

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматки»

Нурбапашев Мадияр Талгатович

Измерительный преобразователь для волоконно-оптических измерительных  
систем

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к дипломной работе

5В071600 – Приборостроение

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

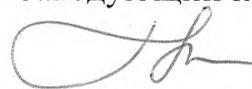
Сәтбаев Университеті

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой РТиТСА

 к.т.н., профессор  
К.А. Ожикенов

« 20 » 05 2019 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к дипломной работе

Тема: «Измерительный преобразователь для волоконно-оптических  
измерительных систем»

по специальности 5В071600 – Приборостроение

Выполнил

Нурбапашев Мадияр

Рецензент

Научный руководитель

кандидат технических наук,

Лектор

ассоц. проф

 Жамуратова М.М.

Сейдилдаева А.К.

« 20 » 05 2019 г.

« 15 » 05 2019 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Сәтбаев Университеті

Институт промышленной инженерии им. А. Буркитбаева

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматизи»

5B071600 – Приборостроение

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой РТиТСА

кандидат техн. наук

К.А. Ожикенов

« 30 » 05 2019 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Нурбапашеву Мадияру Талгатовичу

Тема: Измерительный преобразователь для волоконно-оптических измерительных систем

Утверждена приказом Ректора Университета № 1251-п от «06» 11 2018 г.

Срок сдачи законченной работы «24» мая 2019 г.

Исходные данные к дипломной работе: Методы исследования волоконно-оптически измерительных систем.

Перечень подлежащих разработке вопросов в дипломной работе:

- а) Волоконно-оптически измерительные системы
- б) Изучение преобразователей ;
- в) выбор преобразователя для дальнейшего изучения характеристик тока;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

представлены 12 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из 12 наименований \_\_\_\_\_

## ГРАФИК

подготовки дипломной проекта

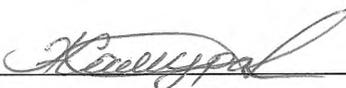
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологическая часть	15.01 – 05.02.2019 г.	Выполнено
Программная часть	02.03 – 20.04.2019 г.	Выполнено

## Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный проект  
с указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормконтролер	Ж.С.Бигалиева, магистр технических наук, лектор	20.05.2019 г.	

Научный руководитель



Жамуратова М.М.

Задание принял к исполнению обучающийся



Нурбапашев М.Т.

Дата

« 20 » май 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе была рассмотрена тема о современных преобразователях которая основана на одноволоконном двухмодовом интерферометре.

Произведённое исследование позволяет сформулировать следующие результаты работы:

- представлен обзор и сравнительный анализ преобразователей компании «МОХА». Приведены их разновидности и технические характеристики;

- на основе анализа был выбран преобразователь для дальнейшего исследования;

- был исследован принцип работы интерферометра;

- рассказано о достоинствах и недостатках преобразователя;

- о возможностях дальнейшего совершенствования данного устройства.

## АҢДАТПА

Осы дипломдық жұмыста бір талшықты екі режимді интерферометрге негізделген заманауи түрлендіргіштердің тақырыбы талқыланды.

Жұмыста қарастырылған зерттеулер мынадай нәтижелерді тұжырымдауға мүмкіндік береді:

- МОХА компаниясының түрлендіргіштеріне шолу және салыстырмалы талдау ұсынылды. Олардың түрлері мен техникалық сипаттамалары қарастырылды;

- талдау негізінде, одан әрі зерттеу үшін түрлендіргіш таңдалды;
- Интерферометр жұмысының принципі зерттелді;
- түрлендіргіштің құндылықтары мен кемшіліктері қарастырылды;
- бұл құрылғыны одан әрі жетілдіру мүмкіндігі қарастырылды.

## ANNOTATION

In this thesis work was discussed the topic of modern converters which is based on a single-fiber two-mode interferometer.

Produced research allows us to formulate the following results:

- presented a review and comparative analysis of converters of the MOXA company. Their types and technical characteristics are given;
- based on the analysis, a converter was chosen for further study;
- the principle of operation of the interferometer was investigated;
- it is told about merits and demerits of the converter;
- the possibilities for further improvement of this device.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Основные понятия и элементы волоконно-оптических измерительных систем	11
1.1	Важные составляющие волоконно-оптических систем	11
1.2	Современные волоконно-оптические преобразователи тока	12
1.3	Принцип работы ВОПТ	14
2	Анализ существующих моделей преобразователей	21
2.1	Виды преобразователей и их технологические характеристики	21
2.2	Выбор преобразователя	24
2.3	Исследование выбранного преобразователя на основе одноволоконного двухмодового интерферометра	25
2.4	Характеристика и преимущества выбранного преобразователя	30
	Заключение	32
	Список использованной литературы	33
	Приложение	

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день развитие производства, расширение круга научных исследований, мониторинг окружающей среды невозможны без измерений большого числа физических величин: электрических, механических, химических и т.д. Эти величины характеризуют состояние управляемых или исследуемых физических объектов или процессов. Поэтому в настоящее время все чаще возникает необходимость создания измерительных систем, способных осуществлять высокоэффективный сбор, передачу и обработку данных о состоянии сложных физических объектов. Например: в геофизике, океанографии и т.д. сбор информации осуществляется на больших площадях, поэтому длина информационных каналов может достигать тысяч метров. В случае использования традиционных электронных измерительных средств это приводит к появлению значительного аддитивного шума вследствие использования длинных линий для передачи относительно слабых электрических сигналов, что снижает помехозащищенность системы. Кроме того, увеличение длины информационных каналов приводит к увеличению массы и стоимости всей измерительной системы в целом.

Для создания протяженной измерительной системы в виде сети наиболее всего подходят элементы волоконной оптики. Кроме того, волоконно-оптические системы обработки и передачи информации, позволяют увеличить скорость передачи данных до 10 Гбит/с, расширить полосу пропускания передаваемых сигналов до 10 Гбит/с, уменьшить потери для канализуемого излучения до уровня менее 0,2 дБ/км, обеспечить максимальную скорость ввода данных в электронную систему обработки и хранения информации. Такие элементы имеют малые габариты, компактность, высокую помехозащищенность. Все выше перечисленное позволяет решить проблемы, возникающие при организации каналов передачи информации между измерительными преобразователями и электронной обрабатывающей системой.

Успехи в создании волоконных световодов (ВС) с заданными параметрами и достижения в разработке компонентов волоконной оптики открыли возможности эффективного использования световодов не только в системах связи, но и в измерительных системах. Возможность передавать излучение по ВС на большие расстояния практически без потерь позволяет создать распределенный волоконно-оптический измерительный преобразователь. Одноволоконный двухмодовый интерферометр (ОДИ), использующий двухмодовый ВС, позволит удешевить и упростить конструкцию измерительного преобразователя. Применение одного световода, с большим диаметром светопроводящей сердцевины, в конструкции ЧЭ позволяет частично устранить проблему согласования волокна с источниками излучения. Преимущество ОДИ также заключается в том, что взаимодействующие моды распространяются в среде с одной и той же температурой, подвергаясь одним и тем же воздействиям. Выходной сигнал изменяется только тогда, когда внешнее воздействие по-разному влияет на каждую из мод. Однако существует сложность регистрации

интерферометрической картины на выходе из ОДИ вызванной случайными набегам фазы мод из-за рассеяния на неоднородностях сердцевины и границы сердцевина-оболочка.

Поэтому одной из задач, стоящих перед исследователями при использовании ОДИ в качестве ЧЭ распределенного измерительного преобразователя, является поиск новых эффективных способов обработки интерференционной картины излучения на выходе двухмодовых ВС для эффективного выделения полезной информации на фоне модовых шумов.

Таким образом, применение распределенных волоконно-оптических преобразователей привносят новое качество или новые возможности в информационно-измерительные системы. Например, существенно уменьшается число соединительных линий и количество необходимого измерительного оборудования, а значит и стоимость измерительной системы. Малая масса и размеры, высокая прочность и гибкость ВС открывают широкие перспективы создания распределенных информационно-измерительных сетей, способных применяться для реконструкции распределения параметров крупномасштабных физических полей.

