

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.04.01 «Приборостроение»
Отделение школы (НОЦ) контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Дифракционный метод контроля диаметра протяженных изделий

УДК 620.151.1:535.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6Б	Чжан Жуйчжи		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Федоров Евгений Михайлович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Данков Артём Георгиевич	К.И.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Анищенко Юлия Владимировна	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Вавилова Галина Васильевна	К.Т.Н.		

Томск – 2018 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 26 рис., 3 табл., 28 источников, 1 прил.

Ключевые слова: дифракция, лазер, дифракция Френеля, принцип Бабин.

Объектом исследования данной работы является методы и средства контроля диаметра малых объектов.

Цель работы – исследовать возможность применения лазерных дифракционных методов для контроля волокон нитей и других изделий. Опробовать их и предложить способы позволяющие их улучшить.

В результате исследования был описан метод контроля диаметра тонких протяжённых объектов на основе эффекта дифракции. Описан способ позволяющий минимизировать влияние на результат измерения мешающих факторов, таких как чрезмерная засветка области центрального максимума. Предложен и опробован вариант технической реализации лабораторного образца дифракционного измерителя, оценены его метрологические характеристики.

Область применения: кабельное приборостроение, измерительная техника.

В будущем планируется техническая реализация прибора.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

диаметр: отрезок, соединяющий две точки на окружности и проходящий через центр окружности, а также длина этого отрезка.

дифракция: явление, которое проявляет себя как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн. Она представляет собой универсальное волновое явление и характеризуется одними и теми же законами при наблюдении волновых полей разной природы.

лазер: источник электромагнитного излучения из видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов, основанный на стимулированном излучении атомов и молекул.

принцип Бабине: принцип Бабине утверждает, что результаты, полученные для расчета задачи дифракции на отверстии можно сразу перенести на случай дифракции на плоском дополнительном экране. При дифракции Фраунгофера, исходя из принципа Бабине, получается простое правило: оба дополнительных экрана создают интерференционные картины с одинаковой интенсивностью.

дифракция Френеля: дифракционная картина, которая наблюдается на небольшом расстоянии от препятствия, по условиям, когда основной вклад в интерференционную картину дают границы экрана.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Обзор методов средств измерения геометрических параметров изделий	8
1.1 Измерение диаметра электрического кабеля	10
1.1.1 Контактные методы	10
1.1.2 Бесконтактные методы	12
1.2 Постановка задачи исследования	24
2 Теоретические основы дифракционных методов измерения	25
2.1 Дифракция Френеля.....	25
2.2 Дифракция Фраунгофера	27
2.2.1 Дифракция на одной щели	28
2.2.2 Принцип Бабиня	33
2.3 Источники излучения для наблюдения дифракции	36
2.3.1 Лазер.....	36
2.3.2 Гауссовый пучок.....	37
3 Методика проводимых исследований.....	41
3.1 Техническая реализация измерительных приборов на основе дифракционного метода.....	41
3.1.1 Источники излучения.....	41
3.1.2 Оптическая система.....	43
3.1.3 Многоэлементный приёмник.....	45

3.2 Описание экспериментальных образцов	47
4 Экспериментальные исследования	47
Заключение.....	56

Введение

В повседневной жизни и промышленном производстве, контроль объектов очень важен. Мы можем получать информацию о параметрах объектов, в особенности, при промышленном производстве. Например, геометрические параметры, электрические параметры, магнитные параметры, термические параметры и так далее. Среди них, геометрические параметры само нарядно показывают характер профиля и размера изделий.

Контроль в промышленности очень важен для улучшения качества продукции и лучшей экономической эффективности производства. В частности на производствах где выпускаются валы, проволоки, кабели и разные трубы необходим и актуален контроль их геометрических параметров.

С помощью современных методов геометрических измерения мы можем получать диаметры кабелей, толщины валов, диаметры труб и так далее. В настоящее время оптические методы неразрушающего измерения - это наиболее перспективные методы для получения геометрических параметров протяжённых изделий. Здесь мы уделим особое внимание им.

Очень важной и актуальной задачей является контроль диаметра протяжённых изделий малого сечения (от единиц до сотен мкм), таких как синтетические волокна, нити, тонкие проволоки и т.п. В связи с их малым сечением для их измерения не применимы классические методы, используемые для изделий сравнительно большого сечения. Для решения данной задачи наиболее хорошо подходят интерференционные методы контроля, которые

обладают более высокой разрешающей способностью в данном диапазоне значений.

Задача работы состоит в обзоре современных методов и средств измерения геометрических параметров изделий и исследовании некоторых аспектов применения интерференционных методов, позволяющих по распределению дифракционных экстремумов получать значение контролируемого геометрического параметра.

1. Обзор методов средств измерения геометрических параметров изделий

При производстве круглых протяжённых изделий таких как жилы, провода, кабели, трубы требуется постоянный непрерывный контроль многих электрических и геометрических параметров. К геометрическим характеристикам относятся внешний диаметр, эксцентricность, толщина стенки, длина и др. [8].

Технологический контроль геометрических параметров должен осуществляться в жёстких условиях. В частности, температура изделий может достигать сотен градусов, а скорость перемещения - сотен метров в минуту при больших вибрациях в зоне контроля. Это делает невозможным применение контактных, магнитных, ультразвуковых методов. Контролируемые изделия имеют поперечные размеры от долей миллиметра до нескольких сантиметров и требуют контроля с разной погрешностью. Наиболее перспективными в данных условиях являются оптические методы.

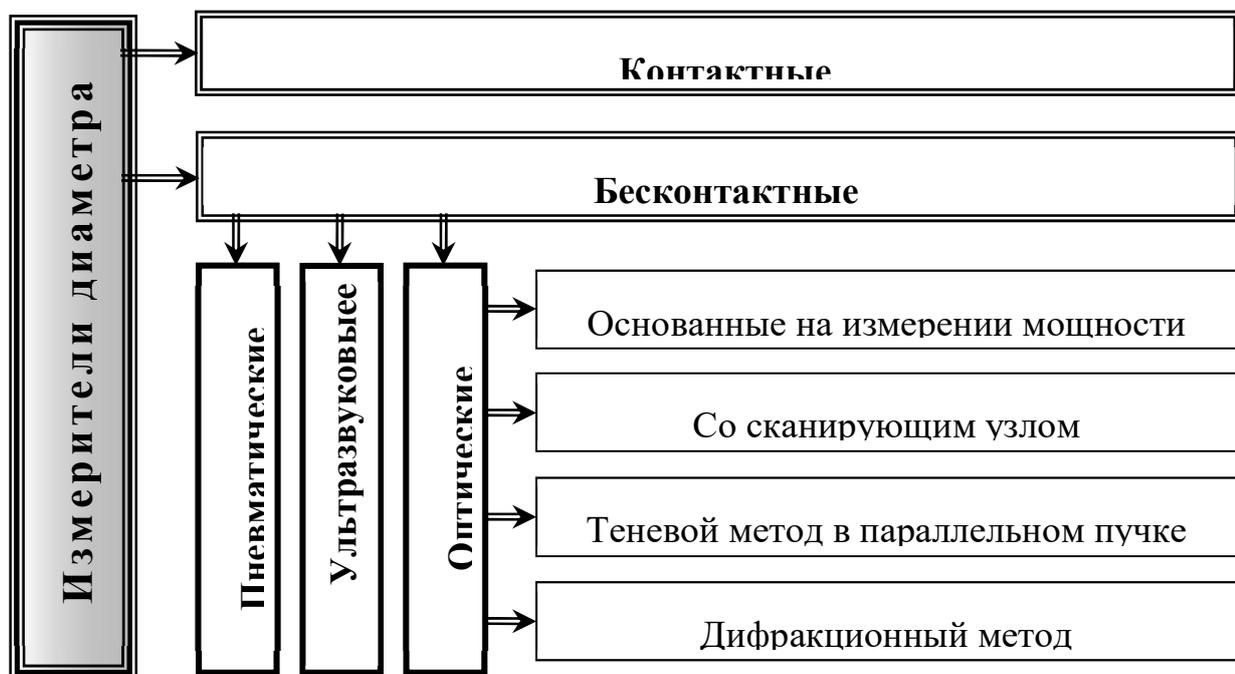


Рисунок 1.1 – Классификация измерителей диаметра

Все способы измерения размеров диаметра разделяются на контактные и бесконтактные. Классификация измерения диаметра показана на рис 1.1.

У контактных измерителях есть существенные недостатки, такие как: невозможно установить прибор после экструзионной машины. Бывает неудовлетворительная погрешность измерения. Для решения этих проблем более 15 лет назад начали использоваться бесконтактные измерители диаметра провода и кабеля. Долговечность (контактные измерителя имеют измерительные наконечники, которые касаются поверхности изоляции кабеля, и со временем истираются).

Эксцентricность, это смещение токопроводящей жилы относительно внешней оболочки. Выход эксцентricности за предельнодопустимые значения приводит к ухудшению частотных свойств кабельного изделия, уменьшает

электрическую прочность изоляции, а также приводит к перерасходу сырья и материалов.

Измерение этих параметров является одним из основных способов снижения стоимости кабельной продукции за счет жестких измерений за счет изоляционного материала во время производства.

1.1 Измерение диаметра электрического кабеля

Наиболее важным требованием для процесса экструзии является обеспечение требуемых форм и размеров: толщины изоляции. Нужно обеспечить не только средний уровень этих параметров, но и их устойчивость по длине кабельного продукта.

В связи с автоматизацией производства электрических и измерительных приборов для измерения диаметра кабелей и проводов, резины, толщины металлических и полимерных оболочек. Мы более подробно рассмотрим методы измерения, используемые в соответствующих устройствах.

1.1.1 Контактные методы

Все измерители диаметров контактов основаны на использовании обычных механических микрометров или датчиков перемещения. Измеритель диаметра имеет подвижный зонд, который непосредственно касается измеряемой поверхности. Когда диаметр кабеля изменяется, зонд меняет свое положение, и это фиксируется микрометром или датчиком перемещения, а затем индикация отклонения по градуированной шкале или цифровому дисплею. Такие

устройства чаще всего измеряют не диаметр изделия, а его отклонение от требуемого значения [20].

Контактные измерительные приборы имеют структурную схему (рис. 1.2), включающую контролируемое изделие 1, чувствительный элемент 2, измерительный преобразователь 3, вторичный электронный прибор 4 и

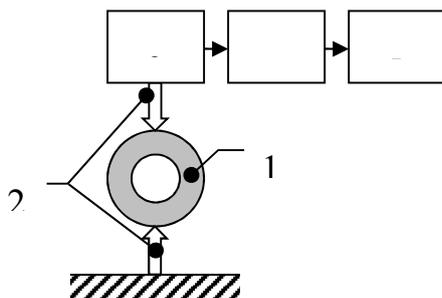


Рисунок 1.2 – Структурная схема измерения
прямым контактным методом.

индуцирующее или регистрирующее устройство 5.

В качестве измерительных преобразователей чаще всего используются механические, опто-механические, электрические и пневматические датчики.

Недостатком таких счетчиков является наличие механических контактных зондов с самим кабелем, что приводит к истиранию трения поверхностей зондов. Существует также возможность повреждения и деформации изоляции кабеля. Такие измерители диаметров не следует устанавливать сразу после камеры экструзии. Они не имеют длительного срока службы и не обеспечивают требуемой точности [21, 22].

Поскольку контактные микрометры для измерения размеров устанавливаются непосредственно на технологическое оборудование, на точность их работы влияют вибрации, возникающие в магазине.

Учитывая все эти недостатки, разработчики в конечном итоге отказались от дизайна измерителей диаметров контактов, и теперь они почти никогда не используются. Изменения в этой области больше не проводятся.

1.1.2 Бесконтактные методы

В технике измерения широко используемых технических средств, построенных на бесконтактных методах. Для бесконтактных измерений размеров и форм используются оптические, пневматические и другие первичные преобразователи.

В технологических процессах, где скорость прессования проводов и проводников высока, предпочтительно использовать бесконтактные устройства, которые обеспечивают высокую точность, требуемую скорость и доступ к использованию в системах автоматического управления.

Бесконтактные методы измерения могут быть прямыми и косвенными. Прямые методы измерения диаметра сравниваются с размером шкалы или длиной волны. При косвенных методах измерения используются различные функциональные зависимости между оптическими измерениями и временем, обладая лучшими областями, распределяя минимумы и максимумы дифракционной картины и т. Д. [23]

Оптические методы измерения. Они также являются самыми современными и перспективными для создания счетчика, который полностью удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Рассмотрим средние методы измерения диаметра более подробно.

1.1.2.1 Пневматические измерители диаметра

Это один из первых бесконтактных методов измерения диаметра, разработанного для производственных линий. Пневматическая установка (рис. 1.3) непрерывно фиксирует отклонение диаметра проволоки от ее номинального значения путем измерения потока через зазоры между двумя измерительными устройствами 1 и калиброванными матрицами измерительной головки 1.

Устройство имеет устройство для очистки проволоки, состоящее из камеры выдувания и войлочных щетки. Пневмоэлектрический зажимной датчик для подключения сигнальных цепей и схем остановки машины для рисования, когда провод с диаметром превышает допустимые отклонения.

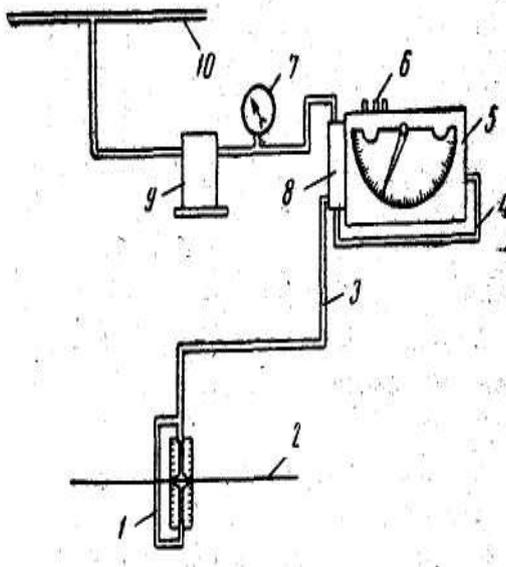


Рисунок 1.3 – Схема пневматического микрометра для измерения диаметра проволоки:

1 – измерительная головка, 2 – измеряемая проволока, 3 – соединительные трубки, 4 – трубка противодавления, 5 – пневмоэлектрический датчик, 5 – выводы электроконтактов, 7 – контрольный манометр, 8 – распределитель,

Измерительная головка представляет собой стальную камеру, в которую ввинчиваются две оправки с нажатыми штампами. Через штампы измеряется провод; [24]. [24].

Кроме того, недостатки заключаются в том, что пневматические микрометры не фиксируют овальность продукта и затрудняют прохождение через сенсорные места пайков, а также их трудно поддерживать.

