

**Министерство высшего и среднего специального образования  
Республики Узбекистан**

**Ташкентский Государственный технический университет  
им. И.А. Каримова**

**Андижанского машиностроительного института**

**Ю.Г. ШИПУЛИН, У.С. ХОЛМАТОВ**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ  
СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ И  
ПОЛЫХ СВЕТОВОДОВ**

**(Монография)**

**ТОШКЕНТ-2017**

**УДК.681.586.57.621.389**

**ISBN 978-9943-10-999-5**

**Ю.Г. Шипулин, У.С. Холматов. Интеллектуальные дискретные системы для контроля и управления параметрами технологических процессов на основе волоконных и полых световодов. Монография. – Т. Январь 2018 г. 140 стр.**

В данной работе рассмотрены вопросы состояния и развития интеллектуальных оптоэлектронных дискретных преобразователей систем контроля и управления параметрами технологических процессов (линейных и угловых перемещений, скорости, учета штучных изделий, расхода и уровня жидкостей и др.) на основе волоконных и полых световодов. Приведены конструктивные построения, математические модели с продольным и поперечным перемещением внешнего модулирующего элемента и их основные характеристики, методики структурного и параметрического проектирования, примеры практического применения оптоэлектронных дискретных преобразователей.

Монография предназначена для специалистов занимающихся разработкой и эксплуатацией интеллектуальных дискретных оптоэлектронных преобразователей для контроля и управления технологическими параметрами в различных сферах народного хозяйства, а также для преподавателей, студентов и магистров соответствующих специальностей при изучении специальных дисциплин, подготовке выпускных работ и магистерских диссертаций.

**Рекомендовано к изданию решением Ученого совета Ташкентского Государственного технического университета им. И.А. Каримова (Протокол № 2 от 20.10.2017 года).**

**Утверждено Ученым советом Андижанского машиностроительного института (Протокол № 4 от 29.12.2017 года).**

Ответственный редактор: доктор технических наук, профессор Р.К. Азимов.

**Ташкентский Государственный технический университет, Андижанский машиностроительный институт, 2017, Интеллектуальные дискретные системы для контроля и управления параметрами технологических процессов на основе волоконных и полых световодов.**

**Авторы: Ю.Г. Шипулин, У.С. Холматов.**

**Рецензенты:**

**д.т.н., проф. Ш.М. Гулямов (Ташкентский Государственный технический университет).**

**д.т.н., проф. Р. Алиев (Андижанский Государственный университет).**

© Ташкентский Государственный технический университет, 2017.

© Андижанский машиностроительный институт, 2017.

© Ю.Г. Шипулин, У.С. Холматов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ (ОДПВ).....	8
1.1. Общие вопросы и принципы построения ОДПВ.....	8
1.2. Классификация ОДПВ.....	11
1.3. ОДПВ на основе методов аналого-цифрового преобразования.....	17
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ.....	23
2.1. Общие вопросы математических моделей ОДПВ.....	23
2.2. Математическая модель ОДПВ с СИИ и продольным перемещением светоотражающего модулирующего тела внутри полого световода.....	31
2.3. Математическая модель ОДПВ на основе пологого световода с СИИ и поперечным перемещением внешнего модулирующего тела.....	35
2.4. Математические модели ОДПВ перемещений с СИИ и с волоконными световодами.....	43
2.5. Математическая модель ОДПВ с продольным перемещением светоотражающего модулирующего тела.....	48
2.6. Математическая модель ОДПВ при поперечном перемещении ВМТ по координате $y$ .....	51
2.7. Графовые модели аналого-цифровых преобразователей перемещений на основе ОДПВ.....	53
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОЛЫМИ И ВОЛОКОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ.....	57
3.1. Основные характеристики ОДПВ.....	57
3.2. Статические характеристики релейных ОДПВ с СИИ на основе полых световодов.....	64
3.3. Статические характеристики релейных ОДПВ с СИИ на основе волоконных световодов при продольных и поперечных перемещениях ВМТ.....	65
3.4. Статические характеристики импульсных ОДПВ с СИИ на основе полых и волоконных световодов для контроля параметров вращающегося диска.....	73
3.5. Статические характеристики оптоэлектронного дискретно преобразователь для автоматических измерений перемещений и размеров.....	78

3.6. Динамические характеристики ОДПВ.....	82
3.7. Исследование основных погрешностей ОДПВ.....	86
3.8. Надежность современных оптоэлектронных элементов с волоконными и полыми световодами .....	94
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ.....	101
4.1. Общие вопросы проектирования ОДПВ и устройств на его основе.....	101
4.2. Структурное проектирование ОДПВ.....	104
4.3. Параметрическое проектирование преобразователей ОДПВ.....	112
4.3.1. Задача проектирования устройств на основе ОДПВ по критерию чувствительности и линейности статической характеристики.....	114
4.3.2.Проектирование по критериям точности и быстродействия.....	115
4.4. Микропроцессорное устройство на основе ОДПВ для контроля и управления большими линейными перемещениями.....	118
4.5. Микропроцессорное устройство на основе ОДПВ для учета продукции на технологических линиях.....	121
ЛИТЕРАТУРА.....	129

## **ВВЕДЕНИЕ.**

В связи с необходимостью повышения эффективности производственных процессов и развития автоматизированных систем контроля и управления постоянно возрастает значение преобразователей, применяемых для получения информации о различных параметрах технологических процессов.

В настоящее время происходят существенные изменения в развитии интеграции автоматизированных систем управления и информационных систем. Это связано с достижениями микроэлектроники, микропроцессорной и вычислительной техники, новых процессов и явлений полупроводниковой, твердотельной и пленочной технологии, а также применением новых материалов. К этим системам предъявляются требования по обеспечению широкой оптимизации модели конкретного производства-предприятия т.е. управления энергией, потоком материалов, процессом производства, качеством и ценой продукции до обеспечения эффективной ориентации на рынке сбыта. Для удовлетворения этих требований необходимо использовать средства управления с новыми функциями и интерфейсами, которые позволяют пользователю представить полностью всю схему технологического процесса.

Рассматривая этот вопрос, мы исходим из того, что современные возможности микроэлектронной технологии позволяют практически безвозвратно формировать весьма сложные измерительные цепи преобразователей непосредственно в контакте с устройствами преобразования. Это требует решить проблему нормализации и усиления сигналов с преобразовательного элемента, но и задачу введения элементов интеллекта [47].

К современным преобразователям технологической информации предъявляются повышенные требования по надежности, помехозащищенности, диапазону измерений, экономичности и непосредственной совместимости с микропроцессорными и цифровыми элементами различного назначения. При решении этих многофакторных задач, одновременно возникают такие вопросы как, определение уровня современной техники измерительных

преобразователей, т.е. согласование их технического уровня в современном состоянии средств обработки данных и измерительной информации.

Достоинством такой концепции построения измерительных преобразователей является возможность их фактической реализации в виде «Интеллектуальных преобразователей», объединяющие различные устройства.

Интеллектуальные преобразователи снабжены микропроцессорами со значительным объемом памяти и высоким быстродействием.

Выполнение необходимых функций обеспечивается как аппаратными (изменение структуры), так и программными средствами.

По назначению, выполняемой функции, используемых электронных средств интеллектуальные преобразователи имеют:

- Техническую интеллектуальность – использующую значительные технические достижения;
- Функциональную интеллектуальность, реализуемую с помощью обрабатывающей электроники и программ;
- Социальную интеллектуальность при взаимодействии с общей системой.

В последние годы широкое развитие получили интеллектуальные оптоэлектронные преобразователи на основе полых и волоконных световодов [48] для получения информации о таких важных величинах как линейные и угловые перемещения, уровень и концентрация жидкостей и газов, скорости перемещения, вращения и другие.

Оптоэлектронные преобразователи на основе полых и волоконных световодов благодаря простоте и надежности конструкций, высокой точности и быстродействию, экономичности и технологичности изготовления широко применяются для автоматизации в различных производственных процессах.

Среди оптоэлектронных преобразователей на основе полых и волоконных световодов недостаточно разработаны и исследованы дискретные преобразователи уровня жидкостей, наклона различных объектов, линейных и

угловых перемещений, устройства для автоматического счета штучной продукции на конвейерных линиях и другие.

Оптоэлектронные преобразователи на основе полых и волоконных световодов являются совместимыми с микропроцессорами и способны эффективно и дискретно преобразовать различные физические величины, которые на входе преобразователя воздействуют на оптический канал, изменяя параметры светового потока при его распространении от источника к приемнику излучения.

Некоторые вопросы разработки и исследования отдельных конструкций дискретных оптоэлектронных преобразователей освещены в [66].

В данной работе изложены принципы построения, математические модели, основные характеристики, источники погрешностей и описаны различные приборы и устройства для контроля и управления, выполненные на основе дискретных оптоэлектронных преобразователей с полыми и волоконными световодами.

Проблема создания и совершенствования оптоэлектронных дискретных преобразователей на основе полых и волоконных световодов (ОДПВ), удовлетворяющих современным требованиям систем контроля и управления существенно способствует совершенствованию как самих оптоэлектронных преобразователей на основе полых и волоконных световодов так и систем контроля и управления различными технологическими процессами [19, 21, 68].

# 1. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ (ОДПВ).

## 1.1. Общие вопросы и принципы построения ОДПВ.

Оптоэлектронные дискретные преобразователи на основе полых и волоконных световодов (ОДПВ) находят широкое применение в различных системах контроля и управления технологическими процессами как дискретные преобразователи (датчики) уровня жидкостей, скорости вращения тел, углов наклона объектов, линейных и угловых перемещений и другие.

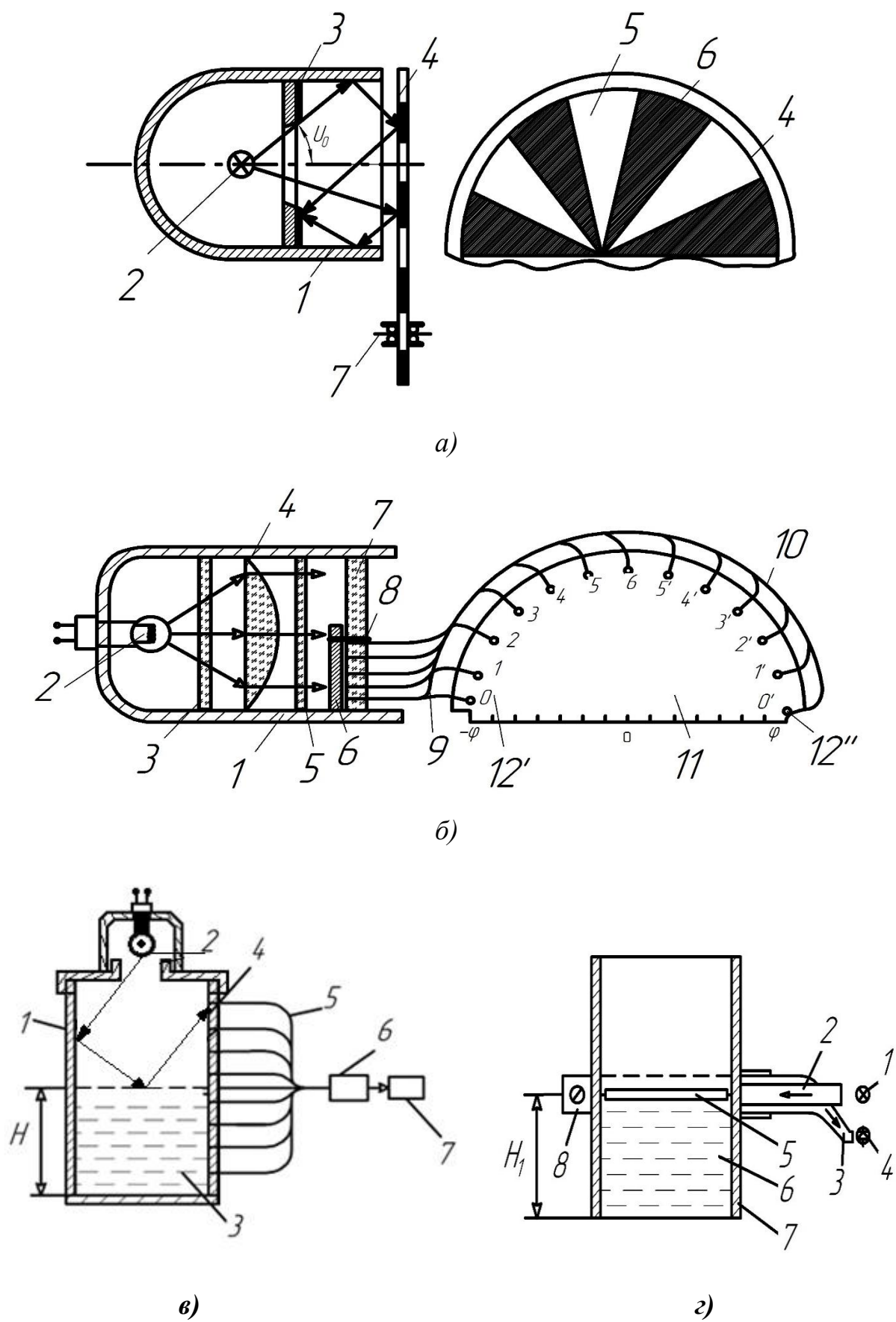
Бесконтактность измерения, быстродействие, высокие точность и надежность, а также экономичность выгодно отличают ОДПВ от других дискретных преобразователей.