Практическая значимость работы заключается в том, что представленные в работе исследования закладывают фундамент для создания распределенных контрольно измерительных систем, предназначенных для исследования различных физических полей и мониторинга состояния природных и техногенных объектов.

Исследования технологических основ конструирования элементов распределенных волоконно-оптических измерительных систем позволили предложить принципы создания информационно-измерительных комплексов, предназначенных для создания систем управления сложным многопараметрическими процессами, охраны объектов и территорий, а также для дистанционного мониторинга технических конструкций в процессе эксплуатации.

Представленные в работе исследования принципов обработки сигналов волоконных интерферометров, определения оптимального положения рабочей точки

Измерительного преобразователя и метод компенсации ее дрейфа могут быть использованы не только при разработке высокочувствительных и стабильных измерительных элементов, распределенных волоконно-оптических измерительных сетей, но могут найти применение при создании оптимизации широкого круга измерительного преобразователя, физических величин различного функционального назначения и обеспечивать дальнейшее развитие элементной базы измерительного преобразователя интерферометрического типа.

# 1 Основные понятия и элементы волоконно-оптических измерительных систем.

## 1.1 Важные составляющие волоконно-оптических систем.

Волоконно-оптические преобразователи тока (ВОПТ) или оптический трансформатор тока представляет собой новый класс измерителей электрического тока, появившийся на рынке сравнительно недавно. Одним из первых создателей прибора этого типа является канадская фирма NXTRPhase. С 2002 года приборы этой компании проходят испытания на действующих высоковольтных линиях электропередачи в разных странах. В Казахстане наилучшие практические результаты по созданию отечественных приборов данного типа получены в компании «Профтек». ВОПТ одинаково применим как для измерения переменного тока, так и для измерения постоянного тока.

Оптические трансформаторы тока свободны от многих недостатков, свойственных традиционным электромагнитным трансформаторам тока. Прежде всего это касается электро- и пожаро-безопасности, экологичности, удобства монтажа и простоте обслуживания, отсутствия эффектов насыщения и гистерезиса при коротких замыканиях на линиях электропередачи и в электрооборудовании. Кроме того, ВОПТ позволяет измерять параметры электрического тока без дополнительного потребления энергии из линии, в то время как измерение тока с помощью традиционных трансформаторов приводит к потерям электрической энергии (по некоторым оценкам, суммарно до 5%). Ключевой особенностью ВОПТ является представление исходной информации об измеренном токе в цифровом виде. Этот факт позволяет без дополнительных преобразований собирать, обрабатывать, хранить и передавать информацию на любые расстояния в реальном времени. Не менее важной особенностью волоконно-оптического преобразователя электрического тока является крайне высокая степень помехозащищенности его чувствительного элемента. Замкнутый (пространственно) волоконный контур, который и является чувствительным элементом ВОПТ, чувствует только электрический ток в шине, которая охвачена этим контуром. Магнитное поле электрического тока в соседних шинах, расположенных вне контура, никак не влияет на точность измерений. Кроме того, точность измерений тока никак не зависит от пространственного расположения токовой шины внутри волоконного контура и формы самого контура. ВОПТ одинаково применим как для измерения переменного тока, так и для измерения постоянного тока. Отмеченные особенности крайне важны на объектах, работа которых требует контроля и управления технологическими процессами с протеканием значительных квазипостоянных электрических токов (величиной до нескольких сотен килоампер).

Отличительными качествами волоконно-оптических датчиков являются низкий дрейф, высокая чувствительность и точность, миниатюрность, длительный срок службы, высокая устойчивость к агрессивным средам и вибрации, нечувствительность к электромагнитным

помехам, большое количество подключенных датчиков с малыми габаритами регистрирующих устройств. Эти качества позволяют использовать их как в системах долгосрочного мониторинга инженерных сооружений, в том числе в условиях длительной эксплуатации на необслуживаемых участках критических объектов (судов, мостов, плотин, трубопроводов, морских платформ), так и в сложных технических установках (объектах авиационной техники), мощные электромобили). Непрерывный мониторинг состояния объектов позволяет избежать их перегрузки, переход от планового ремонта к ремонту “как есть”, недопущение или предотвращение развития аварии и, таким образом, обеспечивает значительную экономию при использовании системы.

Чувствительный элемент датчика решетка Брэгга волокна (FBG) периодическая структура, созданная внутри стекловолокна. Каждый период отражает назад небольшую часть излучения, передаваемого через оптическое волокно. Полный отраженный сигнал имеет резонанс высокого ( $k > 5000$ ) на длине волны соответствующая периоду ФБГ, который изменяет свое спектральное положение подверженный к внешнему влиянию на волокне. Система регистрации преобразует смещение отраженной FBG длины волны в цифровой сигнал. Чувствительный элемент такого датчика не содержит никаких электронных или движущихся компонентов и поэтому полностью пассивен, что означает, что его можно использовать в районах с повышенной взрывоопасностью, сильными электромагнитными помехами и т. д. Поставленные датчики упорны к интенсивной вибрации и агрессивной пользе окружающей среде. Показания датчиков не могут быть получены удаленно без подключения к оптическим волокнам измерительной системы (информационная безопасность). Используя длину волны света, в качестве информационного параметра делает датчик нечувствительным к долгосрочному дрейфу интенсивности источника и приемника, а также случайного затухания оптической мощности в волокне.

В одном оптическом канале могут быть установлены различные датчики с различными резонансными длинами волн. В этом случае на объекте измерения будет создана распределенная система регистрации.

## 1.2 Современные приборы волоконно-оптической измерительной системы

Интеррогатор (оптический регистрирующий блок) служит ключевым прибором систем измерения на основе волоконно-оптических датчиков, осуществляя одновременно регистрацию показаний каждого из подключенных датчиков и передачу измеренных показаний устройствам верхнего уровня (в простейшем случае – серверу оператора).



Рисунок 1- Интеррогатор.

Основными элементами интеррогаторов MicronOptics являются стабильный узкополосный перестраиваемый лазер, а также регистрирующие и обрабатывающие оптический сигнал, отраженный датчиками, электронные компоненты. В наиболее современных интеррогаторах моделей si 155, si 255 элементы, выполняющие эти функции, собраны в единую оптоэлектронную плату, что значительно повышает точность и быстродействие интеррогатора.

При правильном выборе резонансных длин волн датчиков, поставляемые интеррогаторы совместимы с большинством волоконно-оптических датчиков на основе ВБР, выпускаемых основными мировыми производителями, а также с некоторыми датчиками, основанными на иных физических принципах. Для ВБР — датчиков MicronOptics, максимальное число подключаемых датчиков на один канал интеррогатора составляет 16 – 40 единиц.

Волоконно-оптические датчики служат первичными преобразователями волоконно-оптических измерительных систем. Отличительными особенностями датчиков являются высокая метрологическая точность, долговечность и стойкость, при уникально малых габаритах чувствительной части датчика (что значит – тип и габариты оптимального датчика определяются спецификой решаемой задачи).

Поскольку интеррогатор (оптический регистрирующий блок) может работать с поставляемыми датчиками независимо от измеряемой датчиком физической величины, волоконно-оптические датчики идеально подходят в тех случаях, когда требуется организовать комплексную систему измерения, включающую большое число датчиков и требующую измерения сразу нескольких параметров.

### 1.3 Принцип работы ВОПТ

Работа ВОПТ основана на бесконтактном оптическом методе измерения электрического тока. Метод использует магнитооптический эффект Фарадея в кварцевом волоконном световоде. Качественно принцип работы ВОПТ поясняется на рис. 2. Две световые волны с ортогональными циркулярными поляризациями вводятся в многовитковый контур из специального световода, внутри контура находится проводник с током. Если тока в проводнике нет, световые волны распространяются по волоконному контуру с одинаковой фазовой скоростью и на выход контура приходят с нулевой относительной разностью фаз. При наличии в проводнике электрического тока световод оказывается в продольном магнитном поле протекающего тока. При этом оптические свойства световода изменяются, и скорость распространения световых волн по контуру становится разной. Соответственно, между волнами на выходе из контура возникает временная задержка и относительный фазовый сдвиг  $\varphi_F$ . Если световод имеет однородную магнитооптическую чувствительность по длине, тогда связь фазового сдвига и величины электрического тока выражается простой формулой:

$$\varphi = 2 \cdot V \cdot N \cdot I, \quad (1)$$

где  $N$  – число волоконных витков,  $V$  – константа Верде,  $I$  – измеряемый электрический ток.

