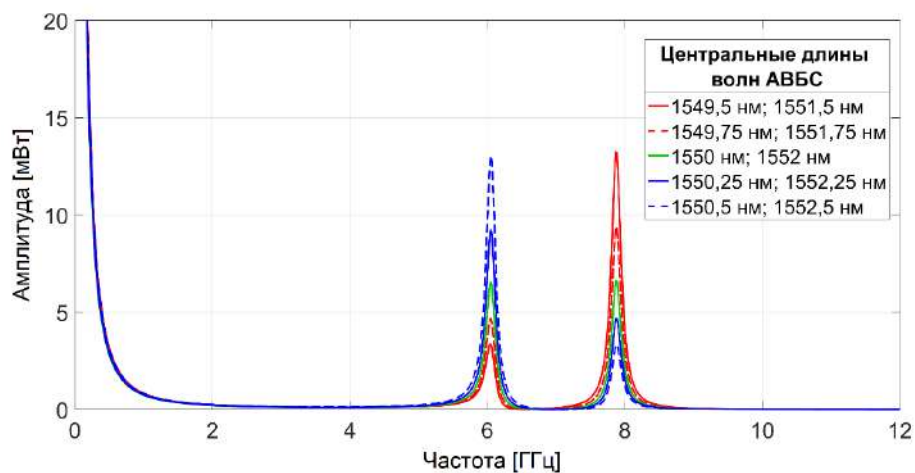


Рисунок 2.19 – Спектры сигнала биений на выходе фотоприемника для 5 случаев положения центральных длин волн АВБС.

Из приведенных результатов компьютерного моделирования видно, что при увеличении центральной длины волны первой АВБС происходит монотонное увеличение амплитуды электрического сигнала фотоприемника на соответствующей адресной частоте, а в случае второй АВБС происходит уменьшение амплитуды сигнала фотоприемника на адресной частоте второй структуры. Графически данные зависимости представлены на рисунке 2.20,а. На рисунке 2.20,б показаны зависимости нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$ , определенного согласно выражению (2.16), для обеих АВБС в диапазоне изменения их центральных длин волн.

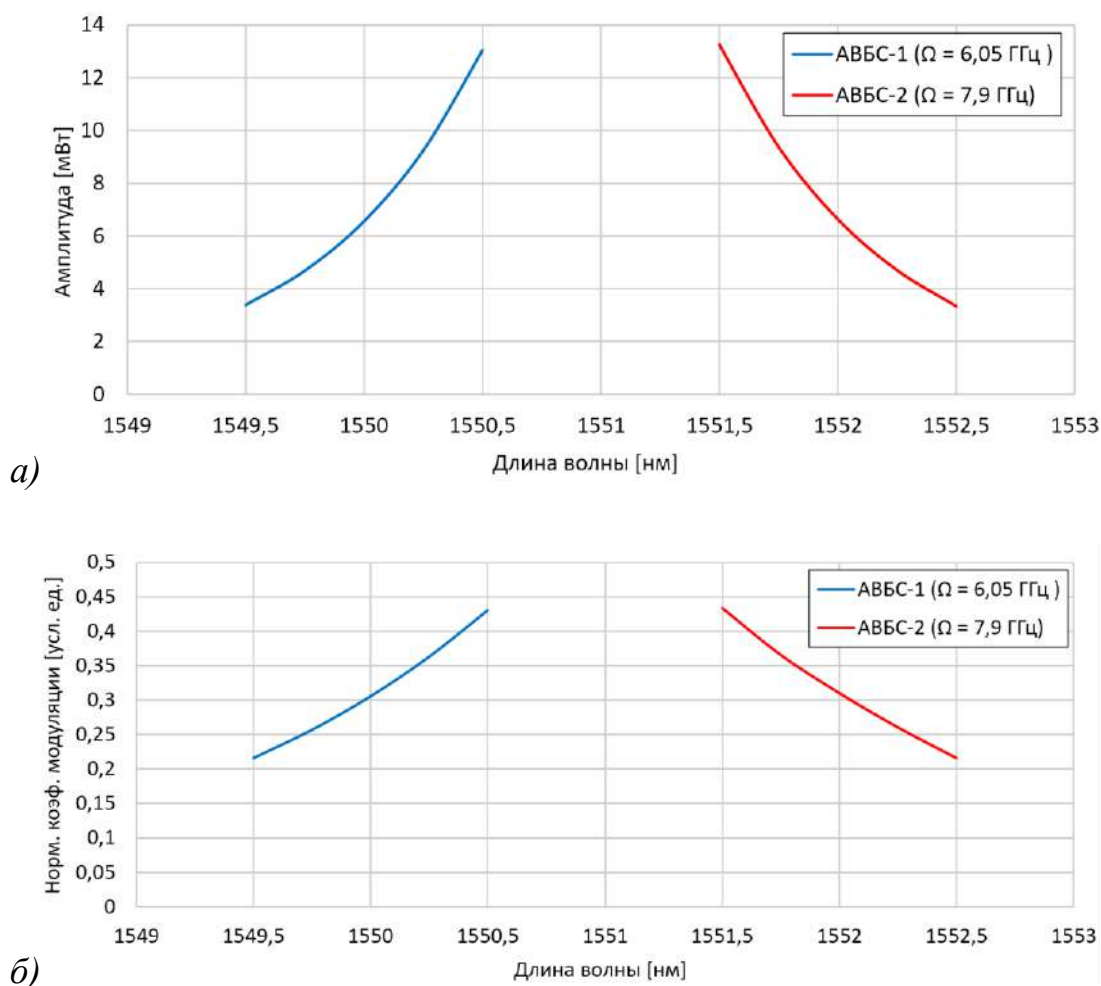


Рисунок 2.20 – Зависимость амплитуды выходного сигнала фотоприемника от изменения центральных длин волн двух АВБС (а); зависимость нормализованного коэффициента модуляции от изменения центральных длин волн двух АВБС (б).



Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность проведения измерений посредством малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами АВБС-датчиков, поскольку она позволяет однозначно определить положение центральной длины волны каждого датчика по нормализованному коэффициенту модуляции.

#### 2.4.2 Моделирование малосенсорной системы с совпадающими центральными частотами АВБС

Рассмотрим модель малосенсорной системы на основе двух АВБС-датчиков с близкими центральными частотами, реализованную в программном пакете Optiwave OptiSystem 7.0 (рисунок 2.21) [66, 67]. Модель соответствует схеме опроса, приведенной в п. 2.2.2 настоящей работы. Как и в предыдущем случае, модель содержит один измерительный и один опорный канал, а в качестве АВБС-датчиков использовались структуры с адресными частотами  $\Omega_1 = 6,05$  ГГц и  $\Omega_2 = 7,9$  ГГц (таблица 2.1), спектральные характеристики которых получены в программе Optiwave OptiGrating 4.2.2.

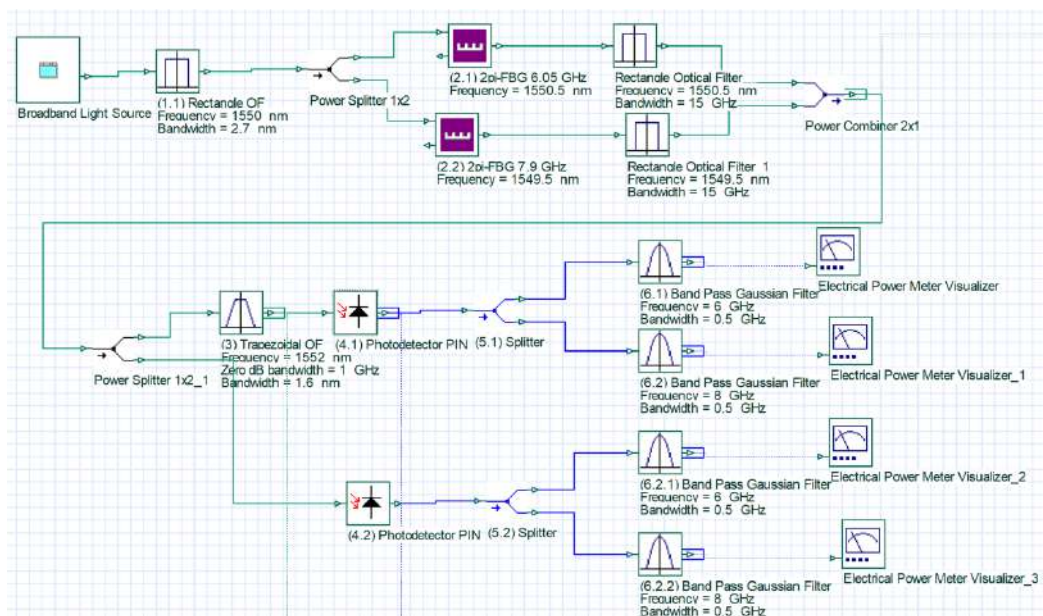


Рисунок 2.21 – Компьютерная модель опико-электронной схемы опроса двух АВБС-датчиков с близкими центральными частотами.



Оптическое излучение от широкополосного источника проходит через полосовой фильтр, полоса пропускания которого соответствует диапазону изменения центральных длин волн датчиков. Излучение с выхода полосового фильтра поступает на две АВБС с близкими центральными длинами волн, включенные параллельно с помощью волоконно-оптического разветвителя и объединителя. Результирующее четырехчастотное излучение вновь делится на два канала (измерительный и опорный) с помощью волоконно-оптического делителя. В первом канале излучение поступает на один из склонов трапецеидального фильтра, после чего детектируется фотоприемником. В опорном канале излучение поступает на фотоприемник в неизменном виде. Электрический сигнал биений фотодетектора подвергается фильтрации на адресных частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  в обоих каналах.

Аналогично предыдущему случаю, проведем моделирование изменения центральных длин волн обоих датчиков в диапазоне 1 нм, что соответствует диапазону деформации около 830 мкм/м и температуры в 100 °С [65]. Спектральные характеристики адресных структур для 5 различных положений центральных длин волн каждого датчика, а также АЧХ линейного наклонного фильтра показаны на рисунке 2.22.

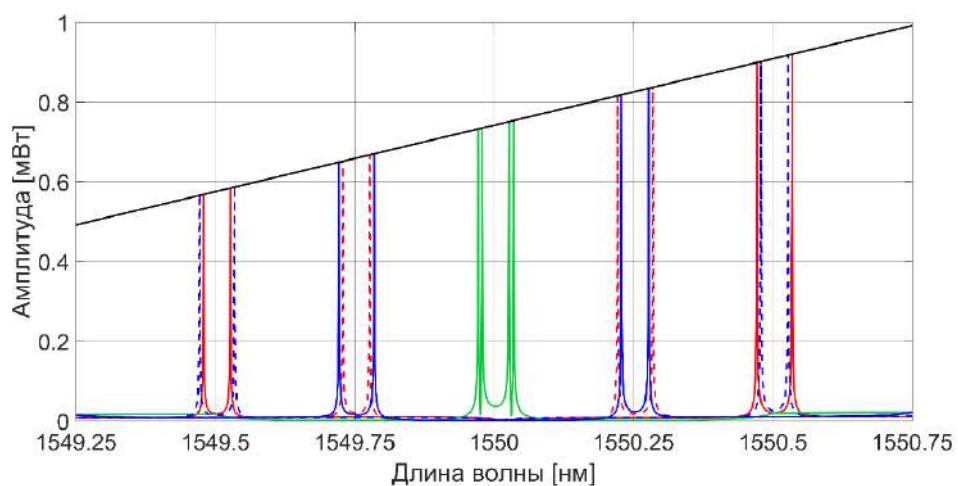


Рисунок 2.22 – Ситуационное взаимное положение спектров АВБС (красные, зеленые, синие линии) и фильтра с линейными склонами АЧХ (черная линия) для 5 случаев центральных длин волн каждой АВБС.

Спектры электрического сигнала биений на фотодетекторе измерительного канала, соответствующие приведенным выше положениям центральных длин волн обеих АВБС, показаны на рисунке 2.23.

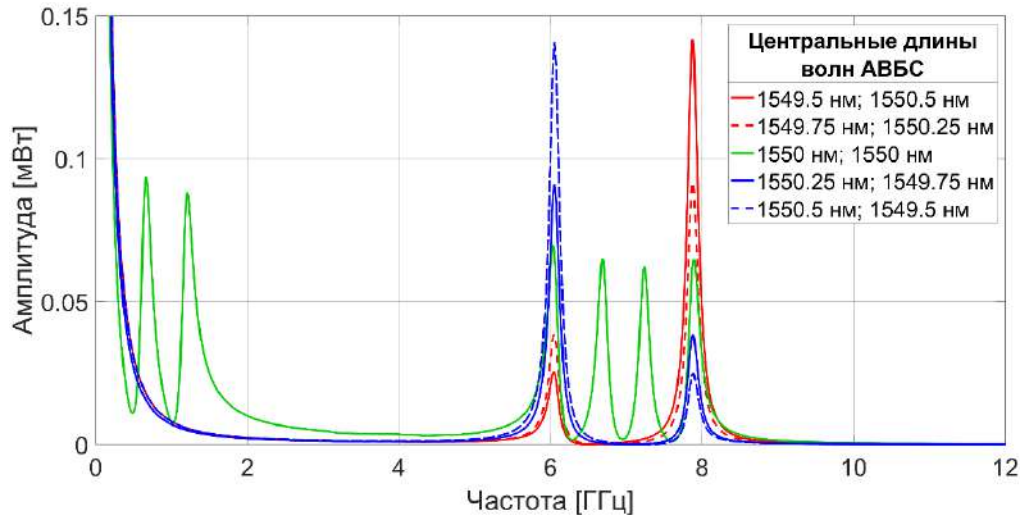


Рисунок 2.23 – Спектры сигнала биений на выходе фотоприемника для 5 случаев положения центральных длин волн АВБС.

Из приведенных результатов компьютерного моделирования видно, что при увеличении центральных длин волн обеих АВБС происходит монотонное увеличение соответствующих амплитуд электрического сигнала фотоприемника на адресных частотах. Графически данные зависимости представлены на рисунке 2.24,а. Следует отметить, что в случае, когда центральные длины волн АВБС совпадают (зеленая линия на рисунках 2.22 – 2.23), в спектре сигнала биений на фотоприемнике формируется шесть составляющих, в результате чего возрастают требования к добротности полосовых фильтров адресных частот. На рисунке 2.24,б показаны зависимости нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$ , определенного согласно выражению (2.16), для обеих АВБС в диапазоне изменения их центральных длин волн.

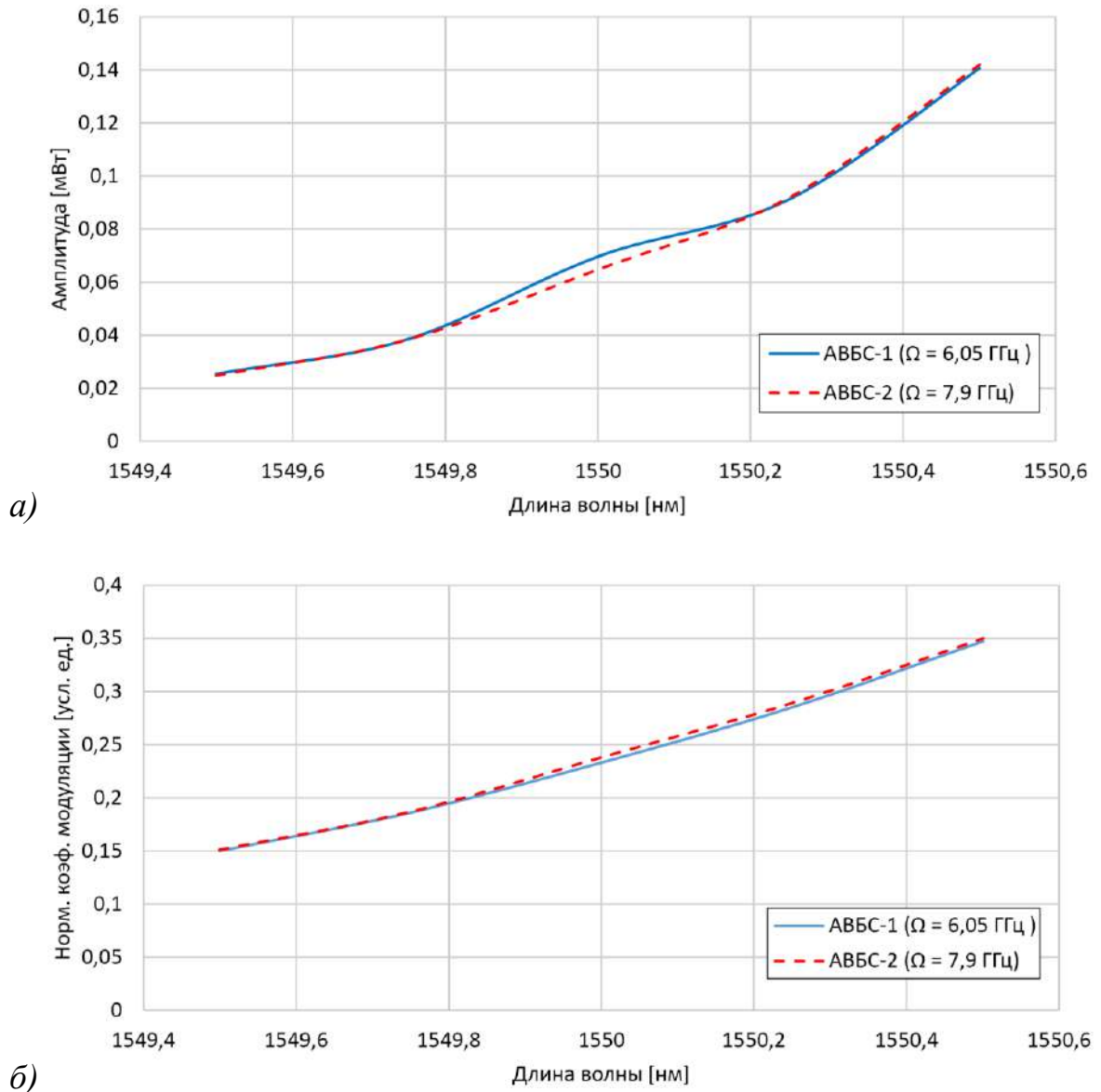


Рисунок 2.24 – Зависимость амплитуды выходного сигнала фотоприемника от изменения центральных длин волн двух АВБС с близкими центральными длинами волн (а); зависимость нормализованного коэффициента модуляции от изменения центральных длин волн двух АВБС (б).

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность проведения измерений посредством малосенсорной системы с близкими центральными частотами АВБС-датчиков, поскольку она позволяет однозначно определить положение центральных длин волн всех датчиков по нормализованному коэффициенту модуляции.

## 2.5 Выводы по главе

В настоящей главе разработаны оптико-электронные структурные схемы малосенсорных систем в двух конфигурациях: с близкими и разнесенными центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур, позволяющих контролировать деформацию внешнего кольца подшипника в одной точке с компенсацией температурного воздействия. Разработанные оптико-электронные схемы реализуют метод радиофотонного опроса, заключающийся в том, что прохождение широкополосного излучения через волоконную брэгговскую структуру с дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами (датчик) формирует двухчастотное оптическое излучение, при прохождении которого через фильтр с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой и последующем приеме этого излучения на фотодетекторе формируется сигнал биений на разностной частоте оптических составляющих, а амплитуда которого несет информацию о сдвиге центральной частоты брэгговской структуры. Предложено использование в схеме двух измерительных каналов, что позволяет компенсировать температурный дрейф оптических фильтров с наклонными АЧХ.

Введено понятие нормализованного коэффициента модуляции, который связывает амплитуду выходного тока фотоприемника на адресной частоте со смещением центральной частоты адресной структуры относительно фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой.

Разработана математическая модель, описывающая выходной ток фотоприемника, выполнено численное и имитационное моделирование малосенсорных измерительных систем, по результатам которых показана возможность однозначного определения центральных частот датчиков деформации и температуры по нормализованному коэффициенту модуляции. Разработана математическая модель влияния дрейфа центральной частоты фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, позволяющая дать оценки его вклада в погрешность определения центральной частоты адресной

структуры. Таким образом, решена задача в малосенсорной постановке – контроля деформации в одной точке внешнего кольца ступичного подшипника с контролем и компенсацией температуры.

### ГЛАВА 3 МНОГОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В главе решена задача многосенсорного контроля деформации ступичных подшипников, которая включает в себя контроль деформации в шести точках внешнего кольца подшипника с компенсацией температурного воздействия на датчики деформации. Разработана оптико-электронная схема опроса многосенсорной системы, позволяющая в том числе компенсировать температурный дрейф оптического фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Проведено компьютерное моделирование многосенсорной оптико-электронной измерительной схемы. Выявлены закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур в зависимости от длин однородных участков, величины наведенного показателя преломления и величин дискретных фазовых сдвигов.

В первом разделе главы сформулирована постановка задачи многосенсорного контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств, что реализуется посредством шести датчиков деформации и одного датчика температуры, который используется для температурной компенсации показаний датчиков деформации.

Во втором разделе главы представлена оптико-электронная схема многосенсорной системы с близкими центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур.

В третьем разделе главы представлена математическая модель и результаты численного моделирования измерительного преобразования многосенсорной системы на основе адресных волоконных брэгговских структур, выполнена оценка погрешности определения положения центральных частот датчиков.

В четвертом разделе главы приведены результаты компьютерного имитационного моделирования многосенсорной системы, которые подтверждают возможность однозначного определения положений центральных длин волн всех датчиков по нормализованному коэффициенту модуляции.

В пятом разделе главы рассмотрены вопросы применения многоадресных волоконных брэгговских структур, использование которых может позволить повысить точность измерений в многосенсорных системах контроля.

Выводы по главе представлены в шестом разделе.

### **3.1 Постановка задачи многосенсорного контроля деформации подшипников**

Контроль деформации ступичного подшипника автомобиля в единственной точке, реализуемый малосенсорными измерительными системами, обеспечивает возможность анализа нагрузки на подшипник в одном, – как правило продольном, – направлении. Однако существуют задачи, в которых контроль нагрузок, действующих на подшипник, необходимо осуществлять в нескольких осях одновременно – продольной, поперечной и вертикальной, что особенно важно для повышения эффективности систем динамической стабилизации. Так, в работах [15, 23, 26, 30, 33] использовались шесть датчиков деформации (установленные на внешнем кольце подшипника на угловом расстоянии  $60^\circ$  относительно друг друга) для вычисления действующих на подшипник продольной, поперечной и вертикальной нагрузок. Рассмотрим схему расположения датчиков деформации, приведенную на рисунке 3.1 [33].

Таким образом, в качестве многосенсорной системы для контроля параметров ступичного подшипника автомобиля принимается система из шести датчиков деформации и одного датчика температуры. Центры датчиков деформации расположены вдоль внутреннего кольца подшипника под углом  $60^\circ$  относительно друг друга. Согласно результатам исследований других авторов [93], внешняя температура возле всех датчиков деформации в многосенсорной

системе одинакова, что обуславливает возможность использования одного датчика температуры, который изолирован от напряжений деформации и, как было сказано выше, включен в систему для компенсации влияния температуры на показания датчиков деформации. Практические рекомендации по установке датчика температуры на внешнем кольце подшипника даны в Главе 4 настоящей работы.

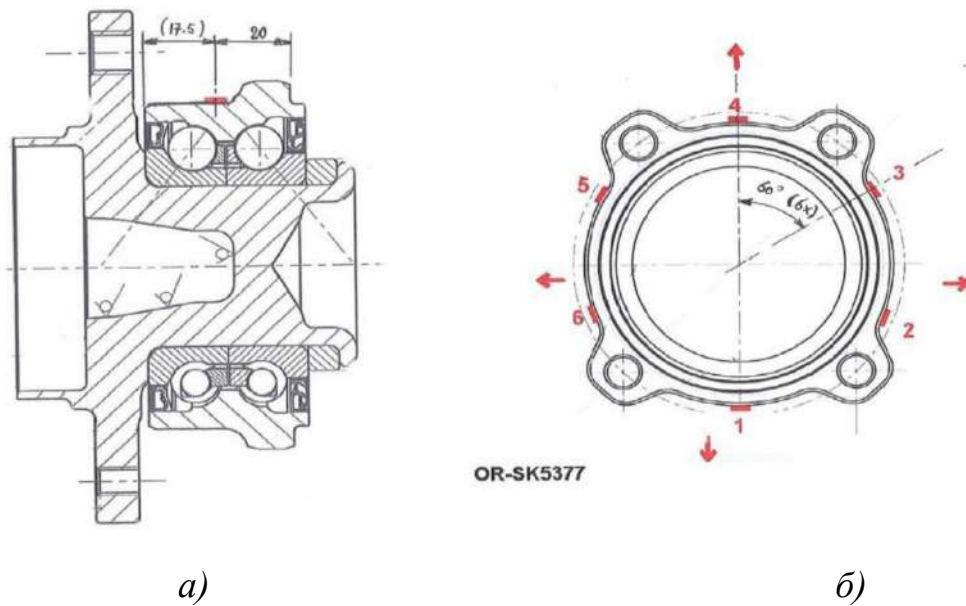


Рисунок 3.1 – Схема установки датчиков деформации (1 – 6) на ступичный подшипник автомобиля (многосенсорный вариант) [33]:

а) поперечное сечение; б) вид спереди

Исходя из требований, определенных в Главе 1, диапазон измерения деформации внешнего кольца подшипника принимается равным от 0 до 800 мкм/м, с разрешающей способностью не превышающей 1 мкм/м, что соответствует диапазону измерения продольной нагрузки от  $-10$  до 10 кН, вертикальной от 0 до 10 кН и поперечной от  $-4$  до 10 кН. Требуемая частота измерений составляет более 300 Гц, длина датчика деформации не превышает 9,42 мм, при диапазоне рабочих температур от  $-30$  до 50 °С.