На рис.1.1 показан ряд устройств на основе ОДПВ выходные сигналы которых в дискретной форме (в виде импульсов тока  $I_{вых}$  или напряжения  $U_{вых}$ ) связаны со скоростью вращения  $\omega$ , угла наклона  $\varphi$  и уровня жидкостей  $H$ .

На рис.1.1, а. изображен ОДПВ скорости вращения [56], содержащий полый световод 1, сосредоточенный источник излучения 2, кольцевой приемник излучения 3, диск 4 со светлыми 5 и темными 6 полосами, ось вращения диска 7. При вращении диска 4 световой поток  $\Phi_0$  от источника излучения 2 проходит через отверстие (диафрагму) образованной кольцевым приемником излучения 3 в пределах угла  $0 \leq u \leq u_0$ , падает на светлые 5 и темные 6 полосы диска и отражаясь только от светлых полос 5 падает на светочувствительную поверхность кольцевого приемника излучения 3, который включен в мостовую измерительную схему, выходной электрический сигнал в виде последовательности импульсов тока  $I_{вых}$  или напряжения  $U_{вых}$  являются функцией скорости вращения диска 4  $\omega$ .

На рис.1.1, б изображен преобразователь угла наклона [54] на основе ОДПВ, содержащий полый световод 1, источник излучения 2, тепловой экран 3,





**Рис.1.1.** Физические модели ОДПВ. а) ОДПВ скорости вращения; б) ОДПВ угла наклона; в, г) ОДПВ уровня жидкостей.

фокусирующую линзу 4, защитное стекло 5, полудисковый оптический экран 6, свободно подвешенный на оси 8 круглого основания 7, в котором на нижнем полукруге установлены в четверть круговых секторах по дугам входные торцы двух групп отводящих волоконных световодов 9 и 10, выходные торцы которых уложены вдоль двух дугообразных шкал делениями в градусах  $-\varphi$  и  $\varphi$  на полудисковом экране для визуального отображения угла наклона объекта: в левую сторону  $-\varphi$ , а в правую сторону  $\varphi$ . Предварительно ОДПВ устанавливается на контролируемый объект.

При наклоне объекта на угол  $\varphi$  корпус ОДПВ наклоняется также на угол  $\varphi$ , а полудисковый оптический экран 6 сохраняет свое исходное положение, связанное с координатами земли. Таким образом, при наклоне корпуса ОДПВ с основанием 7 на угол  $\varphi$  часть входных для светового потока торцов отводящего волоконного световода 9 открываются экраном 6 и освещаются, а входные торцы отводящего волоконного световода 10 не освещаются, что свидетельствует о направлении наклона (влево и вправо). Светящиеся входные торцы отводящего световода 12' дают в числовом виде информацию об угле наклона на шкале полудискового отображающего экрана 11, а выходные торцы отводящего волоконного световода 12" не будут светиться и это визуально будет информацией, что наклон произошел в другую сторону.

В ОДПВ уровня жидкости (рис.1.1, в) в верхнем торце полого световода 1 [22] расположен неподвижный источник излучения 2, а роль подвижного внешнего модулирующего тела (ВМТ) выполняет светоотражающая поверхность уровня жидкости, при перемещении которой изменяется распределения светового потока  $\Phi_0$ , вдоль полого световода 1. Данный полый световод имеет продольную оптическую щель 4, вдоль которой размещены входные торцы отводящих световой поток волоконных световодов 5, выходные торцы которых оптически соединены с матрицей приемников излучение 6 и далее со схемой обработки сигналов 7. При перемещении уровня  $H$  жидкости 3 внутри полого световода 1 происходит изменение распределения светового

потока  $\Phi_{(x)}$ , который соответственно освещает входные торцы отводящих волоконных световодов 5, которые соответственно подводят световые потоки к приемникам излучения 6 и на выходе схемы обработки сигналов 7 получается информация об измеряемом уровне жидкости.

ОДПВ уровня жидкостей изображенный на рис.1.1, *з* содержит: источник излучения 1, подводящий волоконный световод 2, отводящий световой поток волоконный световод 3, приемник излучения 4, цилиндрический поплавок 5, жидкость 6 с уровнем  $H$ , уровнемерную трубку 7, хомут для крепление ОДПВ с винтом 8. В исходном состоянии при значении уровня  $H < H_1$  поплавок 5 не будет находится напротив торцов подводящего 2 и отводящего 3 волоконных световодов и световой поток  $\Phi_0$  от торца подводящего световода 2 не будет отражаться от светоотражающей боковой поверхности поплавка 5 и на приемник излучения и не будет падать световой поток. При достижении уровня жидкости  $H=H_1$  поплавок 5 окажется напротив торцов световодов 2 и 3 и световой поток  $\Phi_0$  от выходного торца световода 2 отразится от светоотражающей боковой поверхности поплавка 5 и попав во входной торец отводящего волоконного световода 3 попадет на приемник излучения 4, на выходе которого возникнет электрический сигнал в виде импульса электрического тока  $I_{вых}$  или напряжения  $U_{вых}$ , несущих информацию о дискретном значении достигнутого уровня жидкости  $H_1$  [56].

Рассмотренные оптоэлектронные дискретные преобразователи свидетельствуют о большом разнообразии конструкций ОДПВ. Проанализируем их принципы построения.

## 1.2. Классификация ОДПВ.

Существующие конструкции ОДПВ можно классифицировать по принципу действия, по конструктивному признаку и функциональному назначению. Принцип действия ОДПВ основан на известных оптических эффектах и явлениях: отражения, экранирования, поглощения, преломления, полном внутреннем отражении и другие. Для ОДПВ в настоящее время

выпускаются различные типы световодов, источников и приемников излучения. Разнообразны в зависимости от типов источников и приемников излучения измерительные схемы ОДПВ. Все перечисленные элементы ОДПВ, а также внешние модулирующие тела (элементы) в основном определяют метрологические характеристики ОДПВ. По конструктивному признаку рассматриваемые ОДПВ делятся в зависимости от типа световода: с полыми и волоконными световодами. В свою очередь полые световоды могут быть выполнены из оптически прозрачных и непрозрачных материалов, с зеркальной внутренней поверхностью, с различными формами и размерами, а волоконные световоды также могут быть различными по конструктивному изготовлению: одиночные световоды; световоды в виде жгутов; коаксиальные световоды и другие [29, 49, 51].

Принцип действия большинства ОДПВ основывается на зависимости между входными и выходными величинами за счет распределения светового потока от источника к приемнику излучения при продольных и поперечных перемещениях различных внешних модулирующих тел (ВМТ). В ОДПВ можно выделить следующие ВМТ: плоские (пластины, диски, ленты), шарообразные, цилиндрические, поверхности жидкостей и твердых тел.

По функциональному назначению ОДПВ могут быть разделены на преобразователи линейных и угловых перемещений, уровня жидкости, скорости вращения и другие. Источники излучения, используемые в ОДПВ, весьма разнообразны и также определяют тип конструкций ОДПВ. Источники излучения можно подразделять на сосредоточенные (точечные), распределенные продольно или поперечно оси световодов. Аналогично могут быть классифицированы приемники излучения. Следует указать, что распределенные на входном торце световодов источники излучения как правило получают сочетанием сосредоточенного источника излучения с линзой. Анализ существующих конструкций ОДПВ и результатов исследований показывает, что для разработки конструкций ОДПВ на основе полых световодов наиболее эффективными являются кольцевые приемники излучения установленные на

входном торце полого световода и которые одновременно выполняют роль диафрагмы. А для разработки конструкций ОДПВ на основе волоконных световодов весьма перспективными являются коаксиальные световоды, у которых подводящий волоконный световод охвачен снаружи отводящим волоконным световодом.

С учетом вышеизложенного ниже на рис.1.2 и рис.1.3 приведены классификации ОДПВ по типам продольно и поперечно перемещающихся ВМТ при сосредоточенных и распределенных в источниках излучения.

На рис.1.2 приведена классификация рефлексивных ОДПВ по типу продольно перемещающихся ВМТ при сосредоточенном источнике излучения. В конструкциях рефлексивных ОДПВ (рис.1.2) на основе полых световодов (ПС) на входном торце световода по оси последовательно установлены источник излучения (ИИ), кольцевой приемник излучения (ПИ) и имеются ВМТ в виде плоских и шарообразных цилиндрических тел, а также в виде поверхности жидкости (ПЖ). При продольных перемещениях ВМТ по координате  $x$  изменяется величина светового  $\Phi_0$  падающего на приемник излучения ПИ из-за распределения светового потока от источника излучения ИИ вдоль продольной координаты и оптических и геометрических параметров ПС и ВМТ.

В целом световой поток  $\Phi_0$  падающий на ПИ при продольном перемещении ВМТ от  $x=0$  в сторону увеличения резко возрастает до максимума  $\Phi_{0 \text{ макс}}$  и далее уменьшается образуя сигнал в форме импульса. Этот выходной сигнал в виде  $\Phi_0(x)$  или изменения  $U_{\text{вых}}(x)$  в измерительной схеме можно использовать для дискретных систем контроля уровня жидкостей, приближения и касания в роботизированных устройствах и в других объектах контроля. Аналогично возникают сигналы в виде импульсов при продольном приближении и касании ВМТ в рефлексивных ОДПВ на основе волоконных световодов.

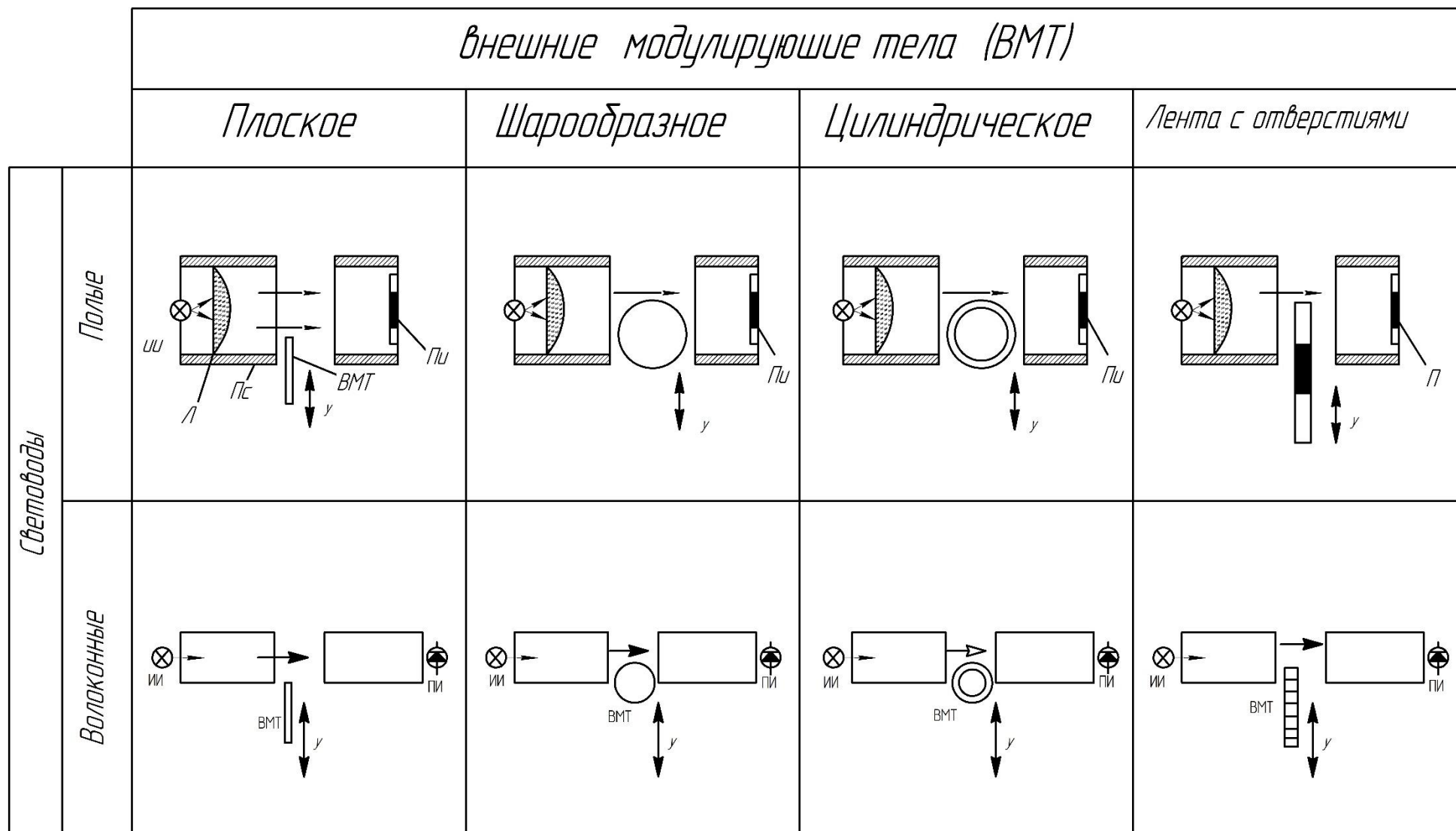
В конструкциях рефлексивных ОДПВ по типу поперечных перемещающихся ВМТ при сосредоточенных источниках излучения (рис.1.3) при поперечных перемещениях ВМТ по координате  $y$  изменяется площадь светоотражающей поверхности ВМТ (пластины, шара, цилиндра и световых и

		внешние модулирующие тела (ВМТ)			
		Плоское	Шарообразное	Цилиндрическое	Поверхность жидкости (ПЖ)
Световоды	Полые				
	Волоконные				

**Рис.1.2.** Классификация рефлективных ОДПВ по типу продольно перемещающихся ВМТ при сосредоточенном источнике излучения.