Из формулы следует, что изменением числа волоконных витков можно эффективно управлять чувствительностью преобразователя и соответственно изменять пределы измерения электрического тока. На практике данная особенность делает возможным измерение токов от сотен миллиампер до сотен килоампер.

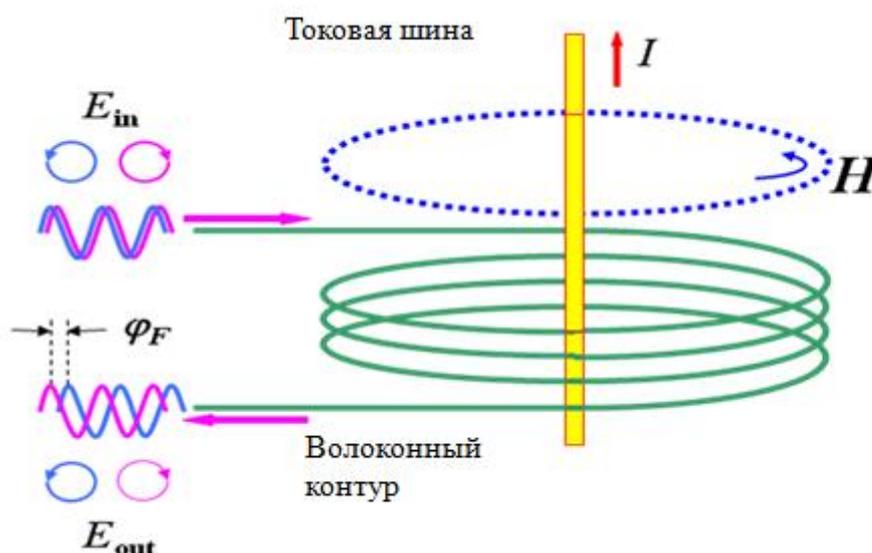


Рисунок 2 - Эффект Фарадея в волоконном световоде.

Таким образом, задача измерения тока волоконно-оптическим методом сводится к прецизионному измерению относительного фазового сдвига между световыми волнами  $\varphi_F$  в волоконном чувствительном контуре, находящемся в продольном магнитном поле электрического тока. При этом для обеспечения требований по точности адекватной классу 0.2S, погрешность измерения фазового сдвига должна находиться на уровне единиц микроградусов при полосе 1 Гц. Измерение фазовых сдвигов с подобной точностью можно реализовать, используя подходы низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии. Два момента являются при этом ключевыми – использование источника низкокогерентного света и наличие взаимного волоконного интерферометра.

Низкокогерентный свет, т.е. свет с длиной когерентности, ограниченной только несколькими десятками длин световых волн, что много меньше базы интерферометра, предлагает ряд преимуществ, необходимых для прецизионного измерения фазового сдвига с помощью волоконного интерферометра. В частности, резко снижается погрешность измерений сдвига из-за релеевского рассеяния света в волокне, изменения показателя преломления волокна под действием интенсивности светового поля, фазовых набегов из-за связи волоконных мод на неоднородностях световода, паразитных отражений в области сварки, чувствительность к нежелательным внешним воздействиям на базу интерферометра.

Основным признаком взаимного волоконного интерферометра является наличие малой разности оптических путей интерферирующих волн. Идеальным взаимным интерферометром является интерферометр с нулевой разностью оптических путей для рабочих световых волн. Такому условию удовлетворяют кольцевые интерферометры Саньяка и линейные отражательные интерферометры на ортогональных поляризационных модах. Оба названных интерферометра можно использовать для измерения фарадеевского фазового сдвига, индуцируемого магнитным полем электрического тока. В волоконных преобразователях тока, производимых «МОХА», используется отражательный волоконный интерферометр. Схема подобного интерферометра показана на рис. 3:

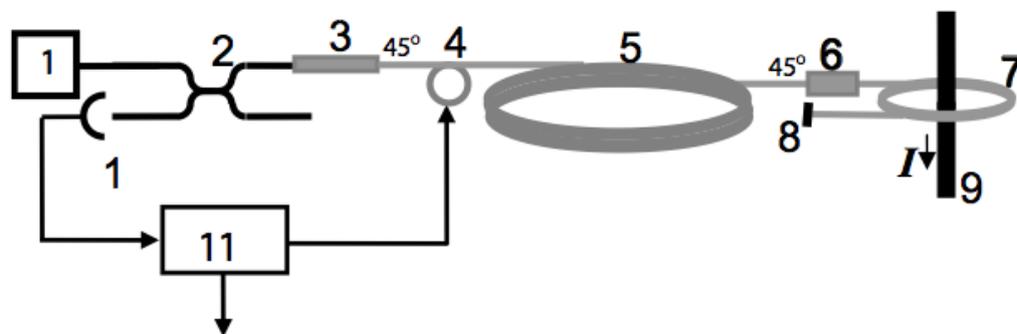


Рисунок 3 - Схема отражательного интерферометра.

Оптическая схема выполнена в цельноволокном варианте, а в качестве низко-когерентного источника излучения используется волоконный флуоресцентный источник 1 на длине волны 1550 нм. Излучение проходит через ответвитель 2 и попадает в волоконный поляризатор 3. Поляризатор

возбуждает на входе волоконного пьезомодулятора двулучепреломления 4 две линейно поляризованные световые волны равной интенсивности, но с ортогональными направлениями колебания вектора электрического поля ( $E_x$  и  $E_y$  моды). Модулятор представляет собой световод с большим линейным двулучепреломлением, намотанный на пьезоцилиндр. Пройдя модулятор, световые волны попадают в волоконную линию задержки 5, изготовленную из того же типа световода, что и модулятор. Далее линейно поляризованные моды с помощью четвертьволновой волоконной пластинки 6 конвертируются в ортогональные циркулярно поляризованные моды. Выход четвертьволновой пластинки соединен с волоконным контуром 7 на основе чувствительного hi-bisrup световода. Циркулярно-поляризованные световые волны пробегают многовитковый контур в прямом направлении и, отражаясь от зеркала 8, распространяются в обратном направлении. При отражении лево-циркулярное состояние поляризации волны конвертируется в поляризационное состояние с правым вращением и наоборот. Световые волны, распространяясь в обратном направлении, вновь проходят четвертьволновую пластинку, на выходе пластинки их поляризации конвертируются в линейные, но при этом волна, которая имела в прямом направлении  $x$  поляризацию, будет иметь при обратном распространении  $y$  поляризацию, и наоборот. В результате при отсутствии тока в пронизывающем чувствительный контур проводнике 9, оптический путь для обеих световых волн оказывается равным и волны на поляризатор 3 приходят с нулевой относительной фазой. Таким образом, имеем оптическую схему в которой компенсируются все взаимные фазовые сдвиги между световыми волнами, накопленные при их распространении в интерферометре. Единственным источником фазового сдвига  $\varphi_F$  в таком интерферометре является магнитное поле тока, протекающего через проводник 9.