Поставленная задача решается на базе многосенсорной измерительной системы, содержащей семь (шесть датчиков деформации и один датчик температуры) волоконно-оптических датчиков. Массив датчиков формируется из



адресных волоконных брэгговских структур с разными адресными и одинаковыми или разными центральными частотами.

### 3.2 Оптико-электронная схема многосенсорной системы

Объединения оптических измерительных каналов на одном фотоприемнике с предварительным преобразованием в оптическом частотно-селективном фильтре с наклонной амплитудно-частотной характеристикой позволяет унифицировать и снизить количество номенклатуры элементной базы, а также упростить задачу температурной стабилизации. Это повышает простоту и стабильность измерительной системы в целом, что в свою очередь повышает технико-экономические характеристики систем многосенсорного контроля.

Как было показано в главе 2, наличие адресов у датчиков и возможность выделения показаний каждого датчика в отдельности из мультипликативного отклика обеспечивает возможность объединения всех датчиков в одном оптическом канале. При этом, в отличие от малосенсорных систем, частотное разделение отклика от датчиков на разные склоны фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой становится нецелесообразным. Каждая АВБС в многосенсорной системе имеет собственную уникальную адресную частоту, а центральная частота АВБС датчика может быть выбрана произвольно.

В оптико-электронной схеме, приведенной на рисунке 3.2, предложен единый источник широкополосного оптического излучения 1, частотный диапазон излучения которого эквивалентен диапазону изменения частот оптических компонент всех АВБС в массиве. Отметим, что оптический источник выбирается из требований обеспечения достаточной мощности излучения, которое позволяет обеспечить требуемое соотношение сигнал/λ при его делении на семь оптических трактов. Вместе с тем, существенное повышение мощности источника оптического излучения может привести к возникновению нелинейных эффектов при распространении света в волокне. Требования к выбору

источника излучения приведены в главе 4, посвященной практическим рекомендациям по проектированию измерительных систем. Исходное оптическое излучение (диаграмма а) делится на семь оптических трактов волоконно-оптическим разветвителем 9. В каждом из трактов расположен АВБС датчик с уникальной, – не совпадающей с другими датчиками в системе, – адресной частотой. Прошедшее через АВБС (2.1–2.7) оптическое излучение объединяется в волоконно-оптическом сумматоре 10 (диаграмма с), после чего оптическое излучение делится на три (два измерительных и один опорный) канала волоконно-оптическим разветвителем 6.

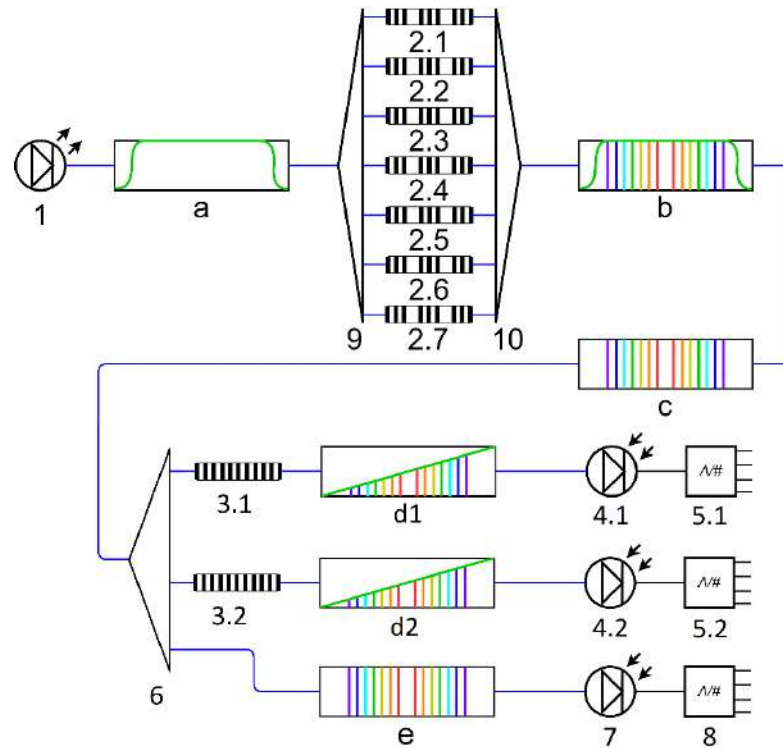


Рисунок 3.2 – Оптико-электронная схема многосенсорной системы контроля деформации подшипника

В каждом из измерительных каналов оптический сигнал пропускается через фильтр с линейной наклонной АЧХ – 3.1 и 3.2, где амплитуды спектральных составляющих сигнала асимметрично частотно-селективно меняются (диаграммы d1 и d2). После чего сигнал принимается на измерительных фотоприемниках – 4.1 и 4.2, сигнал после которых принимается на аналого-

цифровых преобразователях (АЦП) – 5.1 и 5.2. В опорном канале оптическое излучение (диаграмма е) поступает напрямую на фотодетектор – 7, сигнал с выхода которого принимается АЦП – 8. Благодаря наличию опорного канала осуществляется нормировка амплитуд в измерительном канале, что позволяет нивелировать (а в ряде случаев и полностью исключить) влияние флуктуаций оптической мощности источника излучения и подводящих оптических линий на амплитуду выходного сигнала в измерительном фотодетекторе. и применять нормализованный коэффициент модуляции, введенный в Главе 2, как единственный измеряемый параметр для малосенсорных измерительных систем. Как и в случае малосенсорных систем, в измерительных каналах используются оптические фильтры с различными известными характеристиками температурной чувствительности, что позволяет учесть влияние их температурного дрейфа на определение центральных частот адресных структур (методика приведена в Главе 4).

### **3.3 Математическое моделирование измерительного преобразования в случае многосенсорной системы**

Рассмотрим модель многосенсорной системы контроля деформации на основе АВБС с радиофотонным опросом. Спектральная характеристика полигармонического оптического сигнала, поступающего на фотоприемник измерительного канала, приведена на рисунке 3.3, где одинаковым цветом обозначены спектральные составляющие каждой АВБС, а пунктирной линией приведена амплитудно-частотная характеристика фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, выполняющего роль асимметричного частотно-селективного преобразования. Как видно из рисунка 3.3, амплитуды спектральных компонент асимметрично меняются после прохождения излучения через фильтр с линейной наклонной АЧХ, параметры которого известны.

Амплитуды составляющих оптического спектра  $A_i$  – левой и  $B_i$  – правой частотных компонент АВБС ( $i = 1, N$ ;  $N$  – количество датчиков в системе, в нашем случае  $N = 7$ ) зависят от параметров фильтра с линейной наклонной АЧХ:

$$A_i(\omega_i) = u \cdot \omega_i + v, \quad B_i(\omega_i) = u \cdot (\omega_i + \Omega_i) + v, \quad i = 1, N, \quad (3.1)$$

где  $u$  и  $v$  – угловой коэффициент и свободный член линейной зависимости, описывающей АЧХ частотно-селективного оптического фильтра.

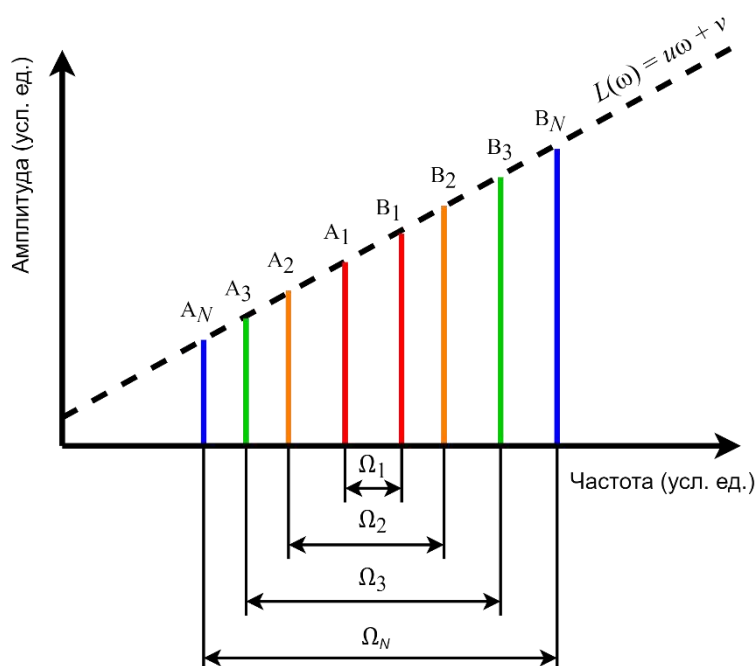


Рисунок 3.3 – Спектральная характеристика оптического сигнала от  $N$  АВБС перед фотоприемником.

В рамках численного моделирования рассматривалась многосенсорная система с семью АВБС-датчиками, адресные частоты которых в безразмерных величинах приняты равными  $\Omega = \{\Omega_i\} = \{2,65; 3,85; 4,7; 6,12; 7,9; 11,27; 13,3\}$  усл. ед., где за характерную размерную частоту задачи была выбрана частота, численно равная 1 ГГц. Следовательно, выбранный массив адресных частот соответствует массиву адресных частот в размерных величинах  $\{2,65; 3,85; 4,7; 6,12; 7,9; 11,27; 13,3\}$  ГГц. Примем положение левых спектральных составляющих АВБС  $\omega = \{\omega_i\} = \{124; 123,5; 123,1; 122,4; 121,3; 120; 119\}$  усл.

ед. относительно любой наперед заданной опорной частоты  $\omega^*$ . Взаимное расположение АВБС и фильтра с линейной наклонной АЧХ показано на рисунке 3.4.

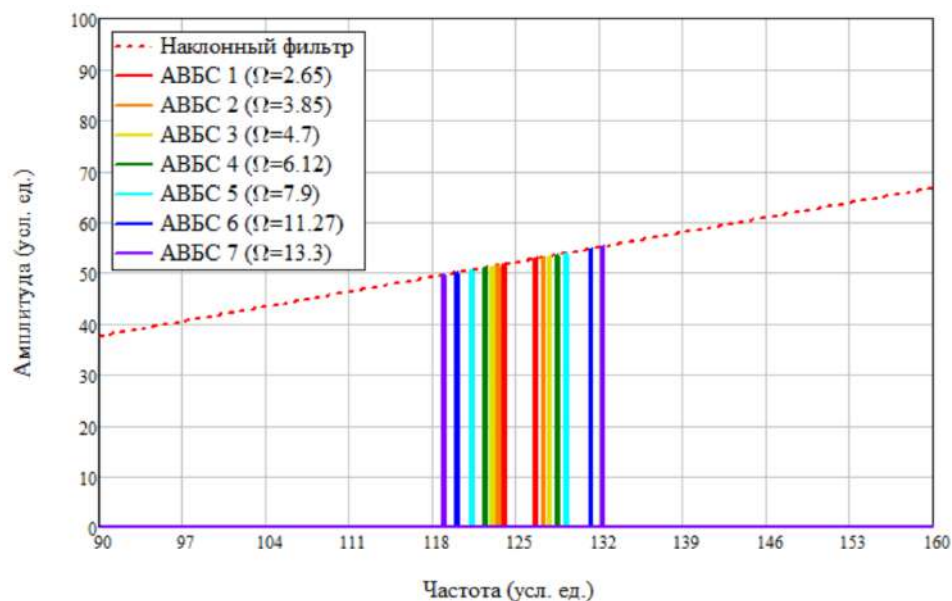


Рисунок 3.4 – Взаимное положение спектров семи АВБС и фильтра с линейной наклонной АЧХ

Как было сказано в предыдущей главе, общий оптический сигнал от массива АВБС мультиплексированных в один канал при попадании на фотоприемник пропорционален квадрату модуля суммы световых откликов от всех датчиков:

$$F(t) = \left| \sum_{i=1}^N (A_i \exp(j\omega_i t) + B_i \exp(j(\omega_i + \Omega_i)t)) \right|^2, i = 1, N. \quad (3.2)$$

Мультиплексирование светового отклика от большого количества АВБС приводит к появлению множества перекрестных биений оптических составляющих АВБС, что несколько усложняет задачу определения центральных частот АВБС. Данную задачу можно решать только путем одновременного определения амплитуд всех частотных составляющих, а значит и положений, всех АВБС, включенных в измерительную систему, с помощью параллельной частотной фильтрации результирующего мультипликативного светового

отклика на всех адресных частотах АВБС, которые входят в измерительную систему.

Преобразовав (3.2), получим выражение, описывающее результат частотной фильтрации выходного сигнала фотоприемника на частоте  $\Omega_j$ :

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left[ \begin{aligned} & A_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ & A_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ & B_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ & B_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t] \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k) \end{aligned} \right] = \quad (3.3)$$

$$= D_j \cos(\Omega_j + \varphi_j), \forall j = \overline{1, N},$$

где  $D_j$  – амплитуда выходного тока фотоприемника на фильтруемой адресной частоте  $\Omega_j$ , функция  $F(\Omega, \omega)$  описывает полосовой фильтр электрического сигнала на адресной частоте  $\Omega$ , представленный в виде фильтра Гаусса. На рисунке 3.5 представлен пример спектра электрического сигнала после фотоприемника (красная линия) и полосовые фильтры на адресных частотах семи АВБС (синие линии) для одного из случаев численного моделирования.

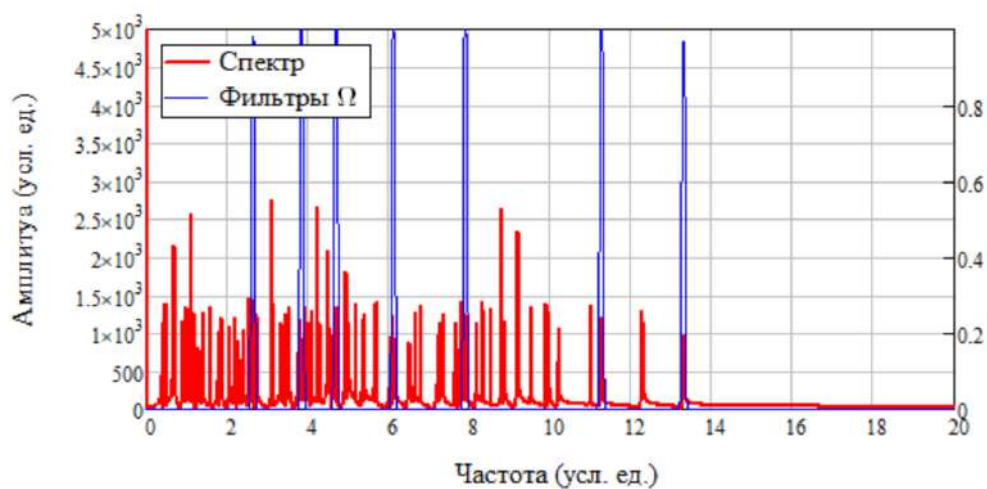


Рисунок 3.5 – Спектр выходного электрического сигнала после фотоприемника (красная линия), фильтры адресных частот (синяя линия).

В выражении (3.3) неизвестными являются амплитуды спектральных составляющих адресных структур  $A_j$  и  $B_j$ . Однако, существует однозначная связь между  $A_j$  и  $B_j$ , согласно (3.1):

$$B_j = A_j + u \cdot \Omega_j, \quad \forall j = \overline{1, N}. \quad (3.4)$$

Таким образом, соотношения (3.3) представляют собой систему уравнений для нахождения неизвестных  $A_j$  и  $B_j$  по измеренным значениям  $D_j$  и угловому коэффициенту  $u$  линейной АЧХ оптического фильтра, которую можно переписать в виде:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left[ \begin{array}{l} A_i A_k \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ A_i (A_k + u_k \Omega_k) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ A_k (A_i + u_i \Omega_i) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ (A_i + u_i \Omega_i)(A_k + u_k \Omega_k) \cdot F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k) \end{array} \right] = D_j, \quad (3.5)$$

$$\forall j = \overline{1, N},$$

относительно  $A_j$ .

Найдем решение системы уравнений (3.5) численным методом (итерационным методом Левенберга-Марквардта) относительно  $\omega_i$ , подставив значения  $A_j$  по выражению (3.1) и приняв в качестве начальных значений  $\{\omega_i\}$  значения, вычисленные ранее с некой погрешностью в 1%. Решением системы уравнений (3.5) является вектор  $\omega = \{\omega_i\}$  ( $i = \overline{1, N}$ ) положений левых спектральных составляющих оптического отклика АВБС:

$$\omega = \begin{pmatrix} 124 \\ 123,5 \\ 123,1 \\ 122,4 \\ 121,3 \\ 120 \\ 119 \end{pmatrix}, \quad z = \begin{pmatrix} 123,784 \\ 123,285 \\ 122,886 \\ 122,187 \\ 121,089 \\ 119,791 \\ 118,793 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 123,987 \\ 123,487 \\ 123,088 \\ 122,392 \\ 121,287 \\ 119,987 \\ 118,99 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 0,013 \\ 0,013 \\ 0,012 \\ 0,008 \\ 0,013 \\ 0,013 \\ 0,01 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

В (3.6) вектор  $\{\omega_i\}$  обозначает точные положения левых спектральных составляющих АВБС;  $\{z_i\}$  – начальные приближения, определенные случайным образом с погрешностью до 1% от точных значений; вектор  $\{s_i\}$  – вычисленные значения положений левых спектральных составляющих АВБС;  $\{E_i\}$  – абсолютная погрешность вычислений.

Как видно из приведенных данных, абсолютная погрешность определения положения левых спектральных компонент АВБС (и, соответственно, центральных частот АВБС) составляет не более 0,013 усл. ед. (13 МГц), что

соответствует величине ошибки определения брэгговской длины волны в 0,104 нм, что свидетельствует об очень высокой точности измерений для таких систем. Следует отметить, что при некоторых взаимных положениях спектров АВБС погрешность определения центральных длин волн может повышаться до 2 нм, что также является высоким показателем точности.

### 3.4 Имитационное моделирование многосенсорной системы

В программном пакете Optiwave OptiSystem 7.0 было проведено имитационное моделирование опто-электронной схемы контроля деформации подшипника для многосенсорной системы. На рисунке 3.6 представлена эквивалентная опто-электронная схема опроса семи АВБС-датчиков (опорный канал на схеме не показан, но при моделировании обязательно учитывался). Как и при моделировании малосенсорных систем, в данной схеме реализован лишь один измерительный канал, поскольку второй канал функционирует идентично.

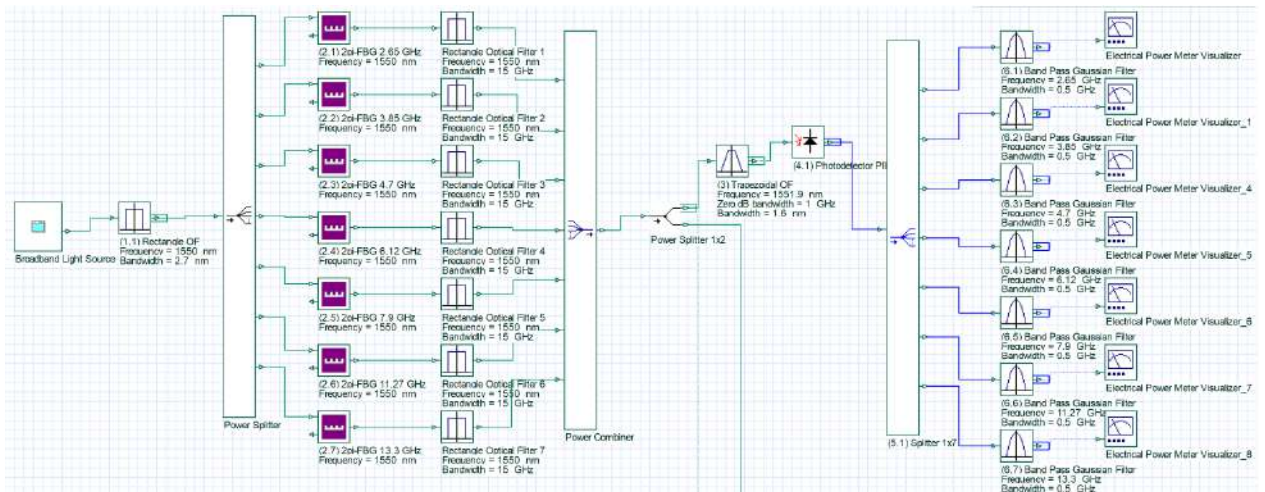


Рисунок 3.6 – Модель опто-электронной схемы опроса семи АВБС в программном пакете OptiSystem 7.0 (опорный канал не показан)

Спектральные модели АВБС-датчиков были предварительно построены в программном пакете OptiGrating 4.2.2. Адресные частоты датчиков



составляли, соответственно,  $\Omega_1 = 2,65$  ГГц,  $\Omega_2 = 3,85$  ГГц,  $\Omega_3 = 4,7$  ГГц,  $\Omega_4 = 6,12$  ГГц,  $\Omega_5 = 7,9$  ГГц,  $\Omega_6 = 11,27$  ГГц и  $\Omega_7 = 13,3$  ГГц. Параметры моделирования АВБС представлены в таблице 3.1. Как видно из приведенных данных, длина каждой АВБС составляет не более 6,2 мм, что соответствует требованиям по длине чувствительного элемента ( $<9,42$  мм), осуществляющего контроль деформации внешнего кольца подшипника.

Таблица 3.1 – Основные исходные параметры массива АВБС

№ АВБС	Период ВБР $\Lambda$ (центр. длина волны $\lambda_B$ ), нм	Эфф. показатель преломления сердцевины ОВ $n_{\text{eff}}$	Величина наведенного показателя преломления $n_{\text{mod}}$	Длина однородных участков ВБР $L_1:L_2:L_3$ , мм	Величина фазового сдвига $\varphi$ , рад
1	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:2,124:2	$\pi/2$
2	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,895:2	$\pi/2$
3	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,782:2	$\pi/2$
4	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,638:2	$\pi/2$
5	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,452:2	$\pi/2$
6	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,302:2	$\pi/2$
7	528,358 (1550)	1,4682	$7 \cdot 10^{-4}$	2:1,212:2	$\pi/2$

Модель оптико-электронной схемы включает в себя широкополосный источник оптического излучения, ширина полосы которого ограничивается полосовым фильтром до диапазона изменений длин волн спектральных составляющих АВБС. Излучение с выхода полосового фильтра разделяется на семь оптических трактов посредством волоконно-оптического разветвителя, в каждом из трактов излучение проходит через АВБС, а затем поступает на планарный объединитель, где формируется результирующее излучение, состоящее из 14 сверхузкополосных компонент. Далее результирующее излучение вновь делится на два канала, измерительный и опорный (на рисунке 3.6 не показан, отвод на опорный канал осуществляется с «Power Splitter 1x2» вниз). В измерительном канале излучение поступает на один из склонов трапецеидального фильтра, после чего принимается на фотодетекторе. В опорном канале излучение поступает на фотодетектор в неизменном виде. Электрический сигнал биений обоих фотоприемников фильтруется на адресных частотах АВБС.

Спектральная характеристика результирующего сигнала в измерительном канале, полученная в результате моделирования, а также АЧХ линейного наклонного фильтра представлены на рисунке 3.7.