		внешнее модулирующее тело (ВМТ)			
		Плоское	Шарообразное	Цилиндрическое	Лента или диск со светлыми и темными полосами
Световода	Полые				
	Волоконные				

**Рис.1.3.** Классификация рефлективных ОДПВ по типу поперечно перемещающихся ВМТ при сосредоточенном источнике излучения.



**Рис. 1.4.** Классификация ОДПВ на основе прерывания светового потока при поперечно перемещающихся ВМТ с распределенным световым потоком на входном торце световода.



темных полос) на поверхности ленты или диска. В целом световой поток  $\Phi_0(y)$  падающий на ПИ при поперечном перемещении ВМТ от  $y=0$  в сторону увеличения резко возрастает до максимума  $\Phi_{0(I)_{\text{макс}}}$  и далее уменьшается образуя сигнал импульса колоколообразной формы. Этот сигнал далее в измерительной схеме преобразуется в электрический дискретный сигнал  $U_{\text{вых}(y)}$  и используется в различных системах управления и контроля перемещением, скоростью и положением объектов. Принципы действия ОДПВ при поперечных перемещениях ВМТ (плоского, шарообразного, цилиндрического, ленточных и дисковых) аналогичны для конструкций с полыми и волоконными световодами.

В конструкциях ОДПВ на основе прерывания светового потока  $\Phi_0(y)$  принцип действия основан на измерении площади прохождения светового потока  $\Phi_0(y)$  в результате воздействия (экранирования) ВМТ, далее световой поток или прямо попадает на светочувствительную поверхность ПИ и в результате изменяется освещенность  $S_{ab,(y)}$  приемника излучения или при малых (сосредоточенных) ПИ могут быть использованы перед ПИ линзы для концентрации светового потока падающего на ПИ. В ОДПВ на основе волоконных световодов из-за малых размеров их сечений используется также линзы для подведения светового потока к ПИ. Указанные ОДПВ с РИИ и поперечным перемещением ВМТ оказались весьма эффективными при разработке микропроцессорных устройств учета штучных изделий при их транспортировке по конвейерным линиям.

### **1.3. ОДПВ на основе методов аналого-цифрового преобразования.**

Как показано выше ОДПВ широко применяются для контроля линейных и угловых перемещений [50], уровня жидкостей [40], скорости перемещения [66] и многих других величин. Однако недостаточно разработаны ОДПВ сочетающие одновременно формирование цифрового выходного сигнала и визуального отображения с помощью тех же волоконных световодов. Результаты ряда работ [4] показывают что на основе волоконных световодов весьма эффективны для

построения аналого-цифровых преобразователей (АЦП) линейных и угловых перемещений.

В целом существующие АЦП перемещений на основе волоконных световодов делятся на две группы.

В первую группу входят оптоэлектронные преобразователи, в которых волоконные световоды выполняют простейшую функцию передачи светового потока. Передача светового потока  $\Phi_0$  осуществляется как от источника излучения к ВМТ так и от ВМТ к приемнику излучения.

Во вторую группу входят оптоэлектронные преобразователи, в которых волоконные световоды выполняют сложную функцию по квантованию, кодированию и передаче модулированного светового потока  $\Phi_0$  несущего измерительную информацию о входной величине, при этом, основой данного процесса преобразования является геометрическое кодирование светового сигнала несущего информацию о входной величине. Таким образом, в оптоэлектронных преобразователях второй группы световой поток  $\Phi_0$  проходит через волоконный световод и одновременно модулируется на основе геометрического кодирования в пределах измерительного пространства на основе конкретной конструкции ОДПВ.

Именно последнее существенно отличает рассматриваемую группу преобразователей от других преобразователей использующих различные кодирующие элементы и устройства, то есть у второй группы преобразователей отсутствуют специальные кодирующие устройства, что существенно упрощает и конструкцию и схему обработки выходных сигналов. У известных оптоэлектронных АЦП кодирующие элементы как правило неподвижны. Входная величина (линейная или угловая) задается или перемещением светового штриха (пятна, точки) или перемещением границы раздела различных оптических элементов (или сред) [67]. Например, преобразователь считывания первой группы может быть выполнен в виде неподвижной кодовой маски, приложенной к входным торцам волоконных световодов (или одного световода) [23]. Входные торцы отводящих волоконных световодов располагаются за

кодовой дорожкой соответствующего разряда кодирующей маски, а выход волоконных световодов сопрягается со входом приемников излучения.

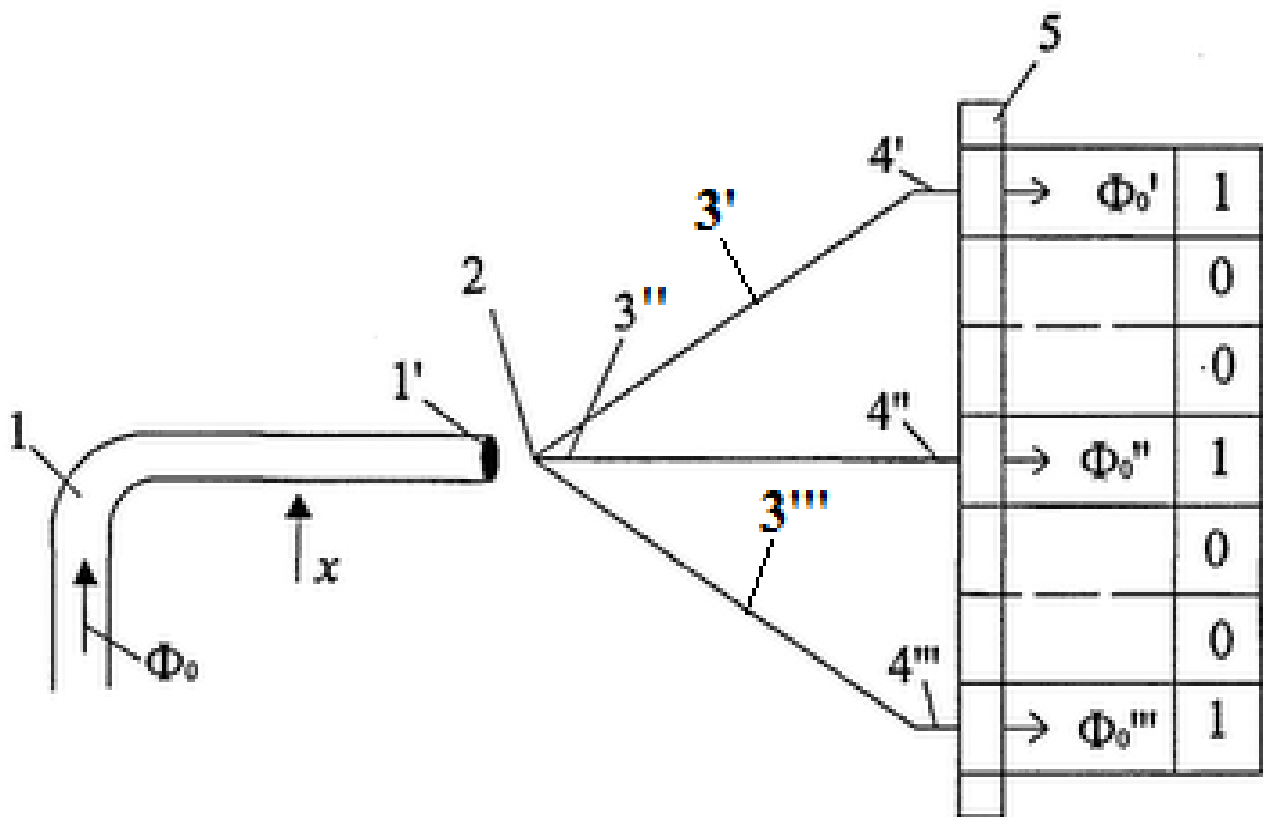
При изменении входной величины изменяется положение светового штриха на кодирующей маске. Так как маска представляет собой совокупность прозрачных и непрозрачных участков кодовых дорожек отдельных разрядов, то каждому положению светового штриха будет соответствовать определенная комбинация сигналов на выходе оптоэлектронных преобразователей.

В тех конструкциях ОДПВ, в которых входные торцы волоконных световодов уложены в обойму вплотную друг к другу, а диаметр волоконного световода постоянный, то входные торцы отводящих волоконных световодов осуществляют квантование измеренного перемещения (линейного или углового). Шаг квантования равен диаметру волоконного световода  $\Delta_k = d_{BC}$ . Данный процесс преобразования происходит при воздействии внешнего модулирующего тела (ВМТ) (шторки, луча, пятна, точки и другое). Наиболее эффективными конструкциями рассматриваемых преобразователей являются устройства с дискретным оптическим кодированием, при котором процессы квантования и кодирования происходят одновременно. Под оптическим кодированием понимают преобразование входного оптического изображения в другое оптическое изображение, которое оптимально и эффективно отображает контролируемые параметры входного изображения контролируемого объекта. При дискретном оптическом кодировании на выходе ОДПВ имеется конечное множество оптических сигналов, которые по определенным правилам размещены на линейных или пространственных шкалах.

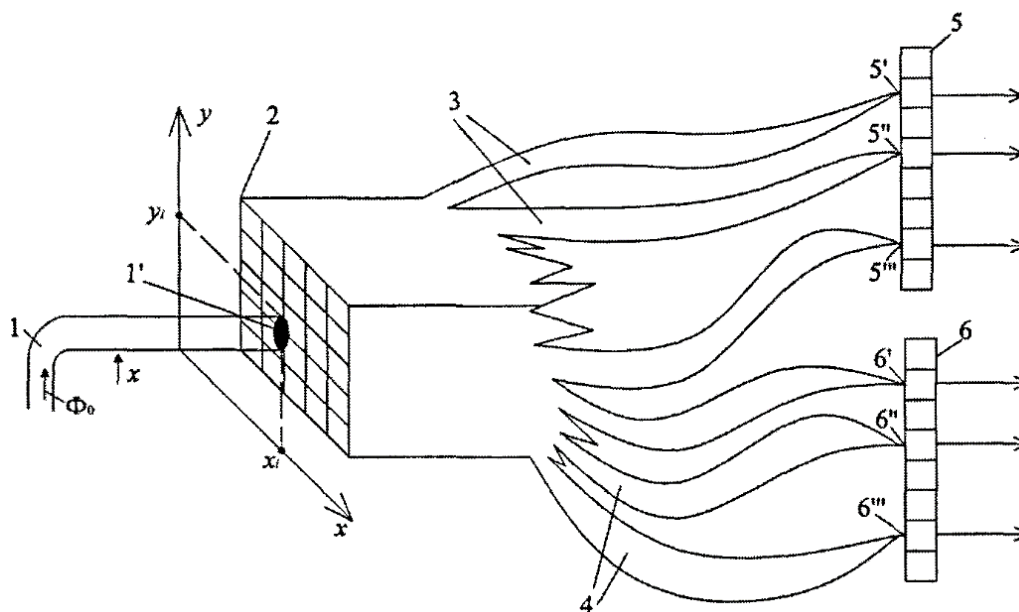
Квантование координат осуществляется, например, квантующей дугообразной однокоординатной шкалой или двухкоординатно расположенными квантующими дугообразными шкалами в виде дугообразных пластин, вдоль которых расположены входные торцы отводящих волоконных световодов. Квантующие пластины однокоординатные и двухкоординатные являются основными элементами ОДПВ содержащими меру перемещения и определяющими точность АЦП.

В рассматриваемых ОДПВ преобразователях кодирование входного сигнала несущего информацию о перемещении объекта происходит и самом преобразователе, при этом формируемый код представляет собой комбинацию освещенных и неосвещенных выходных торцов отводящих волоконных световодов, каждый из которых отображает значение величины перемещения благодаря определенному разряду кода. В рассматриваемом аналого-цифровом преобразователе наиболее эффективным является применение позиционных кодов.

Рассмотрим отдельный входной торец 2 отводящего волоконного световода 3, который расщепляется на  $n$  оптических волокон, выходные торцы 4 которых расположены в пластине 5. (рис.1.5.)



**Рис.1.5.** Схема оптического кодирования в ОДПВ: 1, 1' - подвижный подводный волоконный световод и его выходной торец; 2 - входной торец отводящего световода; 3 - отводящий световод; 4 - выходные торцы отводящего световода; 5 - пластина для крепления выходных торцов;  $x$  - координата перемещения объекта.