Измерение фазового сдвига  $\varphi_F$  с помощью оптического интерферометра реализуется различными способами. Наиболее используемыми являются два подхода, хорошо отработанные в волоконно-оптической гироскопии: метод открытого контура и метод замкнутого контура. В первом варианте, который используется в приборах «МОХА», информационный сигнал, сформированный в оптической схеме, далее обрабатывается цифровой электронной схемой и вычисленное значение тока поступает на выходные интерфейсы прибора. Для регистрации фазового сдвига  $\varphi_F$  при этом используется метод вспомогательной фазовой модуляции. Для этой цели с помощью модулятора двулучепреломления 4 (рис. 2) вводится вспомогательная гармоническая модуляция разности фаз ортогонально поляризованных волн. В результате во времени выходной сигнал интерферометра представляет собой сумму гармоник частоты модуляции. Причем в отсутствии протекающего тока ( $\varphi_F=0$ ) в выходном сигнале присутствуют только четные гармоники частоты модуляции. Если же  $\varphi_F$  не равен нулю, в сигнале появляются также и нечетные гармоники, амплитуда которых пропорциональна величине измеряемого электрического тока и, соответственно, величине фарадеевского фазового сдвига  $\varphi_F$ . Для вычисления  $\varphi_F$  используются отношения амплитуд гармоник. При этом обеспечивается независимость вычисления  $\varphi_F$  от вариаций параметров

оптической схемы (мощность, амплитуда модуляции и т.д.) и, соответственно, высокая точность измерения тока. Во втором подходе, который можно назвать компенсационным или методом замкнутой обратной связи, на основе вычисленного фазового сдвига, обусловленного измеряемым током, формируется сигнал обратной связи, который индуцирует в оптической схеме точно такой же по величине компенсирующий фазовый сдвиг. Достоинством метода замкнутого контура является более высокая точность и более высокий верхний предел измеряемых токов. Недостатком является необходимость быстродействующего интегрально-оптического модулятора и существенно более высокая стоимость как оптической схемы, так и электронной схемы обработки.

Современный волоконно-оптический преобразователь тока (ВОПТ) состоит из трех основных частей: чувствительного волоконного элемента, устанавливаемого на токовой шине, соединительной оптической линии и электронно-оптического блока.

Фазовый сдвиг между световыми волнами, индуцированный магнитным полем измеряемого тока переносится из чувствительного элемента по соединительной кабельной линии в электронно-оптический блок обработки. Электронно-оптический блок измеряет фазовый набег, преобразует его в величину тока, и выдает измеренное мгновенное значение тока на выходные интерфейсы ВОПТ.

Чувствительный элемент – важнейший компонент высокоточного ВОПТ. Чувствительные элементы, производимые компанией «Профтек» имеют две базовые модификации: «жесткая петля» и «гибкая петля». Чувствительный элемент типа жесткой петли устанавливается на высоковольтной изоляционной колонне. Данный элемент предназначен для применения в высоковольтной энергетике ( $> 10\text{кВ}$ ) и его включение требует разрыва силовой линии. Чувствительный волоконный контур при этом размещается в жестком кожухе, залитом силиконовым компаундом. В изделиях «Профтек» в одном кожухе размещается один волоконный контур для целей коммерческого учета и два независимых защитных контура. Такое решение значительно повышает надежность передачи данных устройствам защиты и автоматики. Высоковольтные чувствительные элементы на рабочие напряжения 110 кВ и 220 кВ прошли полный цикл испытаний на электрическую прочность.

Гибкая петля представляет собой волоконно-оптический кабель, внутри которого находится магнито-чувствительное волокно. Основная область применения гибкой петли электрические линии на токи более 2 кА и напряжением до 10 кВ. Применение данного типа чувствительного элемента не требуется разрывать электрическую линию. Кабель с чувствительным волокном просто обматывается вокруг токовой шины. Количество витков определяется величиной электрического тока.

Чувствительный элемент ВОПТ при работе испытывает значительные воздействия внешней среды, в частности рабочий диапазон температур может составлять минус  $60^{\circ}\text{C}$ ... $+60^{\circ}\text{C}$ . Обеспечение класса точности ВОПТ 0.2S в таких жестких условиях требует от чувствительного световода хороших температурных свойств по чувствительности к измеряемому току.

На рис. 3 приведена температурная характеристика токовой чувствительности световодов, используемые «Профтек» в своих чувствительных волоконных элементах. По оси Y отложено значения измеряемого эталонного тока ( $I=3,125$  А, погрешность воспроизведения  $< 0.1\%$ ) при разных температурах чувствительного световода.

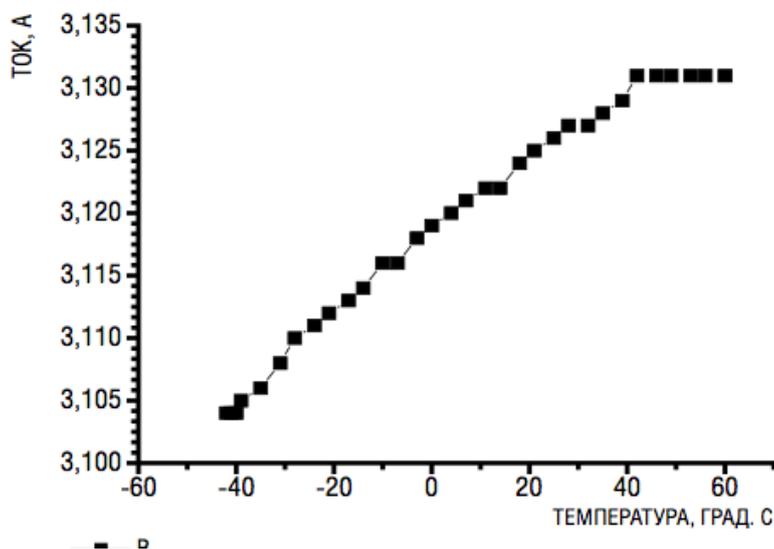


Рисунок 4 - Интегральное изменение показаний ВОПТ

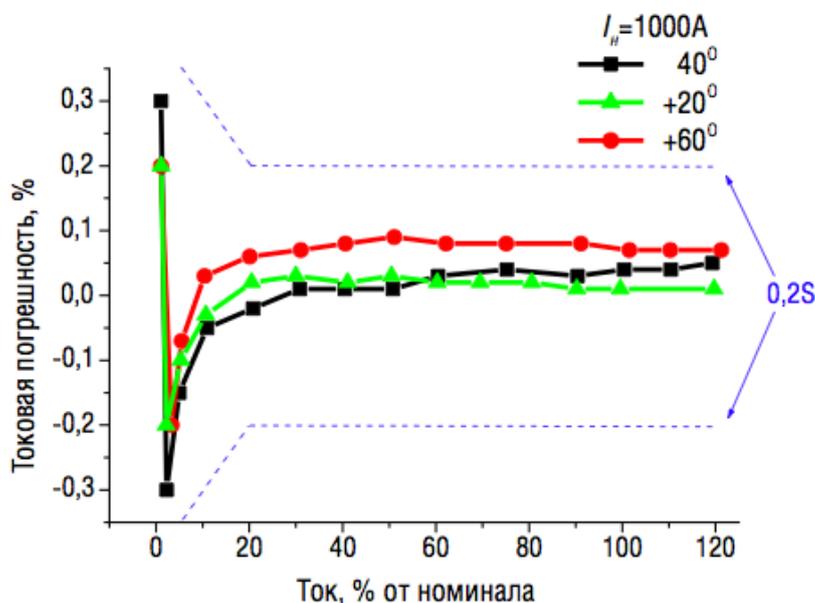


Рисунок 5 - Температурная характеристика токовой чувствительности световодов.

Из рис. 5 видно, что в диапазоне 100 градусов интегральное изменение показаний ВОПТ (магнито-оптической чувствительности световода) составляет менее 1% при высокой степени линейности температурной зависимости. Столь высокие температурные свойства позволяют без контроля температуры чувствительного элемента в диапазоне температур

100 градусов иметь в приборах «Профтек» погрешность измерения  $<\pm 0.5\%$ . Применение температурной коррекции позволяет температурную погрешность измерений в диапазоне 100-120°C снизить до уровня менее 0.1%.

На рис. 5 показаны результаты сличения эталонного классического трансформатора (класс точности 0.05%) с ВОПТ при разных температурах чувствительного элемента. Чувствительный элемент в этих сличениях помещался в термокамеру. В качестве прибора сравнения использовался прибор КНТ-05. Графики приведены для токового номинала 1000 А при трех температурах в камере: -40 °С, +20 °С, +60 °С. По оси X отложен процент от номинала тока, по оси Y токовая погрешность по отношению к показаниям эталона. Штриховая линия показывает границы погрешности, допустимые для трансформаторов тока класса точности 0.2S.

Электронно-оптический блок (ЭОБ) «Профтек» представляет собой трехфазный блок обработки токового информационного сигнала. Блок имеет модульную конструкцию и размещается в 19" стоечном корпусе высотой 3U.