Описанный метод обеспечивает низкую погрешность измерения около 100 мкм и имеет серьезные недостатки, такие как неразъемная конструкция

измерительного преобразователя, ограниченный диапазон измеренных диаметров.

1.1.2.2 Ультразвуковые измерители диаметра

Принцип работы ультразвуковых счетчиков заключается в методе эхо-импульса, в котором измеряется время между испускаемым импульсом и принятым импульсом, отраженным от медиа-интерфейса. Предполагается, что скорость распространения ультразвука в среде известна. Ультразвуковой преобразователь содержит пьезоэлектрический кристалл, который после воздействия на него импульсом напряжения очень короткой длительности излучает звуковую волну. В зависимости от формы объектива преобразователя звуковая волна исходит от преобразователя через воду к поверхности объекта измерения. При прохождении через интерфейс среды, в нашем случае это вода - поверхность обмотки кабеля, скорость волны изменяется. Это изменение вызывает отражение части энергии волны обратно на преобразователь. Этот эффект называется эхом. Эхо-импульс фиксируется одним и тем же пьезокерамическим преобразователем. Кроме того, вычисляется время между испускаемым и принимаемым импульсами. Скорость распространения звуковой волны в среде постоянна. Зная скорость и время, вы можете рассчитать расстояние L_1 до измеряемого объекта, и если вы используете два идентичных конвертера, расположенных на известном расстоянии L друг от друга, вы можете рассчитать диаметр измеряемого объекта как $D = L - (L_1 + L_2)$.

Установка нескольких пар датчиков в нескольких плоскостях. При использовании эха из секции раздела (оболочка кабеля) такие системы находятся в состоянии, а также в форме сердечника и его эксцентриситета.

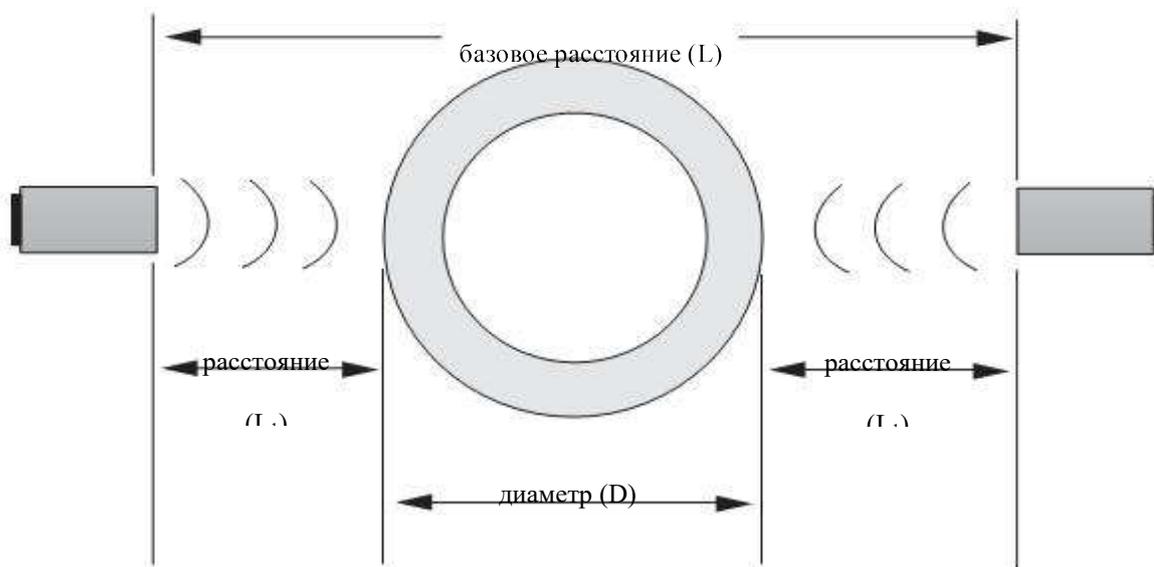


Рисунок 1.4 – Метод измерения диаметра при помощи ультразвука.

Такие системы, хотя и имеют высокие метрологические характеристики, имеют ряд недостатков из-за того, что преобразователь должен постоянно погружаться в воду охлаждающей ванны, что усложняет ее установку и техническое обслуживание. Кроме того, более высокие требования предъявляются к чистоте охлаждающей воды, несоблюдение которой приводит к помехам, а выход измерительного устройства не соответствует требованиям [25, 26].

1.1.2.3 Оптические методы измерения диаметра

Для бесконтактного измерения геометрических размеров кабелей широко используются оптоэлектронные устройства с использованием кодированных оптических масштабов, методов помех, принципов амплитудной и импульсной

модуляции, реализованных на основе использования лазерной технологии, микроэлектроники и микроконтроллеров.

Анализ измерительных оптических цепей приборов позволил идентифицировать четыре наиболее распространенных оптических метода измерения диаметра. Все эти методы измерения характеризуются высокой скоростью, небольшой погрешностью, хорошей помехоустойчивостью, они позволяют реализовать бесконтактный принцип получения первичной информации. Однако эти методы также имеют существенные различия, которые налагают ограничения на сферу их применения. Мы более подробно познакомимся с этими методами [27].

1.1.2.3.1 Метод измерения мощности потока излучения

Метод, представленный на рисунке 1.5, основан на измерении мощности излучения, воспринимаемой фотоприемником. Измеренный объект (кабель) находится в рабочей области, через которую проходит параллельный световой поток от осветителя. Кабель частично блокирует световой поток и, соответственно, уменьшает мощность излучения до фотоприемника. Изменения мощности излучения, воспринимаемые фотоприемником, затем пересчитываются в диаметр измеряемого кабеля. Чтобы использовать эту схему, вам нужен источник со стабильной излучательной способностью, которая со временем остается постоянной, а также приемником оптического излучения с постоянной чувствительностью. В реальных условиях при наличии внешних дестабилизирующих факторов эти условия едва ли достижимы. По этой причине

прибор требует частой калибровки и не имеет достаточной точности измерения. Необходимость измерения мгновенных значений мощности, а также в некоторых вариантах оптической схемы и необходимости измерения механических движений ограничивает применение метода.

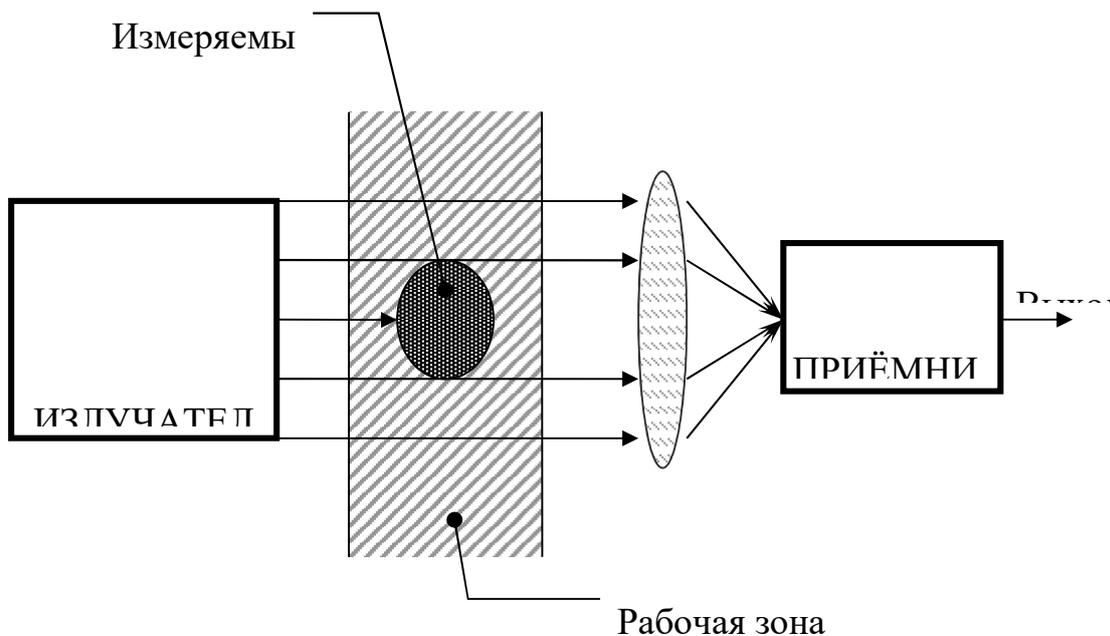


Рисунок 1.5 – Метод измерения мощности потока излучения.

Из-за вышеописанных недостатков ни один из производителей измерительных приборов в настоящее время не работает. Этот метод является одним из первых методов оптического измерения габаритных размеров объектов.

1.1.2.3.2 Метод измерения сканированием

Устройство, реализующее метод и показанное на рисунке 1.6, содержит блок сканирования, который генерирует тонкий луч, который равномерно перемещается с постоянной скоростью V в области измерения шириной W . Пучок прерывается измерением кабеля, и импульс появляется на фотоприемник,

принимающий излучение, продолжительность которого равна времени t

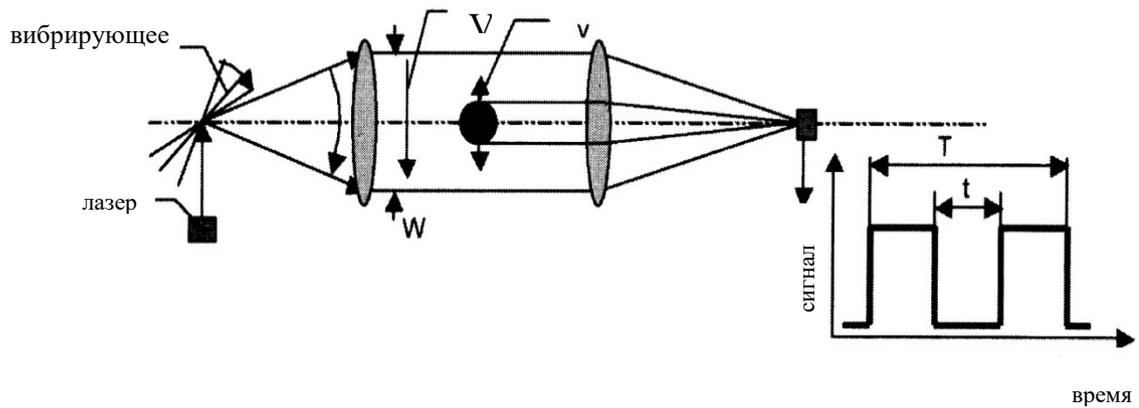


Рисунок 1.6 – Схема со сканирующим узлом.

движения пучка в поперечном сечении кабеля. Длину импульса фотоприемника измеряют и преобразуют в диаметр измеряемого кабеля, используя соотношение

$$D = \frac{t}{T} \cdot W, \quad (1.1.2.3.2.1)$$

где T – период сканирования всей рабочей зоны.

Поскольку время t зависит от собственной скорости измеряемого объекта v , вычисления по этой формуле будут справедливыми только в том случае, если v равно нулю.

$$t = \frac{D}{V \pm v}. \text{ При } v=0 \text{ то } t = \frac{D}{V}. \quad (1.1.2.3.2.2)$$

При сильных вибрациях кабеля ошибка может увеличиться, поэтому кабель должен быть дополнительно стабилизирован.

Компактные полупроводниковые лазерные модули используются в качестве источников излучения в соответствующих оптических схемах. Пучок

перемещается в зоне вращающимся шестиугольным зеркалом, а в последних разработках этого типа вибрирует пьезоэлектрическое зеркало [28].

На рисунке 1.7 показан один из вариантов метода измерения малых диаметров. Чтобы увеличить разрешение, оптическая система должна быть настроена, чтобы стать потенциальным объектом в фокальных плоскостях коллиматоров.

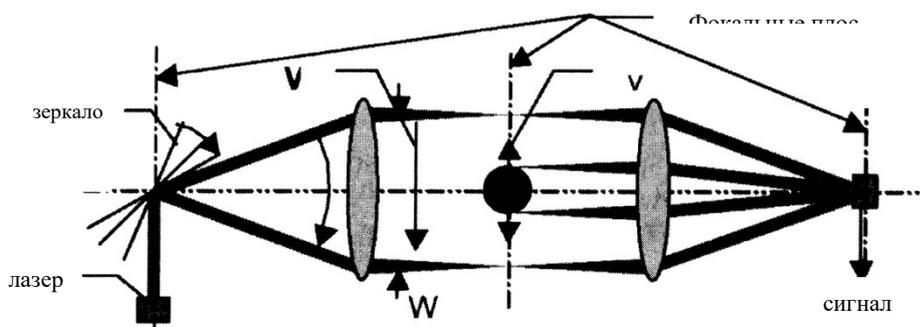


Рисунок 1.7 – Схема со сканирующим узлом для измерения малых

Преимущества метода - большой диапазон измерений, высокая скорость измерения и небольшая погрешность. Однако наличие мобильных механических компонентов требует их высококачественного производства для достижения требуемого срока службы, а также необходимость использования высококачественной широкоапертурной оптики и лазерного модуля с небольшим углом расхождения в качестве источника излучения делает устройство более дорогая.

1.1.2.3 Теневой метод в квазипараллельном пучке

При разработке приборов для измерения диаметра кабеля этот метод чаще всего используется сегодня. Его оптическая схема показана на рисунке 1.8. Излучатель использует оптическую систему коллиматора для создания луча света вблизи параллели в рабочей области, через которую измеряемый кабель перемещается горизонтально. Тень кабеля падает на многоэлементный фотоприемник, ячейки которого расположены вертикально по линии. Количество темных ячеек n фотоприемника, умноженное на ширину одной ячейки l , соответствует диаметру кабеля и может быть рассчитано $D = n \cdot l$ при опросе ячеек. Современные линейные многоэлементные фотоприемники имеют размер ячейки l от 2 до 60 мкм, что позволяет обеспечить соответствующую погрешность измерения. В качестве источника излучения можно использовать лампу накаливания, один светодиод, излучение которого подается на точечный источник с помощью дополнительной оптики или полупроводниковый лазерный модуль. Использование лазерного модуля является предпочтительным, поскольку этот источник наиболее приближен к точечному, что упрощает оптическую схему и процесс ее настройки и выравнивания.