**Рис.1.6.** Схема оптического кодирования в двухкоординатном преобразователе: 1 – подвижный подводный волоконный световод с выходным торцом 1'; 2 – матрица входных торцов отводящих волоконных световодов; 3, 4 – отводящие волоконные световоды распределенные по координатам  $x$  и  $y$ ; 5, 6 – пластины с установленными выходными торцами соответственно 5', 5'' и 5''' и 6', 6'' и 6''' отводящих волоконных световодов.

Из анализа существующих конструкций ОДПВ можно сделать следующие выводы:

1) Характерными признаками рассматриваемых ОДПВ для конструкций на основе полых световодов являются: наличие на входном торце полого световода, последовательно установленных по оси полого световода сосредоточенного источника излучения и кольцевого приемника излучения, который одновременно выполняет роль диафрагмы и своей светочувствительной поверхностью обращен во внутрь полости полого световода для восприятия светового потока от различных ВМТ по принципу действия перемещающихся продольно или поперечно оси световода.

2) Характерными признаками ОДПВ на основе волоконных световодов являются: наличие на входном торце волоконного подводного световода сопряженного с ним сосредоточенного источника излучения и коаксиально

расположенного с подводящим световодом отводящего волоконного световода, что создает осе-симметричное распределение эффективной освещенности торца отводящего световода световым потоком, отраженным от ВМТ, при этом выходной торец подводящего волоконного световода несколько отодвинут от торцов отводящего волоконного световода, что устраняет фоновую засветку и создает необходимую индикатрису излучения от подводящего волоконного световода.

3) Общими характерными признаками для рассматриваемых ОДПВ являются наличие подвижных (в продольном или поперечном направлениях) ВМТ в качестве которых наиболее часто в конструкциях ОДПВ используется плоское тело, шарообразные и цилиндрической форма тела, а также поверхности уровня жидкости в ОДПВ для контроля уровня жидкости.

4) Для ОДПВ основанных на явлении прерывания светового потока характерным является наличие распределенного на торце полых или волоконных световодов светового потока и поперечно перемещающихся ВМТ, в качестве которых используются плоские, шарообразные и цилиндрические тела, а также линейка, лента и диски с отверстиями.

Улучшение метрологических характеристик ОДПВ можно добиться выбором материалов полых и волоконных световодов, параметров оптической системы, геометрических и оптических параметров ВМТ, а также использованием в измерительных схемах современных устройств микроэлектронной микропроцессорной техники.

5) Для дальнейшего развития ОДПВ на основе волоконных световодов перспективным является разработка ОДПВ и устройств на их основе с применением геометрического и оптического кодирования выходных торцов отводящих волоконных световодов и получение на этой основе ОДПВ с аналого-цифровым преобразованием, это позволит эффективному сопряжению ОДПВ с микропроцессорными устройствами и широко применять ОДПВ в различных системах контроля и управления.

## **2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ.**

### **2.1. Общие вопросы математических моделей ОДПВ.**

Теория рассматриваемых ОДВП в общем случае основана на создании импульса светового потока в результате связи между входной величиной  $x_{вх}$  и распределением светового потока в полых и волоконных световодах  $\Phi_0(x,y)$  по продольной  $x$  и поперечной  $y$  координатам до и после ВМТ.

Размеры (продольные и поперечные) полых и волоконных световодов больше длины волны света, и поэтому достаточная точная для практического использования методика светораспределения в этих световодах может быть получена при использовании законов геометрической оптики. Теория и методы расчета светопропускания в волоконных световодах достаточно полно освещены в ряде работ [28].

Однако, большинство указанных работ относятся к теории и методам расчета светопропускания волоконных световодов используемых в системах передачи информации и связи и недостаточно пригодны для проектирования и расчета ОДПВ как дискретных преобразователей различных величин. В связи с этим с целью упрощения процесса расчета ОДПВ можно разработать методику расчета основных характеристик ОДПВ по аналогии с методикой расчета ОППС, которые как показано выше достаточно исследованы и разработаны [24, 52].

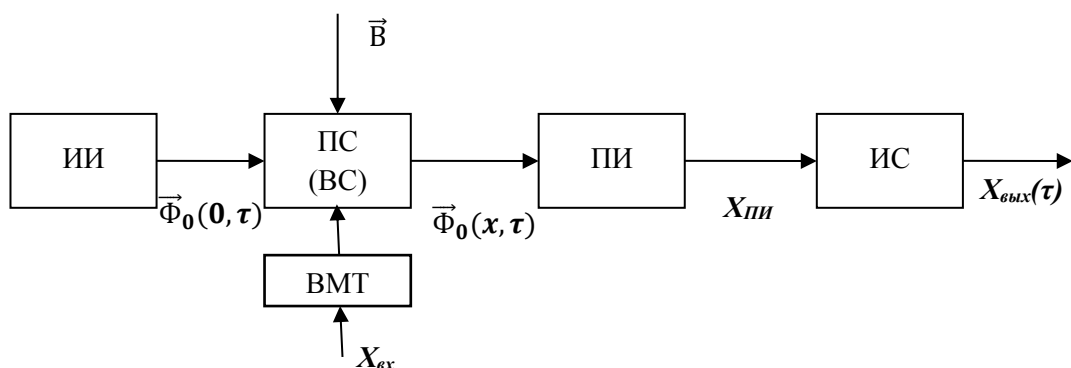
В ОДПВ на основе полых световодов [26], как показано выше при разработке принципов построения основным положением является распределение светового потока  $\Phi_0(x)$  вдоль световода под воздействием входной величины или внешнего модулирующего тела, связанного со входной величиной. Роль волоконных световодов в данных типах преобразователей заключается в основном в подведении и отведении световых потоков от участков преобразования [59-60].

ОДПВ на основе волоконных световодов, как было показано выше, принципы их построения реализованы в двух основных направлениях: в первом, волоконные световоды используются для подведения светового потока к ВМТ и далее для отвода модулированного светового потока от модулирующего тела к приемнику излучения; во втором, направлении в конструкциях ОДПВ волоконные световоды выполняют сложную функцию по измерительному преобразованию, по квантованию и кодированию, а также передаче модулированного светового потока к приемнику излучения.

В связи с изложенным целесообразно отдельно рассмотреть математические модели преобразователей на основе полых и волоконных световодов.

В общем случае выходной сигнал ОДПВ (рис.2.1) формируется посредством модуляции параметров светового потока  $\vec{\Phi}_0(x, \tau)$  под воздействием измеряемой величины  $X_{вх}$  или внешнего модулирующего подвижного тела, (ВМТ) связанного с измеряемой величиной.

Обобщенную функциональную схему ОДПВ можно представить в виде



**Рис.2.1.** Обобщенная функциональная схема ОДПВ:

$\vec{\Phi}_0(0, \tau)$  - световой поток на входе ПС (ВС);  $\vec{\Phi}_0(x, \tau)$  - световой поток, на выходе ПС (ВС); ИИ - источник излучения; ПИ – приемник излучения;  $X_{ПИ}$  — выходная величина приемника излучения; ИС — измерительная схема;  $X_{вых}(\tau)$  — величина на выходе ИС;  $\tau$  — координата времени;  $x$  — линейная координата.

Согласно принципу работы ОДПВ входная величина  $X_{вх}$  воздействует на параметры светового потока  $\vec{\Phi}_0(0, \tau)$ , изменяя его характеристики, и в



результате  $\vec{\Phi}_0(\mathbf{0}, \tau)$  посредством оператора  $F_1$  преобразуется в выходной световой поток  $\vec{\Phi}_0(\mathbf{x}, \tau)$ .

Процесс преобразования  $\vec{\Phi}_0(\mathbf{0}, \tau) \rightarrow \vec{\Phi}_0(\mathbf{x}, \tau)$  можно представить в виде

$$F_1(X_{\text{вх}}, \vec{B}) \cdot \vec{\Phi}_0(\mathbf{0}, \tau) = \vec{\Phi}_0(\mathbf{x}, \tau) \quad (2.1)$$

$\vec{B}$  – различные воздействия (влажность, внешний световой поток, температура и др.), определяющие факторы неинформативного воздействия

$$\vec{B} = \left\| \begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{array} \right\| \quad (2.2)$$

В целом на выходе ОДПВ имеем выходной сигнал  $X_{\text{вых}}(\tau)$

$$X_{\text{вых}}(\tau) = F_2(\vec{B}) \cdot [F_1(X_{\text{вх}}, \vec{B}), \Phi_0(\mathbf{0}, \tau)] \quad (2.3)$$

Функция (2.3) в общем виде выражает математическую модель ОДПВ. Для определения основных характеристик ОДПВ (статические, динамические и др.) необходимо определить функции операторов  $F_1$  и  $F_2$ .

В дальнейшем с целью определения операторов  $F_1$  и  $F_2$  основное внимание уделяется нахождению математических моделей ОДПВ для основных типов конструкций. При этом, учитывая, что исследуемые ОДПВ работают в основном в стационарных режимах, то, с целью упрощения анализа световых потоков в указанных ОДПВ, они также исследуются в стационарном режиме. А динамические характеристики ОДПВ будут исследованы при анализе основных характеристик ОДПВ.

Как было указано выше, математические модели ОДПВ недостаточно разработаны, так как многие конструкции ОДПВ появились в последние годы.

Существовал ряд научных работ [4, 13, 14, 28], посвященных светопропусканию полых и волоконных световодов, которые использовались для расчета конструирования некоторых конструкций ОДПВ.

Однако, ОДПВ являются измерительными преобразователями и их световоды являются измерительными каналами и определяют все их основные характеристики ОДПВ являются специфическими преобразователями и имеют

наиболее эффективную область применения в дискретных преобразованиях линейных и угловых перемещений и других величин и существенно отличаются от других типов оптоэлектронных преобразователей. Также разработаны ОДПВ предназначенные для преобразования таких величин как влажность, температура, давление, концентрация и другие и они отличаются как по принципам построения, так и по математическим моделям и основным характеристикам.

Для получения основных характеристик ОДПВ прежде всего необходимо выявить функции распределения и кодирования светового потока  $\Phi_0(x, \tau)$ , которая, зависит многих факторов и параметров. А для ОДПВ на основе волоконных световодов важную роль играет как распределение светового потока на измерительном участке  $\Phi(x)_{max}$  так и возможность оптического кодирования результатов преобразования.

Наиболее точное решение задачи прохождения светового потока и его распределение вдоль световодов можно получить, рассматривая прохождение света через световод с точки зрения электромагнитной теории света, используя математический аппарат уравнений Максвелла. Однако, окончательные результаты такого решения являются весьма сложными и затруднительными для практических расчетов ОДПВ. В связи с этим, учитывая, что геометрические размеры световодов ОДПВ (длина, поперечное сечение и др.) намного больше длины волны света, то для практических расчетов ОДПВ наиболее целесообразным является получение математических моделей ОДПВ на основе положений геометрической оптики, в основе которой лежат линейность распространения лучей света, законы поглощения, преломления, отражения и другие.

Методы расчета светопропускания полых и волоконных световодов на основе геометрической оптики были выполнены в ряде работ [1, 3, 7, 62, 64]. Однако, как было указано выше, в этих работах полые и волоконные световоды рассматривались как каналы для прохождения светового потока, а для ОДПВ необходимо, чтобы световод являясь основным элементом преобразователя,

выполнял функции измерительного преобразования и имел такую математическую модель, которая позволяла бы исследовать все основные метрологические характеристики ОДПВ и разработать новые конструкции.

В общем случае зависимость распределения светового потока  $\Phi(x, \tau)$  вдоль полого или волоконного световода от величины входящего светового, потока  $\Phi(0, \tau)$  может быть записана в виде:

$$\Phi(x, \tau) = f[\Phi(0, \tau)x, y, \rho_1, \rho_2, n_0, n_1, d, b, K_x, L \dots] \quad (2.4)$$

где:  $\rho_1$  - коэффициент отражения внутренней поверхности полого световода;

$\rho_2$  - коэффициент отражения поверхности внешнего модулирующего тела (ВМТ);

$n_0$  – показатель преломления сердцевины волоконного световода;

$n_2$  – показатель преломления оболочки (или стенки) волоконного световода;

$D$  — внутренний диаметр световода, м;

$D_1$  – наружный диаметр световода, м;

$b$  – толщина стенки световода;

$K_x$  - коэффициент поглощения среды, заполняющей световод;

$K_y$  - коэффициент поглощения внутренней поверхности (оболочки) световода;

$D_0$  – диаметр диафрагмы, м;

$u_0$  – угол вхождения луча;

$u$  – текущий угол луча;

$n$  - число отражений луча внутри световода;

$x$  - линейная координата;

$y$  – поперечная координата;

$L$  - длина световода;

$\tau$  – координата времени.

Как видно из формулы (2.4), функция  $\Phi(x, \tau)$  является весьма сложной, зависящей от многих параметров (например коэффициенты  $\rho_1$   $\rho_2$ ,  $n$  зависят от углов падения лучей и других факторов). Кроме того, при расчете функции

$\Phi(x, \tau)$  необходимо учитывать особенности конструкции ОДПВ (принцип построения, выполняемую функцию, тип световода и другие).