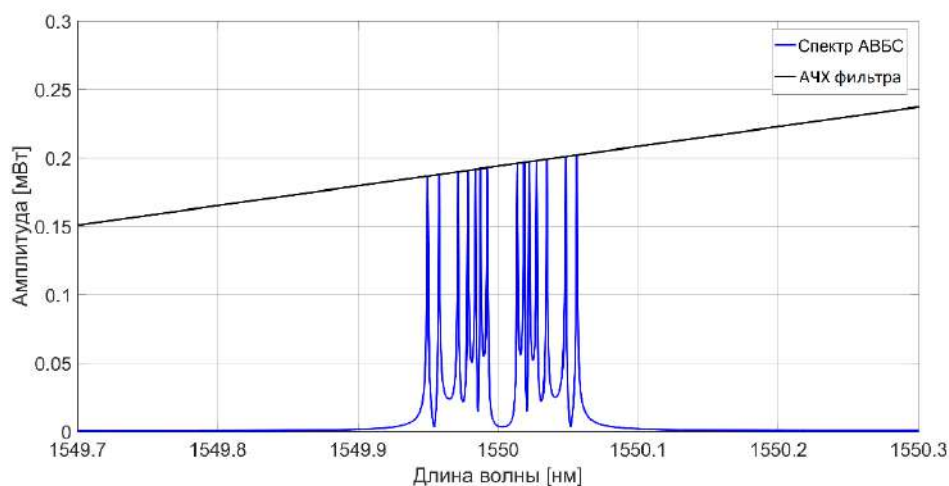


Рисунок 3.7 – Спектр результирующего сигнала от семи АВБС в оптическом диапазоне (синяя линия) и АЧХ линейного склона оптического фильтра (черная линия).

Было проведено моделирование изменения центральной длины волны четвертого АВБС-датчика с адресной частотой  $\Omega_4 = 6,12$  ГГц в диапазоне длин волн 1 нм, что соответствует диапазону деформации около 830 мкм/м или температуры в диапазоне 100 °С [65]. При этом центральные длины волн остальных АВБС предполагались неизменными и составляли 1550 нм.

Спектр выходного сигнала фотоприемника измерительного канала для пяти ситуационных случаев положения центральной длины волны четвертой АВБС, совместно с АЧХ полосовых фильтров для адресных частот, показан на рисунке 3.8.

Из приведенных результатов компьютерного моделирования видно, что при увеличении центральной длины волны четвертой АВБС происходит монотонное увеличение соответствующей амплитуды электрического сигнала фотоприемника на частоте  $\Omega_4 = 6,12$  ГГц. Следует отметить, что амплитуда сигнала на остальных адресных частотах оставалась неизменной во всех рассмотренных случаях положения спектра четвертой АВБС, кроме случая

совпадения центральных длин волн АВБС, что обусловлено увеличением амплитуды биений на частотах, близких или совпадающих с адресными частотами первой, второй, третьей и пятой структур.

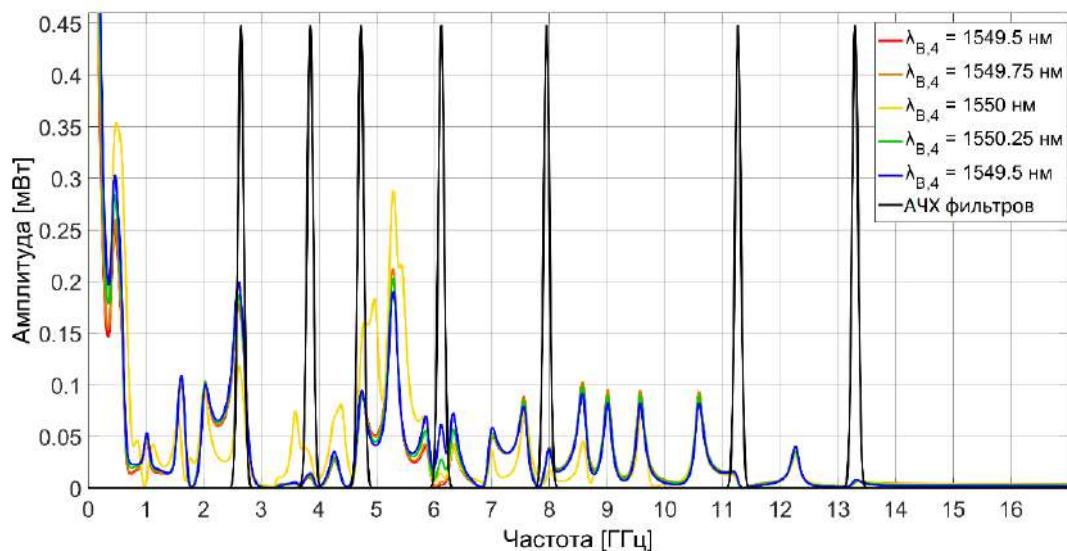
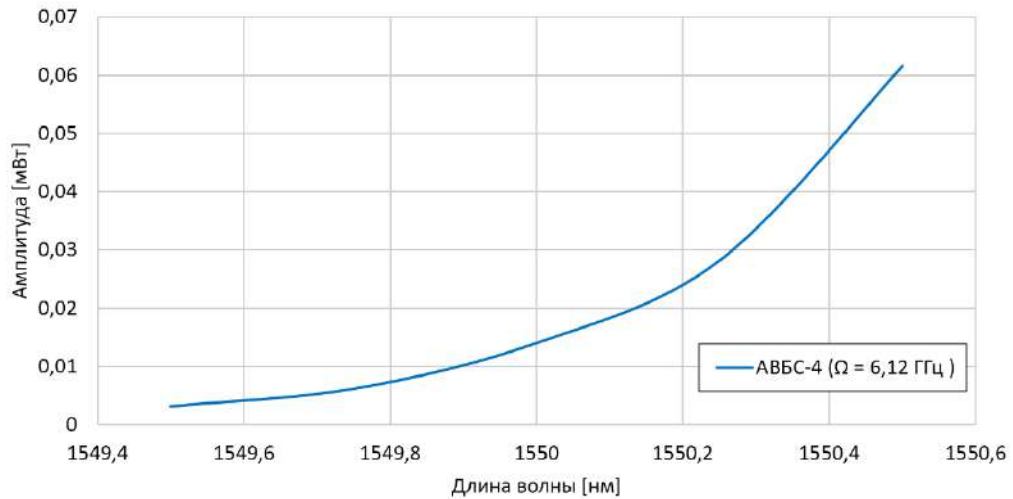
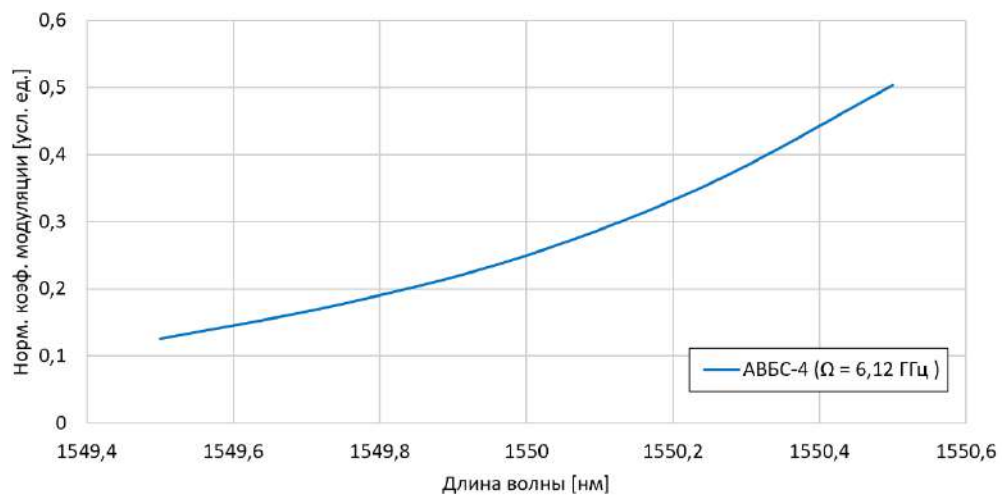


Рисунок 3.8 – Спектры сигнала биений на выходе фотоприемника и АЧХ фильтров адресных частот для 5 случаев положения центральных длин волн АВБС

На рисунке 3.9,*а* представлена зависимость амплитуды электрического сигнала биений на адресной частоте четвертой АВБС ( $\Omega_4 = 6,12$  ГГц) от положения центральной длины волны данной структуры. На рисунке 3.9,*б* показана зависимость нормализованного коэффициента модуляции  $M_n$ , определенного согласно выражению (2.16). Аналогичные зависимости могут быть получены для всех АВБС многосенсорной системы.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Зависимость амплитуды выходного сигнала фотоприемника от изменения центральной длины волны АВБС-4 для многосенсорной системы (а); зависимость нормализованного коэффициента модуляции от изменения центральной длины волны АВБС-4 (б).

Таким образом, приведенные результаты подтверждают возможность проведения измерений посредством многосенсорной системы с близкими центральными и разными адресными частотами АВБС-датчиков, поскольку она позволяет однозначно определить положение центральных длин волн всех датчиков.

### 3.5 Возможность применения многоадресных структур в системах контроля

В работах [73, 74] при участии автора были рассмотрены вопросы применения многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВБС) в качестве чувствительных элементов датчиков волоконно-оптических измерительных систем. Многоадресные брэгговские структуры отличаются от адресных тем, что в их периодическую структуру вносятся три и более дискретных фазовых сдвига, что позволяет формировать три и более окон прозрачности в их спектральном отклике. Так же, как и АВБС, многоадресные структуры характеризуются инвариантностью разностных частот между спектральными компонентами при воздействии на МАВБС физических полей. Прием прохождения широкополосного лазерного излучения через массив многоадресных брэгговских структур формирует перекрестные биения всех частотных компонент, составляющих адреса многоадресных структур. Возможность анализа результирующего биения сразу на двух и более адресных частотах МАВБС позволяет повысить точность измерений и расширить адресную емкость сенсорной системы за счет увеличения информации о положении МАВБС, которую можно получить путем фильтрации МАВБС на каждой из адресных частот.

Опрос многоадресных волоконных брэгговских структур в многосенсорной системе осуществляется по методу, схожему при опросе массива адресных волоконных брэгговских структур. Обозначим разностную частоту между центральной и левой компонентами многоадресной структуры как  $\Omega_1$ , а между правой и центральной – как  $\Omega_3$ .

Электрический сигнал биений фотоприемника после фильтрации на частоте  $\Omega_F$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
I(\Omega_F) = & F(\Omega_F, 0) \sum_{i=1}^N [((\omega_i - \Omega 1_i)u + v)^2 + (\omega_i u + v)^2 + ((\omega_i + \Omega 3_i)u + v)^2] + \\
& + F(\Omega_F, \Omega 1_i) \sum_{i=1}^N [((\omega_i - \Omega 1_i)u + v)(\omega_i u + v)] + \\
& + F(\Omega_F, \Omega 3_i) \sum_{i=1}^N [(\omega_i u + v)((\omega_i + \Omega 3_i)u + v)] + \\
& + F(\Omega_F, \Omega 1_i + \Omega 3_i) \sum_{i=1}^N [((\omega_i - \Omega 1_i)u + v)((\omega_i + \Omega 3_i)u + v)] + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[ \begin{aligned} & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k - \Omega 1_i + \Omega 1_k) ((\omega_i - \Omega 1_i)u + v) ((\omega_k - \Omega 1_k)u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k - \Omega 1_i) ((\omega_i - \Omega 1_i)u + v) (\omega_k u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k - \Omega 1_i - \Omega 3_k) ((\omega_i - \Omega 1_i)u + v) ((\omega_k + \Omega 3_k)u + v) \end{aligned} \right] + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[ \begin{aligned} & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k + \Omega 1_k) (\omega_i u + v) ((\omega_j - \Omega 1_k)u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k) (\omega_i u + v) (\omega_k u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k - \Omega 3_k) (\omega_i u + v) ((\omega_k + \Omega 3_k)u + v) \end{aligned} \right] + \\
& + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left[ \begin{aligned} & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k + \Omega 3_i + \Omega 1_k) ((\omega_i + \Omega 3_i)u + v) ((\omega_k - \Omega 1_k)u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k + \Omega 3_i) ((\omega_i + \Omega 3_i)u + v) (\omega_k u + v) + \\ & F(\Omega_F, \omega_i - \omega_k + \Omega 3_i - \Omega 3_k) ((\omega_i + \Omega 3_i)u + v) ((\omega_k + \Omega 3_k)u + v) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \quad (3.7)$$

где функция  $F(\Omega_F, \Omega)$  описывает частотный полосовой фильтр, настроенный на частоту  $\Omega_F$ ;  $\omega_i$  – центральная оптическая частота  $i$ -ой структуры;  $u$  и  $v$  – соответственно, угловой коэффициент и смещение по оси ординат прямой, описывающей линейную наклонную АЧХ оптического фильтра.

Введем в рассмотрение объединенное множество значений частот, объединив нулевую частоту (постоянный уровень сигнала), множество адресных частота  $\Omega 1_i$ ,  $\Omega 3_i$  и множество их сумм  $\Omega 1_i + \Omega 3_i$ :

$$\{\Omega_{F,n}\}_{n=1,3N+1} = \{0\} \cup \{\Omega 1_i\} \cup \{\Omega 3_i\} \cup \{\Omega 1_i + \Omega 3_i\}, \forall i = \overline{1, N}. \quad (3.8)$$

Отфильтровав сигнал (3.7), на частотах (3.8), получим переопределенную систему из  $3N+1$  уравнений для нахождения  $N$  неизвестных. Переопределенную систему уравнений можно решить методом наименьших квадратов, путем поиска экстремума функции:

$$\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N) = \sum_{n=1}^{3N+1} [I(\Omega_{F,n}) - I_{F,n}]^2 \rightarrow \min, \quad (3.9)$$

где  $I_{F,n}$  обозначает амплитуду выходного сигнала фотоприемника на частоте  $\Omega_{F,n}$ . Условие (3.9) эквивалентно требованию равенства нулю всех частных производных по искомым переменным  $\omega_i$ , что приводит к системе из  $N$  нелинейных уравнений:

$$\partial\Phi/\partial\omega_i = 0, \quad \forall i = \overline{1, N}. \quad (3.10)$$

Полученная система уравнений (3.10) нелинейна в силу нелинейности частных производных  $\partial\Phi/\partial\omega_i (i = 1, N)$  и решается итерационно-численными методами, такими как метод Левенберга-Маргквардта или Ньютона-Раффсона. В качестве начальных условий можно использовать те значения  $\omega_i$ , которые являются решением системы уравнений (3.10) и в которых предполагается, что последних трех двойных сумм в (3.7) не существует, и система уравнений распадается на множество уравнений второго порядка. Выбор решения однозначен, поскольку одно из них строго положительное, второе отрицательное [74].

Как было показано в Главе 2, при использовании адресных волоконных брэгговских структур с близкими центральными частотами могут возникать частные случаи, в которых спектр сигнала биений содержит частоты, кратные или совпадающие с адресными. Однако при построении системы на основе МАВБС данные коллизии могут быть либо разрешены, либо невозможны в структурах с тремя адресными компонентами. Решение указанных коллизий производится автоматически, путем учета вклада таких колебаний в систему уравнений [74].

### 3.6 Выводы по главе

В главе решена задача многосенсорного контроля деформации ступичных подшипников.

Приведена постановка задачи многосенсорного контроля деформации подшипников, включающая в себя измерение деформации в шести точках на внешнем кольце подшипника и контроль температуры в одной точке.

Для решения поставленной задачи приведена опико-электронная схема измерительной системы, содержащая семь (шесть датчиков деформации и один датчик температуры) волоконно-оптических датчиков. Массив датчиков формируется из адресных волоконных брэгговских структур, с разными адресными и близкими центральными частотами.

Выполнена разработка радиофотонного измерительного преобразования для многосенсорных измерений. Проведено математическое моделирование измерительного преобразования, по результатам которого выполнена оценка абсолютной погрешности определения положения центральных частот АВБС, что составило не более 0,013 усл. ед. (13 МГц), что соответствует величине ошибки определения брэгговской длины волны в 0,104 пм. Следует отметить, что при некоторых взаимных положениях спектров АВБС погрешность определения центральных длин волн может повышаться до 2 пм.

Выполнено компьютерное имитационное моделирование многосенсорной измерительной системы, по результатам которого были получены измерительные характеристики АВБС-датчиков. Показана возможность однозначного определения положений центральных длин волн всех датчиков многосенсорной системы.

Рассмотрены вопросы применения многоадресных волоконных брэгговских структур, использование которых в качестве чувствительных элементов может позволить повысить точность измерений в многосенсорных системах контроля и расширить адресную емкость системы в целом.



## **ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ**

В главе представлены практические рекомендации по разработке систем контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств на основе адресных волоконных брэгговских структур и результаты натурального эксперимента.

В первом разделе главы даны рекомендации по установке волоконно-оптических датчиков деформации и температуры на ступичные подшипники транспортных средств.

Во втором разделе главы представлены практические рекомендации по формированию волоконно-оптических элементов измерительной системы, в том числе адресных волоконных брэгговских структур и оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Исследованы оптомеханические свойства волоконных брэгговских решеток, содержащих дискретные фазовые  $\pi$ -сдвиги и обеспечивающих радиофотонный адресный метод опроса. Представлены основные закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами, позволяющие формировать адресные и многоадресные структуры с требуемой формой спектрального отклика.

Третий раздел главы посвящен вопросам компенсации температурного дрейфа оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Представлена математическая модель, на основе которой дана оценка влияния температурного дрейфа оптического наклонного фильтра на погрешность определения центральных частот адресных волоконных брэгговских структур. Предложен подход, позволяющий отказаться от требования температурной стабилизации оптического фильтра, который заключается в том, что в систему опроса вводится дополнительный измерительный канал для

учета температурного дрейфа фильтров с линейными наклонными амплитудно-частотными характеристиками.

В четвертом разделе главы приведена методика совместной калибровки датчиков деформации и температуры, что позволяет компенсировать влияние температурного воздействия на показания датчиков деформации.

В пятом разделе главы сформулированы требования к фотоприемнику, частотным фильтрам, источнику широкополосного оптического излучения. Произведена оценка погрешностей измерений.

В шестом разделе главы приведены результаты экспериментального исследования системы контроля деформации подшипника на основе адресных волоконных брэгговских структур, дана оценка метрологических характеристик.

Выводы по главе приведены в седьмом разделе главы.

#### **4.1 Рекомендации по интегрированию**

##### **волоконно-оптических датчиков в ступичные подшипники**

Выделяют три группы ступичных подшипниковых узлов HUB (с англ. Hub Unit Bearings,) (рисунок 4.1 [79]): HUB I, не имеющие фланцев, которые могут устанавливаться на ведущих и ведомых осях транспортных средств как с вращающимся внешним кольцом, так и с внутренним; HUB II, имеющие фланец на внешнем кольце и устанавливаемые с вращающимся внутренним кольцом (на ведущих и ведомых осях) или с вращающимся внешним кольцом (только на ведомых осях); HUB III, имеющие фланцы как на внешнем, так и на внутреннем кольце и устанавливаемые также с вращающимся внутренним кольцом (на ведущих и ведомых осях) или с вращающимся внешним кольцом (только на ведомых осях). Исходя из приведенной классификации, для установки датчиков системы контроля деформации рекомендуется использовать подшипниковые узлы с вращающимся внутренним кольцом (тип II и III), поскольку этот тип подшипников позволяет разместить датчики близко к телам

качения, что повышает чувствительность измерений и упрощает съем информации благодаря неподвижному внешнему кольцу подшипника.

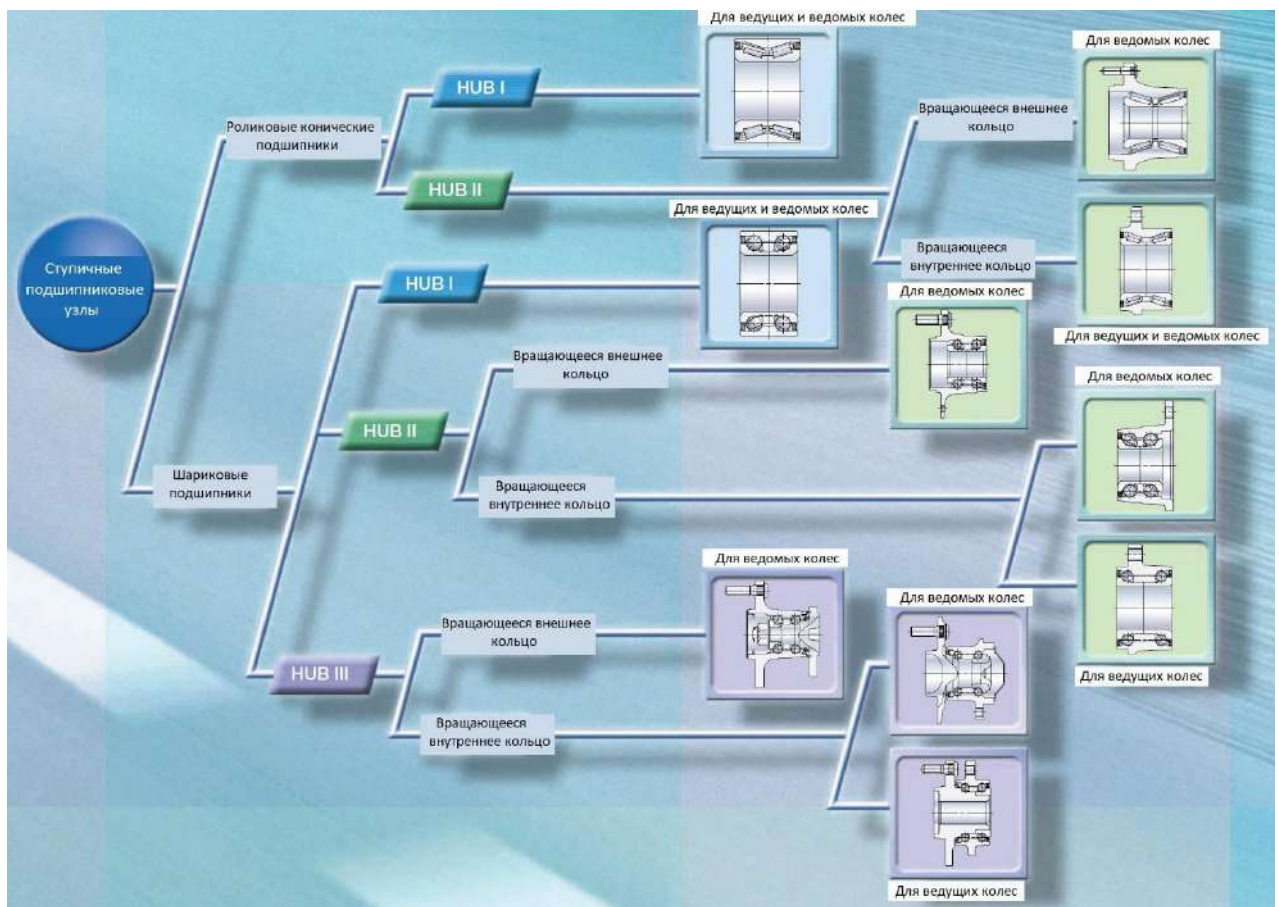


Рисунок 4.1 – Классификация ступичных подшипниковых узлов автотранспортных средств [79]

Сформулируем рекомендации по установке АБС-датчиков на внешнем кольце подшипника в условиях, определенных в предыдущей главе, когда для определения нагрузки на подшипник в продольном, поперечном и вертикальном направлениях используется шесть датчиков деформации, установленных на внешнем кольце подшипника на угловом расстоянии в  $60^\circ$  относительно друг друга [15, 23, 26, 30, 33] (рисунок 3.1).

Корректная работа датчика деформации возможна в условии сохранения адресной частоты датчика, что обеспечивается выполнением требования равномерного изменения периода адресной структуры по всей ее длине, что в свою очередь обеспечивается выполнением требования равномерного

растяжения/сжатия участка оптического волокна, содержащего АВБС. Для обеспечения этого условия на внешнем кольце подшипника формируется углубление (выборка) в местах установки АВБС датчиков (рисунок 4.2), которое обеспечивает равномерность деформации датчиков при прохождении тел качения (шариков).

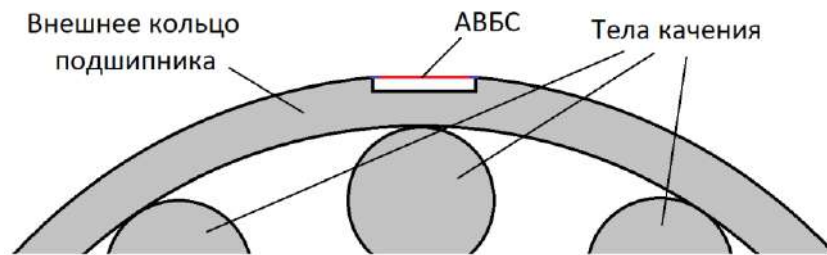


Рисунок 4.2 – Выборка во внешнем кольце подшипника при установке АВБС датчика

Основным требованием к надежному монтажу АВБС является обеспечение высокой адгезии клеевого состава одновременно и к материалу внешнего кольца подшипника, и к оптическому волокну, что влечет за собой требования к выбору клеящего вещества. Условия эксплуатации подшипников влечет за собой требования к клеевому составу, которые обеспечивают сохранение его свойств во всем рабочем диапазоне температур. По результатам анализа различных видов клеевых составов, был выбран двухкомпонентный эпоксидный клей Vishay M-bond 610 [94], который имеет широкий диапазон рабочих температур (от  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+232\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), низкую вязкость, высокую адгезию к металлу (подшипник) и кварцевому стеклу (оптическое волокно).