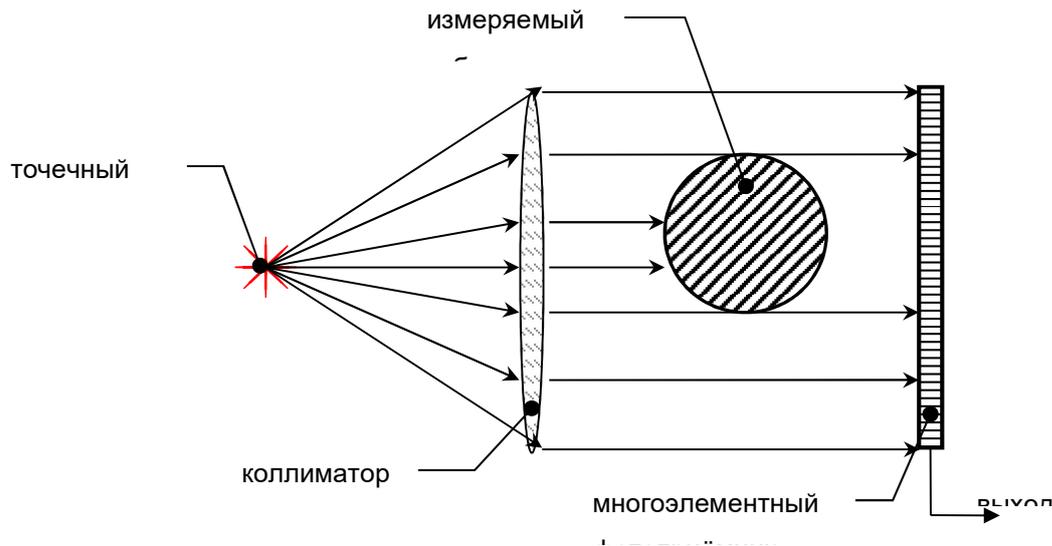


Рисунок 1.8 – Теневой метод в квазипараллельном пучке.

Основной вклад в ошибку при использовании этого метода делает неидеальность оптической системы коллиматора, которая преобразует свет от точечного источника в квазипараллельный пучок. Наличие aberrаций и ошибка выравнивания приводят к тому, что световой поток в рабочей области отличается от параллельного, что при перемещении измеряемого объекта в рабочей зоне сильно влияет на ошибку измерения. Чем больше зона измерения, тем больше диафрагма коллиматора должна быть, и чем больше диафрагма, влияние этого типа ошибки на результат измерения увеличивается, даже если используется линейка фотодетектора с меньшим шагом. По той же причине метод не подходит для измерения малых объектов диаметром менее 0,5 мм, поскольку величина ошибки сравнима с диаметром объекта измерения. Этот метод применим для измерений в диапазоне диаметров от примерно 1 до 30 мм. Создание двухкоординатных счетчиков с широким диапазоном измерений на основе этого

метода проблематично из-за громоздкости его средств реализации, но метод выгодно отличается от предыдущих с потенциально более высокой надежностью, введя отсутствие механических движущихся элементов и меньших помех из-за отсутствия измерений амплитуды и времени. Он используется в течение длительного времени (с 1990 года) и успешно применяется на заводе Hermis + для создания одноосных измерителей диаметров с диапазоном измерения от 20 до 30 мм.

1.1.2.3.4 Дифракционный метод

Для повышения точности измерения диаметра тонких проводов используется явление дифракции света. Луч света, обходящий тонкую кусочек, создает дифракционный силуэт, который зависит от диаметра (рис. 1.9). Многоэлементный приемник преобразует дифракционную картину в электронные сигналы, которые затем преобразуются в значение диаметра. Чем тоньше изделие, тем резче дифракционная картина и тем выше точность измерения.

Этот метод может быть реализован как независимо в метрах диаметра изделий малых и сверхмалых секций, так и в качестве вспомогательного инструмента для уменьшения погрешности существующих измерителей диаметров на основе методов измерения теней.

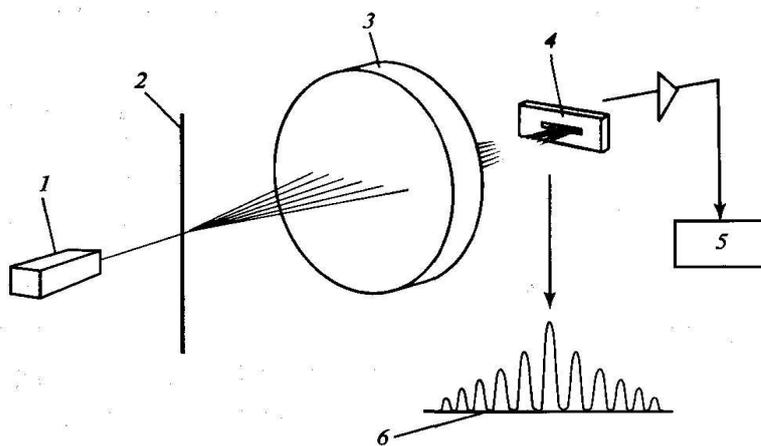


Рисунок 1.9 – Измерение диаметра проволоки, основанное на явлении дифракции света:

1 - лазер; 2 - проволока; 3 - линза; 4 - многоэлементный приёмник; 5 - вычислитель; 6 - дифракционная картина на многоэлементном приёмнике.

1.2 Постановка задачи исследования

- Составление и утверждение технического задания
- Поиск и изучение материала по теме
- Выбор направления исследований
- Изучение литературы по теме
- Анализ существующих схем по методу
- Разработка принципиальной схемы устройства
- Подбор элементной базы
- Сборка экспериментальной разработки
- Экспериментальные исследования
- Изучение результатов проведенного исследования
- Анализ результатов

2 Теорические основы дифракционных методов измерения

2.1 Дифракция Френеля



Рисунок 2.1 – Картиа дифракции

Дифракция - явлениям, которые происходят, когда волна встречает препятствие. В классической физике явление дифракции описывается как очевидный изгиб волны вокруг небольших препятствий и распространению волн из прошлого небольшие отверстия. Подобные эффекты возникают, когда световой волны проходит через среду с различными показателем преломления, или звуковая волна проходит через один с переменным акустическим сопротивлением. Дифракционные происходят со всеми волны, в том числе звуковые волны, волны на воде, и электромагнитных волн, таких как видимый свет, рентгеновские лучи и радиоволны. Как физические объекты имеют волновые свойства (на атомном уровне), дифракция также происходит с веществом и может быть изучен в соответствии с принципами квантовой механики. Итальянский ученый Франческо Мария Гримальди придумал слово

«дифракция» и был первым для записи точных наблюдений этого явления в 1665 году.

В оптике уравнения Френеля дифракции для ближней зоне дифракции это приближение Кирхгофа дифракции Френеля, которые могут быть применены к распространению волн в ближней зоне. Ближнем поле может быть задано число Френеля оптического устройства, которое определено для волны, падающей на отверстие, как:

$$F = \frac{a^2}{L\lambda}$$

где, a - характерный размер апертуры

L - расстояние от отверстия до точки наблюдения

λ -длина волны

При $F < 1$ дифракционной волны считается в ближнем поле и дифракция Френеля может быть использована для расчета его форму.

Дифракционная картина электрического поля в точке (X, Y, Z) определяется по формуле:

$$E(x, y, z) = \frac{z}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x', y', 0) \frac{e^{ikr}}{r^2} dx' y'$$

Где,

$E(x', y', 0)$ - апертура

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}$$

i -мнимая единица

$\cos \theta = \frac{z}{r}$ - косинус угла между направлениями z и r

2.2 Дифракция Фраунгофера

Дифракция, при которой картина дифракции наблюдается на значительном расстоянии от апертуры или преграды. Расстояние должно быть таким, чтобы можно было пренебречь в выражении для разности фаз членами порядка $\frac{\rho^2}{z\lambda}$ сильно упрощает теоретическое рассмотрение явления. ρ - радиальная координата рассматриваемой точки в плоскости наблюдения в полярной системе координат. z - расстояние от отверстия или преграды до плоскости наблюдения. λ - длина волны источника света.

Дифракция Фраунгофера наблюдается при число Френеля $F \ll 1$, этом приходящие в точку, волны являются практически. При наблюдении этого типа дифракции изображение объекта не искажается, и только изменяет размер и положение в пространстве. В противоположность этому, изображение Френеля при дифракции также изменяет свою форму и значительно искажена.

Явления дифракции Фраунгофера имеют большое практическое значение, являются основой принцип действия многих спектральных приборов, в частности, дифракционных решеток. В последнем случае поле наблюдения света на бесконечности использует линзы или вогнутой дифракционной решетки, соответственно экране помещается в фокальной плоскости.

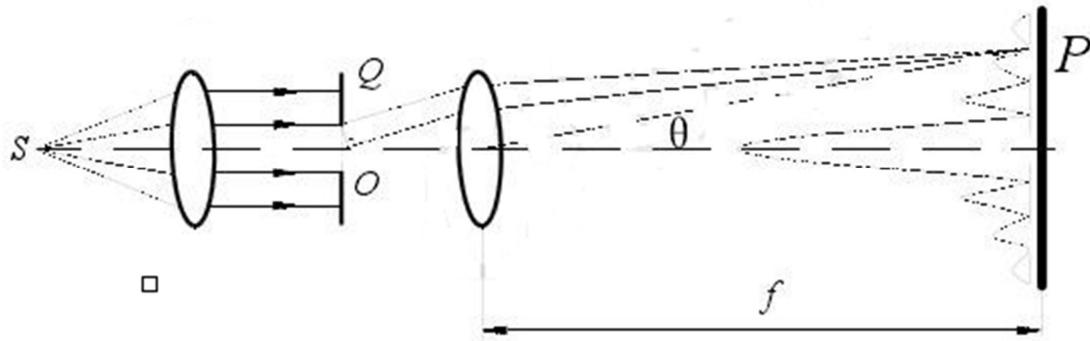


Рисунок 2.2 – Дифракция Фраунгофера

2.2.1 Дифракция на одной щели

На дифракционной схеме Фраунгофера на одной щели, рис. 2.2.1, плоские монохроматические волны обычно падают на плоскость, бесконечно длинная ширина щели. Слоты считаются бесконечно длинными, если их длина намного больше его ширины. Такая ширина 0,01-0,05 мм длиной несколько миллиметров может быть бесконечной.

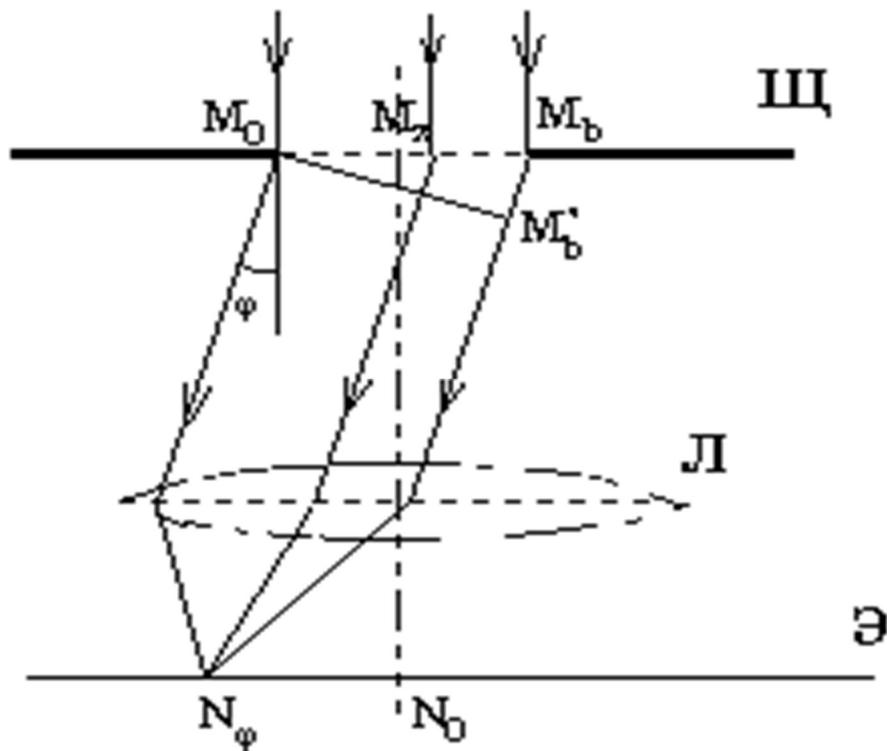


Рисунок 2.3 – Дифракция Фраунгофера на одной щели.

Щель оставить объектив L в фокальной плоскости экрана, который является \mathcal{E} . Наличие объектива эквивалентно экрану, а также на бесконечном расстоянии от объекта. Когда свет распространяется линейно в соответствии с законами геометрической оптики, в фокальной плоскости линзы была бесконечно узкая полоса света. Эта то, что проходит через N_0 на экран \mathcal{E} . Как показывает принцип Гюйгенса-Френеля, каждая точка волновой фронт достигает плоскости, где разрыв является источником вторичных волн. И так, лучи, идущие от всех этих вторичных источников под углом φ к начальному направлению, образуют плоский волновой фронт. И он соберет на фокальной плоскости линза в точке N_φ .

Когда мы определяем поля в плоскости экрана, мы напрямую используем принцип Гюйгенса-Френеля. Этот участок открытой части поверхности в зазоре области в виде узких полос равной ширины dx , параллельных краев щели. Эти элементарные объекты становятся источниками вторичных волн. dA_0 амплитуд этих волн, приходящих тока N_φ в том, что экран с различными полосами являются идентичными, потому что области имеют тождественную площадь и том же направлении на вторичный угол волна φ . Эти амплитуды пропорциональны произведению амплитуды падающей волны E_0 от размера полосы dx , так что то есть

$$dA = CE_0 dx$$

где C - коэффициент пропорциональности.

Тем не менее, фаза колебаний, поступающих из различных частей разрыв будет меняться. Когда определением разность фаз, мы рисуем M_0M_b , перпендикулярной направлению дифрагированного пучка, и должен найти разность путей, возникающих на пути от M_0M_b до M_0M_b' . Видно, что разность хода волн, приходящих с точки M_0 и M , на расстоянии x от точка M_0 , это $x\sin\varphi$.

Таким образом, если предположить, что фаза волны, приходящие в точке N_φ из точки M_0 , равен 0. Затем колебания dU_φ исходя из элементов dx района точка M_x в точке N_φ , можно записать как этого :

$$dU_\varphi = dA_0 \cos(\omega t - kx \sin\varphi)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число,

ω - частота колебания.

Сейчас хотим вычислить U_φ в точке N_φ надо суммировать вклады из разных участков щели. Интегрировать dU_φ в пределах от $x = 0$ до $x = b$.

$$\begin{aligned} U(\varphi) &= \int_a^b CE_0 \cos(\omega t - kx \sin\varphi) dx \\ &= CE_0 b \frac{\sin\left(\frac{1}{2}kbs \sin\varphi\right)}{\frac{1}{2}kbs \sin\varphi} \cos\left(\omega t - \frac{1}{2}kbs \sin\varphi\right) \end{aligned}$$

Тогда амплитуда волны

$$A_\varphi = CE_0 b \frac{\sin\left(\frac{1}{2}kbs \sin\varphi\right)}{\frac{1}{2}kbs \sin\varphi}$$

Когда амплитуда волны распространяющейся в направлении $\varphi=0$,

$$A_0 = CE_0 b$$

То есть,

$$A_{\varphi} = A_0 \frac{\sin\left(\frac{1}{2}kbsin\varphi\right)}{\frac{1}{2}kbsin\varphi}$$

Пусть,

$$u = \frac{1}{2}kbsin\varphi$$

интенсивность света определяется квадратом амплитуды,

$$I_{\varphi} = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}kbsin\varphi\right)}{\frac{1}{2}kbsin\varphi} \right]^2 = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$$

где I_0 - интенсивность в центре дифракционной картины.