Рассмотренные в главе 1 существующие конструкции ОДПВ свидетельствуют о большом разнообразии форм полых и волоконных световодов в ОДПВ. Таким образом, световоды могут иметь разнообразные геометрические формы и размеры с различными сочетаниями коэффициентов  $\rho_1, \rho_2, n_0, n_1, n_2, k_x, k_y$ , которые, в свою очередь, могут быть распределенными вдоль и поперек оси световода (по координатам  $X, Y$ )

В целом расчет распределения светового потока  $\Phi(x, \tau)$  вдоль таких световодов представляет крайне сложную задачу. Поэтому целесообразно с практической точки зрения рассмотреть методику расчета распределения  $\Phi(x, \tau)$  для световодов с параметрами  $D(x)=const; \rho_1(x)=const; k_x(x)=const; k_y(x)=const$ , которые технологичны в изготовлении и получили наибольшее распространение при разработке различных измерительных устройств на основе ОДПВ. Результаты разработки практических конструкций ОДПВ показывают, что именно цилиндрические по форме световоды являются наиболее распространенными надежными, технологичными при изготовлении и экономически выгодными.

При анализе принципов построения ОДПВ было показано, что источники излучения ИИ в ОДПВ бывают распределенными (РИИ) и сосредоточенными (СИИ).

В ОДПВ с РИИ интерес представляют равномерно распределенные на входном торце световода источники излучения, создающие параллельный поток лучей. Такие ОДПВ широко используются при разработке преобразователей линейных и угловых перемещений, наклона объектов, уровня жидкостей, счета штучных изделий и другие.

С учетом вышеизложенного, а также особенностей большого числа практических конструкций ОДПВ для создания математических моделей ОДПВ с СИИ приняты следующие допущения, позволяющие разработать модели,

пригодные для практических расчетов различных конструкций ОДПВ, данного типа:

1. Основным источником излучения в ОДПВ является точечный (сосредоточенный) с равномерным распределением интенсивности излучения внутри телесного угла  $\Omega_0$  и расположен во входном сечении световода на его оси.

2. В ряде конструкций ОДПВ используется распределенный продольно или поперечно источник излучения. Основными типами световодов ОДПВ являются полые и волоконные световоды со следующими распределенными параметрами  $\rho_1(x)=const$ ;  $D(x)=const$ ;  $k_x(x)=const$ ;  $k_y(x)=const$ ,  $n_0(x)=const$ ;  $n_1(x)=const$ ;  $n_2(x)=const$ .

3. Зависимости коэффициентов отражения  $\rho_1$  и  $\rho_2$  от углов падения лучей учитываются заданием среднего значения по поверхности этих коэффициентов  $\bar{\rho}_1$ ,  $\bar{\rho}_2$ .

4. Ослабление светового потока в световодах, в основном в полых световодах определяется средой заполняющей полость световода, считается заданным путем задания коэффициентов поглощения  $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$ , а ослабление светового потока в сердцевине волоконного световода в ОДПВ может не учитываться из-за сравнительно малых длин измерительных участков волоконных световодов. Размеры источников излучения в ОДПВ на порядок меньше параметров световодов.

Зависимость  $\rho_1$  и  $\rho_2$  от углов падения лучей, а также от коэффициентов преломления  $n_0$  и  $n_1$  (по поперечной координате  $y$ ) учитываются путем выбора средних значений этих коэффициентов в интервале длин волн  $\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ .

В целом источник излучения (СИИ или РИИ) оказывает большое влияние на метрологические характеристики ОДПВ. Из существующих ИИ (лампочки накаливания, газоразрядные лампы, лазеры, светодиоды и другие) для ОДПВ наиболее пригодными являются светодиоды и лампочки накаливания с высокой яркостью и малой светоизлучающей поверхностью. Световой поток вводимый в световод, зависит от апертуры световода, угловой диаграммы и мощности излучения. В световод вводятся лучи, которые имеют угол вхождения меньше

критического угла, определяемого параметрами световода (диаметром, материалом, коэффициентами  $n_0, n_1$  и  $n_2$  и другие). В целом благодаря тому, что длина световодов ОДПВ не большая и входные и выходные торцы световодов находятся в одной среде (как правило в воздухе), то апертуры входящих и выходящих из торцов световодов световых потоков будут одинаковыми.

Как было указано выше процесс распространения светового потока в световодах ОДПВ, геометрические размеры которых (диаметр, длина и другие) существенно больше длины волны света, можно рассматривать в рамках положений геометрической оптики.

Следует также указать, что несмотря на аналогичность распределения и прохождения светового потока в полых и волоконных световодах имеются различия в принципах построения ОДПВ на их основе, а также в использовании различных оптических явлений, законов и эффектов при создании датчиков и преобразователей различных физических величин.

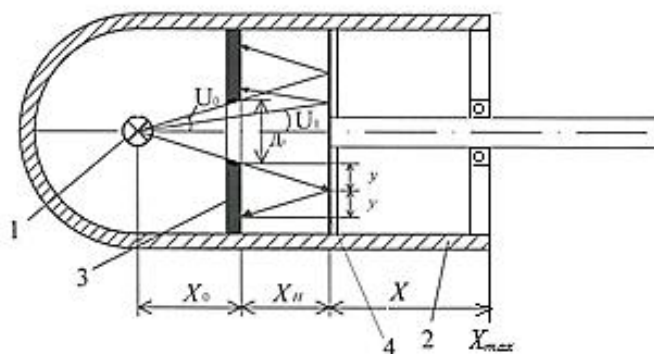
В ОДПВ на основе полых световодов [5, 8, 18], как показано выше при анализе принципов их построения, основой измерительного преобразования является распределение светового потока  $\Phi_0(x)$  в световоде под воздействием контролируемой величины или промежуточного модулирующего тела, связанного со входной величиной. В данных конструкциях ОДПВ могут быть использованы и волоконные световоды, но их основная роль заключается в подведении и отведении световых потоков от участков преобразования.

В связи с тем, что в области ОДПВ рефлексивного типа с полыми световодами наибольшее распространение получили конструкции, в которых на входном торце световода на оси последовательно установлены сосредоточенный источник излучения и кольцевой приемник излучения, выполняющий роль диафрагмы в дальнейшем будут рассмотрены в основном математические модели применительно к данным ОДПВ. А математические модели ОДПВ рефлексивного типа на основе волоконных световодов будут рассмотрены для конструкций выполненных коаксиально с подводящим волоконным световодом в середине и наружной части общего световода отводящим волоконным

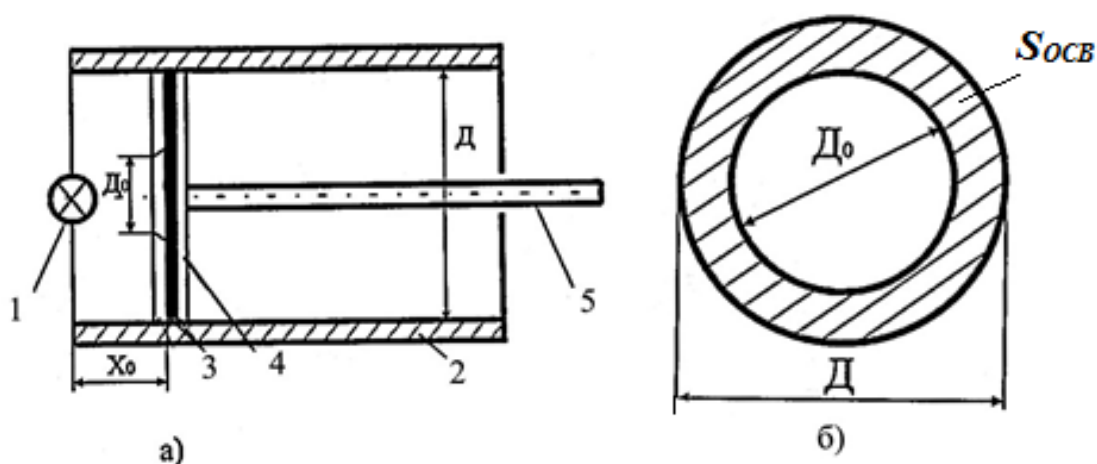
световодом, которые недостаточно исследованы и разработаны. Далее будут рассмотрены математические модели ОДПВ на основе прерывания светового потока при поперечно перемещающихся ВМТ и с распределенных на входных торцах полых и волоконных световодах источника излучения и ОДПВ с элементами оптического и геометрического кодирования на основе волоконных световодов.

## 2.2. Математическая модель ОДПВ с СИИ и продольным перемещением светоотражающего модулирующего тела внутри полого световода.

На рис.2.2 приведена физическая модель ОДПВ с СИИ и продольным перемещением светоотражающего внешнего модулирующего тела (ВМТ).



**Рис.2.2.** Физическая модель ОДПВ с продольным перемещением внешнего светоотражающего модулирующего тела 4.



**Рис.2.3.** Физическая модель ОДПВ при начальном положении светоотражающего модулирующего тела 4: а – исходное положение ВМТ; б – площадь освещения приемника излучения преобразователя.

Согласно физической модели на рис.2.2. распределения  $\Phi_0(x)$  вдоль полого световода имеет начальный участок  $[x_0, x_n]$  – основной участок  $[x_n, x_{max}]$ . Рассмотрим участок  $[x_0, x_n]$ , который наиболее чувствителен при весьма малых диапазонах продольных перемещений. Математическая модель для данного типа ОДПВ основана на нахождении зависимости площади освещенности приемника излучения  $S_{осв}$  от перемещения  $x$  ВМТ. Для данного типа ОДПВ освещение приемника излучения 3 происходит в результате попадания на её чувствительную поверхность отражённого светового потока от подвижного ВМТ 4. Светочувствительная поверхность приемника излучения аналогична поверхности диафрагмы  $D$  и имеет кольцеобразную форму с внутренним диаметром  $D_0$  и наружным диаметром  $D$  (совпадающий с диаметром полого световода).

Для данного ОДПВ зависимость  $D_{осв}=f(x)$  определяется следующим образом (рис.2.3):

$$D_{осв}=D_0+2y; \quad (2.5)$$

$$tg U_0 = D_0/2 \quad x_0 = y/x; \quad (2.6)$$

$$y = D_0 x / (2 x_0); \quad (2.7)$$

$$D_{осв} = D_0 + D_0 x / x_0; \quad (2.8)$$

$$S_{осв} = \pi (D_0 + 2y)^2 / 4 - \pi D_0^2 / 4. \quad (2.9)$$

На основании (2.9) получим:

$$S_{осв} = \pi D_0^2 x / (2 x_0) * (1 + x / (2 x_0)) \quad (2.10)$$

Для ОДПВ с  $D_0 = 5 * 10^{-3}$ ;  $D = 15 * 10^{-3}$ ;  $x_0 = 10 * 10^{-3}$  получается зависимость (рис.2.4).

Чувствительность преобразования  $S_{осв}=f(x)$  определяется из формулы:

$$K = \pi D_0^2 / (2 x_0) * (1 + x / x_0) \quad (2.11)$$

Максимальный диапазон определяется из выражения:

$$tg U_0 = (D - D_0) / (2 x) = D_0 / 2 x_0 \quad (2.12)$$

$$x_m = x_0 (D / D_0 - 1) \quad (2.13)$$



Диапазон преобразований тем больше, чем больше  $x_0$ ,  $D$  и чем меньше  $D_0$ .

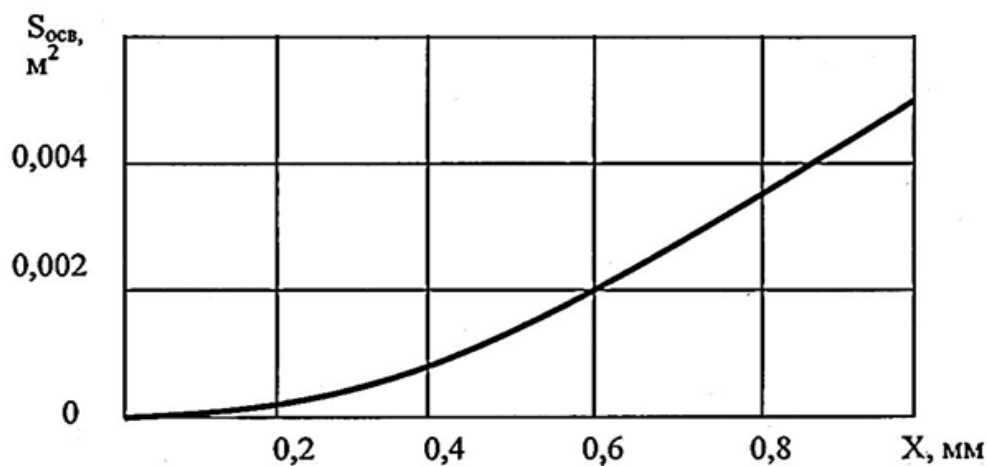


Рис.2.4. Зависимость  $S_{осв}=f(x)$

Так световой поток  $\Phi_0(x)$  определяется по формуле

$$\Phi_0(x) = I_0 S_{осв}(x) \rho_1 / (x_0 + 2x)^2 \cdot e^{-K_x(x_0+2x)} \quad (2.14)$$

то кривая  $\Phi_0(x)$  (рис.2.5) имеет вид распределения аналогичный графику  $S_{осв}(x)$  на участке  $x=0 - 1,0$  мм.