Как это было показано в предыдущих главах, измерительная система, должна быть дополнена датчиком температуры, который используется для компенсации влияния температуры на показания датчиков деформации. Датчик температуры необходимо изолировать от воздействия от деформаций растяжения и сжатия, кроме того, он должен испытывать воздействие той же температуры, что и датчики деформации. Результаты проведенных экспериментов и данные других авторов [93] свидетельствуют о том, что температуру на

всем внешнем кольце подшипника и возле всех датчиков можно считать одинаковой. Следовательно, задача выбора места установки для датчика температуры сводится к определению такого места крепления на подшипнике, которое обеспечивает его изолированность от деформации. Результаты компьютерного моделирования деформации подшипникового узла типа HUB II передней (ведущей) оси автомобиля Ford Explorer методом конечных элементов для нагрузок, действующих на подшипник внутреннего колеса при повороте автомобиля на постоянной скорости с поперечным ускорением  $0,4\text{ g}$ , приведены на рисунке 4.3 [91].

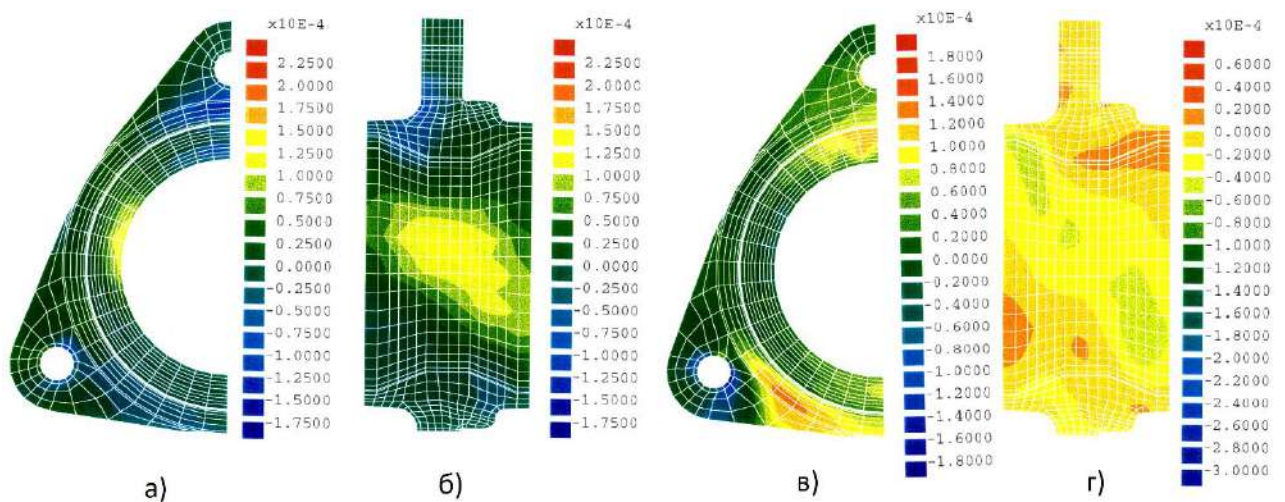


Рисунок 4.3 – Результаты моделирования деформации ступичного подшипника [91]: (а), (б) – вертикальная деформация; (в), (г) – поперечная деформация

Исходя из приведенных результатов моделирования, можно определить подходящие места установки датчиков температуры. Как видно из рисунка 4.3, минимальной деформации подвергаются наиболее удаленные от оси вращения подшипника области вблизи крепежных отверстий на фланце внешнего кольца, которые обозначены красными кружками на рисунке 4.4.

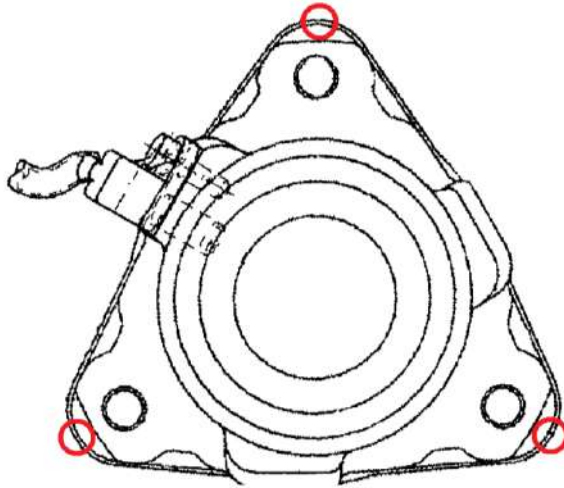


Рисунок 4.4 – Рекомендуемые места установки датчика температуры (выделены красным)

Следует отметить, что места установки датчиков температуры могут отличаться для разных конструктивных исполнений подшипниковых узлов.

## 4.2 Практические рекомендации по формированию волоконно-оптических компонентов измерительной системы

Волоконно-оптическими компонентами системы контроля деформации подшипника являются датчики на основе АВС с дискретными фазовыми сдвигами и оптический фильтр с линейной наклонной АЧХ. Рассмотрим технологии формирования таких периодических структур.

### 4.2.1 Влияние параметров адресной волоконной брэгговской структуры на форму ее спектрального отклика

Рассмотрим основные закономерности влияния параметров волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами на форму их спектрального отклика, позволяющие формировать адресные и многоадресные структуры. Создание многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВС) является развитием концепции адресных брэгговских структур [73, 74]. МАВС представляет собой квазипериодическую структуру,

сформированную аналогично АВБС, оптический спектральный отклик которой состоит из трех и более сверхузкополосных компонент, разностные частоты между которыми находятся в радиочастотном спектральном диапазоне. АВБС можно рассматривать как частный случай многоадресной волоконной брэгговской структуры, в которой сформированы два фазовых сдвига. В силу этого задача ставится в постановке, рассматривающей 3φ-ВБР, состоящей из четырех последовательно сформированных однородных участков ВБР с фазовыми сдвигами между ними, спектральный отклик которой содержит три окна прозрачности.

#### Моделирование спектрального отклика

Известны два подхода к формированию АВБС и МАВБС – внесение нескольких фазовых сдвигов в периодическую структуру ВБР [75] и формирование набора сверхузкополосных ВБР с брэгговскими частотами, разнесенными между собой на адресные частоты [76]. Рассмотрим математическую модель МАВБС, сформированную путем внесения трех фазовых сдвигов в периодическую структуру равномерной ВБР (3φ-ВБР) [77]. Схема 3φ-ВБР структуры и амплитудно-частотная характеристика центральной части её спектра пропускания приведены на рисунке 4.5. Многоадресная 3φ-ВБР состоит из четырех последовательно сформированных однородных участков ВБР с фазовыми сдвигами между ними (рисунок 4.5,а). Спектр центральной части оптического излучения, прошедшего через 3φ-ВБР, содержит три окна прозрачности, которые формируют адресные частоты  $\Omega_{21}$ ,  $\Omega_{32}$  и  $\Omega_{31}$  (рисунок 4.5,б).



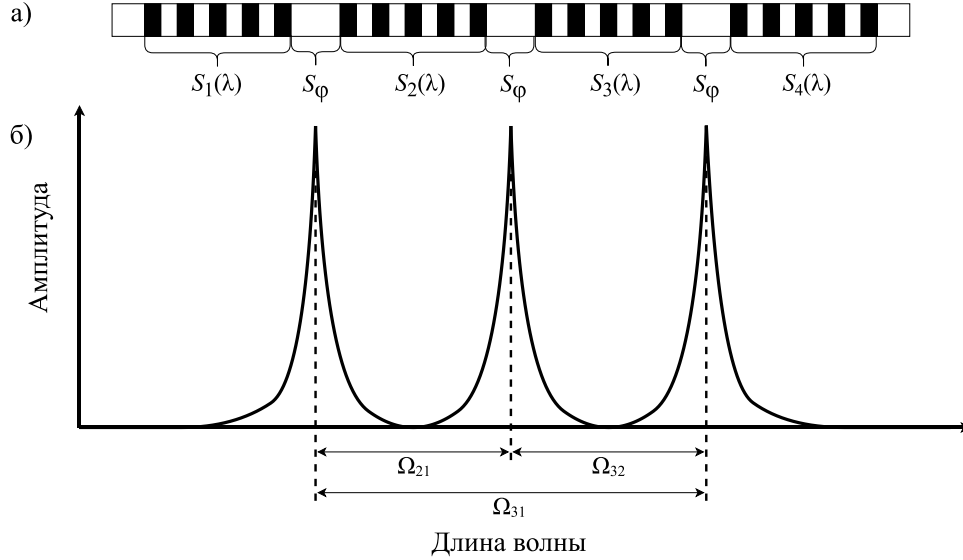


Рисунок 4.5 – а) схема многоадресной 3φ-ВБР структуры; и б) схематичное представление амплитудно-частотной характеристики центральной части её спектра

Для формирования спектрального отклика 3φ-ВБР применим метод матриц передач. Каждая однородная секция МАВБС с дискретными фазовыми сдвигами описывается матрицей передачи  $S_L$  [78]:

$$S_L(\lambda, n_{\text{mod}}, l) = \begin{bmatrix} \frac{e^{iq(\lambda, n_{\text{mod}})l} - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2 e^{-iq(\lambda, n_{\text{mod}})l}}{1 - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2} & \frac{-r(\lambda, n_{\text{mod}})^2 e^{-iq(\lambda, n_{\text{mod}})l} + e^{iq(\lambda, n_{\text{mod}})l}}{1 - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2} \\ \frac{r(\lambda, n_{\text{mod}})^2 e^{-iq(\lambda, n_{\text{mod}})l} - e^{iq(\lambda, n_{\text{mod}})l}}{1 - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2} & \frac{e^{-iq(\lambda, n_{\text{mod}})l} - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2 e^{iq(\lambda, n_{\text{mod}})l}}{1 - r(\lambda, n_{\text{mod}})^2} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

где  $l$  – длина однородного участка, а параметры  $r(\lambda)$  и  $q(\lambda)$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} r(\lambda, n_{\text{mod}}) &= [q(\lambda, n_{\text{mod}}) - \sigma_\beta(\lambda)]/\kappa, \\ q(\lambda, n_{\text{mod}}) &= \sqrt{\sigma_\beta(\lambda)^2 - \kappa(n_{\text{mod}})^2}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

В (4.2)  $\sigma_\beta(\lambda) = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ ,  $\lambda_B = 2 n_{\text{eff}}\Lambda$  – центральная (брэгговская) длина волны ( $\Lambda$  – период ВБР,  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления сердцевины волокна);  $\kappa(n_{\text{mod}}) = \pi\sigma_n(n_{\text{mod}})/\lambda_B$  – постоянная распространения, в которой  $\sigma_n(n_{\text{mod}}) = n_{\text{mod}}/n_{\text{eff}}$  – индекс модуляции коэффициента преломления,  $n_{\text{mod}}$  –



величина наведенного показателя преломления. Таким образом, матрицу передачи каждой однородной секции можно представить как функцию от длины волны  $\lambda$ , наведенного показателя преломления ВБР  $n_{\text{mod}}$  и длины однородного участка  $l$ :  $S_L(\lambda, n_{\text{mod}}, l)$ .

Для описания дискретного фазового сдвига вводится матрица  $S_\varphi$ :

$$S_\varphi(\varphi) = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где  $\varphi$  – величина фазового сдвига.

Результирующая матрица, описывающая всю структуру МАВБС с дискретными фазовыми сдвигами, записывается как произведение матриц передачи однородных участков и матриц фазовых сдвигов:

$$S_{res}(\lambda, n_{\text{mod}}, \mathbf{L}, \boldsymbol{\varphi}) = \left[ \prod_{m=1}^N S(\lambda, n_{\text{mod}}, L_m) \times S_\varphi(\varphi_m) \right] \times \quad (4.4)$$

$$\times S_{N+1}(\lambda, n_{\text{mod}}, L_{N+1}),$$

где  $N$  – количество спектральных компонент, формирующих адрес МАВБС, в случае 3ф-ВБР  $N = 3$ ;  $\mathbf{L}$  – вектор, содержащий  $N+1$  элементов, определяющий длины однородных участков МАВБС;  $\boldsymbol{\varphi}$  – вектор, содержащий  $N$  элементов, определяющий величины фазовых сдвигов МАВБС.

Отклик оптического излучения, прошедшего через многоадресную брэгговскую структуру, согласно методу матриц передач, записывается в виде:

$$T_{res}(\lambda) = \left( \left| S_{res}(\lambda)_{11} - \frac{S_{res}(\lambda)_{12} S_{res}(\lambda)_{21}}{S_{res}(\lambda)_{22}} \right| \right)^2. \quad (4.5)$$

Таким образом, входными параметрами для моделирования спектрального отклика 3ф-ВБР структуры являются: период ВБР –  $\Lambda$ , эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна –  $n_{\text{eff}}$ , наведенный показатель преломления ВБР –  $n_{\text{mod}}$ , длины однородных участков –  $L_1, L_2, L_3, L_4$ , и величины фазовых сдвигов –  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ . В таблице 4.1 приведены исходные значения параметров, использованные в работе для моделирования 3ф-ВБР.

Таблица 4.1 – Исходные параметры для построения модели МАВБС

Параметр	Значение
Период ВБР $\Lambda$ (центральная длина волны $\lambda_B$ ), нм	528,358 (1551,47)
Эффективный показатель преломления сердцевинны оптического волокна $n_{\text{eff}}$	1,4682
Величина наведенного показателя преломления $n_{\text{mod}}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Длины однородных участков ВБР $L_0, L_1:L_2:L_3:L_4$ , мм	$L_0=2, (1:1:1:1) \cdot L_0$ .
Величины фазовых сдвигов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , рад	$\pi/2, \pi/2, \pi/2$

### Влияние величины наведенного показателя преломления

Результаты исследования изменения спектрального отклика центральной части 3ф-ВБР в зависимости от величины наведенного показателя преломления приведены на рисунке 4.6, где представлены фрагменты центральной части спектров 3ф-ВБР структуры для пяти различных значений наведенного показателя преломления  $n_{\text{mod}}$  в диапазоне величин от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $7 \cdot 10^{-4}$  с дискретным шагом  $1 \cdot 10^{-4}$ .

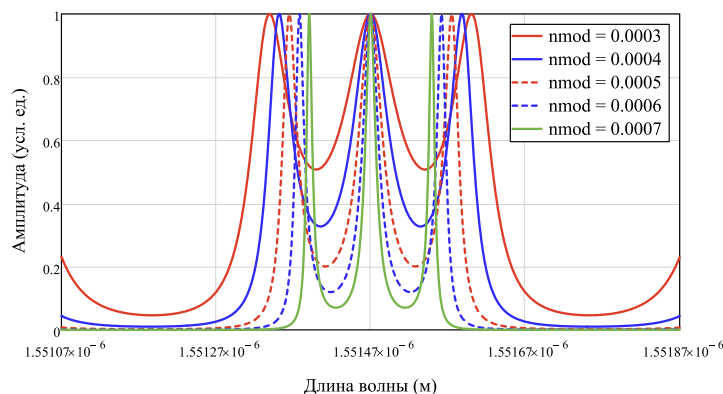


Рисунок 4.6 – Центральная часть спектра 3ф-ВБР структуры при различных значениях наведенного показателя преломления

Изменение величины наведенного показателя преломления не влияет на симметрию формы спектрального отклика 3ф-ВБР, а лишь ведет к изменению спектральной ширины окон прозрачности и к симметричному смещению окон прозрачности. С ростом амплитуды модуляции наведенного показателя преломления ширина окон прозрачности уменьшается, одновременно с этим

уменьшаются и расстояния между окнами прозрачности, формирующие адресные частоты АВБС, рисунок 4.6.

### Влияние длин однородных участков на спектр адресной структуры

На основе анализа математической модели были исследованы различные варианты изменения спектральной формы 3ф-ВБР при изменении длин однородных участков  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$  относительно их исходных величин  $L_0$ .

Одновременное увеличение длин всех однородных участков 3ф-ВБР структуры сохраняет амплитуду окон прозрачности, при этом уменьшаются разностные частоты между окнами прозрачности и их спектральная ширина (рисунок 4.7,а, черная линия –  $L_1:L_2:L_3:L_4 = 1:1:1:1 \cdot L_0$ , синяя линия –  $1,4:1,4:1,4:1,4 \cdot L_0$ , красная линия –  $1,6:1,6:1,6:1,6 \cdot L_0$ ).

Симметричное увеличение длин крайних участков ( $L_1$  и  $L_4$ ) сохраняет амплитуды и разностные частоты 3ф-ВБР структуры, но уменьшает ширину окон прозрачности (рисунок 4.7,б, синяя линия –  $1,4:1:1:1,4 \cdot L_0$ ). Асимметричное увеличение длин крайних участков ( $L_1$  и  $L_4$ ) сохраняет разностные частоты 3ф-ВБР структуры, и уменьшает амплитуду и ширину окон прозрачности (рисунок 4.7,б, красная линия –  $1,4:1:1:1,1 \cdot L_0$ ). Перемена местами длин крайних участков ( $L_1$  и  $L_4$ ) никак не влияет на изменение спектральной формы 3ф-ВБР.

Симметричное увеличение длин центральных участков ( $L_2$  и  $L_3$ ) ведет к уменьшению разностных частот при сохранении ширины и амплитуды окон прозрачности (рисунок 4.7,в синяя линия –  $1:1,4:1,4:1 \cdot L_0$ ). Асимметричное увеличение длин центральных участков ( $L_2$  и  $L_3$ ) ведет к уменьшению амплитуды окон прозрачности и разностных частот, сохраняя ширину центрального окна прозрачности и уменьшая ширину обоих боковых окон прозрачности (рисунок 4.7,в красная линия –  $1:1,4:1,1:1 \cdot L_0$ ).

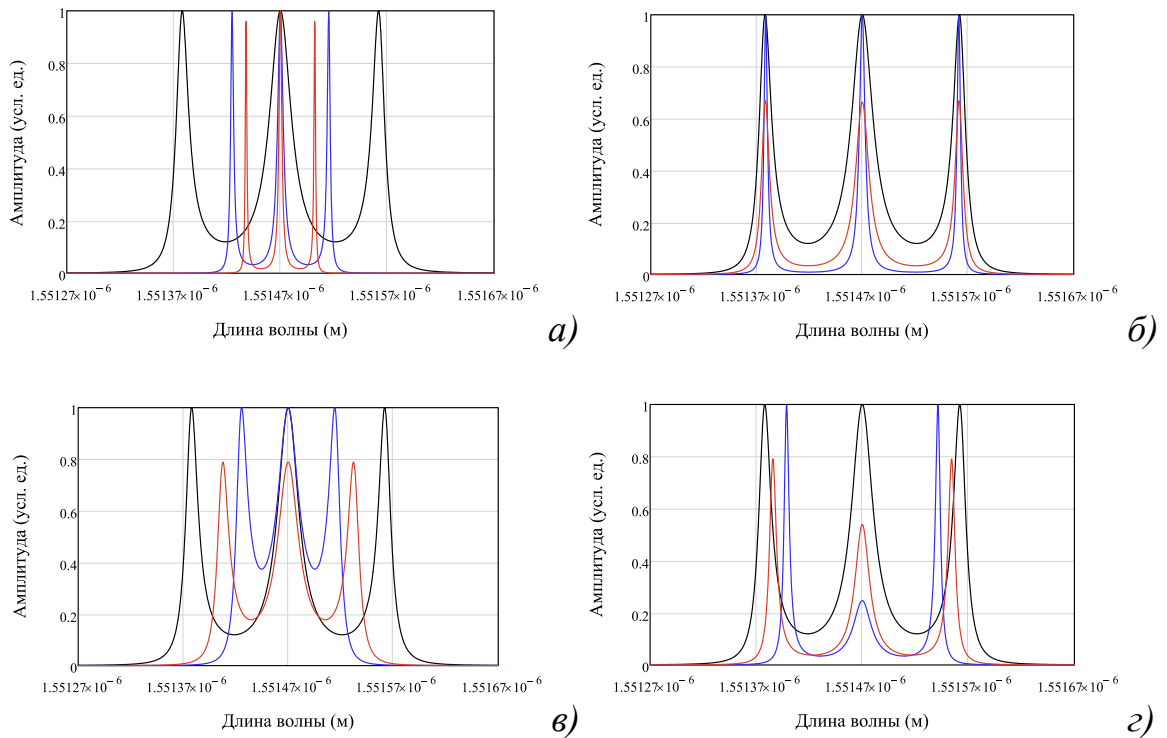


Рисунок 4.7 – Амплитудно-частотная характеристика спектрального отклика центральной части 3φ-ВБР структуры при: а) одновременном изменении длин всех участков; б) изменении длин крайних участков ( $L_1$  и  $L_4$ ); в) изменении длин центральных участков ( $L_2$  и  $L_3$ ); г) изменении длин первого и третьего участков ( $L_1$  и  $L_3$ ) 3φ-ВБР структуры.

Расшифровка цветового обозначения кривых дана в тексте

Симметричное увеличение длин первого и третьего однородных участков ( $L_1$  и  $L_3$ ) ведет к уменьшению разностных частот (рисунок 4.7,г синяя линия  $-1,4:1:1,4:1 \cdot L_0$ ), одновременно с этим уменьшается амплитуда и растет спектральная ширина центрального окна прозрачности, при этом сохраняется амплитуда и уменьшается спектральная ширина боковых окон прозрачности. Асимметричное увеличение длин первого и третьего участков ( $L_1$  и  $L_3$ ) ведет к уменьшению амплитуды и спектральной ширины всех окон прозрачности, одновременно с этим уменьшаются и разностные частоты (рисунок 4.7,г красная линия  $-1,4:1:1,1:1 \cdot L_0$ ).

Анализ спектральных форм, полученных для различных отношений длин однородных участков 3φ-ВБР структуры, позволил сделать вывод о том,

что уменьшение разностных частот происходит всегда за исключением симметричного или асимметричного изменения длин двух крайних участков. Только симметричное изменение длин однородных участков не приводит к уменьшению амплитуд спектральных составляющих. Изменение длин центральных участков не влияет на изменение ширины спектральных составляющих окон прозрачности. Изменение длин однородных участков во всех случаях сохраняет симметрию формы спектрального отклика 3ф-ВБР структуры.

#### Влияние величин дискретных фазовых сдвигов

Исследованы различные варианты изменения формы спектра 3ф-ВБР при вариации величин фазовых сдвигов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  относительно их исходных значений  $\varphi_0 = \pi/2$ . В результате исследований, было выяснено, что целом, изменение величин фазовых сдвигов не приводит к изменению ширины окон прозрачности многоадресной структуры. Уменьшение одного из крайних фазовых сдвигов ( $\varphi_1$  или  $\varphi_3$ ) приводит к асимметричному уменьшению амплитуд всех окон прозрачности и незначительному увеличению разностной частоты  $\Omega_{21}$  (рисунок 4.8,а: черная линия – исходный спектр, красная линия –  $\varphi_1 = 0.8 \cdot \varphi_0$  или  $\varphi_3 = 0.8 \cdot \varphi_0$ ). Уменьшение центрального фазового сдвига сохраняет амплитуды окон прозрачности, но вызывает значительное уменьшение  $\Omega_{21}$  и значительное увеличение  $\Omega_{32}$  (рисунок 4.8,а: синяя линия –  $\varphi_2 = 0.8 \cdot \varphi_0$ ).

Уменьшение величин двух соседних фазовых сдвигов ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , либо  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ ) ведет к асимметричному уменьшению амплитуд всех окон прозрачности и незначительному увеличению разностной частоты  $\Omega_{32}$  (рисунок 4.8,б: черная линия – исходный спектр, красная линия –  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.8 \cdot \varphi_0$  или  $\varphi_2 = \varphi_3 = 0.8 \cdot \varphi_0$ ). Уменьшение величины двух крайних фазовых сдвигов сохраняет амплитуды окон прозрачности, но вызывает значительное увеличение разностной частоты  $\Omega_{21}$  и значительное уменьшение разностной частоты  $\Omega_{32}$  (рисунок 4.8,б: синяя линия –  $\varphi_1 = \varphi_3 = 0.8 \cdot \varphi_0$ ).