Основные модули и элементы блока:

- три однофазных электронно-оптических измерителя тока (оптическая связь с чувствительными элементами обеспечивается посредством оптического кабеля, вводимого в 1U оптический кросс);
- интерфейсный модуль (обеспечивает обмен данными с измерителем напряжения);
- модуль МЭК 61850-9-2 (обеспечивает передачу данных на вторичные устройства по протоколу МЭК 61850-9-2LE);
- кросс-плата (обеспечивает питание и взаимодействие электронных модулей);
- источник оптического излучения;
- модуль питания DC-DC 5В и  $\pm 12В$ ;

Каждый однофазный электронно-оптический измеритель тока состоит из оптического модуля и электронного модуля. Базовой частью электронного модуля является четыре канала синхронных цифровых детекторов, обеспечивающих предварительное измерение гармонических компонент оптического сигнала, на основе которых с помощью сигнального процессора вычисляется значение электрического тока. Уровень шумового тока, на выходе электронно-оптического модуля в пересчете на один волоконный виток чувствительного элемента в интервале  $\pm 3\sigma$  (полоса 1Гц) составляет  $\pm 2.5А$ . Полоса частот электронно-оптического измерителя тока позволяет измерять свыше 100 гармоник сети.

Модульная конструкция, используемая в приборах «Профтек», допускает гибкое управление рабочими функциями электронно-оптического блока. Простая замена чувствительного элемента с оптическим модулем и компьютерная перенастройка конфигурационных параметров блока делают возможным использовать один и тот же ЭОБ как для целей цветной металлургии, где типовые токи имеют величину сотен кА, так и на объектах силовой энергетики, где измеряемые токи находятся в диапазоне 100 А – 10000 А. Также один и тот же ЭОБ можно перенастроить как на выполнение

измерений токов для целей релейной защиты и автоматики, так и для приборов учета электроэнергии.

Для контроля состояния ВОПТ в электронно-оптическом блоке предусмотрена самодиагностика. В реальном времени обеспечивается контроль всех основных узлов оптической и электронной частей ВОПТ. Обобщенный результат диагностики выводится на индикаторные лампочки на передней панели. Выявить конкретную область неисправности можно с помощью дисплея ВОПТ и при подключении внешнего компьютера.

Основным выходным интерфейсом ВОПТ «Профтек» является цифровой выход передачи данных по протоколу МЭК 61850-9-2LE. Для оперативного контроля метрологических характеристик в приборе также предусмотрен выход на аналоговый измерительный усилитель 1 А.

## 2 Анализ существующих моделей преобразователей

### 2.1 Виды преобразователей и их технологические характеристики

#### Волоконно-оптические преобразователи SDO OCT от Artech



Информация о тестировании волоконно-оптического измерительного преобразователя SDO OCT компании Artech на совместимость по протоколу МЭК 61850-9-2 с устройствами различных производителей добавлена в реестр совместимых устройств iReg.

По заявлению производителей совместимость SDO OCT на частоте 80 выборок/период была проверена со следующим оборудованием:

- Landis & Gyr ZMQ802C
- Alstom P442
- SEL SEL-421,

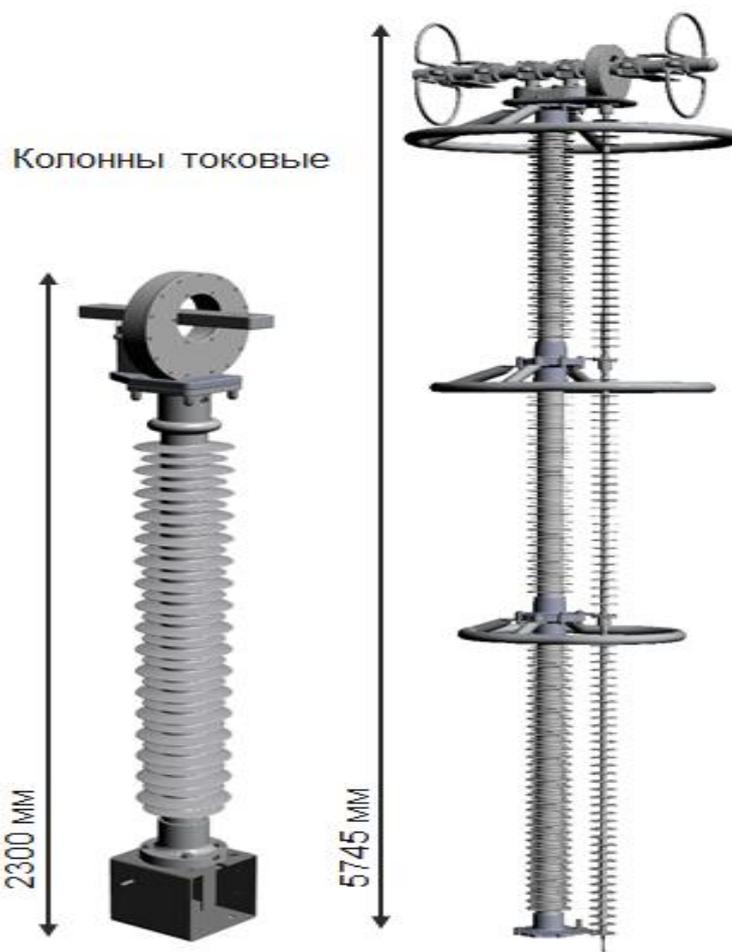
- Reason RPV-311
- ABB RET670
- OMICRON CMC356

Волоконно-оптический трансформатор Artech SDO OCT поддерживает формирование мгновенных значений по протоколу МЭК 61850-9-2 с частотой 80 и 256 выборок за период.

Измерительный преобразователь рассчитан на применение в электрических сетях напряжением от 20 до 750 кВ с номинальным током в диапазоне от 100 до 5000 А.

Электронный оптический преобразователь тока

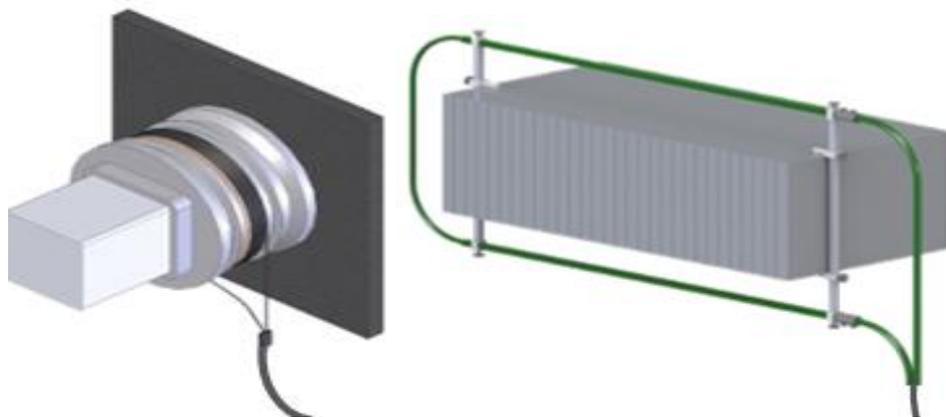
Принцип работы этого преобразователя основан на эффекте Фарадея. Электронный оптический преобразователь тока состоит из оптического волокна, измерительного элемента, токоведущей шины и из трех оптических кабеля. Первый оптический кабель служит телеизмерений и коммерческого учета, второй для релейной защиты, третий кабель служит для резервной релейной защиты. В качестве изоляции используется силиконовая рубашка, сухой воздух или гель.