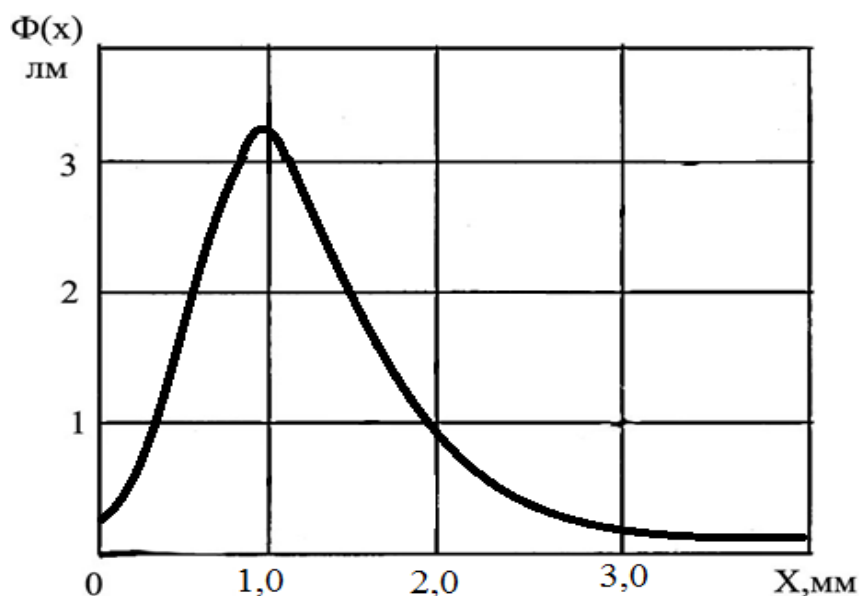


Рис.2.5. Зависимость  $\Phi_0(x)=f(x)$  для  $I_0=60\text{кд}$ ;  $\rho_1=0,9$ ;  $K_A=0,001\text{м}^{-1}$ ;  $D=15*10^{-3}\text{м}$ ;  $D_0=5*10^{-3}\text{м}$ ;  $x_0=10*10^{-3}$ .

Далее рассмотрим вывод математической модели данного типа ОДПВ с СИИ для основного участка  $[x_n, x_{max}]$ . Согласно физической модели на рис.2.2

прямой световой поток без отражений о внутреннюю стенку световода, падающий на приемник излучения и входящий в полый световод в пределах угла  $0 < U < U_1$  определяется из выражения

$$\Phi_{np1}(x) = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_0^2)}{4(2x)^2} \rho_2 e^{-K_x 2x}, \quad (2.15)$$

где:  $I_0$  - сила света источника;

$D, D_0$  - диаметры соответственно полого световода и отверстия диафрагмы;

$\rho_2$  - коэффициент отражения поверхности внешнего модулирующего тела (диска);

$K_x$  - коэффициент поглощения средой, заполняющей полый световод;

$x$  - координата перемещения внешнего модулирующего тела.

Лучи, вышедшие из источника излучения под углом  $U_1 \leq U \leq U_2$  будут отражаться как от поверхности диска (ВМТ) с коэффициентом отражения  $\rho_2$ , так и от внутренней поверхности полого световода с коэффициентом отражения  $\rho_1$ .

Световой поток, отраженный от внутренней поверхности полого световода, определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Phi_{отр2} = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} \rho_2 \left[ \frac{1}{x_0^2} - \frac{1}{4x^2} \right] \cdot e^{-K_x 2x} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \\ \cdot \int_{U_1}^{U_2} \rho_1^{\frac{2x}{D} \tan U} dU \end{aligned} \quad (2.16)$$

Таким образом, на приемник излучения падает суммарный световой поток, равный

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{np1} + \Phi_{отр2} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\Sigma} = I_0 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{16x^2} \left[ \rho_2 e^{-K_x 2x} + \left( \frac{4x^2}{x_0^2} - 1 \right) \cdot e^{-K_x 2x} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \right. \\ \left. \cdot \int_{U_1}^{U_2} \rho_1^{\frac{2x}{D} \tan U} dU \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Анализ формулы (2.18) показывает, что в данном ОДПВ важными являются параметры  $\rho_1, \rho_2; D_1, X_0$ , которые определяют чувствительность и другие характеристики преобразователя.

В результате анализа ОДПВ было выявлено, что величины  $X_0$  и  $D_0$  не вносят существенных изменений в характеристики преобразователя.

### **2.3. Математическая модель ОДПВ на основе полого световода с СИИ и поперечным перемещением внешнего модулирующего тела.**

Рассмотрим физическую модель ОДПВ на основе полого световода с поперечным перемещением внешнего модулирующего тела, представленную на рис.2.6, у которой внешним модулирующим телом является лента со светлыми и темными прямоугольными полосами 3. Допустим, что светлые прямоугольные полосы имеют коэффициент отражения  $\rho_2$ , а темные полосы –  $\rho_3$ , при этом можно принять  $\rho_3=0$  (как абсолютно не отражающая плоская поверхность) [10, 41].

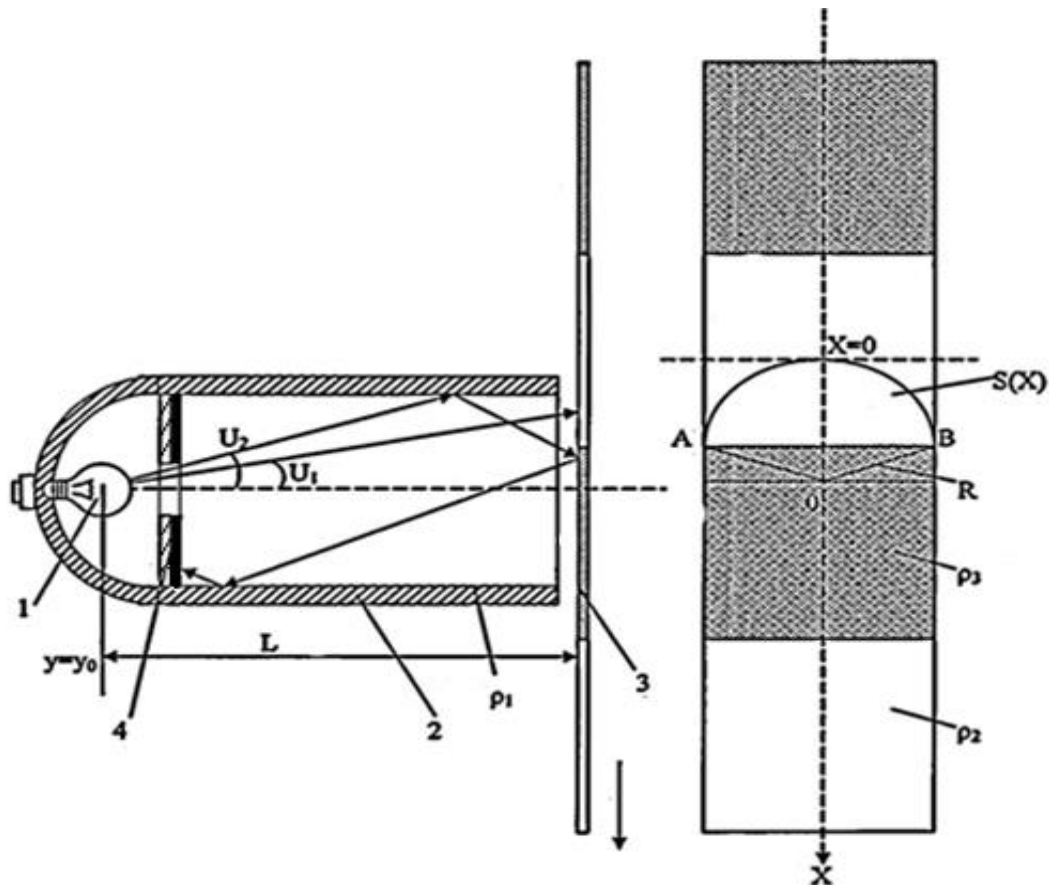
Согласно физической модели, представленной на рис.2.6, прямой световой поток  $\Phi_{пр1}$  от точечного источника излучения 1 распространяется вдоль оси полого световода 2 и в процессе отражения от светлой полосы ленты 3 с коэффициентом отражения от его поверхности  $\rho_2$  в пределах угла вхождения лучей  $U$  в пределах  $0 < U < U_1$ , где  $U_{мин}=0$  а  $U_{макс}=U_1$

$$\Phi_{пр1} = I \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{16L^2} \rho_2 \quad (2.19)$$

где  $I$  - сила света;  $D$  - диаметр отверстия диафрагмы;  $D_1$  - диаметр внутренний ПС;  $L$  - длина полого световода.

Согласно физической модели на рис.2.6 световой поток (лучи светового потока)  $\Phi_{пр2}$  под углом и в пределах  $U_1 < U < U_2$  будет испытывать еще и дополнительное отражение от внутренней поверхности стенки полого световода 2 с коэффициентом отражения  $\rho_1$ . В этом случае полный световой поток от всех лучей будет определяться выражением

$$\Phi_{np2} = I \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} \rho_2 \left[ \frac{1}{y_0^2} - \frac{1}{4L^2} \right] \cdot e^{-K_y 2L} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \cdot \int_{U_1}^U \rho_1 \frac{2L}{D} \operatorname{tg} U dU \quad (2.20)$$



**Рис.2.6.** Физическая модель схема конструкции ОДПВ на основе полого световода с поперечно перемещающейся подвижной лентой, имеющей светлые и темные светоотражающие полосы.

Таким образом, на приемник излучения 4 будет падать суммарный от  $\Phi_{np1}$  и  $\Phi_{np2}$  световой поток

$$\Phi_{\Sigma} = I \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{16L^2} \rho_2 \left[ e^{-K_{xy} 2L} + \left( \frac{4L^2}{y_0^2} - 1 \right) \cdot e^{-K_y 2L} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \cdot \int_{U_1}^U \rho_1 \frac{2L}{D} \operatorname{tg} U dU \right] \quad (2.21)$$

При перемещении светоотражающей полосы ленты 3 относительно торца полого световода 2 происходит изменение светоотражающей поверхности  $S(x)$  полосы ленты в виде светоотражающего сегмента. Площадь сегмента изменяется согласно следующей формуле

$$S(x) = S_{\text{сектора}} - S_{\Delta}, \quad (2.22)$$

где  $S_{\text{сектора}} = \frac{\pi R^2 \cdot n}{360}$ ;  $n$  – угол, ограничивающий площадь сектора;  $S_{\Delta}$  – площадь равнобедренного треугольника ДАВ.

Формула (2.22) является несколько сложной для расчетов изменения  $S(x)$  и поэтому с достаточной точностью можно воспользоваться более простой и удобной формулой, приведенной в [22, 41-42]

$$S(x) = \frac{2}{3} AB \cdot X, \quad (2.23)$$

где  $AB$  – основание сегмента

$$AB = 2\sqrt{R^2 - (R - x)^2} \quad (2.24)$$

и

$$S(x) = \frac{4}{3} \sqrt{R^2 - (R - x)^2} \cdot x \quad (2.25)$$

Полученная формула (2.25) отражает зависимость изменения светоотражающей поверхности  $S(x)$  при изменении координаты перемещения ленты  $X$ . Конструкция ОДПВ (перемещения, скорости, направления движения, вибрации и т.д.) содержит кольцеобразный приемник излучения и поэтому необходимо найти величину светового потока  $\Phi_{\Sigma}(X)$ , который после отражений от изменяющейся поверхности  $S(x)$  падает на поверхность приемника излучения  $S_{\text{пи}}$ .