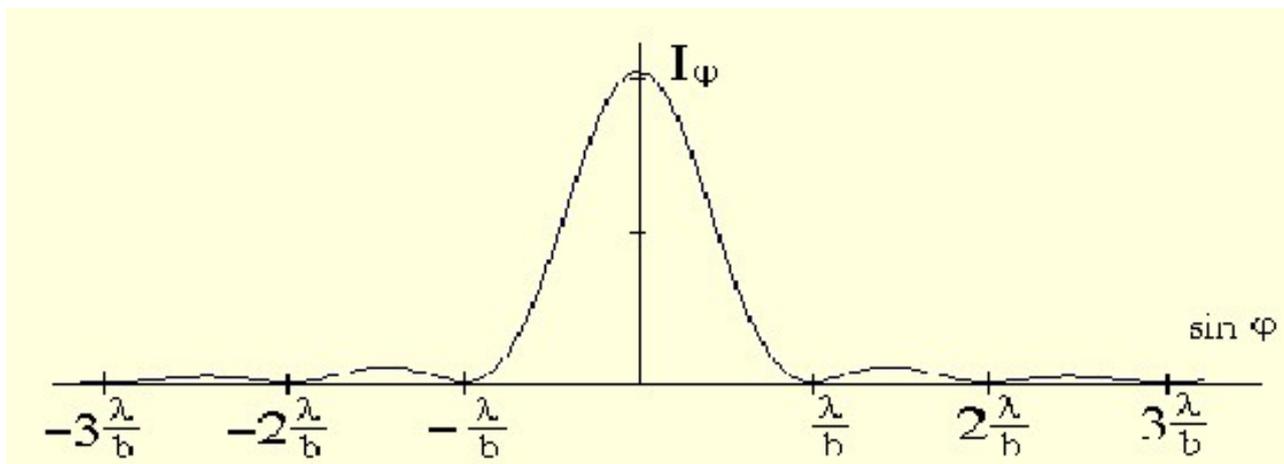


Рисунок 2.4 – Дифракция Фраунгофера на одной щели: распределение интенсивности на экране в зависимости от синуса угла дифракции.

На Рис.2.4 приведен график зависимости интенсивности I_{φ} от синуса угла дифракции φ .

В то время $\sin \varphi = l/b, 2l/b, 3l/b, 4l/b\dots$, удовлетворяющих уравнению $\sin u=0$, интенсивность равна нулю. Это значит, что для любой случайно выбранной области, равной по величине, площадь, из которой излучение будет поступать

строго в противофазе с излучением объекта объекта. Тем не менее, в результате интерференции, интенсивность распространения в этих направлениях.

Видно, что основная часть светового потока сосредоточена в центральной зоне дифракции, определяемой значением $\theta = 0$ (называемым центральным максимумом), малая его часть будет распространяться в пределах первого и второго максимумов и т. д.

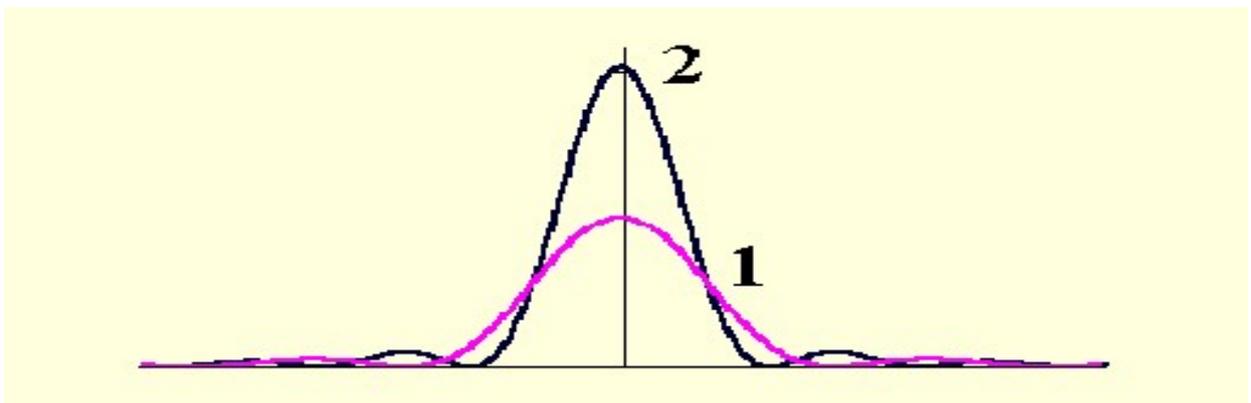


Рисунок 2.5 – Дифракция Фраунгофера на одной щели: 1 - узкая щель, 2 - широкая щель.

Рассмотрим влияние ширины распределения распределения дифракционной картины. Увеличение ширины зазора приводит к приближению первых минимумов к центру дифракционной картины, а резкость максимума дифракции возрастает. Отношение интенсивностей света в индивидуальных максимумах не изменяется, а увеличивает абсолютную величину интенсивности из-за того, что энергия проходящего через нее излучения увеличивается с увеличением ширины щели.

В заключении отметим, что дифракция Фраунгофера может наблюдаться и при падении сферической волны на объект, и при отсутствии линзы. Условия для наблюдения дифракции Фраунгофера имеют вид: $b_2/lr \ll 1, b_2/l_s \ll 1$.

2.2.2 Принцип Бабинне

В физике принцип Бабинне является теорема о дифракции, что указывает, что картина дифракции от непрозрачного тела идентична той, что из отверстия одного и того же размера и формы, за исключением общего вперед интенсивности пучка.

Пусть в исходном теле дифрагирующего и B' его дополнение, то есть тело, которое является прозрачным, где B является непрозрачным, и непрозрачные, где B является прозрачным. Сумма диаграммы вызванного B и B' должен быть таким же, как диаграмма направленности невозмущенного луча. В местах, где спокойно луч не был бы достигнут, это означает, что диаграммы направленности вызванного B и B' должен быть противоположны по фазе, но равны по амплитуде.

Дифракционные картины из отверстий или органов известного размера и формы сравнивают с паттерном от измеряемого объекта. Например, размер эритроцитов может быть найдено путем сравнения их дифракционную картину с множеством маленьких отверстий. Одним из следствий принципа Бабинне Парадоксально, что внутри дифракционного предела, излучение удаленных из пучка из-за частиц равна удвоенной частицы креста раз раздел потока. Это

потому, что количество излучения поглощается или отражается такое же, как количество дифрагированного.

Принцип наиболее часто используется в оптике, но это также верно и для других форм электромагнитного излучения и, по сути, общая теорема дифракции и справедливо для всех волн. Принцип Бабинета находит применение в самых его способность обнаруживать эквивалентности по размеру и форме.

Обозначим распределение поля на экране в случае дифракции на щели $U_{щ}(x')$, а на проволоке $-U_{п}(x')$, где x' - координата в плоскости экрана. Тогда сумму полей $U_{щ}(x') + U_{п}(x')$ можно представить как сумму интегралов по открытым областям для каждого из этих объектов, или как интеграл суммы открытых доменов. Но отверстия для дополнительных объектов устроены так, что они полностью «открывают» весь фронт волны падающего излучения, следовательно.

$U_{щ}(x') + U_{п}(x') = U_0(x')$, где $U_0(x')$ - волновое возмущение на экране при отсутствии какого-либо препятствия. Таким образом, сумма полевых распределений от дополнительных объектов равна полю, наблюдаемому на экране при отсутствии препятствия. Полученный результат называется принципом Бабинета.

Обратите внимание, что $U_0(x')$ есть волновое возмущение на экране для случая отсутствия какого-либо препятствия, а не для случая, когда и прорезь и провод устанавливаются одновременно на пути падающего облучения (так как нетрудно понять, свет не пройдет через такой набор объектов). Дело в том, что

при рассмотрении принципа, когда на пути падающей волны установлено несколько объектов, наоборот, замкнутые области суммируются.

Если лазер используется как источник плоской волны, размер пучка намного больше ширины щели b , то на экране в отсутствие препятствия будет наблюдаться яркое пятно, а в оставшейся области на экране поле можно считать равным нулю.

Для этой "не засвеченной" области справедливо

$$U_{щ}(x') + U_{п}(x') = 0,$$

следовательно

$$U_{щ}(x') = -U_{п}(x'),$$

а для интенсивностей

$$I_{щ}(x') = I_{п}(x').$$

В области основного пятна $I_{п}(x') \approx I_0(x')$, так как в данной области

$$U_0(x') \gg U_{щ}(x').$$

Так, для объектов - прорезей и проводов одинакового размера распределение интенсивности на экране везде одинаково, за исключением области, где исходный луч попадает в отсутствие препятствия. Если толщина проволоки такова, что размер первого максимума дифракции для прорези такой же ширины, что и провод, превышает размер лазерного луча, то для обоих объектов координаты как всех минимумов, так и всех максимумов дифракционная картина будет совпадать.

Обратим внимание на интересное явление. Иногда дифракция на проводе, за исключением минимумов соответствующих дифракционных минимумов, наблюдалась при дифракции на щелях одинакового размера, можно видеть еще два острый глубокий минимум, где интенсивность лазерного луча значительно уменьшается. Это явление легко объясняется на основе принципа Бабинета.

В самом деле, в области лазерного пучка справедливо соотношение $U_0(x') \gg U_{щ}(x')$, а в той области, куда лазерное излучение не попадает, $U_0(x') = 0 < U_{щ}(x')$. Следовательно, существует такая точка x'_0 , в которой $U_0(x'_0) = U_{щ}(x'_0)$, и, следовательно, $U_p(x'_0) = 0$. Эта точка находится на границе лазерного луча, и поскольку интенсивность пучка в этой области обычно резко падает, то «провал» по интенсивности имеет небольшую ширину. Так как размер окна фотодиода, используемого в установке, сравним с размером «провала», когда дифракция регистрируется на проводе, уменьшение интенсивности не всегда записывается.

2.3 Источники излучения для наблюдения дифракции

На практике, люди обычно используют лампы или лазер как источник света, здесь мы выбираем лазер, потому что у него высокая коллимация и малая затрата энергии.

2.3.1 Лазер

Лазер, источник электромагнитного излучения из видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов, основанный на стимулированном излучении атомов и молекул. Слово «лазер» состоит из начальных букв (аббревиатуры)

слов английской фразы «Усиление света путем стимулированного излучения», что означает «усиление света в результате вынужденного излучения». В советской литературе также используется термин «оптический квантовый генератор» (ОКГ). Создание Л. (1960) и нескольких более ранних мазеров (1955) послужило основой для разработки нового направления в физике и технике, называемого квантовой электроникой.

Лазер по сравнению с другими источниками света обладает рядом уникальных свойств, связанных с когерентностью и высокой направленностью излучения. Однако излучение источника тепла распространяется во всех направлениях от источника, т. е. Заполняет телесный угол 2π rad. Формирование направленного пучка из такого источника, осуществляемого с помощью системы диафрагм или оптических систем, состоящих из линз и зеркал, всегда сопровождается потерей энергии. Никакая оптическая система не позволяет получить на поверхности освещенного объекта мощность излучения больше, чем в самом источнике света.

2.3.2 Гауссовый пучок

Для дифракционной модели Фраунгофера требуется плоская монохроматическая волна. Не существует идеальных плоских монохроматических волн. Фактически, в этой системе лазер используется как источник. Лазер представляет собой гауссовый пучок, так что дифракционная картина отличается от монохроматической плоской волновой картины.

Математическое описание

Будем найти способ приведенного волнового уравнения, описывающего распространение такого пучка в виде

$$\Psi = u(x, y, z)e^{(ikz)}$$

где $u(x, y, z)$ — медленно меняющаяся сложная функция.

Применяя оператор Δ к функции Ψ , имеем

$$\Delta\Psi = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik\frac{\partial u}{\partial z} - k^2 u \right) e^{(ikz)}$$

Если пренебречь второй производной от u по сравнению с первой производной, то на основе приведенного волнового уравнения Гельмгольца получим уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2ik\frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

Полученное уравнение относится к уравнениям параболического типа, а сама аппроксимация, в пределах которой она была получена, называется параболическим приближением. Нетрудно показать, что уравнение будет удовлетворять гауссовскому пучку, амплитуда которого изменяется по поперечной координате в соответствии с законом Гаусса.

Для гауссова пучка можно писать выражение

$$u = a \exp\left(i\left(p + \frac{k}{2q}r^2\right)\right)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$. Параметр q — комплексный параметр пучка, определяющая кривизна волнового фронта, который вблизи оси является сферическим и гауссово распределение поля по координате r , где r — расстояние

от оси. Параметр p — комплексный фазовый сдвиг при распространении света вдоль оси z .

Рассмотрим свойства гауссова пучка с длиной волны λ . Для этого вынести параметр q через два действительных параметра пучка R и w

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} + i \frac{\lambda}{\pi w^2}$$

где R - радиус кривизны волнового фронта, а также характеризуется изменением поля E в поперечной плоскости (параметр w обычно называют шириной пучка). Распределение поля в этой плоскости подчиняется закону Гаусса, а w - центр, при котором амплитуда поля уменьшается в e раз по сравнению с полем на оси.

Ширина пучка

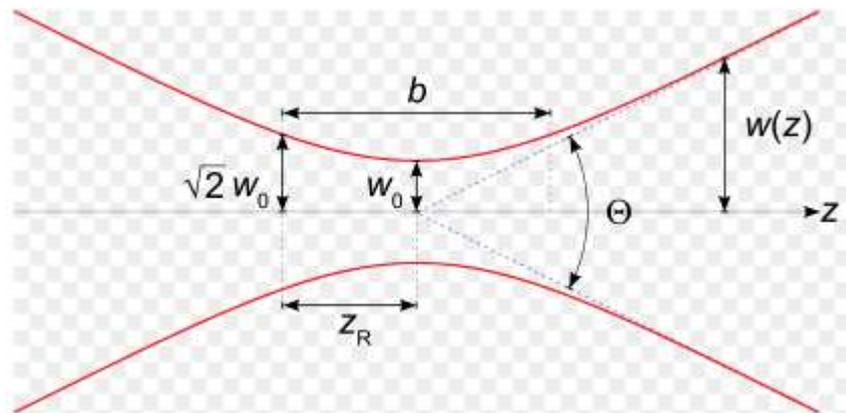


Рисунок 2.6 – Ширина гауссова пучка

b : глубина резкости; θ : угловая расходимость пучка z_R : длина Рэлея; w_0 : горловина пучка; $w(z)$ как функция z .

$$q_0 = \frac{\pi w_0^2}{i\lambda}, z_R = iq_0$$

где z_R — длина Рэлея. Тогда w (ширина пучка на расстоянии) задается следующей формулой

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}$$

Радиус кривизны

Зависимость радиуса кривизны от координаты

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right)$$

Расходимость пучка

Образующая пучка $w(z)$ представляет собой гиперболу, асимптота которой наклонена к оси под углом

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0^2}$$

Этот угол равен углу дифракции основной моды в дальней зоне.