Принцип работы	Эффект Фарадея в специальном оптическом волокне.
Изоляция	Силиконовая рубашка, сухой воздух или гель
Номинальное напряжение	0-500 кВ
Номинальный первичный ток	200-40000 А
Интерфейс	МЭК 61850-9-2LE
Класс точности	02s(измерения),5TRE(защита)

### Электронный оптический гибкий преобразователь тока

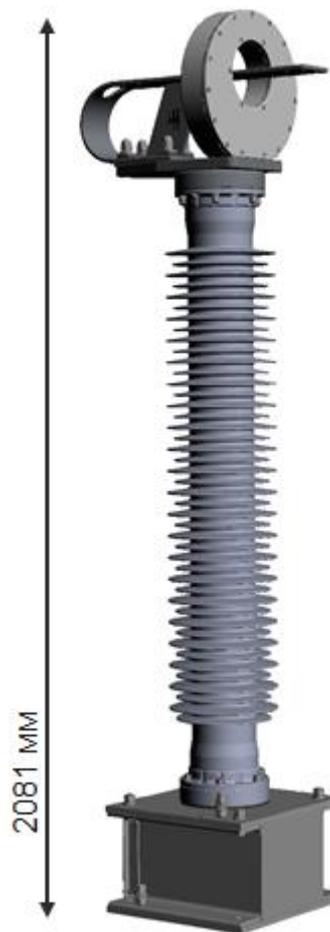
Преимуществом этого преобразователя является то, что он может как и с переменным, так и с постоянным током. Преобразователь для переменного тока состоит из чувствительного элемента и шинпровода. Преобразователь для постоянного тока состоит из шинпровода, оптического кабеля и электронно-оптического блока.



Принцип работы	Эффект Фарадея в специальном оптическом волокне. (линейный отражательный интерферометр)
Номинальный первичный ток	5000-400000 А
Интерфейс	МЭК 61850-9-2LE
Класс точности	02s(измерения); 0,05 (эталонный); 5TRE(защита)

### Комбинированный преобразователь тока и напряжения

Принцип работы основан на эффекте Фарадея касемо тока, а напряжения емкостное до 100кВ делитель с модулем АЦП. В качестве изоляции используется силиконовая рубашка, минеральное масло или азот. Состоит из токоведущей шины, измерительного элемента, изоляционной колоны с емкостным делителем, основанием с АЦП и волоконно-оптического интерфейса и оптического кабеля. По сравнению с другими преобразователями ему требуется два оптических блока, один для напряжения, другой для тока. Данный преобразователь является новинкой на рынке приборостроения и на сегодняшний день нигде не используется.



Принцип работы	Ток-Эффект Фарадея в специальном оптическом волокне.  Напряжение - емкостной(выше 100кВ) делитель с модулем АЦП
Изоляция	Силиконовая рубашка, минеральное масло, азот
Номинальное напряжение	100-145 кВ
Номинальный первичный ток	200-40000 А
Интерфейс	МЭК 61850-9-2LE
Класс точности	Ток- 02s(измерения),5TPE(защита), Напряжение- 02(измерения), 3P(защита)

## 2.2 Выбор преобразователя

Изучив и проанализировав волоконно-оптические преобразователи, было решено выбрать преобразователь который выполнен на основе одноволоконного двухмодового интерферометра.

Данный тип преобразователя обладает простой конструкцией, малым уровнем шумов, автоматизацией. Важнейшим преимуществом этого преобразователя является наличие интерферометра, действие которого

основано на явлении интерференции. Принцип действия интерферометра заключается в следующем: пучок электромагнитного излучения (света, радиоволн и т. п.) с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее количество когерентных пучков. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и направляется на экран, создавая интерференционную картину, по которой можно установить разность фаз интерферирующих пучков в данной точке картины.

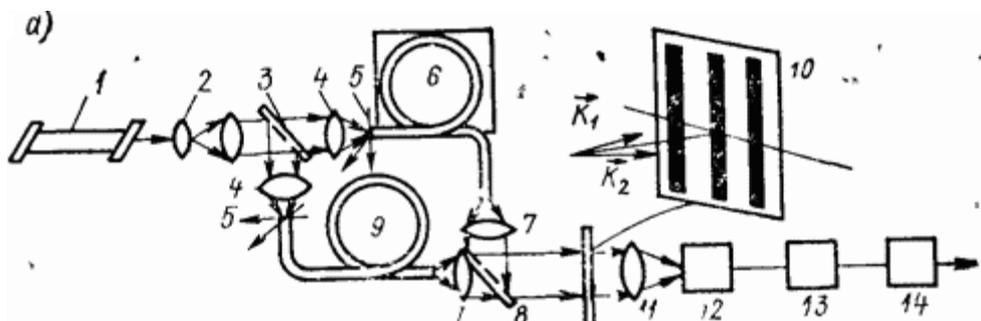


Рисунок 12 - Волоконно-оптический интерферометр  
 1-лазер; 2-коллиматор; 3,8-светоделители; 4-фокусирующая оптика;  
 5-микроподвижки; 6-рабочее волокно; 7-выходные объективы;  
 9-опорное волокно; 10-плоскость фильтрации; 11-собирающая линза;  
 12-фотодетектор; 13-усилитель; 14-блок обработки.

### 2.3 Исследование выбранного преобразователя на основе одноволоконного двухмодового интерферометра

Измерительные преобразователи на основе ОДИ отличаются простотой конструкции и малым уровнем шумов.

Как и в объемной оптике, принцип действия ОДИ основан на регистрации интерферометрическим способом произошедших в результате внешних воздействий изменений фаз распространяющихся в ВС мод. Базой ОДИ является отрезок двухмодового ВС. Подобное устройство наиболее полно соответствует принципам построения распределенных измерительных линий, а КМИ на его выходе достаточно проста и легко обрабатывается, что делает перспективным использование ОДИ для создания преобразователей РВОИС.

На рис.12 представлена схема измерительного преобразователя на основе ОДИ. Интерферометр образован двухмодовым ВС, в котором распространяются две линейно поляризованные моды  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ . Для предварительного возбуждения указанных мод используется устройство, согласующее подводящий излучение одномодовый ВС с ОДИ.



Рисунок 13 - Схема одноволоконного двухмодового интерферометра (а). Фотография картины межмодовой интерференции на выходе ОДИ (б)

При оптимальном возбуждении обеих мод на выходе ОДИ наблюдается КМИ в виде двух ярко выраженных пространственно разделенных максимумов интенсивности излучения. Распределение интенсивности такой КМИ описывается выражением:

$$I(x, y, \varphi) = [I_{01}(x, y) + I_{11}(x, y)] \cdot (1 + \cos^2 \varphi) + 2\sqrt{I_{01}(x, y)I_{11}(x, y)} \cos[(\beta_{11} - \beta_{01})L] \cos \varphi,$$

где  $L$ - длина ОДИ;

$\varphi$  - азимутальный угол в плоскости выходного торца световода;

$b_{01}, b_{11}$ - постоянные распространения мод  $BC$ ;

$I_{01}, I_{11}$ - функции пространственного распределения интенсивностей соответствующих мод.

Интенсивность максимумов КМИ на выходе ОДИ изменяется в противофазе относительно друг друга, в зависимости от изменения величины разности оптических путей для распространяющихся мод:  $(\beta_{11} - \beta_{01})L$ . Обработка такого сигнала не представляет трудностей и может быть осуществлена простым диафрагмированием одного из максимумов в КМИ. Малые перемещения диафрагмы не влияют на характер получаемой зависимости, что обуславливает технологическую стабильность технологическую стабильность такого способа обработки.

В этом случае интенсивность выходного сигнала на выходе ОДИ приблизительно равна:

$$I \approx I_0 [1 + \cos((\beta_{11} - \beta_{01})\Delta L)] \quad (1)$$

Где  $I_0$ -интенсивность мод;

$b_{11}$  и  $b_{01}$ - постоянные распространения  $LP_{11}$  и  $LP_{01}$  мод;

$\Delta L$ - удлинение базы интерферометра.

Для построения ОДИ был выбран ВС со следующими параметрами:  $n_\infty - n_{cl} = 0,006$ , диаметр сердцевины  $2r_\infty = 6$  мкм и диаметром оболочки  $2r_{cl} = 125$  мкм, полиамидное защитное покрытие. Такой ВС на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм направляет две LP моды различного порядка:  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  (рис. 12 б)). Разность постоянных распространения этих мод, составляет  $\beta_{11} - \beta_{01} \approx 2,67 \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>-1</sup> для ВС.

Зависимость изменения интенсивности одного из максимумов КМИ от удлинения световода можно рассматривать как калибровочную кривую для ОДИ. Результаты расчета калибровочной, кривой представлены на рис. 14 (линия).