Считая, что изменение интегральной светочувствительной поверхности приемника излучения  $S_{\text{пи}}(x)$  происходит пропорционально изменению светоотражающей поверхности поперечно перемещающейся ленты с полосами с изменяющейся поверхностью  $S(x)$  можем записать

$$S_{\text{пи}}(x) = K \cdot S(x) \quad (2.26)$$

Формула для полного светового потока, падающего на приемник излучения 4, примет следующий вид

$$\Phi_{\Sigma} = I \frac{K \cdot S(x)}{4L^2} \left[ \rho_2 e^{-K_{xy}2L} + \left( \frac{4L^2}{y_0^2} - 1 \right) \cdot e^{-K_y 2L} \int_{U_1}^{U_2} \frac{1}{\cos U} dU \cdot \int_{U_1}^U \rho_1 \frac{2L}{D} \operatorname{tg} U dU \right] \quad (2.27)$$

С учетом того, что

$$K \cdot S(x) \approx \left( 1 - \frac{D_1^2}{D^2} \right) \frac{4}{3} \sqrt{R^2 - (R - x)^2} \cdot x \quad (2.28)$$

то

$$K \approx \frac{S_{\text{пи}}(x)}{S(x)} = \left( 1 - \frac{D_1^2}{D^2} \right) \quad (2.29)$$

Углы вхождения лучей  $U_1$  и  $U_2$  определяются из выражений

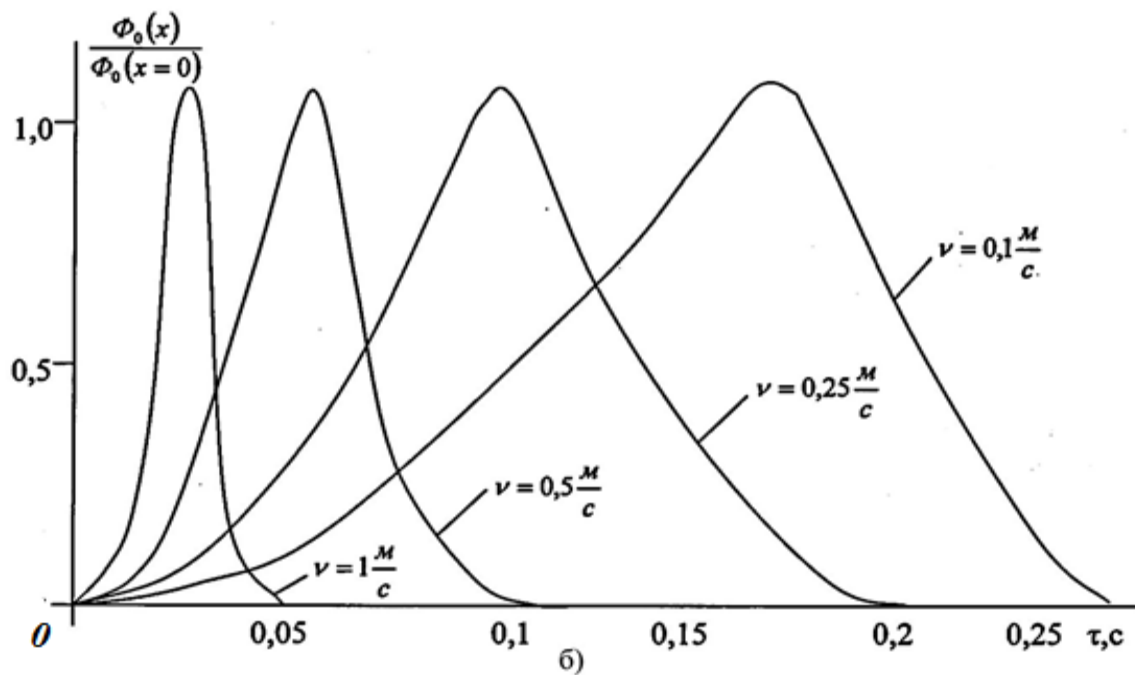
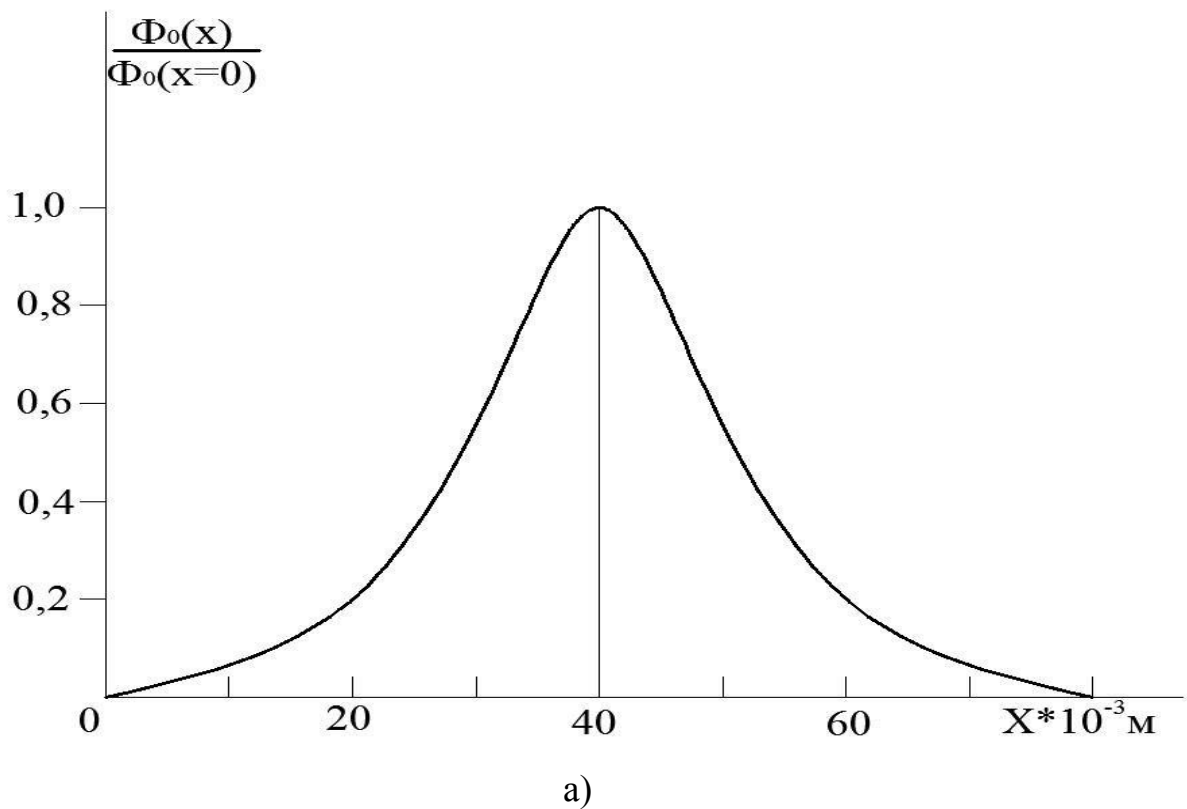
$$U_1 = \arctg \frac{R}{2L} \quad (2.30)$$

$$U_2 = \arctg \frac{D_1}{2y_0} \quad (2.31)$$

На рис.2.7 (а) приведен график изменения относительного значения  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$ , полученного при расчете на ЭВМ, при следующих исходных данных:

$$\begin{aligned} D_1 &= 0,012 \text{ м}; & D &= 0,032 \text{ м}; \\ K_y &= 0,001 \text{ 1/м}; & y_0 &= 0,010 \text{ м}; \\ L &= 0,032 \text{ м}; & \rho_1 &= 0,9; \\ \rho_2 &= 0,8; & X &= 0,001 \div 0,068 \text{ м}. \end{aligned}$$

График изменения относительного значения отраженного светового потока  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$  показывает, что световой поток, а, следовательно, и выходной сигнал оптоэлектронного преобразователя при поперечном перемещении светлых и темных полос ленты изменяется в виде импульса, который имеет колоколообразную форму.



**Рис.2.7.** Графики изменения относительного значения  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$ , при поперечных перемещениях ленты со светлыми и темными полками: *а* – при постоянной скорости перемещения; *б* – при различных скоростях перемещения.

Анализ показывает, что если в математическую модель ОДПВ вместо координаты перемещения  $X$  ввести  $X=v \cdot \tau$  (где  $v$  – скорость перемещения светлых

и темных полос ленты, а  $\tau$  - время перемещения), то появляется возможность измерения скорости перемещения ленты, а, следовательно, и контролируемого тела (объекта) (рис.2.7, б). Кроме того, при подсчете количества импульсов, появляющихся на выходе при прохождении светлых и темных полос, можно определить перемещение объекта и при определенной измерительной схеме можно определить также направление перемещения [41, 56].

С целью проверки адекватности математических моделей были проведены исследования на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.2.8.

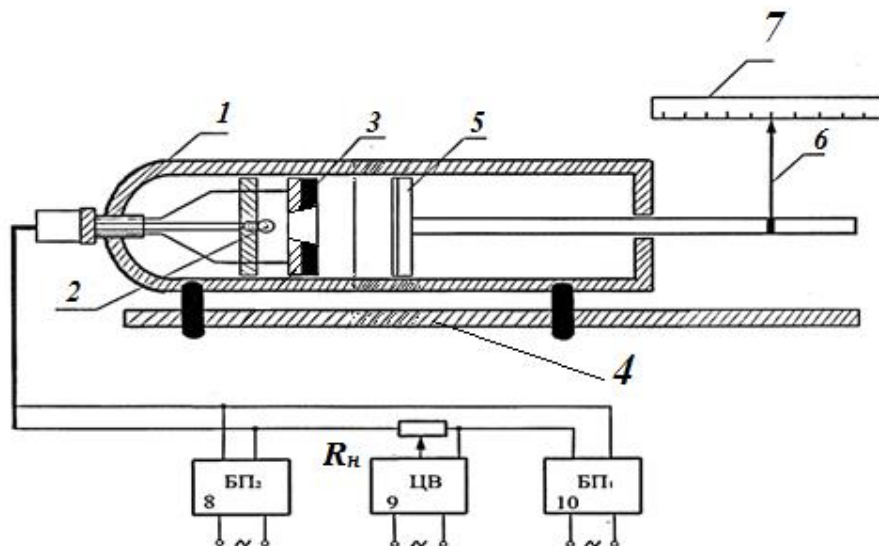
При экспериментальных исследованиях ОДПВ с продольным перемещением в качестве подвижного тела был использован круглый диск 5, коэффициент отражения поверхности которой 4 могла изменяться путем укрепления на ней различных пленок с коэффициентами отражения от  $\rho_1=0,1$  (черная пленка) до  $\rho_1=0,9$  (алюминиевая или зеркальная поверхность). В экспериментах изменяли также материал полого световода 1, путем установок трубок из алюминия, стекла (кварцевого, органического, технического), черной бумаги и других. Световой поток от источника излучения (лампа накаливания типа А, напряжением 4В), через круговую диафрагму кольцеобразного приемника излучения 3 (фоторезистор типа ФСК-6) направляется вдоль полого световода 1, диаметром  $D=0,032$  м., длиной  $L=0,16$  м. на подвижной светоотражающий диск 4 и после отражения световой поток возвращаясь обратно падал на светочувствительную поверхность кольцеобразного ПИ 3. В качестве нагрузки фоторезистора ФСК-6 использовался переменный резистор  $R_n$  (СП5-14, СП3-39, сопротивлением  $R_n=47$  кОм, 100 кОм).

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  на нагрузочном сопротивлении  $R_n$  измерялось цифровым вольтметром типа В7-39. Так как при малых значениях освещенности фототок, протекающий через сопротивление нагрузки  $R_n$ , линейно зависит от светового потока  $\Phi_0(x)$ , то относительные значения распределения светового потока  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$  в результате обработки экспериментов определялись, как