3 Методика проводимых исследований

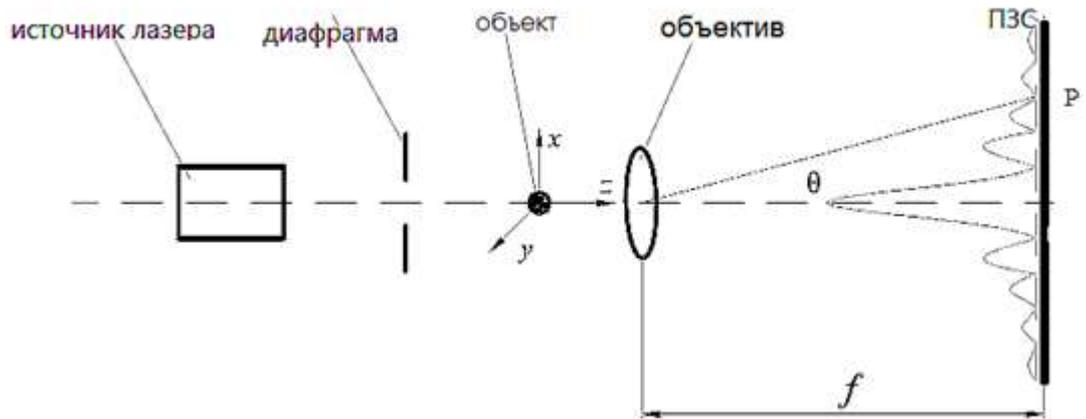


Рисунок 3.1 – Дифракционный метод измерения

3.1 Техническая реализация измерительных приборов на основе дифракционного метода

3.1.1 Источники излучения

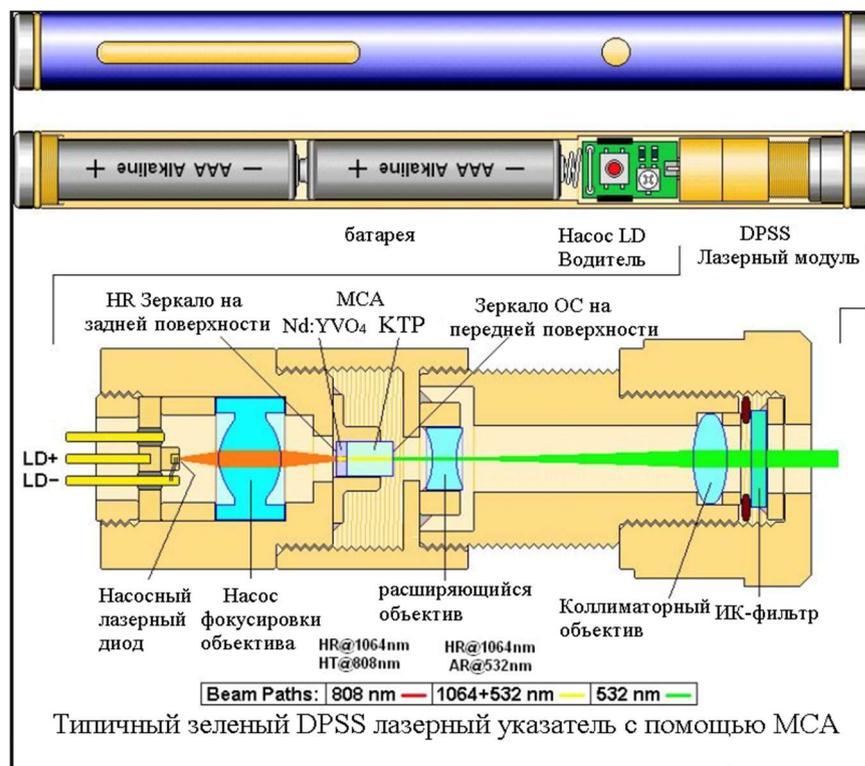


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема зеленого лазера

В качестве источника света был применён зелёный полупроводниковый лазер устройство которого приведено на рисунке 3.2. Это очень удобный ручной военный класс лазерного света, когда вы путешествуете или путешествуете и нуждаетесь в указке, это хороший выбор. Также можно использовать в лазерной указке. Авиационный алюминиевый сплав, прочный; Внешний вид обработки поверхности: анодированный черный

Примечание:

1. Этот лазер имеет высокую мощность, так что он будет работать от аккумулятора быстро.

2. не держите лазера на постоянной основе в течение более 20 секунд, или он может сжечь изнутри.

3. Никогда не светите лазерный луч, или даже близко, глаза людей или животных. Это может вызвать слепоту.

3. дети должны использовать лазерный луч только под наблюдением взрослых. Удалить батарейки, когда не в использовании и хранить в неконтролируемом месте, чтобы предотвратить неконтролируемый использования детьми.

4. если вы обнаружите, что яркость лазерного луча уменьшена, пожалуйста, зарядите или Замените аккумулятор.

Код.

Длина волны: 532nm.

Стиль луча: Непрерывная линия.

Выходная мощность <1 МВт

Рабочая температура: + 15 ~ + 35град. с

Температура хранения:-10 ~ + 40deg. с

Preheat time: <3 секунды.

Светлый цвет: зеленый

Цвет корпуса: черный/серебристый

Выходная мощность лазера: <1 МВт

Размер: 16.5*2.5 см

Эффективный диапазон: 3000-5000 м

Тип батареи: 18650 батарея (Батарея не входит в комплект)

3.1.2 Оптическая система

Измерение диаметра тонких (50 – 300 мкм) протяжённых изделий, таких как волокна, нити, тонкие проволоки и т.п. является чрезвычайно актуальной задачей. Точный непрерывный их технологический контроль на всех стадиях производства от полуфабриката до готового изделия является залогом высокого качества продукции, а также экономической рентабельности и конкурентоспособности производства в целом. В силу очень малых размеров объекта измерения в данной области затруднительно применить контактные, емкостные, ультразвуковые и другие методы. Наиболее применимыми в данном случае являются оптические лазерные методы основанные на нелинейных

оптических эффектах позволяющих увеличить разрешающую способность в диапазоне малых диаметров.

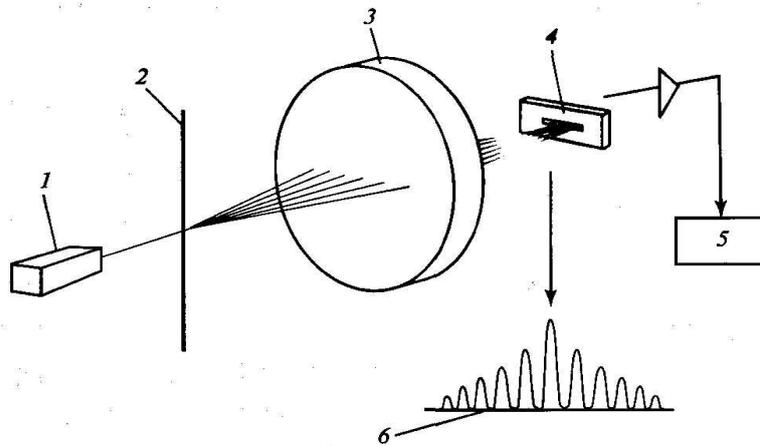


Рисунок 3.3 – Основа измерения диаметра проволоки на явлении дифракции света: 1 - лазер; 2 - проволока; 3 - линза; 4 - многоэлементный приёмник; 5 - вычислитель; 6 - дифракционная картина на многоэлементном приёмнике.

Согласно принципу Бабины, когда нить освещается параллельным пучком, дифракционный эффект будет таким же, как у щели, и на принимающем экране получаются одни и те же яркие и темные полосы.

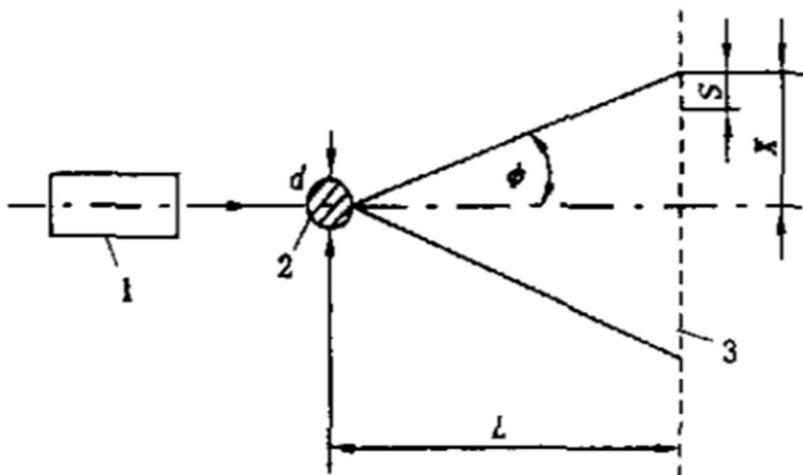


Рисунок 3.4 – Расчёт диаметра по параметрам дифракционных полос

На рисунке 2 показана дифракционная картина нити. Когда $L \gg \frac{d^2}{\lambda}$ будет наблюдаться дифракция Фраунгофера [5], распределение интенсивности на экране наблюдения будет определяться выражением:

$$I = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi d \sin \phi}{\lambda}\right)^2}$$

Диаметр объекта будет рассчитываться по следующим формулам:

$$d = \frac{kL\lambda}{x_k} = \frac{L\lambda}{S}$$

где: S - интервал дифракционных полос.

На рисунке 2 представлена структурная схема измерительного макета, реализующая лазерный дифракционный измеритель тонких нитей. В качестве источника излучения в установке применён лазерный диод мощностью 5 мВт и длиной волны 640 нм. Диод освещает измеряемое волокно, за которым формируется интерференционная картина. Для её фиксации применён многоэлементный КМОП сенсор TSL1412S длиной 100 мм и величиной ячейки 40 мкм. Сенсор находится под управлением отладочной платы DE0 на базе FPGA Altera Cyclone.

3.1.3 Многоэлементный приёмник

MPD3728 - это высокоскоростной и высокочувствительный датчик линейного изображения CCD (с зарядовой связью), который изменяет оптические изображения на электрический сигнал и выполняет функцию разделения цвета.

MPD3728 имеет 3 строки по 7300 пикселей, и это 2-выводный / цветной CCD-датчик с 2 строками / цветом регистра переноса заряда, который передает электроны фотосигнала 7300 пикселей, разделенные на нечетные и четные пиксели. Подходит для высокоскоростных цветных цифровых копировальных аппаратов 600 dpi / А3 и т. Д.

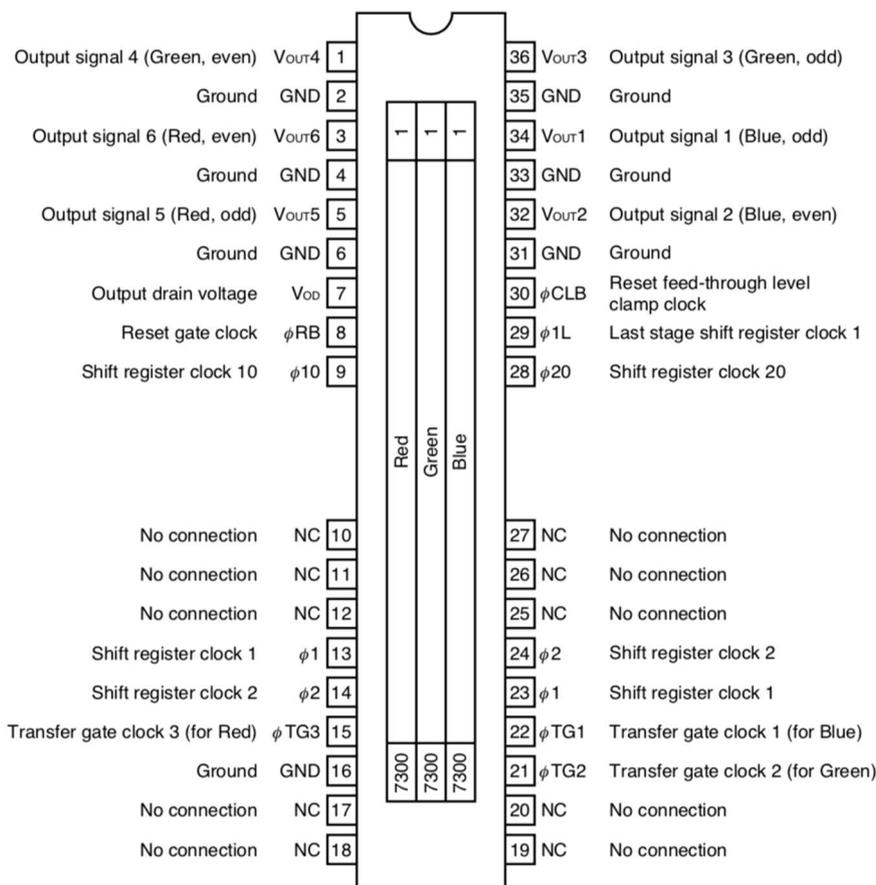


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема

ОСОБЕННОСТИ

- Действительный фотоэлемент : 7300 пикселей × 3
- Шаг фотоэлемента • Межстрочный интервал : 10 мкм
- Цветной фильтр : 40 мкм (4 линии) Красная линия-Зеленая линия, Зеленая линия-Синяя линия

- Разрешение: Основные цвета (красный, зеленый и синий), пигментный фильтр (со светостойкостью 107 лк • час): 24 точки / мм (600 dpi) Размер A3 (297 × 420 мм) (более короткая сторона)
- Уровень тактового сигнала : Выход CMOS под напряжением 5 В
- Скорость передачи данных : 40 МГц МАХ. (20 МГц / 1 выход)
- Тип выхода : 2 выхода по фазе / цвету
- Электропитание : +12 В
- Встроенные схемы : Сброс питающих контуров уровня подачи
Усилители напряжения

3.2 Описание экспериментальных образцов



Рисунок 3.6 – Объекты измерения(1- волосы 2,3,4- провода)

У нас 4 образцов. Объект 1 – Это волос (черный). Объект 2 – провода . Объект 3,4 – две части из одной проводы .