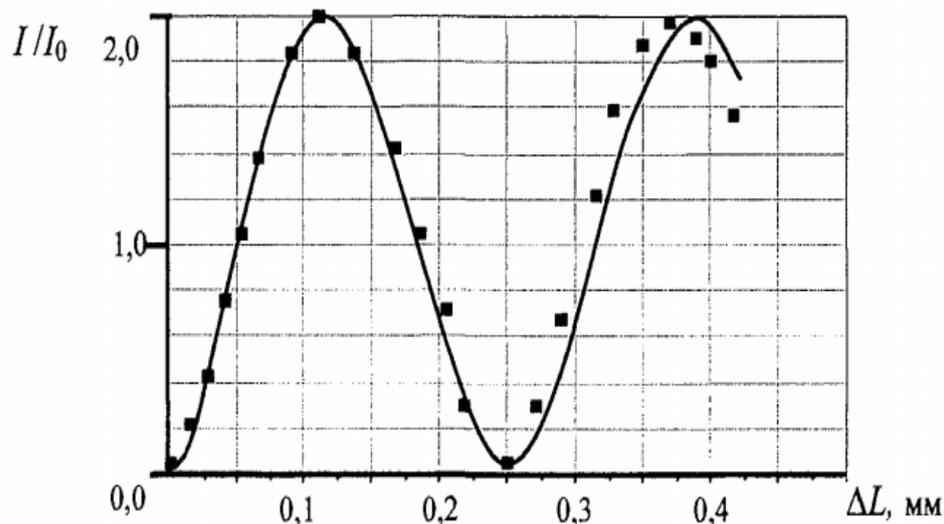


Рисунок 14 - Зависимость интенсивности излучения в одном из максимумов КМИ на выходе ОДИ от удлинения (линия-расчет, точки-эксперимент)

Проверка полученных выводов наблюдалась на установке, изображенной на рис. 15.

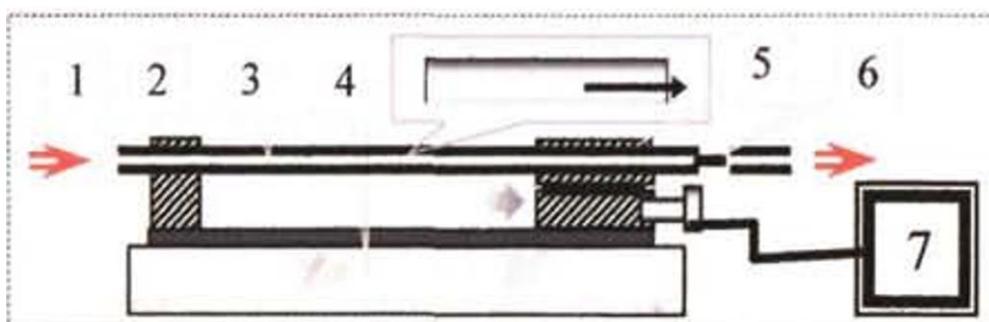


Рисунок 15 - Способ монтажа ОДИ на измерительную платформу.  
 1- входной торец двухмодового ВС; 2- неподвижная опора; 3- ОДИ;  
 4- измерительная платформа; 5- подвижная опора; 6- модовый фильтр;  
 7- преобразователь перемещения в изменение электрического тока.

При удлинении ВС экспериментально наблюдалось изменение интенсивности максимумов в КМИ, при этом усиление и ослабление яркости пятен происходило в противофазе. Результаты измерения интенсивности излучения в одном из пятен представлены на рис. 13. Как видно, теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Крутизна изменения сигнала на выходе фотоприемников в зависимости от удлинения составляет 6 мкВ/мкм, что при уровне шумов использованной измерительной системы равной 0,3 мкВ позволяет фиксировать удлинение волокна сточностью  $5 \cdot 10^{-3}$  мкм.

Стандартные меры для обеспечения оптимальных условий возбуждения мод ОДИ связаны с наклоном или смещением параллельно оси ВС сфокусированного лазерного пучка. Такая конструкция ввода излучения в ОДИ не обеспечивают стабильного состояния возбуждения мод и сложна в реализации.

Для решения проблемы обеспечения оптимальных условий возбуждения мод ОДИ были проведены исследования, направленные на разработку специального устройства согласования, представленного на рис. 16.

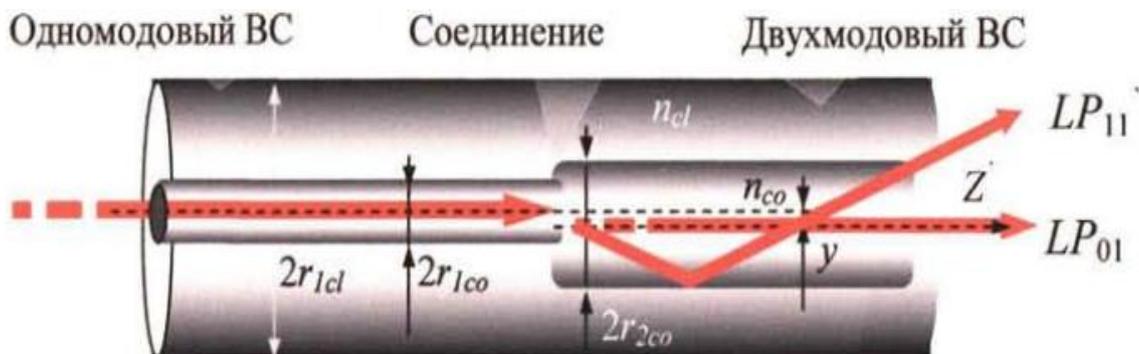


Рисунок 16 - Волоконно-оптическое устройство согласования одномодового ВС подводящего излучение и интерферометра.

Устройство согласования представляет собой волноводный переход в виде соединения одномодового и двухмодового ВС. Смещение осей ВС на величину  $y$  на соединении обеспечивает возбуждение мод  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  интерферометра  $LP_{01}$  - модой одномодового ВС. Эффективность возбуждения мод ОДИ, характеризуемая соответствующими коэффициентами возбуждения  $K_{01}$  и  $K_{11}$ , определяется относительным смещением осей ВС  $S = y/r$ .

Для определения условий оптимального возбуждения мод интерферометра запишем выражения для коэффициентов возбуждения мод  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ :

$$K_{01} = \exp\left(-S^2 \frac{V}{4}\right), \quad (1)$$

$$K_{11} = S \left(\frac{V}{2}\right)^{0,5} \exp\left(-S^2 \frac{V}{4}\right).$$

На рис. 16 представлены зависимости коэффициентов возбуждения  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ - мод от относительного смещения  $S$  для следующих параметров интерферометра:  $2r_{\infty} = 6 \text{ мкм}$ ,  $V = 9,6$ .

Как видно из графика, максимальная яркость (контраст) максимумов интерференции на выходе из ОДИ при равенстве коэффициентов возбуждения мод, наблюдается при относительном смещении осей  $S \approx 0,56$ . Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, при указанном значении  $S$  КМИ является неустойчивой. Оптимальное возбуждение мод наблюдается с несколько меньшим контрастом при  $S \approx 0,6$ .