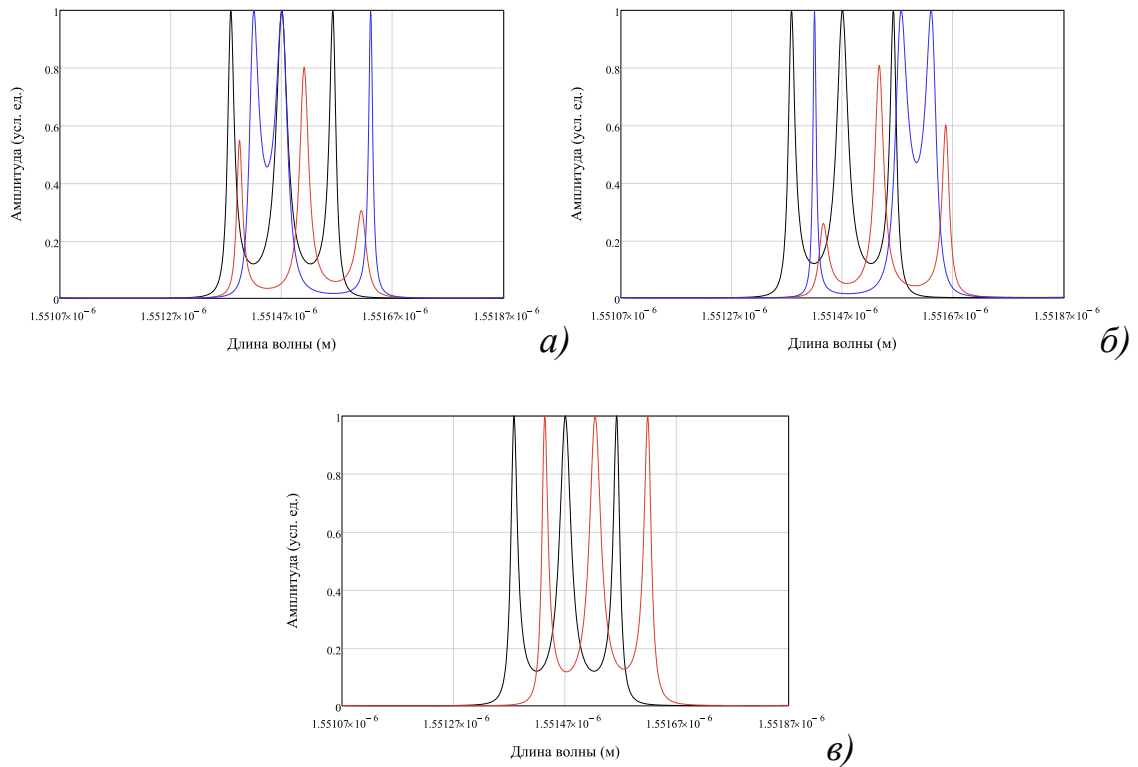


Рисунок 4.8 – Амплитудно-частотная характеристика центральной части спектрального отклика 3ф-ВБР структуры при изменении: а) одного фазового сдвига; б) двух фазовых сдвигов; в) трех фазовых сдвигов 3ф-ВБР структуры.

Расшифровка цветового обозначения кривых дана в тексте

При равном изменении величин всех трех фазовых сдвигов все окна прозрачности одинаково смещаются по частоте, при этом их амплитуды и адресные частоты остаются неизменными (рисунок 4.8, в: черная линия – исходная спектральная характеристика, красная линия –  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0.9 \cdot \varphi_0$ ).

### Основные закономерности

По результатам исследования влияния параметров МАВБС с тремя фазовыми сдвигами (3ф-ВБР) на спектральные характеристики ее оптического отклика были выявлены следующие основные закономерности изменения формы спектрального отклика. Асимметричное изменение разностных частот осуществляется только путем вариации величин фазовых сдвигов. Наибольшее влияние на симметричное уменьшение разностных частот оказывает увеличение длин промежуточных однородных участков МАВБС. Только при соблюдении симметричности 3ф-ВБР структуры относительно ее центра не

уменьшаются амплитуды спектральных составляющих. На уменьшение ширины окон прозрачности наибольшее влияние оказывает увеличение наведенного показателя преломления и длин крайних однородных участков МАВБС.

Используя представленные качественные зависимости характеристик спектров брэгговских структур от параметров квазипериодической структуры с фазовыми неоднородностями, возможно получить адресные структуры с требуемой формой оптического спектрального отклика, которые могут быть использованы в измерительных системах, в том числе и для задач контроля деформации подшипников.

#### *4.2.2 Методы записи адресных волоконных брэгговских структур*

Одним из методов записи адресной волоконной брэгговской структуры является технология поточечной записи, обеспечивающей изменение показателя преломления вдоль сердцевины оптического волокна. Технология поточечной записи обеспечивает возможность контроля периодичности штрихов, их размера и интенсивности, что позволяет формировать структуры с произвольным профилем аподизации и чирпирования. Поточечная запись осуществляется титан-сапфировым (TiSa) лазером или эксимерным фемтосекундным УФ-лазером на первой (800 нм) или второй (400 нм) гармонике, или на второй гармонике аргонового лазера. Запись может осуществляться как в непрерывном режиме, так и в импульсном [80, 81]. В качестве альтернативы титан-сапфировым лазерам могут применяться твердотельные или волоконные иттербиевые фемтосекундные лазеры, преимуществами которых являются более простая конфигурация, возможности режима линейного поглощения в оптическом волокне с долговременной стабильной работой в промышленных условиях, а также то, что оболочка оптического волокна прозрачна для длины волны излучения (1020–1060 нм) иттербиевого лазера. Последняя особенность позволяет производить запись периодической структуры в сердцевине оптического волокна без снятия оболочки с оптического волокна, что сохраняет его механическую прочность.

В работе [80] также показана возможность формирования неоднородных (суперструктурированных) периодических структур методом поточечной записи. На рисунке 4.9 приведена опико-электронная схема установки для поточечной записи периодических структур в оптическом волокне [80]. Установка включает в себя фемтосекундный лазер Light Conversion PHAROS 6W, формирующий излучение с центральной длиной волны второй гармоники 1026 нм, частотой формирования импульсов 1 кГц и длительностью импульсов 232 фс. Излучение вводится в объектив 100X Mitutoyo Plan Apo NIR HR с большой числовой апертурой  $NA = 0,7$  через систему управляемых поворотных зеркал (M1–2, BS3) [80]. Путем изменения положения поляризатора (P) между двумя полуволновыми пластинами осуществляется регулировка уровня мощности излучения высокочувствительным фотодетектором Ophir PD10-pJ (PD).

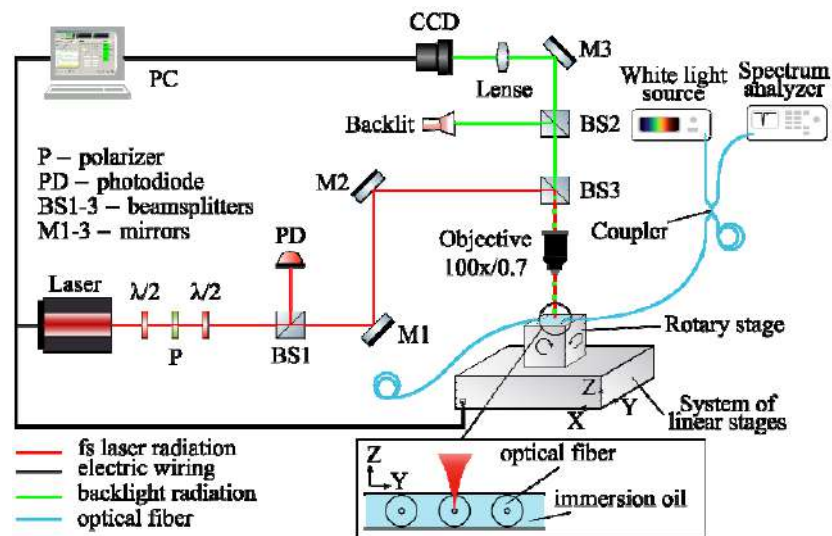


Рисунок 4.9 – Схема установки для поточечной записи периодических структур в оптическом волокне [80]

Протяжка оптического волокна производится при помощи высокоточной координатной механической системы Aerotech ABL1000. Координатный стол оборудован подсветкой, что позволяет контролировать фокусировку и осуществлять контроль плоскости при перемещении оптического волокна.



Результирующий спектр регистрируется анализатором спектра Yokogawa AQ6370 и источником белого света Yokogawa AQ4305.

Другим методом формирования АВБС с дискретными фазовыми сдвигами является метод последовательной записи нескольких ВБР. Участок с однородной ВБР записывается с помощью традиционных интерферометрических схем записи на основе интерферометра Ллойда или Гальботта, затем оптическое волокно смещается с помощью прецизионной координатной протяжки, и записывается следующий однородный участок ВБР. Подбирая величину сдвига и линейный размер однородных частей ВБР можно сформировать спектрально-адресные волоконные брэгговские структуры с наперед заданными характеристиками. Для точного контроля величины смещения в схеме используется интерферометр Майкельсона на объемных оптических элементах [81]. Структурная схема установки для последовательной записи представлена на рисунке 4.10.

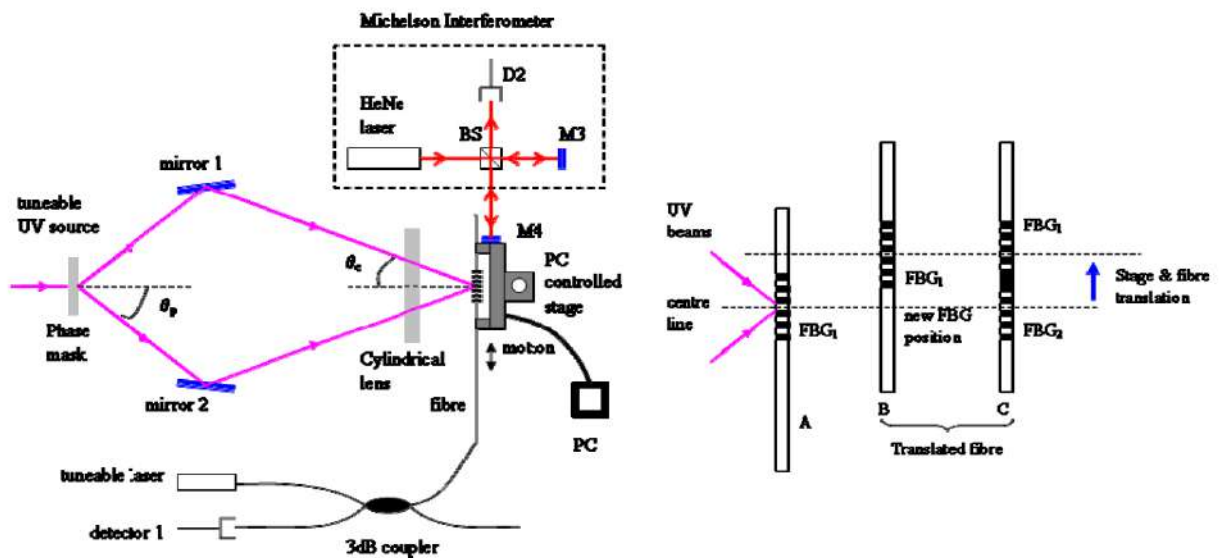


Рисунок 4.10 – Структурная схема установки, реализующей метод последовательной записи ВБР [81]

Преимуществом технологии последовательной записи ВБР по сравнению с технологией поточечной записи является более простая конструкция установки, поскольку последовательная запись требует только одного

прецизионного позиционера для протяжки волокна (с точностью позиционирования порядка  $\pm 5\text{--}10$  нм). Недостатком технологии последовательной записи является невозможность контроля аподизации однородных участков АВБС, поскольку технология предполагает только естественную аподизацию профиля ВБР, что вызвано нормальным (гауссовым) распределением интенсивности записывающего пучка. Данная особенность имеет и положительный эффект, который заключается в снижении уровня боковых паразитных максимумов по сравнению с однородной волоконной брэгговской решетки, записанной без аподизации [82]. Технология последовательной записи ВБР позволяет формировать произвольное количество однородных участков ВБР друг за другом, в частности, для создания  $2\pi$ -ВБР требуется формирование трех однородных волоконной брэгговской решетки, а длина однородного участка ВБР регулируется внешней диафрагмой [82].

#### *4.2.3 Формирование оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой*

Оптический фильтр с линейной наклонной АЧХ является ключевым компонентом системы опроса АВБС-датчиков как для малосенсорных (глава 2), так и для многосенсорных (глава 3) конфигураций измерительной системы контроля деформации ступичных подшипников. Оптический фильтр с наклонной АЧХ может быть сформирован на основе ВБР с наперед заданным спектральным откликом, который требует линейные фронты спектральной характеристики, что может быть получено с помощью обратного преобразования Фурье [83].

Преобразование Фурье применяется в случаях, когда определяющими функциями являются период и глубина модуляции показателя преломления волокна [82, 84]. Как правило, преобразование Фурье состоит из определения параметров амплитуды и фазы, которые могут быть разделены и нанесены на сердцевину волокна независимо. Метод формирования заданной спектральной формы ВБР основан на том факте, что коэффициент модуляции ВБР

является обратным Фурье-преобразованием спектра отражения решетки [83]. Опишем требуемый профиль спектра с помощью двух наклонных участков прямой (рисунок 4.11), а обратным преобразованием Фурье определим амплитуду коэффициента модуляции.

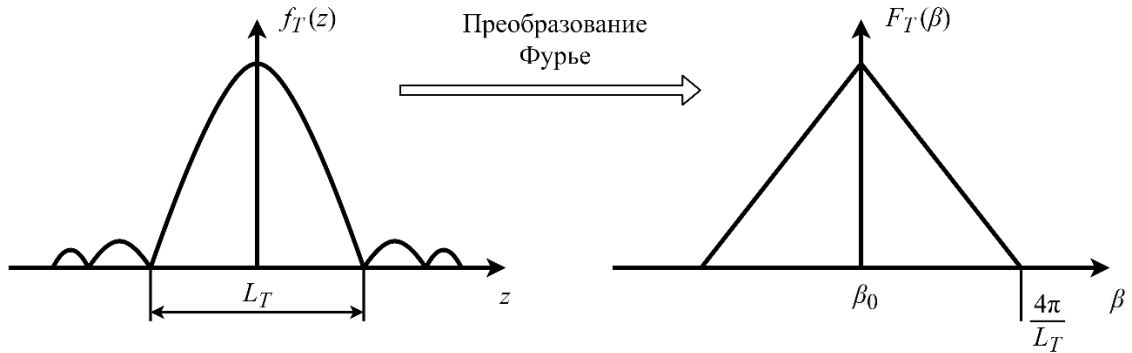


Рисунок 4.11 – Преобразование Фурье для треугольной формы спектра ВБР

Фаза, полученная после преобразования Фурье, дискретна, что можно использовать для построения фазовой модуляции решетки вдоль оптической оси волокна. Таким образом, профиль волоконной брэгговской решетки связан с ее спектральной формой выражением:

$$F(z)e^{i\theta} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\lambda)e^{i\lambda z} d\lambda, \quad (4.6)$$

где  $\lambda$  – пространственной частота,  $z$  – координата вдоль длины волокна,  $F(z)$  – коэффициент модуляции огибающей,  $\theta$  – фаза модуляции показателя преломления (в равномерной решетке это константа),  $\Phi(\lambda)$  – требуемая форма спектра. Задав спектральную форму  $\Phi(\lambda)$ , обратным преобразованием Фурье получаем зависимость интенсивности модуляции показателя преломления  $F(z)$  вдоль оптического волокна. Для ВБР с треугольной симметричной формой спектрального отклика его спектральная форма описывается выражением:

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} A - \frac{A}{W} |\lambda|, & \lambda \in (-W, W), \\ 0, & \lambda \notin (-W, W) \end{cases}, \quad (4.7)$$

где  $A$  – амплитуда,  $W$  – основание (спектральная ширина) фильтра. Поскольку требуемая спектральная форма симметрична, то коэффициент модуляции огибающей определяется в виде стандартного косинус преобразования Фурье:

$$F(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot \cos(z\lambda) d\lambda, \quad (4.8)$$

Проведем моделирование спектрального отклика оптического фильтра с треугольной формой АЧХ методом обратной задачи рассеяния в программном пакете Optiwave OptiGrating 4.2.2 [85]. На рисунке 4.12 красной линией показан требуемый спектр отражения ВБР, а синей линией приведена спектральная характеристика полученной модели ВБР.

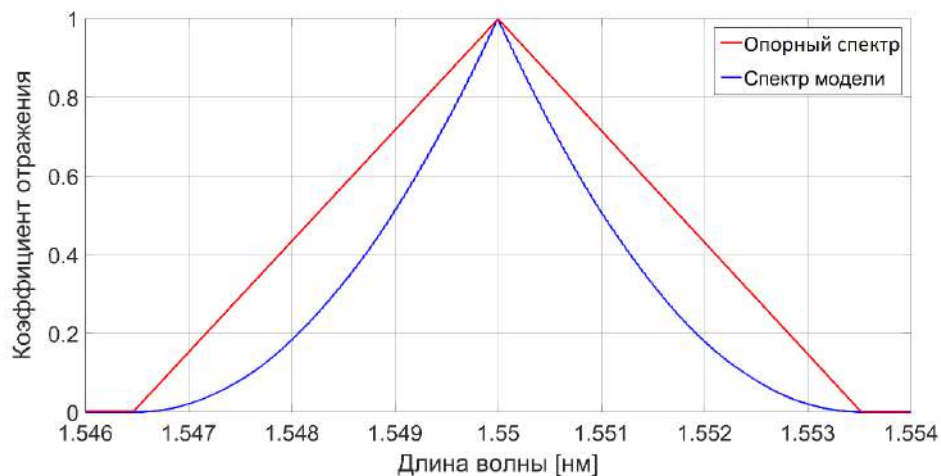


Рисунок 4.12 – Опорный спектр отражения ВБР (красная линия), спектр отражения полученной модели ВБР (синяя линия)

Оценим диапазон отклонения длин волн спектральных компонент АВБС, при котором ошибка определения их амплитуды вследствие нелинейности АЧХ полученного фильтра будет лежать в допустимых пределах. Для этого построим линейную аппроксимацию левого склона АЧХ фильтра в диапазоне коэффициента отражения от 0,2 до 1. График аппроксимирующей прямой и АЧХ фильтра показан на рисунке 4.13,а.

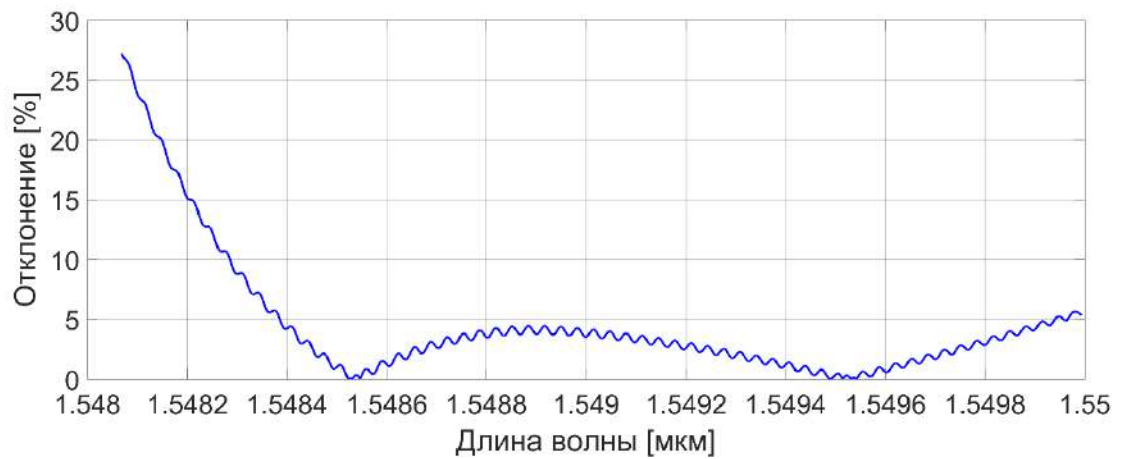
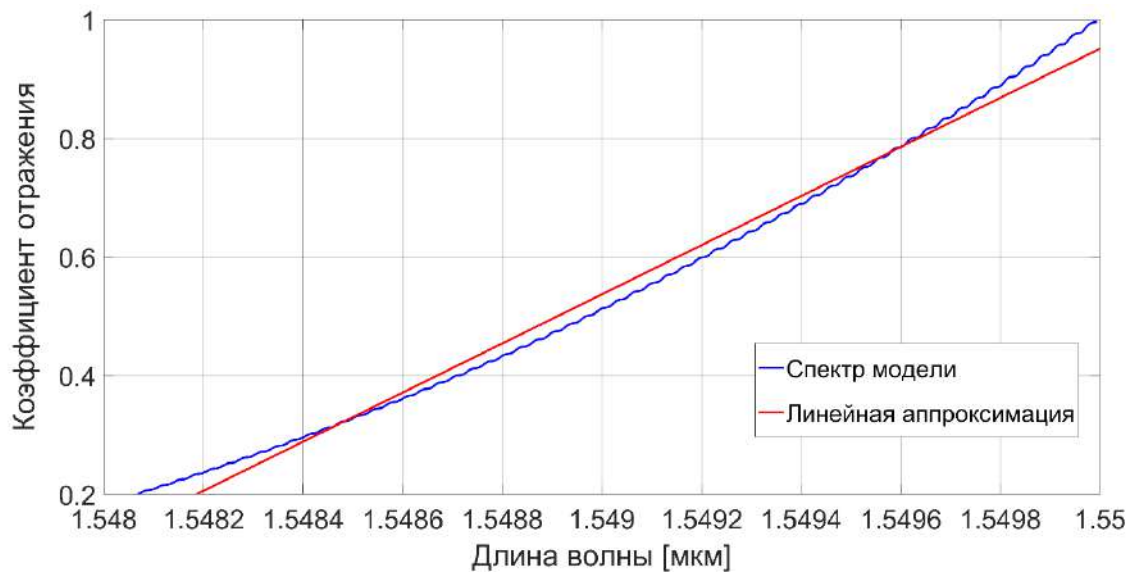


Рисунок 4.13 – (а) Спектр отражения фильтра (синяя линия), аппроксимирующая прямая (красная линия); (б) Отклонение АЧХ фильтра от линейной аппроксимации (в % от амплитуды АЧХ фильтра)

На рисунке 4.13,б представлена зависимость отклонения АЧХ фильтра от аппроксимирующей прямой. Как видно из рисунка, в диапазоне длин волн от 1548,39 нм до 1549,91 нм отклонение линейной аппроксимации от АЧХ фильтра не превышает 4,5%. Таким образом, указанный диапазон длин волн принимаем в качестве допустимого диапазона сдвигов спектральных компонент АВБС. Аналогично определяется допустимый диапазон для правого склона АЧХ фильтра.

### 4.3 Компенсация температурного дрейфа оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой

При реализации предложенных систем опроса адресных волоконных брэгговских структур необходимо учитывать возможный сдвиг линейной наклонной амплитудно-частотной характеристики оптического фильтра вследствие изменения его температуры, поскольку это оказывает существенное влияние на точность определения центральной частоты АВБС. В настоящей работе данная проблема решается путем температурной стабилизации фильтра с линейной наклонной АЧХ, либо введением дополнительного (второго) измерительного канала с оптическим фильтром, характеристика температурной чувствительности которого отличается от фильтра первого канала.

#### 4.3.1 Температурная стабилизация оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой

Определяемое положение центральной частоты адресных волоконных брэгговских структур, согласно выражению (2.27), линейно зависит от смещения фильтра с наклонной АЧХ по частоте. Минимизация дрейфа фильтра с линейной наклонной АЧХ достигается температурной стабилизацией условий использования оптического фильтра, которая решается стандартными методами. Вместе с тем, необходимо провести оценку допустимого дрейфа спектра фильтра с линейной наклонной АЧХ для обеспечения требуемой погрешности измерений. Для этого преобразуем выражение (2.27) к виду:

$$\varepsilon_F = \frac{1}{2} \sqrt{\Omega^2 + \frac{2(D + \varepsilon_D)}{u^2}} - \frac{\omega + \Omega}{2} - \frac{v}{u}, \quad (4.9)$$

где  $D$  – амплитуда электрического сигнала на выходе фотодетектора на адресной частоте АВБС,  $\varepsilon_F$  – случайное смещение по частоте линейной наклонной АЧХ оптического фильтра,  $\varepsilon_D$  – погрешность определения амплитуды электрического сигнала на фотодетекторе,  $\omega$  – положение центральной частоты АВБС,  $\Omega$  – адресная частота АВБС,  $u$  и  $v$  – параметры прямой, описывающей

линейную АЧХ оптического фильтра. В качестве примера для оценки величины допустимого смещения спектра фильтра с линейной наклонной АЧХ используем параметры, полученные в ходе компьютерного имитационного моделирования малосенсорной системы с близкими центральными частотами АВБС, описанного в главе 2 настоящей работы: примем  $D = 1360 \text{ мВт}^2$ ,  $\omega = 110 \text{ усл. ед.}$ ,  $\Omega = 8 \text{ усл. ед.}$ ,  $u = 0,4167 \text{ мВт/усл. ед.}$ ,  $v = 0 \text{ мВт}$ . Выполнив расчет при погрешности определения амплитуды электрического сигнала на фотодетекторе  $\varepsilon_D = 1,5625 \text{ мВт}^2$ , что соответствует погрешности определения центральной длины волны АВБС в 1 пм, получим величину допустимого смещения спектра фильтра линейной наклонной АЧХ, равную 3,75 усл. ед., что соответствует сдвигу длины волны в 30 пм. Таким образом, учитывая типичную температурную чувствительность ВБР, равную  $10 \text{ пм/}^\circ\text{С}$ , получаем требование к температурной стабилизации линейного наклонного фильтра, по которому его температура не должна изменяться на более чем  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{С}$  в процессе измерений.