4 Экспериментальные исследования

Согласно принципу Бабинне, когда нить освещается параллельным пучком, дифракционный эффект будет таким же, как у щели, и на принимающем экране получаются одни и те же яркие и темные полосы. Поэтому математические выражения для расчёта параметров тонкой щели справедливы и для тонких непрозрачных объектов таких как тонкие проволоки волокна и нити.

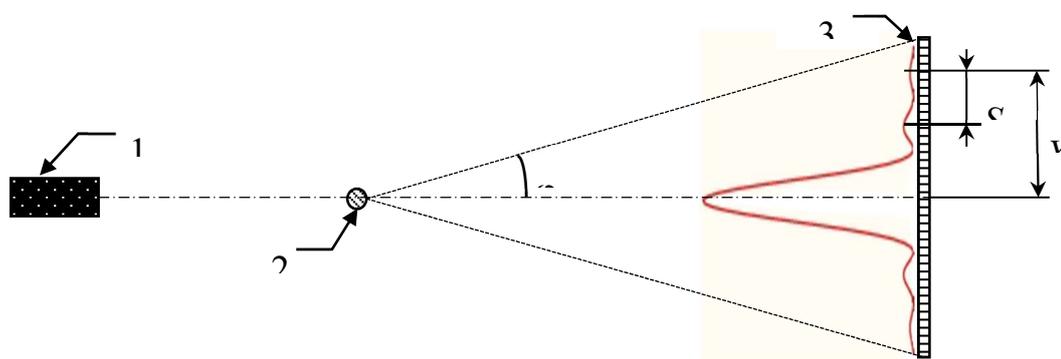


Рисунок 4.1 – Расчёт диаметра по параметрам дифракционных полос.

На рисунке 4.1 показана схема лазерного дифракционного измерителя где 1 это полупроводниковый лазер, 2 – объект контроля с диаметром сечения d , 3 – плоскость многоэлементного фотоприёмника на котором фиксируется дифракционная картина, ϕ - угол дифракции, X – расстояние от нулевого максимума до максимума n -го порядка, S – расстояние между соседними максимумами.

При $L \gg \frac{d^2}{\lambda}$ будет наблюдаться дифракция Фраунгофера [5], распределение интенсивности на экране наблюдения будет определяться выражением:

$$I = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)^2}$$

Диаметр объекта будет рассчитываться по следующим выражениям:

$$d = \frac{kL\lambda}{X_k} = \frac{L\lambda}{S}$$

где: S - интервал дифракционных полос, X_k расстояние от нулевого максимума до максимума k -го порядка, λ - длина волны падающего света.

Детектирование максимумов первого второго и последующих порядков в данном преобразователе затруднительно, так как их интенсивность более чем на порядок меньше интенсивности максимума нулевого порядка. Это требует использования многоэлементных приёмников со значительно более широким динамическим диапазоном и применения аналого-цифровых преобразователей с большей разрядностью, что значительно усложняет и удорожает конструкцию измерителя

Техническая реализация метода

На рисунке 4.2 представлена структурная схема измерительного макета, реализующая лазерный дифракционный измеритель тонких нитей. В качестве источника излучения в установке применён лазерный диод мощностью около 1 мВт и длиной волны 530 нм. Диод освещает измеряемое волокно, за которым формируется интерференционная картина. Для её фиксации применён многоэлементный КМОП сенсор MPD3728 длиной 70 мм и величиной ячейки 10 мкм. Сенсор находится под управлением отладочной платы DE0 на базе FPGA Altera Cyclone III.

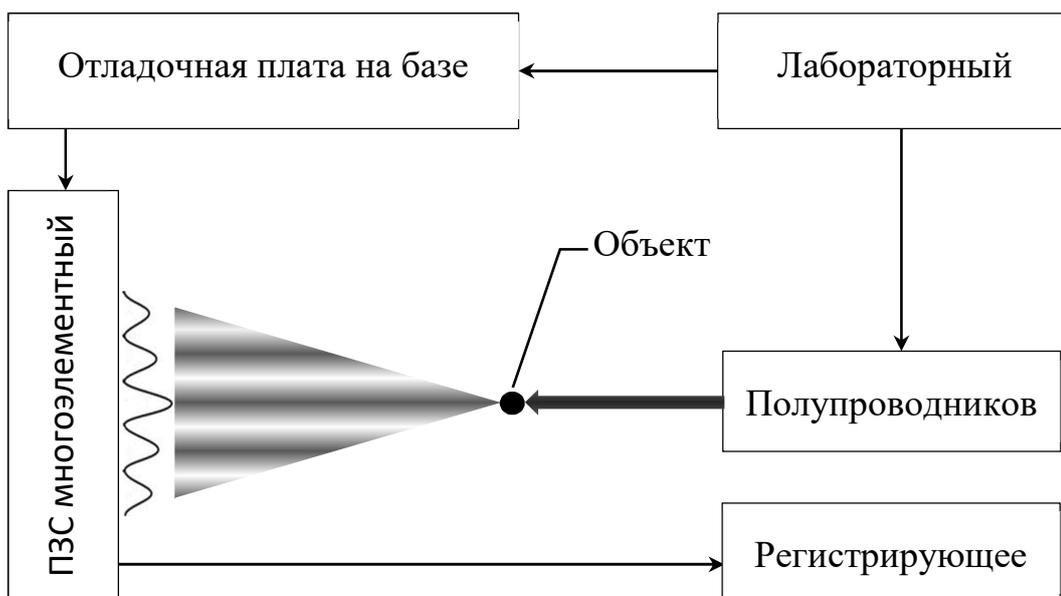


Рисунок 4.2 – Структурная схема макета дифракционного измерителя

Видеосигнал формируемый многоэлементным приёмником фиксировался при помощи осциллографа. Внешний вид компонентов экспериментальной установки показан на рис 4.3.

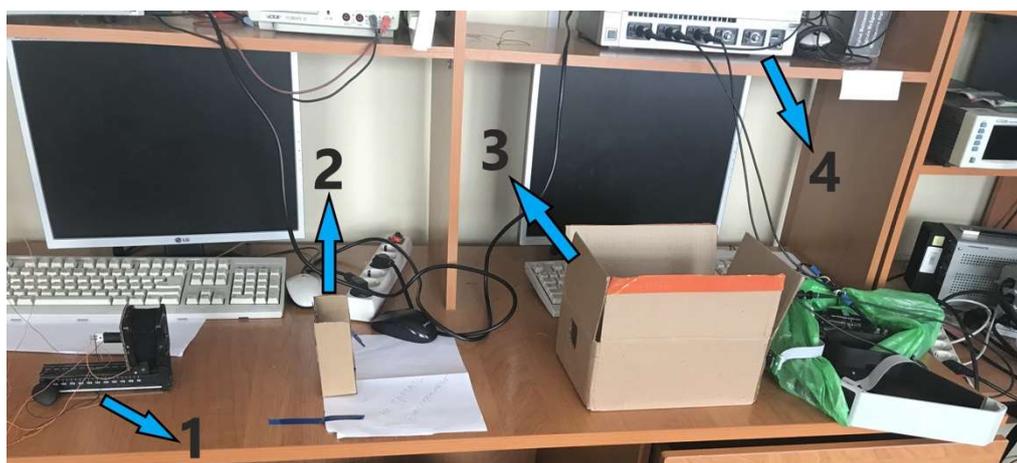


Рисунок 4.3 – Внешний вид и состав экспериментальной установки.

1 – Лазер, 2 – объекты, 3 - многоэлементный приёмник, 4 - осциллограф

Описанный макет позволяет интерпретировать дифракционную картину по взаимному расположению минимумов и максимумов и вычислять диаметр волокна. Однако проблему представляет центральный максимум интенсивность которого выходит далеко за пределы динамического диапазона сенсора. Основная энергия дифракционных полос, создаваемых дифракцией измеренных нитей, сосредоточена в полосе нулевого порядка, Как показано на рисунке 4.1. Чтобы избежать насыщения ПЗС и расширить динамический диапазон измерений дифракционных полос, нами предложено использование специального светозащитного барьера рис. 4.4 в для исключения дифракционного пучка нулевого порядка.

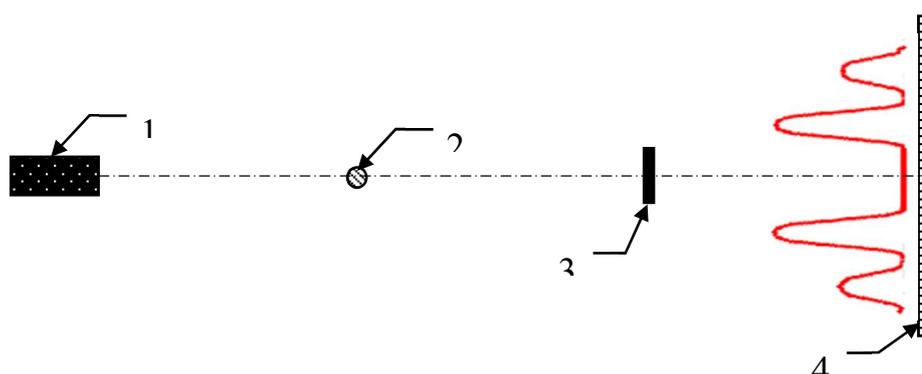


Рисунок 4.4 – Расчёт диаметра по параметрам дифракционных полос.

Схема реализации предложенного дифракционного преобразователя (рис. 4.4) включает как и в предыдущем случае полупроводниковый лазер 1, объект контроля – 2 и многоэлементный приёмник – 4. Существенным отличием является наличие непрозрачного барьера – 3 который вырезает из дифракционной картины центральный максимум нулевого порядка, что

позволяет с гораздо большей достоверностью определять положения остальных экстремумов и по этим данным рассчитывать диаметр измеряемого объекта.

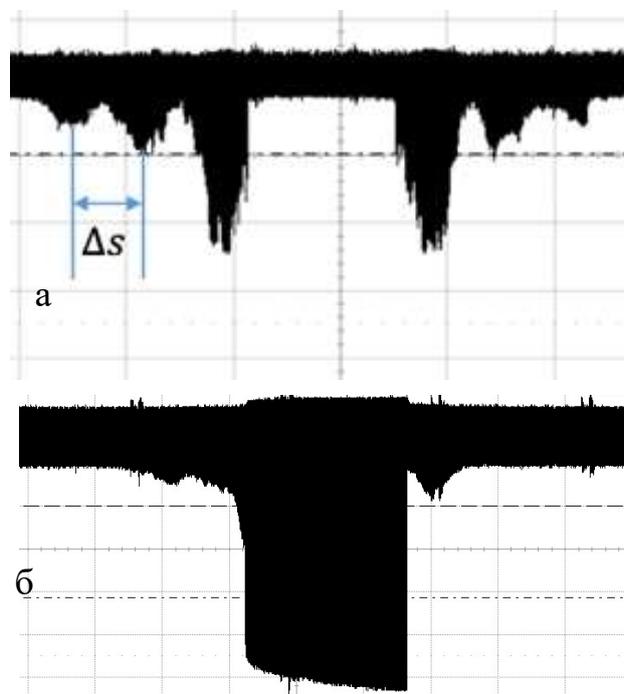


Рисунок 4.5 – Дифракционная картина полученная многоэлементным приёмником: а – с непрозрачным барьером, б – без непрозрачного барьера.

В качестве объектов для измерения и проверки теории были взяты несколько образцов тонкого провода и образец человеческого волоса (Рис. 3.2.1). Для получения эталонных значений диаметра образцы были измерены при помощи стандартного измерительного микроскопа «название микроскопа» с погрешностью измерения 1 мкм. Измерения проводились трижды для каждого образца с последующим получением среднего значения диаметра. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения с помощью микроскопа.

Объект	Первый раз	Второй раз	Третий раз	Среднее значение
1	0.092 мм	0.095 мм	0.093 мм	0.0933 мм
2	0.039 мм	0.040 мм	0.038 мм	0.039 мм
3	0.052 мм	0.054 мм	0.053 мм	0.053 мм
4	0.054 мм	0.052 мм	0.053 мм	0.053 мм

Далее при помощи экспериментальной установки (рис. 3, 4 и 5) были получены параметры дифракционной картины для каждого из экспериментальных образцов в частности расстояния между соседними экстремумами рис 4.5 а. Используя измеренные параметры дифракционной картины был рассчитан диаметр для каждого образца. Результаты измерения представлены в таблице 2. Для сравнения на рисунке 4.5 б представлена осциллограмма дифракционной картины от измеряемого объекта без установки непрозрачного барьера. Как видно значение интенсивности света сосредоточенной в центральном максимуме выходит за границы динамического диапазона используемого многоэлементного приёмника, что приводит к невозможности детектирования дифракционной картины и измерения её параметров.

$$\text{Расчётная форма } d = \frac{L \cdot \lambda}{\Delta s \cdot K_1 \cdot K_2}$$

Коэффициент преобразования K2 189.6

Длина волны λ нм 532

Расстояние между объектом и сенсором $L = 528$ мм

Таблица 2. Результаты получения по расчётам из расположения дифракционных экстремумов.

Объект	Δs_1	Δs_2	Δs_3	Среднее значение
1	3.1 (5 кл)	3.2 (5 кл)	3.3 (5 кл)	3.2 (5 кл)
2	3.8 (10 кл)	3.7 (10 кл)	3.9 (10 кл)	3.8 (10 кл)
3	5.6 (5 кл)	5.7 (5 кл)	5.5 (5 кл)	5.6 (5 кл)
4	5.7 (5 кл)	5.6 (5 кл)	5.5 (5 кл)	5.6 (5 кл)

В таблице 3 представлена погрешность полученная при измерении образцов дифракционным методом.

Таблица 3. Результаты сравнения измерений разными методами

	Δs в клетках	К1 цена деления мкс	Диаметр по расчету (мм)	Диаметр по микроскопу (мм)	δ
1	3.2	5	0.0926	0.093	0.43%
2	3.8	10	0.038987	0.039	0.033%
3	5.6	5	0.0529	0.053	0.18%
4	5.6	5	0.0529	0.053	0.18%

Объект 1 – черные волосы

Объект 2, 3 и 4 – медная проволока

Погрешность, полученная при сравнении результатов прямых измерений образцов и измерений при помощи предложенного метода не превышает 0.2%,

что является хорошим результатом и позволяет говорить о хорошей согласованности теоретических и экспериментальных данных, а так же о потенциальной применимости предложенного метода для проектировании приборов для измерения протяженных объектов с малым диаметром.

Заключение

В работе описан метод контроля диаметра тонких протяжённых объектов на основе эффекта дифракции. Описан способ позволяющий минимизировать влияние на результат измерения мешающих факторов, таких как чрезмерная засветка области центрального максимума. Предложен и опробован вариант технической реализации лабораторного образца дифракционного измерителя, оценены его метрологические характеристики.