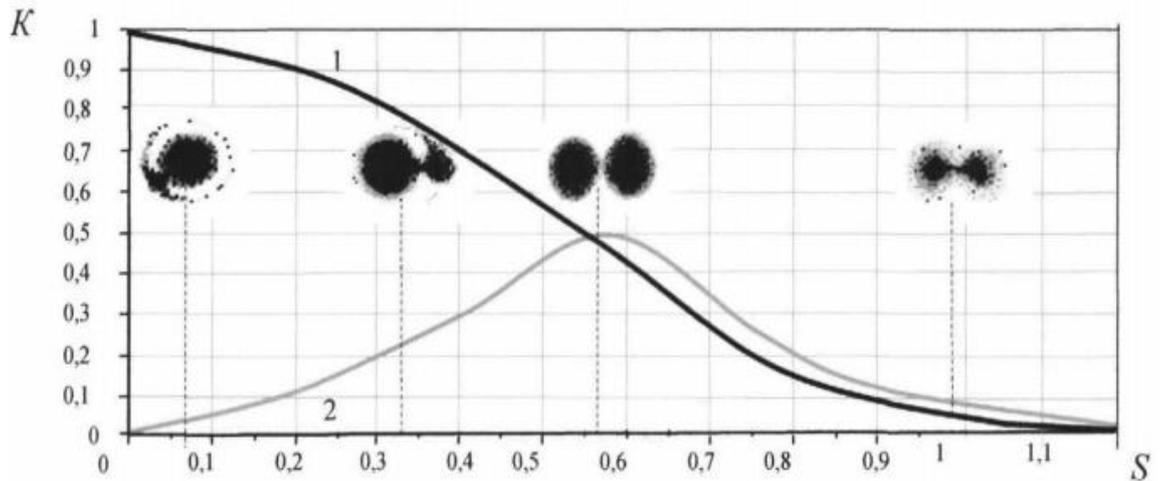


Рисунок 17 - Зависимости коэффициентов возбуждения  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ -мод от относительного смещения  $S$  возбужденного пучка. Кривые 1, 2- теоретические зависимости для  $K_{01}(S)$  и  $K_{11}(S)$  соответственно. На фотографиях представлена КМИ, проецируемая на экран, при различных соотношениях возбуждения мод.

Изготовление устройства согласования ВС сводится к стандартной процедуре сварки двух ВС (одномодового и двухмодового ВС), на аппарате для сварки световодов *KCC-121*. Сварка ВС производится при визуальном наблюдении величины смещения осей световодов.

Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на возможность создания ОДИ. Получено выражение интенсивности выходного сигнала на выходе ОДИ. Рассмотрено влияние условий возбуждения мод  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  на входе ОДИ на состояние ярко выраженных пространственно-разделенных максимумов на выходе ОДИ. Определено, что максимальная яркость (контраст) максимумов интерференции на выходе из ОДИ наблюдается при равенстве коэффициентов возбуждения мод. Решена проблема обеспечения стабильного состояния возбуждения мод  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  в ОДИ в виде волоконно-оптического устройства согласования (соединения) подводящего оптическое излучение одномодового и двухмодового ВС. Найдено относительное смещение осей, равное  $S \approx 0,6$ , соединенных ВС, когда наблюдается оптимальное и устойчивое возбуждение обоих мод.

#### 2.4 Характеристика и преимущества выбранного преобразователя

Преобразователи МОХА улучшенной серии ICF-1150 — оптимальное решение для построения автоматизированных систем сбора данных, дистанционного контроля и управления серийных устройств на основе волоконно-оптического кабеля. Экстендеры преобразуют среду передачи, одновременно уменьшая интерференцию сигналов и обеспечивая отличную защиту от электромагнитных воздействий. Все модели оборудованы тремя полностью независимыми интерфейсами: оптически, RS-232 (DB9), RS-422/485 (терминальная прокладка). Такая конфигурация позволяет подключать абсолютно любые промышленные контроллеры, датчики, средства автоматики и исполнительные механизмы к высокоскоростным

сетям максимального радиуса, а также связывать их в многоточечные, цепочные и кольцевые топологии общей протяженностью до 100 км (передатчик одного преобразователя соединен с приемником следующего и далее по цепочке).

Характеристики и преимущества

- Максимальная скорость COM-портов увеличена до 921,6 Кбит / с. Автоматические переговорные ставки устраняют потерю пакетов, а автоматическое управление направлением передачи (ADDC) оптимизирует трафик.

- Оптические маршруты обеспечат минимальную дисперсию и затухание сигнала, максимальную дальность передачи (до 40 км), полную помехозащищенность и несанкционированный доступ.

- Функция ретрансляции данных между портами упрощает связь и диагностику, позволяет резервировать связь, передавать двум клиентам и конвертировать RS-232 в RS-485 по меди.

- Широкий диапазон подтягивающих резисторов (485 ом ... 150 ком) обеспечивает стабильность сигнала при подключении большого количества устройств. Встроенные 10-ходовые поворотные выключатели.

- Элементы управления и ручная регулировка сопротивления находятся на передней панели, поэтому даже не нужно снимать преобразователь с DIN-рейки. Предусмотрена удобная система LED-индикаторов.

- Силовая цепь: 12 ... 48 В постоянного тока. Изделия имеют высокую защиту от статических разрядов (8/15 кв), перегрузок по току (1,1 а), высокоамплитудных перепадов напряжения (4 кв), импульсных помех.

- EMI/EMS: EN 55024/32, CISPR32, FCC 15B, EN 61000-4. Безвентиляторный металлический корпус IP30 предохраняет электронику от механических повреждений и имеет комплект для монтажа на DIN-рейку.

- Габариты: 30x70x115. Период наработки на отказ (MTBF) — почти 100 лет.

Все конвертеры MOXA ICF-1150 аттестованы для пользы в жестковатых промышленных средах.

Кроме того, некоторые модели выдерживают экстремальные температуры от -40 до +85 С (буква “Т” на этикетке изделия), оснащены оптической изоляцией COM - 2 кв портов (буква “I”), адаптированной для работы во взрывоопасной среде (индекс “IEX”). Эти характеристики позволяют порядку величины увеличить уже хорошее предохранение. В частности, уникальная технология бесконтактной гальванической изоляции полностью исключает риск протекания тока, повреждения цепей и обрывов связи. При выборе устройства также обращайтесь внимание на тип оптического порта. Элитное одномодовое волокно (буква “S”) гарантирует отсутствие дисперсии и максимальную дальность передачи. С другой стороны, многомодовое волокно (буква “M”) удобнее в установке и не требует больших затрат на прокладку и ремонт кабельных трасс.

Преобразователь MOXA ICF-1150, имеет трехстороннюю связь. Конвертер оборудован с 2 последовательными портами RS-232/422/485 с разъемом DB9 для порта RS 232 и отделяемым терминальным блоком для

интерфейсов RS-422 и RS-485. Все 3 порта (2 последовательных и один оптический) полностью независимы. Когда конвертер ICF-1150 получает данные через любой порт, его можно отправить через остальные 2 порта. Например, если преобразователь получает команду от удаленного главного устройства через оптический порт, он преобразует сигнал и отправляет команду через интерфейсы RS-232 и RS-422/485 одновременно. Если пользователь хочет контролировать работу сети RS-485, то нет необходимости использовать дополнительный преобразователь RS-232 в RS-485 для подключения к последовательному порту компьютера к шине RS-485. Поворотный переключатель для установки PullHigh/Low резисторов на MOXA ICF-1150

Интерфейс RS485 поддерживает многокапельную (multi-drop) и цепную (daisy-chain) топологию и позволяет подключать последовательные устройства, такие как счетчики, RTU и считыватели на одной шине. Для того чтобы предотвратить отражение последовательных сигналов, конвертер ICF-1150 оборудован с резисторами утески. Поворотный переключатель на передней панели преобразователя ICF-1150 позволяет установить требуемое значение без снятия устройства с DIN-рейки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие производства, расширение круга научных исследований, приводят к необходимости мониторинга природных и техногенных объектов, что выдвигает задачу создания протяженных(распределенных) измерительных систем.

Такие системы должны удовлетворять целому ряду требований: организации большого числа информационных каналов передач и данных, высокое быстродействие и помехозащищенность, способность функционировать в экстремальных условиях окружающей среды, в связи с этим задача исследования и разработки распределенных волоконно-оптических измерительных преобразователей, решение проблемы объединения их в единые информационно-измерительные сети и создания соответствующей элементной базы является актуальной, этому и посвящена дипломная работа. Основные результаты, сводятся в основном к следующему:

Исследована базовая конструкция многофункционального чувствительного элемента на основе одноволоконного двухмодового интерферометра. Разработана базовая конструкция измерительного преобразователя для акселерометров на основе одноволоконного двухмодового интерферометра, обеспечивающая минимально измеряемое значение ускорения приблизительно равное  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ , при неравномерности амплитудно-частотной характеристике  $\pm 0,3'10''^{\wedge} \text{ В-с}^{\wedge} / \text{ ми}$  динамическом диапазоне 50дБ.