#### *4.3.2 Использование дополнительного измерительного канала для учета температурного дрейфа оптического фильтра*

В оптико-электронных схемах опроса малосенсорных (раздел 2.2) и многосенсорных (раздел 3.2) систем предложено использование дополнительного (второго) измерительного канала для учета температурного дрейфа оптических фильтров с наклонной АЧХ. Предложенный подход заключается в том, что фильтры с линейными наклонными АЧХ имеют различные известные характеристики сдвига их центральных частот от температуры, при этом температура обоих фильтров одинакова. Зависимость центральной частоты фильтра в  $i$ -ом канале от температуры описывается выражением:

$$\omega_{Li}(T) = \alpha_i T + \beta_i, \quad i = 1, 2, \quad (4.10)$$

$\omega_{Li}$  – центральная частота оптического фильтра,  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – коэффициенты зависимости (при этом выполняется требование  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ),  $i$  – номер канала. Разность

центральных частот оптических фильтров при одной и той же температуре равна:

$$\Delta\omega_L(T) = \omega_{L1}(T) - \omega_{L2}(T) = (\alpha_1 - \alpha_2)T + \beta_1 - \beta_2. \quad (4.11)$$

В (4.6) разность центральных частот оптических фильтров соответствует разности центральных частот, определенных с помощью обоих измерительных каналов для одной и той же адресной структуры ( $\Delta\omega_{AFBS}$ ):

$$\Delta\omega_L(T) = \Delta\omega_{AFBS}(T) = \omega_{AFBS1}(T) - \omega_{AFBS2}(T). \quad (4.12)$$

Таким образом, после определения центральной частоты адресной структуры с помощью обоих измерительных каналов при известных параметрах  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  оптических фильтров становится возможным вычислить температуру данных фильтров ( $T$ ) по выражению:

$$T = \frac{\beta_2 - \beta_1 + \Delta\omega_{AFBS}}{\alpha_1 - \alpha_2}. \quad (4.13)$$

Найденное значение температуры (4.8) подставляем в (4.5) для вычисления абсолютного значения центральной частоты фильтра  $\omega_L$ , по которому определяется поправка к центральной частоте АББС:

$$\Delta\omega_{AFBS,corr} = \omega_L - \omega_{L0}, \quad (4.14)$$

где  $\omega_{L0}$  – значение центральной частоты наклонного фильтра, используемое при вычислении центральной частоты АББС. Скорректированное положение центральной частоты АББС вычисляется как сумма:

$$\omega_{AFBS,corr} = \omega_{AFBS} + \Delta\omega_{AFBS,corr}, \quad (4.15)$$

где  $\omega_{AFBS}$  – измеренное значение центральной частоты АББС до корректировки.

#### **4.4 Калибровка датчиков деформации с учетом показаний датчика температуры**

Средой формирования волоконных брэгговских решеток и периодических структур на их основе является оптическое волокно, изготавливаемое из



кварцевого стекла, которое подвержено эффекту теплового расширения. Воздействие деформаций растяжения/сжатия, лежащих в основе работы датчика деформации, невозможно напрямую отделить от воздействия внешней температуры на датчик. Несмотря на то, что эффект температурного расширения/сжатия кварцевого стекла крайне мал, он сопоставим с величиной шага периодической брэгговской структуры в волокне. Вследствие эффекта теплового расширения центральная длина волны ВБР смещается примерно на 10 пм на каждый градус Цельсия [65]. Учитывая требуемую разрешающую способность датчика деформации в 1 мкм/м и чувствительность ВБР в 1,2 пм/(мкм/м) [65], изменение температуры в 0,1 °С оказывает существенное влияние на показание датчика деформации в 0,83 мкм/м. Чтобы исключить влияние температурного расширения/сжатия оптического волокна на показания датчиков деформации, необходимо включение в измерительную систему как минимум одного датчика температуры на каждом подшипнике (глава 2, 3), причем температура всех датчиков на подшипнике считается одинаковой.

Простейшим подходом к компенсации влияния температуры является вычитание смещения центральной длины волны датчика температуры из смещения центральной длины волны датчика деформации. Данный подход применим только в том случае, когда оптическое волокно, в котором сформированы датчики деформации и температуры, идентично. К недостатку этого метода следует отнести тот факт, что оптическое волокно, которое используется для изготовления датчиков деформации и температуры редко бывает идентичным на практике.

Существует другой подход, заключающийся в том, что для датчика деформации вводится калибровочная функция особого вида, зависящая от двух параметров от сдвигов центральной длины волны датчика деформации и температуры одновременно [86 – 88]. Особый вид функциональной зависимости калибровочной функции выбирается из эмпирической зависимости величины деформации от смещения центральной длины волны датчика деформации, выраженной полиномом третьей степени, и зависимости температуры от сдвига

центральной длины волны датчика температуры, выраженной полиномом второй степени. Определение коэффициентов полинома осуществляется путем калибровки датчиков деформации.

Функциональная зависимость величины деформации от смещения центральной частоты датчика деформации определяется в виде полинома третьей степени:

$$\varepsilon = f(\Delta\omega_\varepsilon, a_n) = a_3(T) \cdot (\Delta\omega_\varepsilon)^3 + a_2(T) \cdot (\Delta\omega_\varepsilon)^2 + a_1(T) \cdot \Delta\omega_\varepsilon + a_0(T), \quad (4.16)$$

где  $\Delta\omega_\varepsilon$  – сдвиг центральной частоты датчика деформации, а коэффициенты  $a_n$ , в свою очередь, представляют собой полиномы второй степени от смещения центральной частоты датчика температуры:

$$a_n(T) = b_{2,n}(\Delta\omega_T)^2 + b_{1,n}\Delta\omega_T + b_{0,n}. \quad (4.17)$$

Подставив (4.17) в (4.16), получим зависимость деформации от смещения центральных частот датчиков деформации и температуры ( $\Delta\omega_\varepsilon, \Delta\omega_T$ ):

$$\varepsilon = f(\Delta\omega_T, \Delta\omega_\varepsilon, b_{m,n}) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^3 b_{m,n}(\Delta\omega_T)^m \cdot (\Delta\omega_\varepsilon)^n. \quad (4.18)$$

Задача совместной калибровки датчиков деформации и температуры заключается в нахождении 12 неизвестных коэффициентов  $b_{m,n}$  зависимости (4.18), которая фактически представляет собой уравнение двумерной поверхности в координатных осях ( $O\Delta\omega_\varepsilon, O\Delta\omega_T, O\varepsilon$ ). Процедура калибровки включает в себя замеры сдвигов центральных частот датчиков деформации ( $\Delta\omega_\varepsilon$ ) и температуры ( $\Delta\omega_T$ ) при заданных значениях деформации и температуры на калибровочном стенде. Диапазон изменения деформации и температуры при калибровке выбирается из требуемого рабочего диапазона измерений, данные измерений записываются в массив  $\{\Delta\omega_{Ti}, \Delta\omega_{\varepsilon i}, T_i, \varepsilon_i\}, i = \overline{1, N}$ . Определение коэффициентов  $\{b_{m,n}\}, m=\{2,1,0\}, n=\{3,2,1,0\}$  ведется методом наименьших квадратов, требуя минимума функционала:

$$\Phi(b_{m,n}) = \sum_{i=1}^N (\varepsilon - \varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^N (F(\Delta\omega_\varepsilon, \Delta\omega_T, b_{m,n}) - \varepsilon_i)^2 \rightarrow \min. \quad (4.19)$$

Условие минимума (4.19) эквивалентно равенству нулю всех частных производных функционала  $\Phi(b_{m,n})$  по  $b_{m,n}$ :

$$\frac{\partial \Phi(b_{m,n})}{\partial b_{m,n}} = \sum_{i=1}^N \left[ (F(\Delta\omega_{\varepsilon i}, \Delta\omega_{Ti}, b_{m,n}) - \varepsilon_i) \frac{\partial F(\Delta\omega_{\varepsilon i}, \Delta\omega_{Ti}, b_{m,n})}{\partial b_{m,n}} \right] = 0, \quad (4.20)$$

$$\forall m \in \{2,1,0\} \cup n \in \{3,2,1,0\}.$$

Что дает систему из двенадцати линейных уравнений относительно неизвестных  $b_{m,n}$ :

$$\begin{aligned} & b_{2,3} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{2+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{3+n} + b_{2,2} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{2+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{2+n} + b_{2,1} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{2+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{1+n} + \\ & + b_{2,0} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{2+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^n + b_{1,3} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{1+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{3+n} + b_{1,2} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{1+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{2+n} + \\ & + b_{1,1} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{1+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{1+n} + b_{0,1} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^m \Delta\omega_{\varepsilon i}^{1+n} + b_{0,0} \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^m \Delta\omega_{\varepsilon i}^n = \\ & = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \Delta\omega_{Ti}^m \Delta\omega_{\varepsilon i}^n. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Систему уравнений (4.21) можно представить в матричной форме

$$[A] \times [B] = [C], \quad (4.22)$$

где  $[A]$  – матрица коэффициентов,  $[B]$  – искомые коэффициенты,  $[C]$  – свободные члены.

Элементы матрицы  $[A]$  имеют вид:

$$[A] = a_{m,n} = \sum_{i=1}^N \Delta\omega_{Ti}^{2+m} \Delta\omega_{\varepsilon i}^{3+n}, \quad m = \{2,1,0\}, \quad n = \{3,2,1,0\}. \quad (4.23)$$

Матрица  $[A]$  имеет размерность  $12 \times 12$ , содержит 144 элемента, из которых уникальными являются лишь 35 элементов, что облегчает задачу по их вычислению.

Вектор свободных членов  $[C]$  имеет вид:

$$[C] = [c_k] = [c_{m,n}] = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \Delta\omega_{Ti}^m \Delta\omega_{\varepsilon i}^n, \quad m = \{2,1,0\}, \quad n = \{3,2,1,0\}. \quad (4.24)$$

Необходимо отметить, что при отсутствии воздействия деформации ( $\Delta\omega_\varepsilon=0$ ) датчик деформации выступает в качестве датчика температуры, согласно (4.10):

$$\varepsilon = f(\Delta\omega_T, \Delta\omega_\varepsilon) = b_{2,n}(\Delta\omega_T)^2 + b_{1,0}\Delta\omega_T + b_{0,0}. \quad (4.25)$$

Система уравнений (4.22) совместна и может быть решена любым методом решения систем линейных уравнений, что полностью определяет калибровочную зависимость для каждого из датчиков.

#### **4.5 Требования к фотоприемнику, частотным фильтрам, источнику.**

##### **Оценка погрешностей измерений**

Одним из основных компонентов предложенной измерительной системы является фотоприемник, который должен работать в диапазоне частот до 15 – 20 ГГц, со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 1510 до 1590 нм, обладать низким показателем обратного отражения и иметь оптоволоконный ввод. [89]. В настоящее время на рынке имеется достаточно широкий выбор фотоприемников, отвечающих этим требованиям. Следовательно, можно определить одно из ключевых требований к выбору фотоприемника, это возможность его работы в диапазоне частот от нескольких мегагерц до 15 – 20 ГГц. Фотоприемники с большей полосой рабочих частот в настоящее время не смогут обеспечить улучшение технико-экономических показателей разрабатываемой системы в силу их высокой стоимости.

Фильтрация выходного электрического сигнала с фотоприемника осуществляется на адресных частотах адресной волоконной брэгговской структуры, что накладывает свои требования к выбору частотных фильтров. В качестве рекомендаций по выбору фильтров адресных частот можно обратиться к линейке частотных фильтров, производимых компанией «Микран» [91], характеристики которых приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Линейка фильтров компании «Микран» [91]

№	Наименование	Диапазон изменения центральной частоты $F_0$ , ГГц	Полоса пропускания, % от $F_0$	Адрес АВБС, ГГц	Адрес АВБС, пм
1	MFPD-1516-01	1,5 – 1,6	1,0	1,5 – 1,6	12 – 12,8
2	MFPW-03604-02	3,6 – 4,2	2,0	3,6 – 4,2	28,8 – 33,6
3	MFPD-4050-01	4,0 – 5,0	0,5	4,0 – 5,0	32 – 40
4	MFPW-079083-01	7,9 – 8,3	0,5	7,9 – 8,3	63,2 – 66,4
5	MFPD-1015-01	10,0 – 15,0	0,5	10,0 – 15,0	80 – 120
6	MFPW-107117-01	10,7 – 11,7	0,5	10,7 – 11,7	85,6 – 93,6

В качестве источника широкополосного излучения рекомендуется использовать суперлюминесцентные диоды с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра, превышающей диапазон изменения длин волн спектральных компонент АВБС, например, диод производства компании «Superlum» [92]. Выходная оптическая мощность источника выбирается, исходя из варианта исполнения системы контроля (малосенсорной или многосенсорной) с целью обеспечения достаточного соотношения сигнал/шум при делении излучения на два или более оптических канала.

Оценим погрешность измерений деформации на основе АВБС с двумя симметричными дискретными фазовыми сдвигами аналогично работам [38, 95]. Как правило, спектральная ширина линий в спектральном отклике АВБС, образующих адрес, составляет  $\sim 50$  МГц. С учетом адресной частоты в 10 ГГц относительная погрешность измерения посредством такой АВБС составляет порядка  $\delta_{AFBS} = 0,5\%$ . Таким образом, при максимальной деформации внешнего кольца подшипника в 800 мкм/м, максимальная абсолютная погрешность измерения деформации с помощью АВБС составит около 4 мкм/м.

Оценка погрешности измерений вследствие нелинейности АЧХ наклонного фильтра производится аналогично п. 4.2.2. Отклонение АЧХ фильтра, представленного в п. 4.2.2, от ее линейной аппроксимации составляет не более  $\delta_F = 1,47\%$  в диапазоне измерений (от 1548,5 нм до 1549,5 нм).

Погрешность измерений вследствие случайного смещения положения фильтра с линейной наклонной АЧХ при стабилизации температуры фильтра  $\pm 3$  °С составляет  $\delta_T=0,1\%$  от диапазона измерений, согласно разделу 4.3 настоящей главы.

Общая погрешность измерений складывается из погрешности измерения АВБС, погрешности вычислений центральных частот АВБС (примем  $\delta_C=0,01\%$  по результатам численного моделирования в Главе 3 настоящей работы), погрешности нелинейности склона АЧХ оптического фильтра, погрешности его температурной стабилизации и погрешностей АЦП измерительного ( $\delta_{ADC1}$ ) и опорного ( $\delta_{ADC2}$ ) каналов:

$$\delta = \sqrt{\delta_{AFBS}^2 + \delta_C^2 + \delta_F^2 + \delta_T^2 + \delta_{ADC1}^2 + \delta_{ADC2}^2}. \quad (4.26)$$

Примем погрешность АЦП равной  $0,1\%$ , тогда, исходя из вышеизложенных оценок, общая погрешность измерений составит  $\delta=1,56\%$ .

## **4.6 Экспериментальное исследование системы контроля деформации подшипника на основе адресных волоконных брэгговских структур**

### *4.6.1 Структурная схема системы контроля в сенсорной системе транспортного средства*

На рисунке 4.14 представлена структурная схема транспортного средства с системой контроля деформации ступичных подшипников (обозначена красным цветом). На схеме: СО – система опроса АВБС-датчиков, установленных на ступичные подшипники колес; БК – бортовой компьютер, осуществляющий управление системами активной безопасности автомобиля; М1 – М4 – электромоторы привода колес, соединенные с редукторами; П1 – П4 – инверторы электрического привода автомобиля.

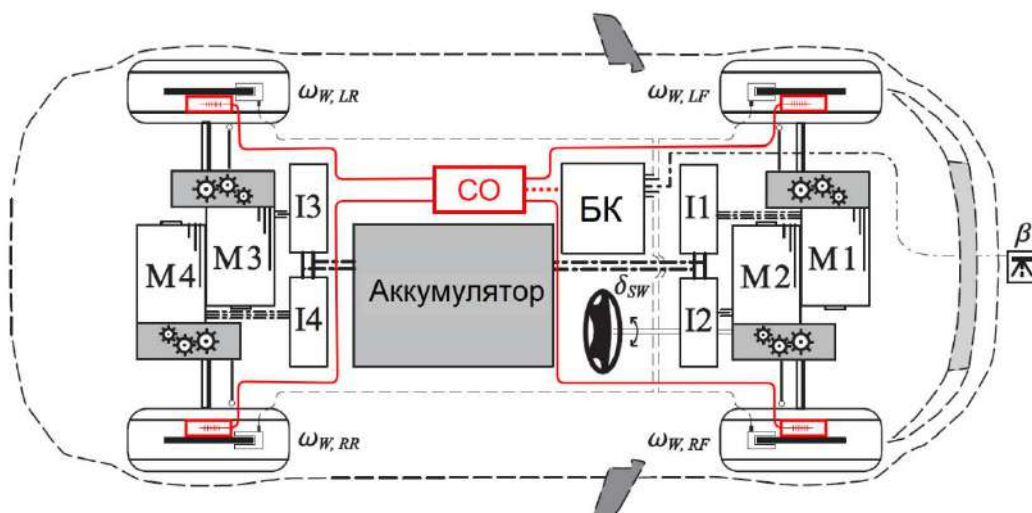


Рисунок 4.14 – Структурная схема системы контроля в сенсорной системе автомобиля

Следует отметить, что в представленной на рисунке 4.14 схеме используется четыре измерительных ступичных подшипника (по одному на каждом колесе), однако в зависимости от решаемых задач в управлении транспортным средством количество измерительных подшипников может быть уменьшено.

#### 4.6.2 Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование волоконно-оптического датчика деформации ступичного подшипника автомобиля проводилось в два этапа: 1) эксперимент малой продолжительности ( $\sim 1,5$  с), в течение которого в стенде была включена единственная АВБС (датчик деформации), поскольку влияние температуры пренебрежимо мало ввиду малой продолжительности эксперимента; 2) эксперимент большой продолжительности ( $\sim 7$  мин.), в котором к стенду была подключена вторая АВБС (датчик температуры). На рисунке 4.15 представлена структурная схема экспериментального стенда. Стенд для эксперимента малой продолжительности включает в себя источник широкополосного оптического излучения (ШИ) – суперлюминесцентный диод фирмы «Superlum» SLD-1550-3, механический пресс (МП) с установленным на нем подшипником качения автомобиля ВАЗ 2114 (СП), оснащенным волоконно-

оптическим датчиком на основе адресной волоконной брэгговской структуры с двумя дискретными фазовыми сдвигами (АВБС), оптоволоконный разветвитель (ОВР), разделяющий оптическое излучение на измерительный и опорный канал. В измерительном канале установлен оптический фильтр (ОФ), выполненный на основе волоконной брэгговской решетки и играющий роль фильтра с наклонной АЧХ, фотоприемник (ФП-1), радиочастотный фильтр на адресной частоте 6 ГГц (РЧФ-1), аналого-цифровой преобразователь (АЦП-1). В опорном канале излучение поступает напрямую на фотоприемник (ФП-2), сигнал с выхода которого преобразуется вторым аналого-цифровым преобразователем (АЦП-2). Сигналы с обоих АЦП обрабатываются портативным компьютером (ПК). Экспериментальный стенд для испытаний большой продолжительности дополнительно включает в себя вторую АВБС, включенную последовательно первой и играющую роль датчика температуры (обозначено синим на рисунке 4.15), центральная длина волны которой разнесена относительно длины волны первой АВБС, что реализует схему малосенсорной системы с разнесенными центральными частотами, разработанную в Главе 2.

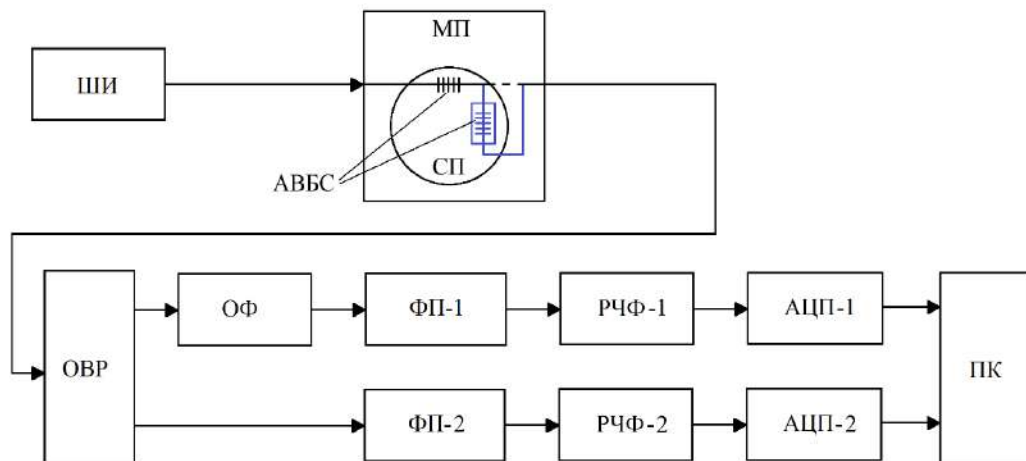


Рисунок 4.15 – Структурная схема стенда для исследования АВБС-датчика деформации ступичного подшипника (синим обозначено включение второй АВБС – датчика температуры)



Внешний вид экспериментального подшипника, установленного на стенде, представлен на рисунке 4.16,*а*, внешний вид системы опроса АВБС показан на рисунке 4.16,*б*. На рисунке 4.17 показан внешний вид датчика температуры, подключаемого к стенду для эксперимента большой продолжительности. Поскольку в экспериментальном стенде использовался подшипник типа HUB I без фланца на внешнем кольце, датчик температуры был изолирован от деформации путем закрепления его на металлической пластине, которая контактировала с поверхностью внешнего кольца подшипника во время эксперимента большой продолжительности. Спектральный отклик адресной структуры 2 $\pi$ -ВБР, записанной в лаборатории НИИ «ПРЭФЖС», представлен на рисунке 4.18. Спектральная характеристика оптического фильтра показана на рисунке 4.19.