При измерении нитей методом дифракции достигается более высокая точность. Однако в практическом применении из-за существования низкого отношения сигнал-шум засветка от максимума нулевого порядка не позволяет с достаточной точностью определять положение остальных максимумов. Применение непрозрачного барьера позволяет решить эту проблему.

Приложение А

Раздел 1 Обзор методов средств измерения геометрических параметров изделий

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6Б	Чжан Жуйчжи		

Консультант отделения контроля и диагностики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Федоров Евгений Михайлович	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения иностраных языков	Игна Ольга Николаевна	Д.П.Н.		

Introduction

In everyday life and industrial production, the control of objects is very important. We can receive information about the parameters of objects, in particular, in industrial production. For example, geometric parameters, electrical parameters, magnetic parameters, thermal parameters and so on. Among them, the geometric parameters themselves show the character of the profile and the size of the items.

Control in the industry is very important for improving the quality of products and better economic efficiency of production. In particular, in industries where shafts, wires, cables and various pipes are manufactured, monitoring of their geometric parameters is necessary and actual.

With the help of modern methods of geometric control, we can obtain the diameters of cables, shafts, diameters of pipes and so on.

In modern conditions, in most practical applications, the optimality of measurements is determined by the maximum achievable accuracy at minimum costs. The level of accuracy is determined by the criterion of expediency.

Measuring instruments of the highest accuracy are used to obtain the values of universal physical constants, the most reliable values of which are then necessary in the technique of accurate measurements. [1]

The task of the paper is to review modern methods and means for controlling the geometric parameters of products.

At present, optical methods of nondestructive testing are the most promising methods for obtaining geometric parameters of long products.

Here we will pay special attention to them.

1. An overview of the methods used to control the geometric parameters of products

For wires, insulated cores and round cables, one of the most important design parameters is the outer diameter [8].

Various technological processes for the manufacture of cable products include the movement of semi-finished products and finished products with speeds from 8 to 10 meters per minute (enameling) to 1000 meters per minute (dragging). The temperature of the monitored objects also has different values - from a few tens to several hundred degrees. Controlled products have transverse dimensions from fractions of a millimeter to several centimeters and require measurement with different errors.

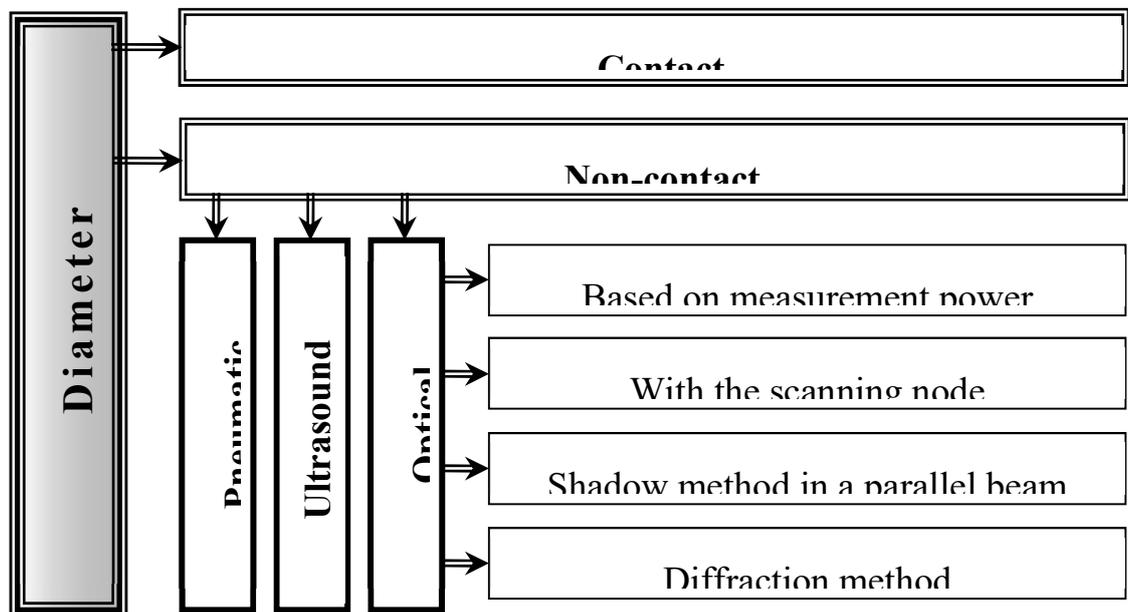


Figure 1.1 - Classification of diameter meters

All methods of dimensional control are divided into contact, when the sensing element is directly in contact with the measured object and non-contact. Classification of diameter meters is presented in the form of a diagram in Fig. 1.1.

At present, the following requirements can be presented to the cable diameter meter [9, 10, 11, 12, 13]:

- absence of mechanical contact of the meter with the cable, which makes it possible to install the meter immediately behind the extruder of the insulating unit;
- measurement of diameter in two coordinates or more, with the possibility of estimating the ovality of the product being manufactured;
- Low measurement error, not exceeding a fraction of a percent;
- high speed (thousandths of a second), allowing measurements on a moving cable;
- small errors due to the transverse movement of the cable, always arising during the production process;
- availability of communication protocols for the device with process equipment for the management of the production process;
- The device should be insensitive to changes in external factors - temperature, humidity, pressure, network interference, etc .;
- universality - the possibility of using the device at different stages of production and for different types of products;
- Reliability in real operating conditions with prolonged multi-shift operation;
- ease of maintenance;
- low cost..

Contact meters have significant disadvantages, such as: longevity (contact diameter meters have measuring tips that touch the surface of the insulation of the wire

or cable, and eventually wear out); impossibility to install the device after the extrusion machine (there is a problem of deformation of insulation by the working parts of the device), unsatisfactory measurement error. To solve the above problems more than 15 years ago, non-contact cable diameter meters were started to be designed.

In the cable industry, when controlling the process of extrusion coating, it is required to measure both the outer diameter of the cable sheath and the eccentricity of its conducting conductor relative to the longitudinal axis of the sheath. In view of the high temperature of the cable sheath and the incompleteness at this stage of the solidification process, both the contact measuring means and the effective ways of centering the cable sheath relative to the longitudinal axis of the primary measuring transducer can not be used. The most perfect method for measuring the specified geometric parameters of the cable is implemented in the development of the leaders in cable instrument making: Sikora Industrieelektronik (Germany), Beta Instr Co (Great Britain), Zumbach Electronic Automatic (Switzerland), OOO ERMIS + (Russia) [14, 15, 16, 17, 18, 19].

Eccentricity, i.e. the displacement of the center of a current-carrying conductor relative to the center of insulation leads to a decrease in the electrical strength of the insulation in a "thin" place and, which is especially unacceptable for communication cables, sharply degrades the frequency characteristics of the cable. The measurement of these geometric parameters is one of the main ways to reduce the cost of cable products due to strict control over the consumption of insulating material in production.

1.1. Measurement of the diameter of the electrical cable

The most important requirement for the extrusion process is to provide the required shape and geometric dimensions: the thickness of insulation and the outer diameter. It is necessary to ensure not only the average level of these parameters, but also their stability along the length of the cable product.

In connection with the automation of the production of a number of cable products, automated instruments for checking the diameter of cables and wires, the thickness of metal, rubber and polymer casings have been developed and widely used. Consider the measurement methods used in such devices in more detail.

1.1.1 Contact Methods

All contact diameter meters are based on the use of conventional mechanical micrometers or displacement sensors. The diameter meter has a movable probe that directly touches the surface to be measured. When the diameter of the cable changes, the probe changes its position, and this is fixed by a micrometer or a displacement sensor, followed by a deviation indication on a graduated scale or digital display. Such devices most often measure not the diameter of the product, but its deviation from the required value [20].

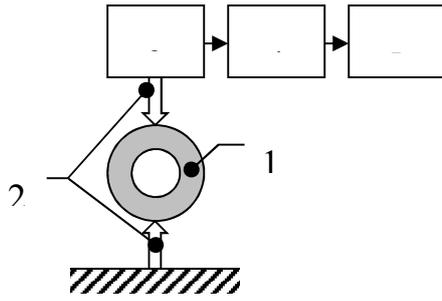


Figure 1.2. Structural scheme of measurement by direct contact method.

Devices using contact measurement methods usually have a block diagram (Figure 1.2), including the monitored product 1, the sensor element 2, the measuring transducer 3, the secondary electronic device 4 and inducing or recording device 5.

As measuring transducers, mechanical, opto-mechanical, electrical and pneumatic sensors are most often used.

The disadvantage of such meters is the presence of mechanical contact probes with the cable itself, which leads to abrasion of the rubbing surfaces of the probes. There is also the possibility of damage and deformation of the cable insulation. Such diameter meters should not be installed immediately after the extrusion chamber. They do not have a long service life and do not provide the required accuracy [21, 22].

Since contact micrometers for measuring dimensions are installed directly on the process equipment, the accuracy of their operation is influenced by the vibrations occurring in the shop.

Given all these shortcomings, the developers eventually abandoned the design of contact diameter meters and now they are almost never used. Developments in this area are no longer being conducted.

1.1.2 Non-contact methods

In the technique of measurement, technical means built on non-contact methods are widely used. They are distinguished by good metrological and operational characteristics and dynamic properties. For non-contact measurements of sizes and shapes, optical, pneumatic and other primary transducers are used, by means of which the monitored parameter is converted into the appropriate physical quantity.

In technological processes, where the speed of pressing the wires and conductors is high, it is preferable to use non-contact type devices that provide high accuracy, the required speed and have an output for use in automatic control systems.

Non-contact measurement methods can be direct and indirect. With direct measurement methods, the diameter of the product is matched to the scale or wavelength. With indirect methods of measurement, various functional dependencies between the geometric dimensions and the time of scanning by the ray of the working zone, the distribution of minima and maxima of the diffraction pattern, etc., are used, etc. [23]

The most common in cable technology are optical methods of measurement. They are also the most modern and promising for creating a meter that fully satisfies all the above mentioned requirements. Consider the existing methods of measuring the diameter in more detail.

1.1.2.1 Pneumatic diameter meters

This is one of the first non-contact diameter control methods developed for production lines. The pneumatic installation (Fig. 1.3) continuously fixes the deviation

of the wire diameter from its nominal value when measuring the air flow passing through the gaps between the surface of the measured wire 2 and the calibrated dies of the measuring head 1.

The device has a device for cleaning wire, consisting of a blowing chamber and felt brushes. The pneumo-electric sensor is provided with clamps for connecting the signaling circuit and stopping schemes of the drawing machine when the wire leaves with a diameter exceeding the specified tolerances.

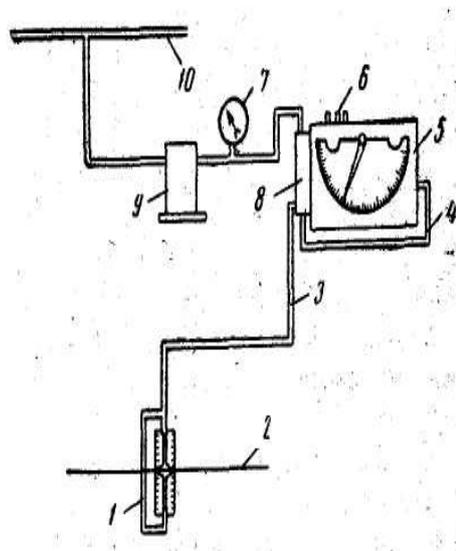


Figure 1.3 - Diagram of a pneumatic micrometer for monitoring the diameter of a wire:

1 - measuring head, 2 - measuring wire, 3 - connecting tubes, 4 - backpressure tube, 5 - pneumatic electric sensor, 5 - contacts of electrical contacts, 7 - control manometer, 8 - distributor, 9 - stabilizer
давления, 10 – сеть сжатого воздуха.

The measuring head is a steel chamber, into which two mandrels are screwed in with pressed dies in them. Through the dies, the measured wire is passed; air inside the

head is introduced through two symmetrically located nozzles and exits through the gaps between the walls of the spinnerets and the surface of the wire [24].

The described method provides a low measurement error of about 100 μm , and has serious drawbacks, such as the inextricability of the transmitter design, the limited range of measured diameters. Also, the disadvantage is that pneumatic micrometers do not fix the ovality of the product and make it difficult to pass through the sensor places of rations, as well as difficult to maintain.

1.1.2.2 Ultrasonic diameter meters

The principle of operation of ultrasonic meters consists in the echo-pulse method, in which the time between the emitted pulse and the received pulse reflected from the media interface is measured. It is assumed that the propagation velocity of ultrasound in a medium is known. The ultrasonic transducer contains a piezoelectric crystal, which, after being exposed to it by a voltage pulse of very short duration, emits a sound wave. Depending on the shape of the transducer lens, the sound wave emanates from the transducer, through water, to the surface of the measurement object. When passing through the medium interface, in our case it is water - the surface of the cable winding, the speed of the wave changes. This change causes a reflection of part of the wave energy back to the transducer. This effect is called - echo. The echo pulse is fixed by the same piezoceramic transducer. Further, the time between the emitted and received pulse is calculated. The speed of propagation of a sound wave in a medium is constant. Knowing the speed and time, you can calculate the distance L_1 to the measured object,

and if you use two identical converters located at a known base distance L from each other, you can calculate the diameter of the measured object as $D = L - (L_1 + L_2)$.

The installation of several pairs of transducers in several planes of the cable section can provide a multi-axis diameter measurement. When using the echo signal from the second section of media (cable sheath - vein), such systems are also able to control both the thickness of the shell of the product and its eccentricity.

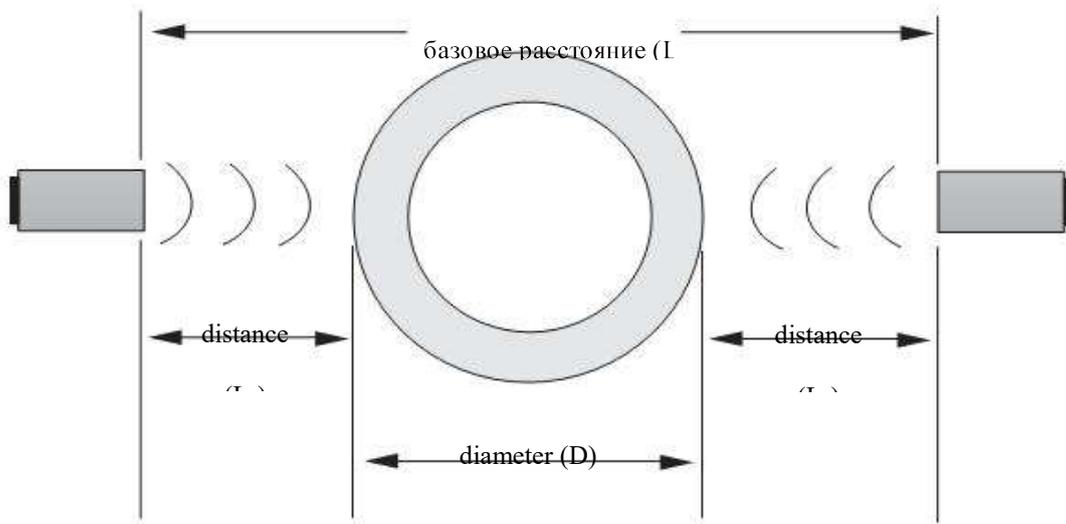


Figure 1.4 -. Method of measuring diameter using ultrasound.