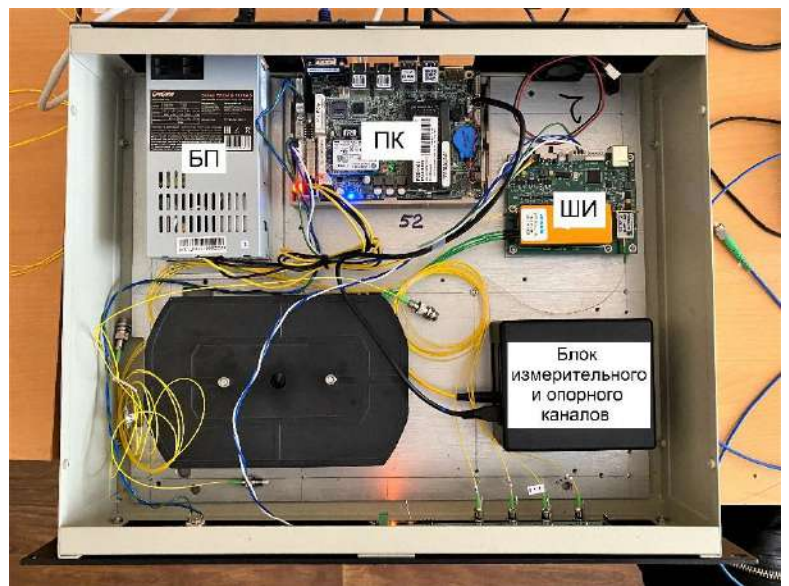
*а)**б)*

Рисунок 4.16 – Внешний вид экспериментального подшипника на механическом прессе (а); внешний вид системы опроса (б): БП – блок питания, ПК – портативный компьютер, ШИ – широкополосный оптический источник



Рисунок 4.17 – Внешний вид датчика температуры на основе АВБС

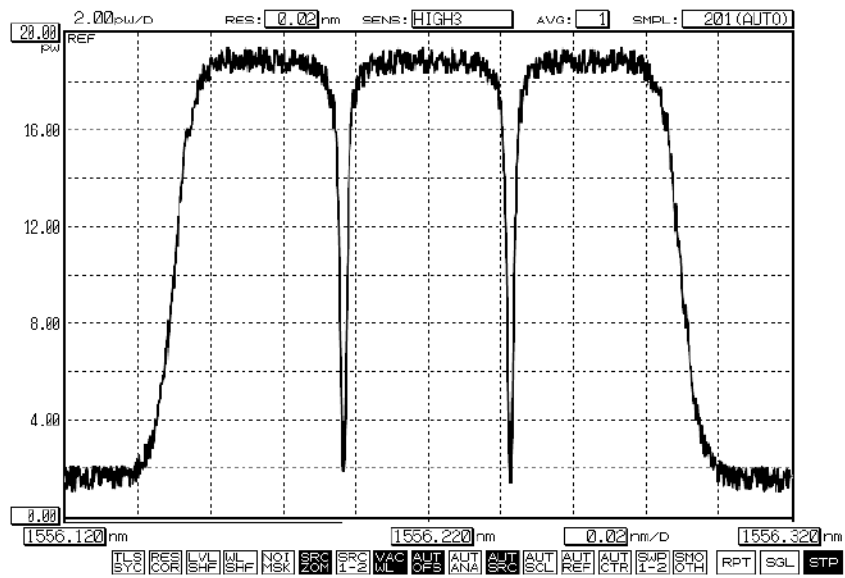


Рисунок 4.18 – Спектральный отклик АВБС типа 2π-ВБР

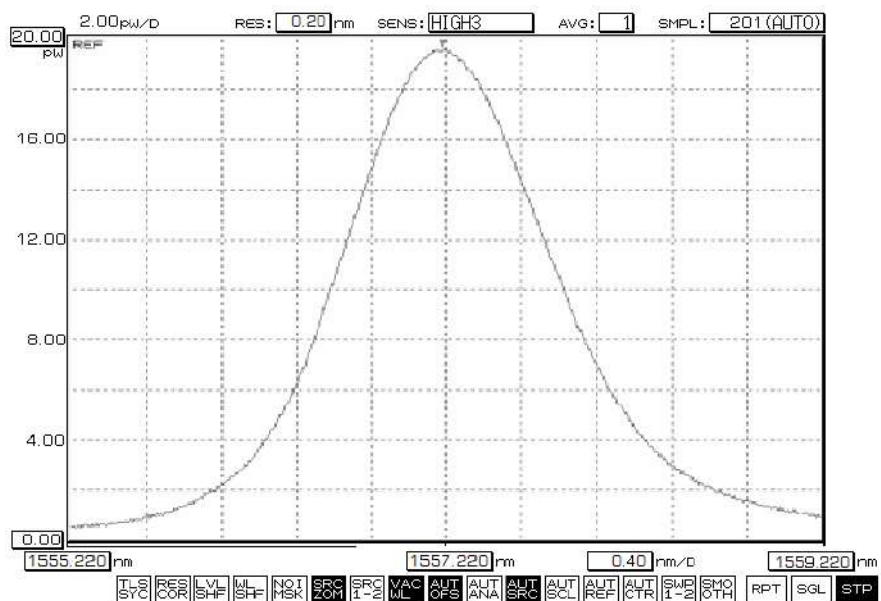


Рисунок 4.19 – Спектральная характеристика оптического фильтра

Согласно приведенным выше практическим рекомендациям по установке АБС-датчика, на внешнем кольце подшипника предусмотрено углубление в месте расположения адресной структуры (см. рисунок 4.16).

#### *4.6.3 Результаты эксперимента. Обработка измерительной информации.*

##### *Оценка погрешности.*

В ходе экспериментального исследования ступичный подшипник устанавливался на механический пресс за внутреннее кольцо. Пресс создавал постоянное усилие на внешнее кольцо подшипника, равное 2000 Н, а внутреннее кольцо вращалось с постоянной частотой в 360 об/мин посредством электрического привода. Экспериментальное исследование проводилось в два этапа: эксперимент малой продолжительности (~1,5 с), и большой продолжительности (~7 мин.). Рассмотрим результаты первого этапа испытаний. На рисунке 4.20 представлена временная зависимость относительной амплитуды сигнала биений фотоприемника на адресной частоте АБС, полученная в результате деления амплитуды сигнала в измерительном канале на амплитуду сигнала в опорном канале в ходе эксперимента малой продолжительности [96].

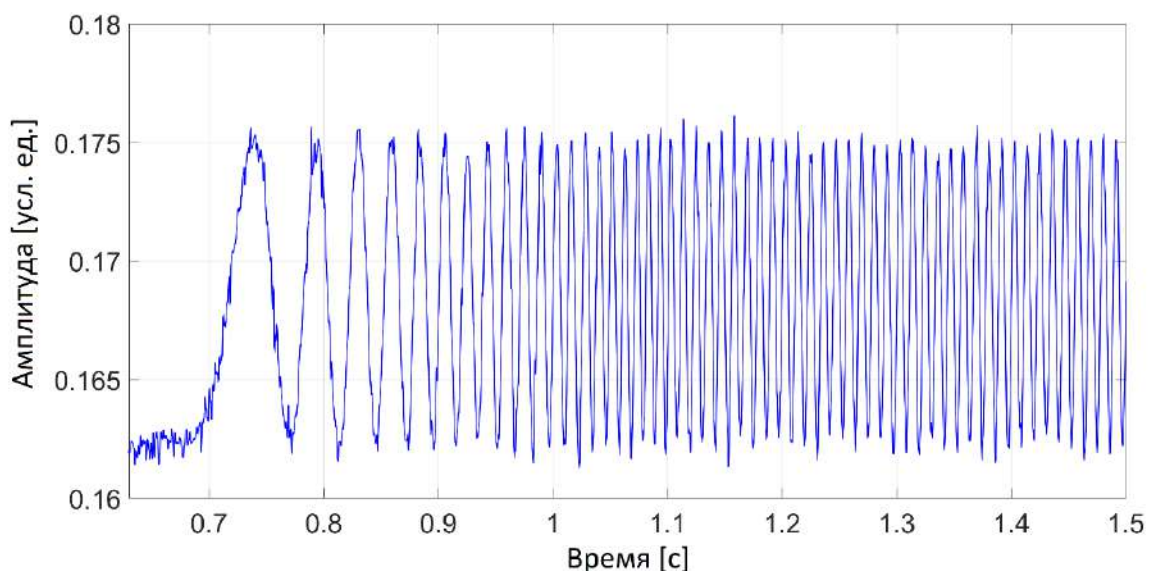


Рисунок 4.20 – Временная зависимость относительной амплитуды сигнала фотоприемников измерительного и опорного каналов

Ввиду малой длительности первого этапа эксперимента ( $\sim 1,5$  с) изменение температуры в ходе него пренебрежимо мало, поэтому датчик температуры не был задействован в стенде для эксперимента малой продолжительности.

Как было сказано в Главе 1, сдвиг центральной длины волны волоконной брэгговской структуры связан с величиной вызывающей его продольной деформации коэффициентом фотоупругости  $p_e$ , который в свою очередь определяется такими величинами, как  $n$  – показатель преломления сердцевины оптического волокна,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  – коэффициенты Поккельса,  $\mu$  – коэффициент Пуассона, и определяется по выражениям (1.6), (1.7). Для оптического волокна SMF-28 данные показатели составляют [97]:  $n_c=1,46$ ,  $p_{11}=0,116$ ,  $p_{12}=0,255$  (на длине волны 1550 нм),  $\mu=0,164$ . Таким образом, коэффициент фотоупругости для указанного оптоволокна равен  $p_e=0,207$ . Вычисленные исходя из приведенных данных значения тангенциальной деформации внешнего кольца подшипника при нагрузке в 2000 Н, представлены на рисунке 4.21.

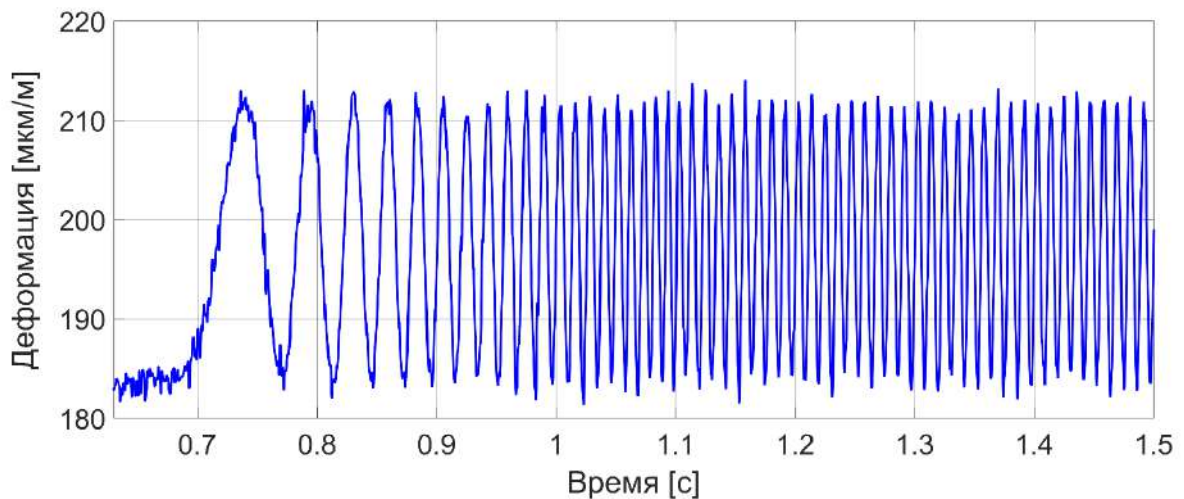


Рисунок 4.21 – Временная зависимость тангенциальной деформации внешнего кольца подшипника, измеренной с помощью АВБС

Эксперимент был повторен с увеличением нагрузки, создаваемой прессом, с 2000 Н до 3000 Н с шагом 200 Н. Для каждого случая нагрузки были определены средние значения относительной амплитуды выходных сигналов

фотоприемников и средние значения вычисленной тангенциальной деформации. Результаты представлены на рисунке 4.22.

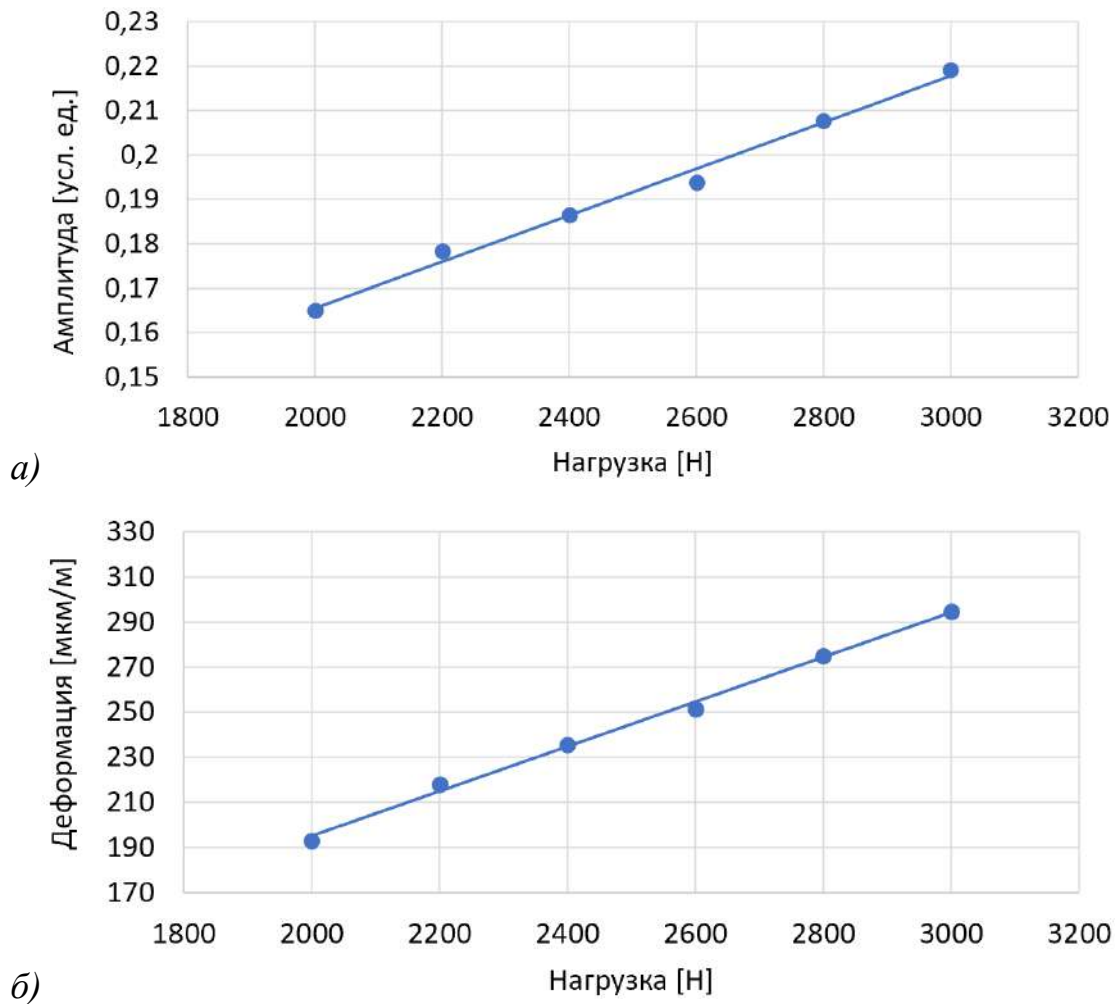


Рисунок 4.22 – Зависимость среднего значения относительной амплитуды сигналов фотоприемников от нагрузки (а), зависимость среднего значения измеренной тангенциальной деформации от нагрузки (б)

При проведении второго этапа испытаний – эксперимента большой продолжительности (~7 мин) – осуществлялась компенсация температурного воздействия на волоконно-оптический датчик деформации путем введения отдельного датчика температуры также на основе АВБС и его совместной калибровки с датчиками деформации в соответствии с методикой, описанной в Разделе 4.4 настоящей главы. В ходе продолжительного эксперимента было установлено, что температура внешнего кольца подшипника достигала 28 °С,



повысившись на  $\sim 7$  °С. Вычисленные по результатам длительного эксперимента значения тангенциальной деформации подшипника схожи с результатами, полученным в ходе эксперимента малой продолжительности.

Из результатов экспериментальных исследований было установлено, что относительная амплитуда биений сигнала на фотоприемнике и, соответственно, тангенциальная деформация внешнего кольца подшипника, измеренная АВБС при фиксированной нагрузке, имеет колебательный характер вследствие прохождения тел качения подшипника. Величины измеренной тангенциальной деформации согласуются с предсказаниями математической модели и результатами исследований других авторов [30]. Чувствительность АВБС к деформации составила  $\sim 1,17$  пм/(мкм/м).

Как было отмечено выше, частота опроса датчиков в разработанной системе ограничивается лишь производительностью аналого-цифровых преобразователей и процессора, осуществляющего вычисления центральных частот АВБС. Частота опроса датчиков в экспериментальной установке составила  $\sim 3$  кГц, что, согласно теоретической оценке, может быть увеличено до десятков или сотен кГц.

Общая инструментальная погрешность измерений складывается из следующих основных составляющих: погрешности измерения АВБС, погрешности вследствие нелинейности склона АЧХ оптического фильтра, погрешности АЦП. Погрешность вследствие температурного воздействия в ходе первого этапа эксперимента не учитывалась ввиду малого времени измерения ( $\sim 1,5$  с), в течение которого температура АВБС считалась постоянной. Погрешность измерений используемой АВБС оценивается, исходя из ширины компонент спектрального отклика, образующих адрес структуры, что составляет  $\sim 50$  МГц. С учетом адресной частоты АВБС в 6 ГГц, относительная погрешность измерения составляет  $\delta_{AFBS} \approx 0,83\%$ . Погрешность нелинейности склона АЧХ оптического фильтра, определяемой по величине отклонения АЧХ данного фильтра от линейной зависимости не превышает  $\delta_F = 2,7\%$ . Погрешность

каждого АЦП по паспорту составляет не более  $\delta_{ADC} = 0,1\%$ . Следовательно, общая погрешность измерений, определяется как:

$$\delta = \sqrt{\delta_{AFBS}^2 + \delta_F^2 + \delta_{ADC1}^2 + \delta_{ADC2}^2}, \quad (4.27)$$

и составляет не более  $\delta = 2,83\%$ .

#### 4.7 Выводы по главе

В главе приведены практические рекомендации по разработке оптико-электронных схем, основных составляющих системы контроля деформации подшипников, и сформулированы рекомендации по выбору элементной базы.

Построена измерительная система на основе адресных волоконных брегговских структурах и проведено экспериментальное исследование контроля деформации подшипника, результаты которого подтвердили основные теоретические положения, корректность предсказаний предложенной математической модели, и выполненные оценки погрешности измерений.

Даны практические рекомендации по выбору конструкции ступичных подшипников и мест установки датчиков деформации и температуры на внешнее кольцо подшипника. Даны практические рекомендации по выбору и формированию волоконно-оптических элементов системы контроля.

Определены условия температурной стабилизации оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Предложена методика, позволяющая компенсировать температурный дрейф наклонного фильтра.

Предложена методика совместной калибровки датчиков деформации и температуры, позволяющая учесть влияние внешнего температурного поля на показания датчиков деформации.

Оценка относительной погрешности измерений на основе экспериментальной установки составила 2,83% (при теоретической оценке минимальной относительной погрешности измерений в 1,56%), что более чем в 1,5 раза

меньше требуемой погрешности измерений в 5%. Частота опроса датчиков в экспериментальной установке составила  $\sim 3$  кГц, что, согласно теоретической оценке, может быть увеличено до десятков или сотен кГц.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе проведенного анализа существующих методов и средств контроля деформации ступичных подшипников транспортных средств были выявлены пути улучшения их метрологических и технико-экономических параметров за счет применения в них адресных волоконных брэгговских структур, позволяющих упростить исполнение и увеличить частоту измерений.

2. Разработаны оптико-электронные структурные схемы малосенсорных систем в двух конфигурациях: с близкими и разнесенными центральными частотами адресных волоконных брэгговских структур, позволяющих контролировать деформацию внешнего кольца подшипника в одной точке с компенсацией температурного воздействия. Разработанные оптико-электронные схемы реализуют метод радиофотонного опроса, заключающийся в том, что прохождение широкополосного излучения через волоконную брэгговскую структуру с дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами (датчик) формирует двухчастотное оптическое излучение, при прохождении которого через фильтр с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой и последующем приеме этого излучения на фотодетекторе формируется сигнал биений на разностной частоте оптических составляющих, а амплитуда которого несет информацию о сдвиге центральной частоты брэгговской структуры. Предложено использование в схеме двух измерительных каналов, что позволяет компенсировать температурный дрейф оптических фильтров с наклонными амплитудно-частотными характеристиками. Введено понятие нормализованного коэффициента модуляции, который связывает амплитуду выходного тока фотоприемника на адресной частоте со смещением центральной частоты адресной структуры относительно фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Разработана математическая модель, описывающая выходной

ток фотоприемника, выполнено численное и имитационное моделирование малосенсорных измерительных систем, по результатам которых показана возможность однозначного определения центральных частот датчиков деформации и температуры по нормализованному коэффициенту модуляции. Разработана математическая модель влияния дрейфа центральной частоты фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой, позволяющая дать оценки его вклада в погрешность определения центральной частоты адресной структуры. Таким образом, решена задача в малосенсорной постановке – контроля деформации в одной точке внешнего кольца ступичного подшипника с контролем и компенсацией температуры.

3. Разработана радиофотонная оптико-электронная схема многосенсорной системы контроля, содержащая семь волоконно-оптических датчиков на основе с различными адресными и близкими центральными частотами. Разработана математическая модель, описывающая колебания выходного тока фотоприемника, позволяющая определять центральные частоты всех датчиков путем фильтрации информационного сигнала на адресных частотах, определения амплитуд и решения системы нелинейных уравнений. Результаты численного и имитационного моделирования подтверждают возможность однозначного определения положений центральных частот всех датчиков в многосенсорной системе. Выполнена оценка абсолютной погрешности определения центральных частот датчиков. Исследованы закономерности формирования спектрального отклика волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами, позволяющие формировать адресные и многоадресные структуры. Представленные качественные зависимости характеристик спектров брэгговских структур от параметров квазипериодической структуры с фазовыми неоднородностями могут быть использованы для получения адресных и многоадресных структур с требуемой формой оптического спектрального отклика, которые могут выступать в качестве чувствительных элементов в системах контроля деформации подшипников. Таким образом, решена задача в многосенсорной постановке, а именно контроля деформации в шести точках

внешнего кольца ступичного подшипника с контролем и компенсацией температуры.

4. Даны практические рекомендации по разработке опико-электронных схем, основных составляющих системы контроля деформации подшипников и сформулированы рекомендации по выбору элементной базы. Построена измерительная система на основе адресных волоконных брегговских структурах и проведено экспериментальное исследование контроля деформации подшипника, результаты которого подтвердили основные теоретические положения, корректность предсказаний предложенной математической модели, и выполненные оценки погрешности измерений. Даны практические рекомендации по выбору конструкции ступичных подшипников и мест установки датчиков деформации и температуры на внешнее кольцо подшипника. Даны практические рекомендации по выбору и формированию волоконно-оптических элементов системы контроля. Определены условия температурной стабилизации оптического фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Предложена методика, позволяющая компенсировать температурный дрейф наклонного фильтра. Предложена методика совместной калибровки датчиков деформации и температуры, позволяющая учесть влияние внешнего температурного поля на показания датчиков деформации. Оценка относительной погрешности измерений на основе экспериментальной установки составила 2,83% (при теоретической оценке минимальной относительной погрешности измерений в 1,56%), что более чем в 1,5 раза меньше требуемой погрешности измерений в 5%. Частота опроса датчиков в экспериментальной установке составила  $\sim 3$  кГц, что, согласно теоретической оценке, может быть увеличено до десятков или сотен кГц.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Dang, J.N. Preliminary Results Analyzing the Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems / J.N. Dang // U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2004. – 5 с.
2. Thomas, P. Crash involvement risks of cars with electronic stability control systems in Great Britain / P. Thomas // *Int. J. Vehicle Safety*. – 2006. – Vol. 1. – No. 4. – p. 267–281.
3. Lie, A. The Effectiveness of ESP (Electronic Stability Program) in Reducing Real Life Accidents / A. Lie, C. Tingvall, M. Krafft, A. Kullgren // *Traffic Injury Prevention*. – 2004. – Vol. 5. – No. 1. – p. 37–41.
4. Aksjonov, A. Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on the Complex Braking Maneuvers / A. Aksjonov, K. Augsborg, V. Vodovozov // *Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 6. – p. 382. DOI: 10.3390/app6120382.
5. Pretagostini, F. Survey on Wheel Slip Control Design Strategies, Evaluation and Application to Antilock Braking Systems / F. Pretagostini, L. Ferranti, G. Berardo [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – p. 10951–10970. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965644.
6. Viehweger, M. Vehicle State and Tyre Force Estimation: Demonstrations and Guidelines / M. Viehweger, C. Vasseur, S. van Aalst [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. – 2020. – Vol. 232. – No. 14. – p. 1883–1930. DOI: 10.1080/00423114.2020.1714672.
7. Canudas-de-Wit, C. Dynamic Friction Models for Road/Tire Longitudinal Interaction / C. Canudas-de-Wit, P. Tsiotras, V. Efstathios [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. – 2003. – Vol. 39. – p. 189–226. DOI: 10.1076/vesd.39.3.189.14152.
8. Jousimaa, O.J. Energy harvesting system for intelligent tyre sensors / O.J. Jousimaa, Y. Xiong, A.J. Niskanen [et al.] // *Proceedings of the 2016 IEEE*

Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, Sweden, 19–22 June 2016. – 2016. – Vol. 2016-August. – pp. 578–583. DOI: 10.1109/IVS.2016.7535445.

9. Hopping, K. Extending the HSRI tyre model for large inflation pressure changes / K. Hopping, K. Augsburg, F. Buchner // Proceedings of the Engineering for a Changing World: 59th IWK. Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany. 11–15 September 2017. – 2017. – 20 p.

10. Coppo, F. A Multisensing Setup for the Intelligent Tire Monitoring / F. Coppo, G. Pepe, N. Roveri, A. Carcaterra // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – No. 3. – p. 00576. DOI: 10.3390/s17030576.

11. Roveri, N. OPTYRE – A new technology for tire monitoring: Evidence of contact patch phenomena / N. Roveri, G. Pepe, A. Carcaterra // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 66–67. – p. 793–810.

12. Mendoza-Petit, M.F. A Strain-Based Method to Estimate Tire Parameters for Intelligent Tires under Complex Manuevering Operations / M.F. Mendoza-Petit, D. Garcia-Pozuelo, O.A. Olatunbosun // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – p. 2973. DOI: 10.3390/s19132973.

13. Vehicle dynamics, durability and tire testing. Kistler Group [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.kistler.com/en/applications/automotive-research-test/vehicle-dynamics-durability/tire-testing/> – свободный. (дата обращения 24.08.2020).

14. Патент США US 9,014,518 B2, Bearing Monitoring Using a Fiber Bragg Grating / A. Reedman // Дата публикации: 21.04.2015.

15. Kerst, S. Anti-lock braking control based on bearing load sensing / S. Kerst, B. Shyrokau, E. Holweg // Proc. EuroBrake. – 2015. – P. 4-6.

16. Nishikawa, K. Hub Bearing with Integrated Multi-axis Load Sensor / K. Nishikawa // Technical Review. – 2011. – Vol. 79. – p. 58–63.

17. Патент США US20070074587A1, Method and sensor arrangement for load measurement on rolling element bearing / H. Mol, G. Van Nijen // Дата публикации: 06.05.2005.

18. Kerst, S. A model-based approach for the estimation of bearing forces and moments using outer-ring deformation / S. Kerst, B. Shyrokau, E. Holweg // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – Vol. 67. – No. 1. – p. 461–470. DOI: 10.1109/TIE.2019.2897510.

19. Suzuki, M. Method for Sensing Tire Force in Three Directional Components and Vehicle Control Using This Method / M. Suzuki, K. Nakano, A. Miyoshi [et al.] // *SAE Technical Paper* – 2007. – No. 2007-01-0830. DOI: 10.4271/2007-01-0830.

20. Ohkubo, N. Brake Torque Sensing for Enhancement of Vehicle Dynamics Control Systems / N. Ohkubo, T. Horiuchi, O. Yamamoto, H. Inagaki // *SAE Technical Paper*. – 2007. – No. 2007-01-0867. DOI:10.4271/2007-01-0867.

21. Патент США US 6,920,801 B2, Measurement Device For Measuring Radial And/Or Axial Forces / B.G. Van Leeuwen et al. // Дата публикации: 26.06.2005.

22. Dincmen, E. Extremum-Seeking Control of ABS Braking in Road Vehicles With Lateral Force Improvement / E. Dincmen, B.A. Güvenç, T. Acarman // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2014. – Vol. 22. – p. 230-237.

23. Kerst, S. Wheel force measurement for vehicle dynamics control using an Intelligent Bearing / S. Kerst, B. Shyrokau, E. Holweg // *Advanced Vehicle Control AVEC'16*. – 2016. – P. 547-552.

24. Acosta, M. Virtual Tyre Force Sensors: An Overview of Tyre Model-based and Tyre Modelless State Estimation Techniques / M. Acosta, S. Kanarachos, M. Blundell // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2018. – Vol. 232. – No. 14. – p. 1883-1930. DOI: 10.1177/0954407017728198.

25. Нуреев, И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / И.И. Нуреев // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 2. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581).

26. Kerst, S. Reconstruction of Wheel Forces Using an Intelligent Bearing / S. Kerst, B. Shyrokau, E. Holweg // *SAE International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems* – 2016. – Vol. 9. – No. 1. – p. 196–203. DOI: 10.4271/2016-01-0092.

27. Jayashankar, A. Experimental & Modeling Study of the Influence of Support Stiffness on Load Sensing Bearings: MSc thesis. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2011. 103 p.

28. Варжель, С.В. Волоконные брэгговские решетки. Учебное пособие / С.В. Варжель. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.

29. Erdogan, T. Fiber grating spectra / T. Erdogan // *Journal of Lightwave Technology*. – 1997. – Vol. 15. – No. 8. – p. 1277–1294.

30. Den Engelse, J.A. Estimation of the Lateral Force, acting at the Tire Contact Patch of a Vehicle Wheel, using a Hub Bearing Unit instrumented with Strain Gauges and Eddy-current Sensors: MSc thesis. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2013. 149 p.

31. Li, L. Comprehensive tire-road friction coefficient estimation based on signal fusion method under complex maneuvering operations / L. Li, K. Yang, G. Jia [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 56–57. – p. 259–276.

32. Oswald, F.B. Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings / F.B. Oswald, E.V. Zaretsky, J.V. Poplawski // *Tribology Transactions*. – 2012. – Vol. 55. – No. 2. – p. 245–265. DOI: 10.1080/10402004.2011.639050.

33. Gandhi, N. Load Estimation and Uncertainty Analysis Based on Strain Measurement: With Application to Load Sensing Bearing: MSc thesis. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2013. 80 p.

34. Hill, K., Meltz, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview / K. Hill, G. Meltz // *Journal of Lightwave Technology*. – 1997. – Vol. 15. – p. 1263–1276.

35. TML Японские измерительные технологии. Каталог продукции [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://tmljp.ru/upload/iblock/e1e/Тензорезисторы%20TML.pdf> – свободный. (дата обращения 24.08.2020).

36. Ye, F. Using frequency-shifted interferometry for multiplexing a fiber Bragg grating array / F. Ye, L. Qian, Y. Liu [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Vol. 20. – p. 1488–1490.

37. Ou, Y. Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency shifted interferometry / Y. Ou, C. Zhou, L. Qian [et al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23. – p. 31484–31495.

38. Сахабутдинов, А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.07 / Сахабутдинов Айрат Жавдатович. – Казань, 2018. – 467 с.

39. FS22 Industrial BraggMETER: Static and Dynamic Optical Interrogators [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hbm.com/en/4604/fs22-industrial-braggmeteroptical-interrogator/> – свободный. (дата обращения 24.08.2020).

40. Аглиуллин, Т.А. Техническое обеспечение модельного эксперимента по исследованию несущего винта вертолета / В.В. Пахов, Д.В. Неделько, М.А. Лебянкин и др. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2019. – Т. 75. – № 4. – С. 96-101.

41. Аглиуллин, Т.А. Система контроля износа пневматической шины / Р.Р. Губайдуллин, Т.А. Аглиуллин, А.Ж. Сахабутдинов // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6(158). – С. 92-93. – DOI 10.24411/2308-6920-2019-16043.

42. Аглиуллин, Т.А. Система измерения деформации колесного подшипника на основе волоконно-оптических адресных структур / Т.А. Аглиуллин, Р.Р. Губайдуллин, А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6(158). – С. 87-88. – DOI 10.24411/2308-6920-2019-16040.

43. Аглиуллин, Т.А. Комбинированная линейная аппроксимация с притягивающей кривой как метод калибровки волоконно-оптических брэгговских



датчиков / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Фотон-экспресс. – 2020. – № 2-3(162-163). – С. 10-13.

44. Agliullin, T.A. Real-time Simulation of Microwave-photonic System for Estimating the Tangential Deformation of Tire / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, O.G. Morozov [et al.] // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020, Svetlogorsk, 01–03 July 2020. – Svetlogorsk, 2020. – P. 9166028. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166028.

45. Нуреев, И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков: дис. д-ра техн. наук: 05.11.13 / Нуреев Ильнур Ильдарович. – Казань, 2017. – 515 с.

46. Yao, J.P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors / J.P. Yao // Fiber and Integrated Optics. – 2015. – Vol. 34. – p. 230–242.

47. Li, W. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase shifted fiber Bragg grating / W. Li, M. Li, J.P. Yao // IEEE Transactions of Microwave Theory Technology. – 2012. – Vol. 60. – No 5. – p. 1287–1296.

48. Морозов, О.Г. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений / О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84–91.

49. Морозов, О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей / О.Г. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 63–67.

50. Алюшина, С.Г. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С.Г. Алюшина, П.Е. Денисенко, О.Г. Морозов, И.Р. Садыков // Нелинейный мир. – 2011. – Т. 9. – № 8. – С. 522–528.

51. Agliullin, T.A. Tire dynamic monitoring setup based on microwave photonic sensors / R. R. Gubaidullin, T. A. Agliullin, O. G. Morozov [et al.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Ufa, 20–22 November 2018. – Ufa: SPIE, 2019. – P. 111461J. – DOI 10.1117/12.2523847.

52. Agliullin, T.A. Addressed FBG-structures for tire strain measurement / T. A. Agliullin, R. R. Gubaidullin, O. G. Morozov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Ufa, 20–22 November 2018. – Ufa: SPIE, 2019. – P. 111461E. – DOI 10.1117/12.2523849.

53. Agliullin, T.A. Microwave-Photonic Sensory Tire Control System Based on FBG / R. R. Gubaidullin, T. A. Agliullin, O. G. Morozov [et al.] // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, Moscow, 20–21 March 2019. – Moscow, 2019. – P. 8706790. – DOI 10.1109/SOSG.2019.8706790.

54. Agliullin, T.A. Tire Strain Measurement System Based on Addressed FBG-Structures / T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin, O.G. Morozov [et al.] // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, Moscow, 20–21 March 2019. – Moscow, 2019. – P. 8706815. – DOI 10.1109/SOSG.2019.8706815.

55. Agliullin, T.A. Load sensing bearings for automotive applications based on addressed fiber bragg structures / T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin, O.G. Morozov [et al.] // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019, Yaroslavl, 01–03 июля 2019 года. – Yaroslavl, 2019. – P. 8814178. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814178.

56. Аглиуллин, Т.А. Радиофотонный датчик температуры высоковольтных шин / Р. Р. Губайдуллин, Т. А. Аглиуллин, А. Ж. Сахабутдинов и др. // Ядерные технологии: от исследований к внедрению - 2019 : Сборник материалов научно-практической конференции, Нижний Новгород, 17–18 октября 2019 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 215-216.

57. Аглиуллин, Т. А. Малосенсорная радиофотонная система измерения деформации ступичного подшипника автомобиля / Т. А. Аглиуллин, Р. Р. Губайдуллин // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2020: VII Молодежная международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 16–18 апреля 2020 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2020. – С. 133-135.

58. Agliullin, T.A. Mathematical modeling of the optical response from addressed fiber Bragg structure based on Lorentz function / T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin, O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov // Proceedings of SPIE: Optical Technologies for Telecommunications 2019. – 2020. – Vol. 11516. – P. 1151614. DOI 10.1117/12.2556726.

59. Agliullin, T.A. Mathematical modeling of optical response of address fiber Bragg structure using Gauss function / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, O.G. Morozov, A.Z. Sahabutdinov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Optical Technologies for Telecommunications 2019, Kazan, 19–21 November 2019. – Kazan: SPIE, 2020. – P. 1151615. – DOI 10.1117/12.2557598.

60. Аглиуллин, Т. А. Математическое моделирование оптического отклика адресной волоконной брэгговской структуры / Т. А. Аглиуллин, Р. Р. Губайдуллин // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Казань, 18–22 ноября 2019 года. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2019. – С. 88-90.

61. Губайдуллин, Р. Р. Математическое моделирование оптического отклика адресной волоконной брэгговской структуры с помощью функции Гаусса / Р. Р. Губайдуллин, Т. А. Аглиуллин // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019 : материалы XVII Международной научно-технической конференции, Казань, 18–22 ноября 2019 года. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2019. – С. 204-205.

62. Аглиуллин, Т.А. Уточнение центральной длины волны узких волоконных брэгговских решеток в условиях малой разрешающей способности оптического анализатора спектра и флуктуирующем уровне мощности / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, В.И. Анфиногентов и др. // Вестник НЦБЖД. – 2020. – № 2(44). – С. 160-166.

63. Agliullin, T.A. Numerical modeling of microwave-photonic sensor system for load sensing bearings / A.Z. Sakhabutdinov, T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin [et al.] // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, Saint-Petersburg, 01–05 июня 2020 года. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 9131447. – DOI 10.1109/WECONF48837.2020.9131447.

64. Аглиуллин, Т. А. Численное исследование системы опроса радиофотонных адресных датчиков деформации колесного подшипника / Т. А. Аглиуллин, А. А. Иванов // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 451-457.

65. Fajkus, M. A Non-Invasive Multichannel Hybrid Fiber-Optic Sensor System for Vital Sign Monitoring / M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – p. 111.

66. Аглиуллин, Т. А. Моделирование радиофотонной тензометрической системы колесного подшипника / Т. А. Аглиуллин // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 446-451.

67. Agliullin, T.A. Modeling of microwave-photonic system for assessing the tangential component of tire deformation / O.G. Morozov, T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin [et al.] // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, Saint-Petersburg, 01–05 June 2020. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 9131541. – DOI 10.1109/WECONF48837.2020.9131541.

68. Vishay Micro-Measurements. Noise Control in Strain Gage Measurements. Tech Note TN-501-2, Document number 11051, Vishay Micro-Measurements, 2013. [электронный ресурс]. Режим доступа: [https://intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes\\_TechTips/TN-501.pdf](https://intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-501.pdf) – свободный. (дата обращения 02.09.2020).

69. Keller, D. Jr. Comparison of resistance-based strain gauges and fiber bragg gratings in the presence of electromagnetic interference emitted from an electric motor: MSc thesis. Fairbanks, USA: University of Alaska Fairbanks, 2018. 60 p.

70. Genuchten, E. Multi-parameter Fibre Optic Sensing System for Remote Condition and Operation Monitoring of Gearbox Bearings in Rack and Pinion Jacking Systems / E. Genuchten, J. Alvarez, S. Eesbeek // Proceedings of the Eleventh International Workshop on Structural Health Monitoring, September 12–14, 2017. – 2017. – p. 648–663. DOI: 10.12783/shm2017/13921

71. Wheel bearings. Technology, Development and product overview // Schaeffler Automotive Aftermarket GmbH & Co. KG - Central & Logistics Center, 2017 [электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/automotive-aftermarket/brochure\\_1/download\\_4/saam\\_3/schaeffler-aftermarket-brochure-fag-radlager-en-7640.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/automotive-aftermarket/brochure_1/download_4/saam_3/schaeffler-aftermarket-brochure-fag-radlager-en-7640.pdf) – свободный. (дата обращения 02.09.2020).

72. Пуртов, В.В. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских решетках для катетеров манометрии высокого разрешения: дис. канд. техн. наук: 05.11.07 / Пуртов Вадим Владимирович. – Казань. – 2019. – 163 с.

73. Аглиуллин, Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13

74. Agliullin, T. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov [et al.] // *Sensors*. – 2020. Vol. 20. – No. 9. – p. 2693.

75. Agliullin, T.A. Modeling of Spectrum Response of Addressed FBG-Structures in Load Sensing Bearings / A. Zh. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, T.A. Agliullin [et al.] // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 19–20 March 2020. – Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9078659. – DOI 10.1109/IEEE-CONF48371.2020.9078659.

76. Agliullin, T.A. Application of Gaussian Function for Modeling Two-Frequency Radiation from Addressed FBG / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, I.I. Nureev [et al.] // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 19–20 March 2020. – Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9078587. – DOI 10.1109/IEEE-CONF48371.2020.9078587.

77. Аглиуллин, Т.А. Управление тонкой структурой трёхкомпонентных адресных брэгговских измерительных преобразователей, последовательно записанных в оптическое волокно квазираспределённой радиофотонной сенсорной системы / Т.А. Аглиуллин, Р.Р. Губайдуллин, А.А. Кузнецов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 4(48). – С. 72-81. – DOI 10.25686/2306-2819.2020.4.72.

78. Kashyap, R. *Fiber Bragg Gratings* / R. Kashyap. – Cambridge: Academic Press, 1999. – P. 478. doi: 10.1016/B978-0-12-372579-0.00010-7.

79. Hub Unit Bearings // NSK Cat. No. E4201b. 2007. 43 P. [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nsk.com/common/data/ctrGpdf/e4201b.pdf> – свободный. (дата обращения 28.01.2021).

80. Dragomir, A. Inscription of fiber Bragg gratings by ultraviolet femtosecond radiation / A. Dragomir, D.N. Nikogosyan, K.A. Zagorulko [et al.] // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28. – No. 22. – P. 2171–2173.

81. Chehura, E. A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength / E. Chehura, S.W. James, R.P. Tatam // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7503. – P. 750379.

82. Мисбахов, Р.Ш. Волоконно-оптическая многосенсорная система для контроля температуры коммутационных и токоведущих элементов энергетических объектов на основе брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми сдвигами: дис. канд. техн. наук: 05.11.07 / Мисбахов Рустам Шаукатович. – Казань. – 2017. – 173 с.

83. Математическое моделирование волоконно-оптических сенсорных систем / Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Анфиногентов В.И., Кузнецов А.А.; под ред. О.Г. Морозова. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2019. – 92с.

84. Misbakhov, R.Sh. Development of an Automated Lighting Control System Based on Machine Vision and Wireless Communication Channels / D.A. Ivanov, M.F. Sadykov, R.Sh. Misbakhov et al. // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11. – No. 13. – p. 2893-2898.

85. Adams, M.J. An Introduction to Optical Waveguides / M.J. Adams. – New York: J. Wiley and Sons, 1981. – 412 p.

86. Agliullin, T.A. Application of addressed fiber bragg structures for measuring tire deformation / R.R. Gubaidullin, A.Z. Sahabutdinov, T.A. Agliullin [et al.] // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019, Yaroslavl, 01–03 July 2019. – Yaroslavl, 2019. – P. 8813908. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813908.

87. Ледянкин, М.А. Методология подготовки модельного эксперимента по исследованию упругоподобного несущего винта вертолета / М. А. Ледянкин, С. А. Михайлов, Д. В. Неделько, Т. А. Аглиуллин // Ученые записки ЦАГИ. – 2020. – Т. 51. – № 6. – С. 76-84.

88. Ледянкин, М.А. Измерение деформаций лопасти модельного несущего винта вертолета на основе радиофотонного метода / М. А. Ледянкин, С. А. Михайлов, Д. В. Неделько, Т. А. Аглиуллин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2020. – № 4. – С. 188-191.

89. Ultrafast Fiber Optic Photodetector Modules, OEM Package [электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=11975#ad-image-0](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11975#ad-image-0), свободный (дата обращения 24.03.2021).

90. Полосно-пропускающие фильтры [электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.micran.ru/productions/microwave\\_electronics/milinks/filter/](https://www.micran.ru/productions/microwave_electronics/milinks/filter/), свободный (дата обращения 24.03.2021).

91. Hoctor, J.C. The Measurement of Automotive Wheel Loads at The Bearing Cup: MSc thesis. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 1998. 128 p.

92. Superlum [электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.superlumdiodes.com/superluminescent-diodes.htm#section3\\_0](https://www.superlumdiodes.com/superluminescent-diodes.htm#section3_0) (дата обращения: 24.03.2021).

93. Biček, M. The Bearing Stiffness Effect on In-Wheel Motors / M. Biček, R. Connes, S. Omerović [et al.] // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – No. 10. – P. 4070. DOI: 10.3390/su12104070.

94. M-Bond 610 Strain Gage Adhesive for Stress Analysis and Transducer Applications. Режим доступа: <http://www.vishaypg.com/docs/11013/bond610.pdf>, свободный (дата обращения 14.03.2021).

95. Артемьев, В.И. Волоконно-оптическая многосенсорная система контроля износа и усилия прижима токоприемников электроподвижного состава на основе адресных волоконных брэгговских структур: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Артемьев Вадим Игоревич. – Казань. – 2019. – 148 с.

96. Agliullin, T. Addressed Fiber Bragg Structures in Load-Sensing Wheel Hub Bearings / T. Agliullin, R. Gubaidullin, A. Sakhabutdinov [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No 21. – P. 1-14. – DOI 10.3390/s20216191.

97. Roselló-Mechó, X. Measurement of Pockels' coefficients and demonstration of the anisotropy of the elasto-optic effect in optical fibers under axial strain / X. Roselló-Mechó, M. Delgado-Pinar, A. Díez, M.V. Andrés // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – No. 13. – P. 2934-2937. DOI: 10.1364/OL.41.002934.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

На правах рукописи

**АГЛИУЛЛИН ТИМУР АРТУРОВИЧ**

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ ПОДШИПНИКОВ ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ  
БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР**

Специальность 05.11.07 –  
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Сахабутдинов Айрат Жавдатович

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по НИИД  
КНИТУ-КАИ

д.т.н., профессор  
С.А. Михайлов

2021 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта КНИТУ-КАИ  
Аглиуллина Тимура Артуровича:

Комиссия в составе:

- Надеев А.Ф. – директор ИРЭФ-ЦТ, профессор каф. РТС, д.ф.-м.н. – председатель комиссии;
- Файзуллин Р.Р. – председатель НТС ИРЭФ-ЦТ, зав. каф. НТВЭ, профессор, д.т.н. – зам. председателя комиссии;
- Морозов О. Г. – зав. каф. РФМТ, профессор, д.т.н. – член комиссии;
- Нуреев И.И. – профессор каф. РФМТ, доцент, к.т.н. – член комиссии,

составила настоящий акт о том, что в период с 2019 г. по настоящее время в научно-исследовательский процесс ИРЭФ-ЦТ и НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ внедрены следующие разработки, в которых используются результаты диссертационной работы Аглиуллина Т.А.:

– математические модели и экспериментальные образцы систем контроля деформации материалов на основе адресных волоконных брэгговских структур и компонентов таких систем – в рамках НИР, выполняемых НИИ ПРЭФЖС по государственному заданию Минобрнауки России КНИТУ-КАИ на проведение научных исследований в 2019 году (программа «Асимметрия», 8.6872.2017/8.9) и 2020-2022 годах (программа «Фократ», Соглашение № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020));

– алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее однозначно определять смещение центральных длин волн адресных волоконных

брэгговских структур в мало- и многосенсорных приложениях – в рамках НИР, выполняемых НИИ ПРЭФЖС по договору РФ1 (ООО «М12 Системс»);

– практические рекомендации по созданию волоконно-оптических измерительных систем для контроля деформации и температуры материалов на основе адресных волоконных брэгговских структур с радиодифракционным методом мультиплексирования и опроса датчиков – в рамках инициативных научно-исследовательских работ кафедры РФМТ по техническим предложениям АО «КПКБ» (Казань), АО «НПО «Каскад» (Чебоксары), АО ИРЗ (Ижевск).

Комиссия отмечает, что результаты диссертационной работы Аглиуллина Т.А. широко использовались и используются при выполнении инициативных и аван-проектных научно-исследовательских работ по техническим предложениям АО «КПКБ», ООО «ИРЗ ТЭК», АО «НПО «Каскад».

Председатель комиссии

Заместитель председателя комиссии

Члены комиссии



Надеев А.Ф.

Файзуллин Р.Р.

Морозов О.Г.

Нуреев И.И.



**УТВЕРЖДАЮ**

генеральный директор

ООО НПК «ОСТЕН»

В.П. Фомин

«14 мая 2021 г.»



## **А К Т**

### **о внедрении результатов диссертационной работы соискателя степени кандидата технических наук Аглиуллина Тимура Артуровича**

Комиссия в составе:

Фомин В.П. – директор – председатель комиссии;

Иванов В.Г. – главный инженер – зам. председателя комиссии;

Гримзе О.В. – конструктор – член комиссии,

составила настоящий акт о том, что при выполнении инициативных разработок совместно с кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», применялись наработки, в которых использовались результаты диссертационной работы Аглиуллина Тимура Артуровича:

– измерительная система контроля деформации материалов на основе адресных волоконно-оптических датчиков в мало- и многосенсорных конфигурациях;

– метод измерительного преобразования, заключающийся в формировании информационного сигнала непосредственно в волоконной брэгговской структуре с дискретными фазовыми сдвигами, что одновременно обеспечивает и адресный съём показаний с каждого датчика;

– компенсацию влияния внешнего температурного воздействия на датчик;

– влияние параметров адресных волоконных брэгговских структур с дискретными фазовыми сдвигами на форму их спектральных откликов, что позволило получить адресные волоконные брэгговские структуры с требуемой формой спектрального отклика в оптическом диапазоне;

– практические рекомендации по созданию системы контроля деформации материалов и основных элементов разрабатываемых приборов и систем, позволяющие упростить конструкцию и улучшить технико-экономические характеристики с учетом особенностей объекта контроля.

Комиссия отмечает, что результаты диссертационной работы Т.А. Аглиуллина широко использовались в аван-проектах, включающих концептуальные проработки приборов контроля деформации и температуры для эндохирургического применения и электросудорожной терапии. Нарботки Т.А. Аглиуллина могут быть использованы при разработке перспективных приборов и устройств.

Председатель комиссии

Заместитель председателя комиссии

Член комиссии

  
В.С. Фомин  
В.Е. Иванов  
В.В. Гримзе