Such systems, although they have high metrological characteristics, have a number of drawbacks due to the fact that the converter must constantly be immersed in the cooling bath water, which complicates its installation and maintenance. Also, higher requirements are imposed on the purity of the cooling water, non-observance of which leads to interference, and to the output of the measuring device is out of order [25,26].

1.1.2.3 Optical methods for measuring diameter

For non-contact measurement of the cable's geometric dimensions, optoelectronic devices that use coded optical scales, interference methods, principles of amplitude and

pulse modulation, implemented on the basis of the use of laser technology, microelectronics and microcontrollers are widely used.

Analysis of measuring optical circuits of devices, allowed to identify the four most common optical methods for measuring diameter. All these methods of measurement are characterized by high speed, small error, good noise immunity, they allow to realize the noncontact principle of obtaining primary information. However, these methods also have significant differences, which impose restrictions on the scope of their application. We will become acquainted with these methods in more detail [27].

1.1.2.3.1 Method for measuring the power of the radiation flux

The method presented in Fig. 1.5 is based on measuring the radiation power perceived by the photodetector. The measured object (cable) is in the working area through which a parallel light flux passes from the illuminator. The cable partially blocks the light flux, and accordingly, reduces the radiation power reaching the photodetector. Changes in the radiation power perceived by the photodetector are then recalculated into the diameter of the measured cable. To use this scheme, you need a source with a stable emissivity that, over time, remains constant, as well as a receiver of optical radiation with constant sensitivity. In real conditions, in the presence of external destabilizing factors, these conditions are hardly attainable. For this reason, the instrument requires frequent calibration and does not have sufficient measurement accuracy. The need to measure instantaneous power values, and in some variants of the optical circuit and the need for measuring mechanical movements, limit the application of the method.

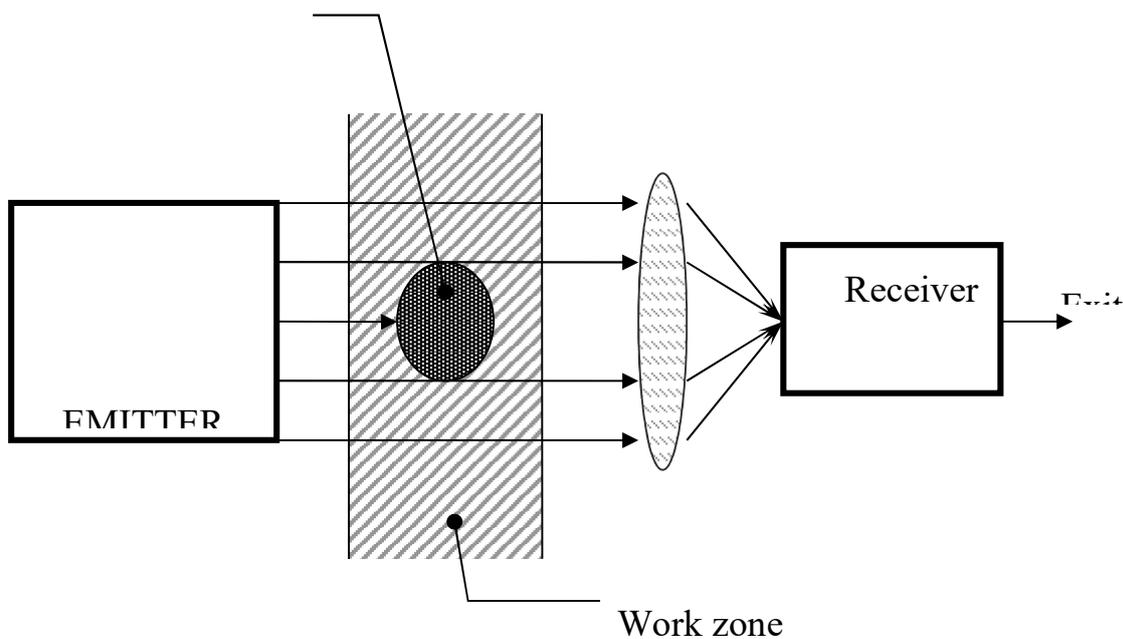


Figure 1.5 - Method of measuring the power of the radiation flux.

This method is one of the first methods of optical control of overall dimensions of objects. Due to the above-described deficiencies, none of the manufacturers of monitoring instruments are currently in use.

1.1.2.3.2 Метод измерения сканированием

Устройство, реализующее метод и приведенное на рис. 1.6, содержит сканирующий узел, создающий тонкий луч, равномерно перемещающийся с постоянной скоростью V в зоне измерения шириной W . Пересекая измеряемый кабель, луч прерывается и на фотоприемнике, воспринимающем излучение, возникает импульс, длительность которого равна времени t движения луча в поперечном сечении кабеля. Длительность импульса фотоприемника измеряется и преобразуется в диаметр измеряемого кабеля с использованием соотношения.

$$D = \frac{t}{T} \cdot W, \quad (1.1.2.3.2.1)$$

where T is the scanning period of the entire working area.

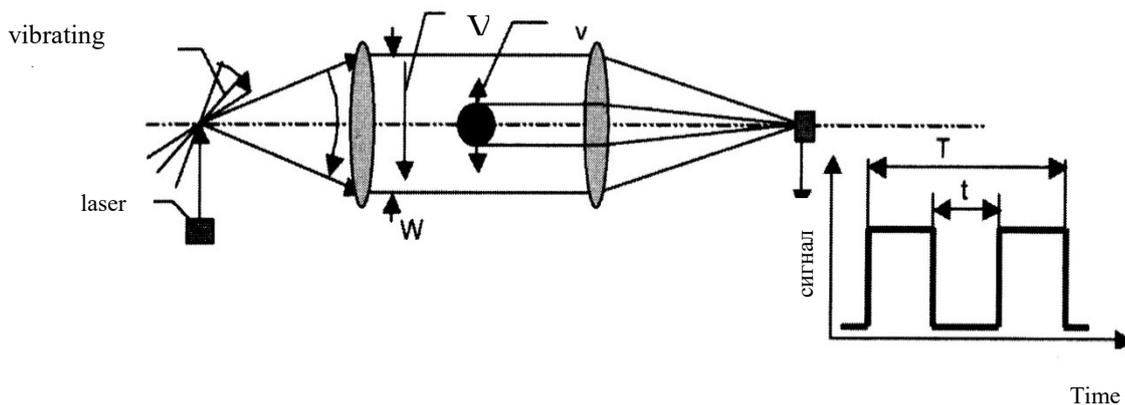


Figure 1.6 - Schema with a scanning node.

Since the time t depends on the intrinsic velocity of the measured object v , the calculations by this formula will be valid only if v is zero.

$$t = \frac{D}{V \pm v}. \text{ При } v=0 \text{ то } t = \frac{D}{V}. \quad (1.1.2.3.2.2)$$

With strong cable vibrations, the error may increase, so the cable must be further stabilized.

As a radiation source in such optical circuits, compact semiconductor laser modules are used. The beam is moved in the zone by a rotating hexagonal mirror, and in the latest developments of this type, a vibrating piezoelectric mirror [28].

Figure 1.7 shows one of the variations of the method for measuring small diameters. To increase the resolution, the optical system must be tuned so that the object being measured is in the focal planes of the collimators.

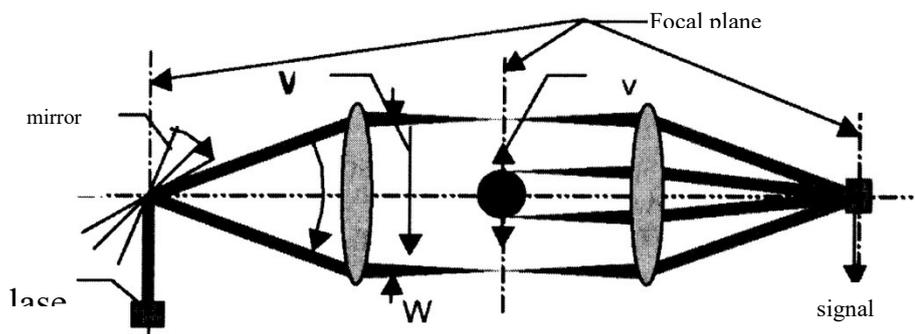


Figure 1.7 - Scheme with a scanning node for measuring small

Advantages of the method are a large measuring range, a high measuring speed and a small error. However, the presence of mobile mechanical components requires their high-quality manufacturing to obtain the required service life, and the need to use high-quality wide-aperture optics and a laser module with a small divergence angle as a radiation source makes the device more expensive.

1.1.2.3.3 The Shadow Method in a Quasi-Parallel Beam

At the development of devices for measuring the diameter of the cable, this method is most often used today. Its optical scheme is shown in Fig. 1.8. The emitter uses the optical system of the collimator to create a beam of light close to the parallel

in the working area through which the cable being measured moves horizontally. The shadow of the cable falls on a multi-element photodetector, the cells of which are arranged vertically in a line. The number of dark cells n of the photodetector multiplied by the width of one cell l corresponds to the cable diameter and can be calculated by $D = n \cdot l$ when interrogating cells. Modern linear multi-element photodetectors have a cell size l from 2 to 60 μm , which makes it possible to provide an appropriate measurement error. As a source of radiation, an incandescent lamp, a single light-emitting diode, whose radiation is led to a point source by additional optics, or a semiconductor laser module can be used. The use of a laser module is preferable, since this source is most approximate to a point-like one, which simplifies the optical scheme and the process of its adjustment and alignment.

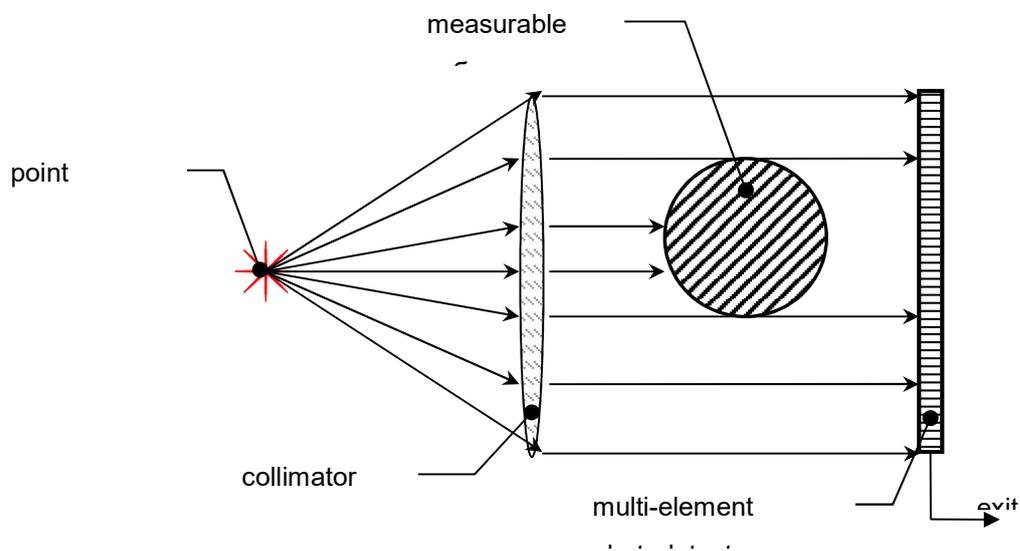


Figure 1.8 - Shadow method in a quasi-parallel beam.

The main contribution to the error in using this method is made by the nonideality of the collimator optical system, which converts light from a point source into a quasi-parallel beam. The presence of aberrations and the error of alignment lead to the fact

that the light flux in the working area is different from the parallel one, which, when moving the measured object in the working zone, strongly affects the measurement error. The larger the measurement zone, the wider the aperture of the collimator should be, and the larger the aperture, the influence of this type of error on the measurement result increases even though a photodetector ruler with a smaller pitch is used. For the same reason, the method is not suitable for measuring small objects with a diameter of less than 0.5 mm, since the magnitude of the error is comparable to the diameter of the object of measurement. This method is applicable for measurements in the range of diameters from about 1 to 30 mm. The creation of two-coordinate meters with a wide measuring range on the basis of this method is problematic due to the cumbersome nature of its means of implementation, but the method compares favorably with the previous ones with a potentially higher reliability by introducing the absence of mechanical moving elements and less interference due to the absence of amplitude and time measurements. It has been used for a long time (since 1990) and has been successfully applied at the Hermis + plant to create single-axis diameter meters with a measuring range of 20 to 30 mm.

1.1.2.3.4. The diffraction method

To enhance the accuracy of the measurement of light, diffraction is used. A ray of light, skirting a thin piece, creates a diffraction silhouette, which is a function of the diameter (Figure 1.9). A multi-element receiver converts the diffraction pattern into electronic signals, which are then converted into a diameter value. The thinner the product, the sharper the diffraction pattern and the higher the measurement accuracy.

This method can be realized both small and ultra-small sections, and as an auxiliary tool to reduce the error of existing measuring methods.

MICROMASTER, the firm Zumbach. As a light source, a red laser diode emitting light of a wavelength of 600 nm is used.

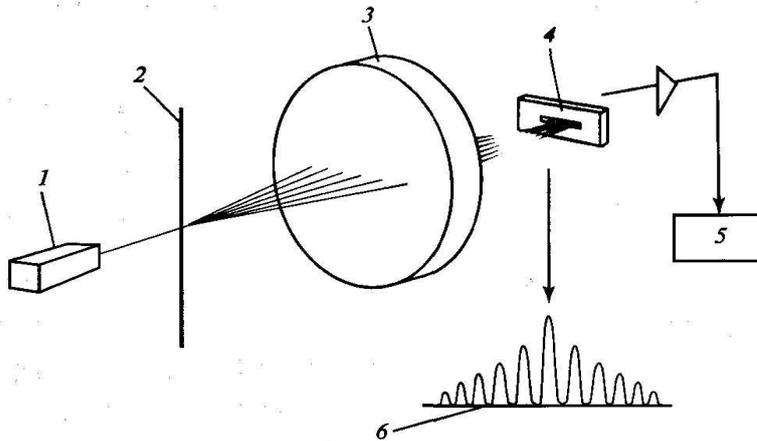


Figure 1.9 - Measurement of wire diameter, based on the phenomenon of light diffraction:

1 - laser; 2 - wire; 3 - the lens; 4 - multi-element receiver; 5 - calculator; 6 - diffraction pattern on a multi-element receiver.