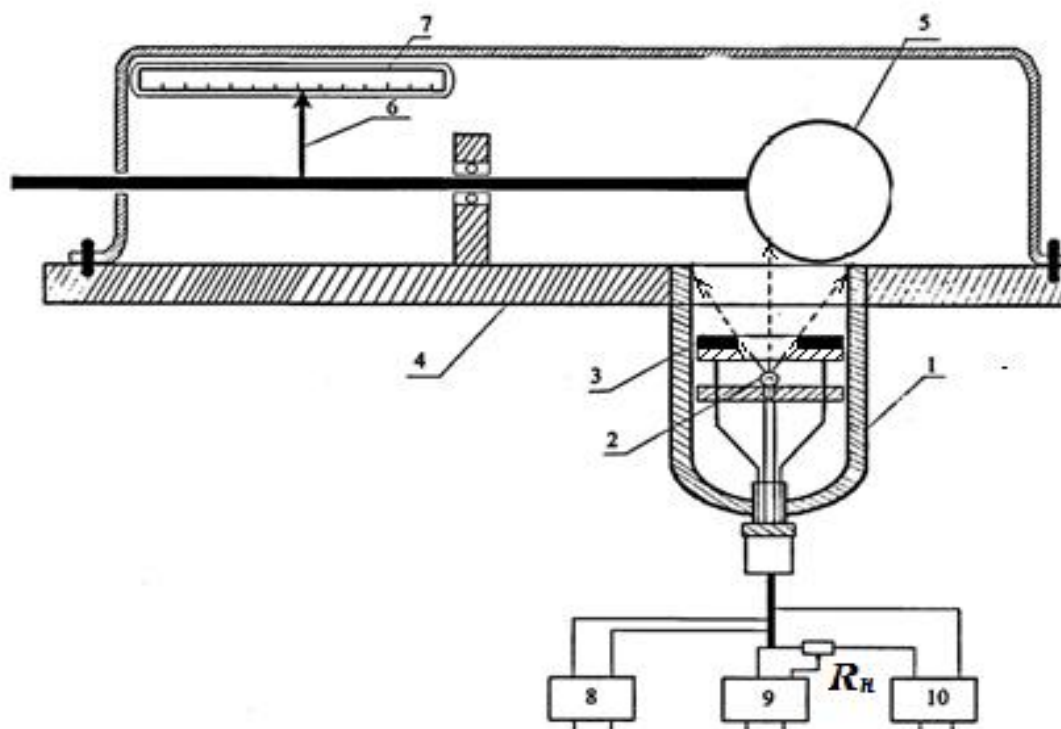


$$\Phi_0(x)/\Phi_0(0) = U_{\text{вых}}(x)/U_{\text{вых}}(x=0), \quad (2.32)$$

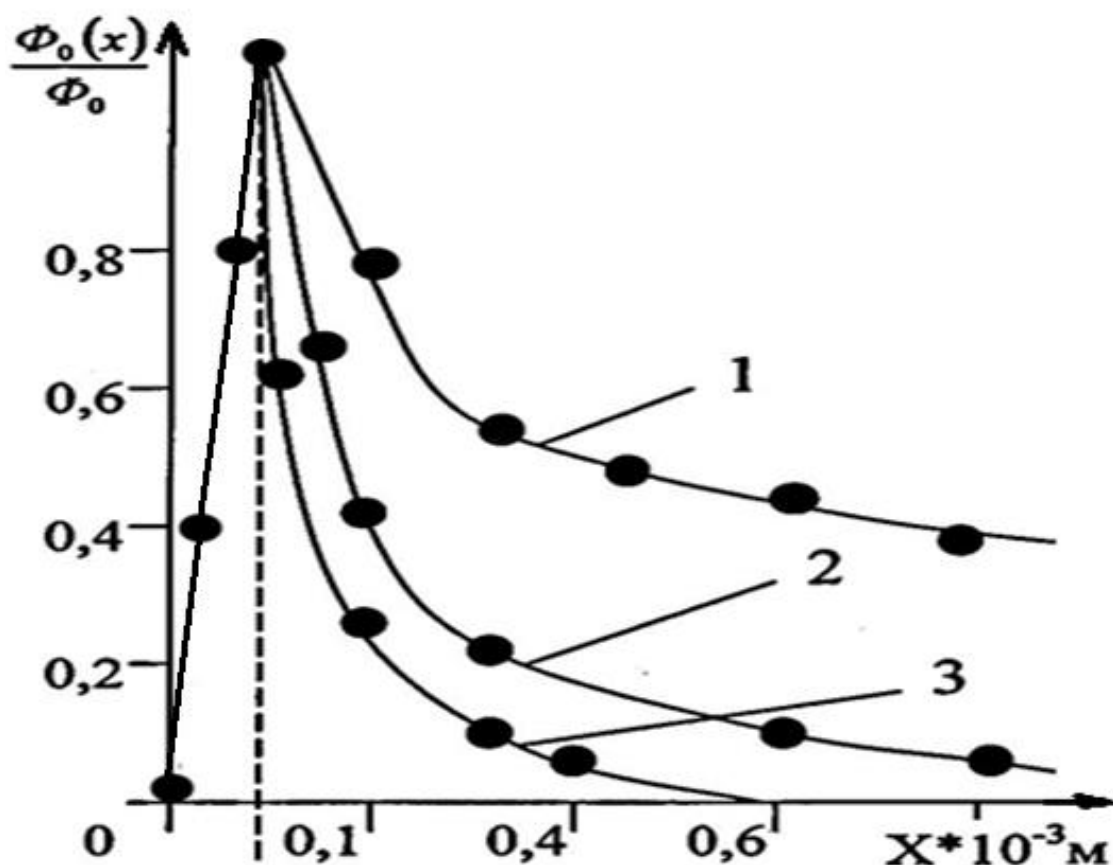
где  $U_{\text{вых}}(x)$  - падение напряжения на резисторе  $R_H$  при перемещении светотражающей поверхности на расстоянии  $X=X_0$  от источника излучения 2.



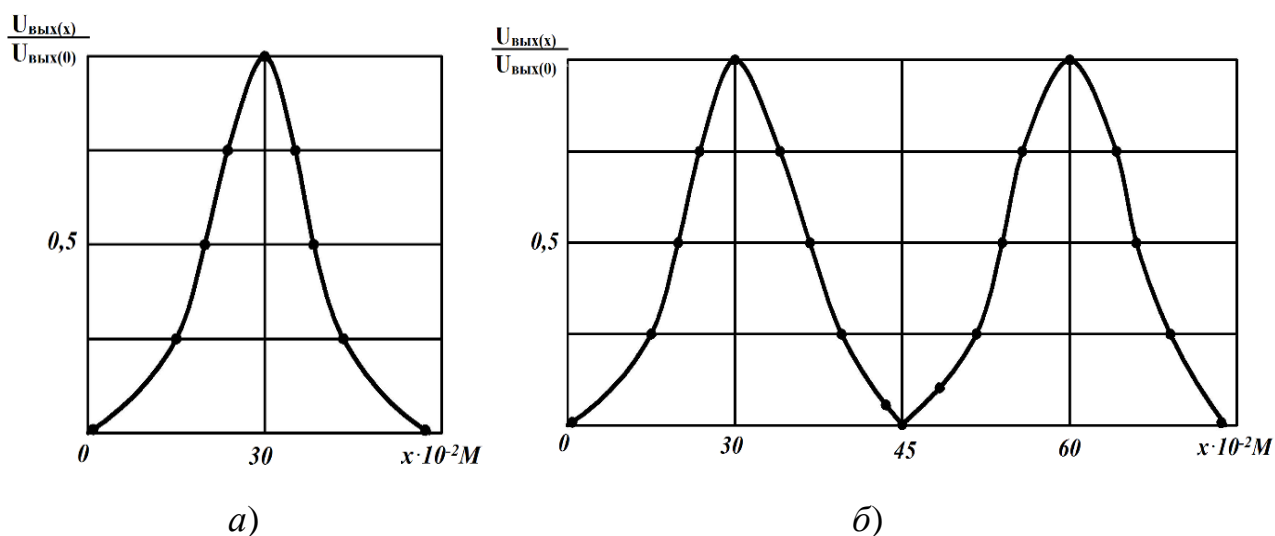
**Рис.2.8.** Экспериментальная установка для исследования ОДПВ при продольном перемещении ВМТ.



**Рис.2.9.** Экспериментальная установка для исследования ОДПВ при поперечном перемещении ВМТ.



**Рис.2.10.** График изменения относительного значения  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$ , при различных материалах внутренней поверхности полого световода: 1—алюминий; 2—стекло; 3—черная бумага.



**Рис.2.11.** Экспериментально полученные графики распределения  $U_{\text{вых}}(x)/U_{\text{вых}}(0)$  (выходного сигнала ОДПВ) при поперечных перемещениях шарика (а) и ленты (б) со светоотражающими и светопоглощающими метками.

На рис.2.11, *а* и *б* приведены результаты экспериментальных исследований распределения светового потока  $\Phi_0(x)/\Phi_0(0)$  при полых световодах, изготовленных из различных материалов (алюминий, стекло, черная бумага), экспериментальных исследований с результатами на ЭВМ показывают хорошее согласование.

Экспериментальные исследования ОДПВ с поперечным перемещением модулирующего тела проводились на экспериментальной установке, схемы которой приведена на рис.2.11. Эксперименты с ОДПВ с поперечным перемещением ленты со светлыми и темными полосами были проведены при следующих данных:  $D=0,032м$ ;  $D_I=0,012м$ ;  $X_0=0,01м$ ; ширина полос  $AB=0,032м$ ;  $BC=0,032м$ .

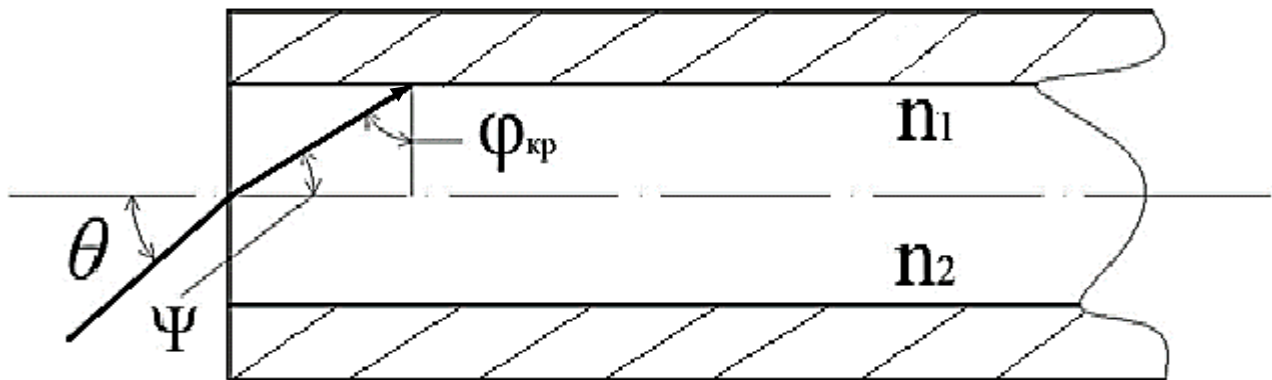
#### 2.4. Математические модели ОДПВ перемещений с СИИ и с волоконными световодами.

В ОДПВ на основе волоконных световодов большое значение имеет выбор источника излучения и как указывалось выше для данных ОДПВ наиболее пригодными в качестве ИИ являются светодиоды с высокой яркостью и малой светоизлучающей поверхностью, которые по диаграмме направленности излучения следует отнести к СИИ, при этом следует учесть, что данные светодиоды могут применяться без линзовой системы. Указанные светодиоды с диаграммой направленности излучения описываемые формулой  $Cos\theta$  относятся к ламбертовским источникам излучения. Также, важнейшей задачей в ОДПВ является эффективность ввода светового потока в волоконный световод, величина которого зависит от его числовой апертуры

$$A = n_0 \sin \theta_{кр} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}, \quad (2.33)$$

где:  $n_0$  – показатель преломления среды (воздух);  $n_1$  – показатель преломления оболочки ВС;  $n_2$  – показатель преломления сердцевины ВС.

Рассмотрим физическую модель, например, подводющего световой поток волоконного световода со ступенчатым профилем изменения показателей преломления  $n_1$  и  $n_2$  (рис.2.12).



**Рис.2.12.** Физическая модель подводящего волоконного световода ОДПВ.

Для того, чтобы происходило полное внутреннее отражение (ПВО), угол отражения  $\varphi$  внутри ВС должен быть больше критического угла  $\varphi_{кр}$

$$\varphi > \varphi_{кр} \quad (2.34)$$

$$\sin \varphi_{кр} = n_1/n_2 \quad (2.35)$$

Угол  $\varphi_{кр}$  может быть связан с углом падения  $\theta$  [4]

$$\sin \theta = n_2 \sin \varphi = n_2 \sin(90 - \varphi_{кр}) = (n_2^2 - n_1^2)^{1/2} \quad (2.36)$$

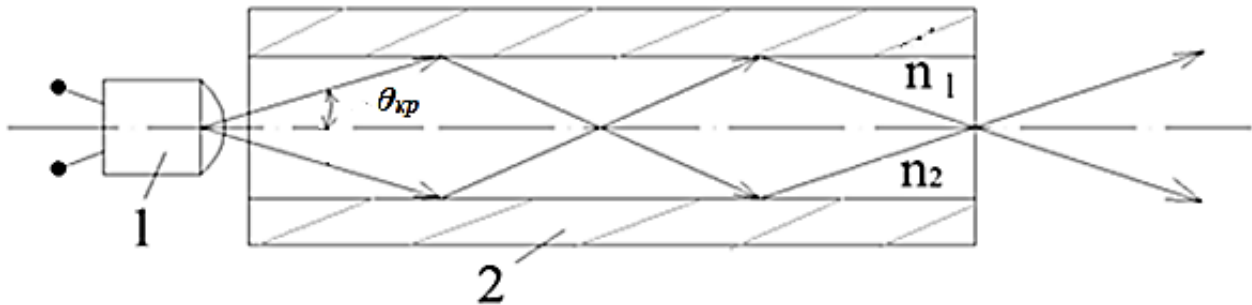
Величина  $n_0 \sin \theta$  как указано выше является числовой апертурой  $A$  волоконного световода. При окружающей воздушной среде

$$A = \sin \theta = 0 \text{ при } n_0=1 \quad (2.37)$$

Для рассматриваемых ОДПВ представляет интерес ввод светового потока  $\Phi_0(x)$  от сосредоточенного источника излучения (СИД), при этом предполагаем, что волоконный световод выполнен виде жгута и его торец соизмерим с выходным торцом СИД, что показаны на физической модели на рис.2.13.

Так как волоконный световод ОДПВ захватывает только те лучи, которые заключены внутри корпуса с максимальным углом, определяемым полным внутренним отражением на границе между сердцевиной и оболочкой (рис.2.13),

то потери на ввод  $\delta$  будут иметь место, если конус источника излучения превышает конус, определяемый числовой апертурой ВС.



**Рис.2.13.** Физическая модель сопряжения СИИ с волоконным световодом (жгутом) ОДПВ: 1 – ИИ; 2 – волоконный световод.

Таким образом, вдоль оси  $x$  волоконного световода распространяются только те лучи, которые содержатся внутри угла  $\theta_{кр}$ . Световые лучи показанные на рис.2.13 являются меридиональными, так как они в некоторых точках своей траектории проходят через оптическую ось ВС.

Однако, наряду с меридиональными лучами существуют также косые лучи, которые не пересекают ось световода.

В целом величина светового потока  $\Phi_0(x)$  вводимого в волоконный световод зависит от апертуры световода  $A$ , угловой диаграммы светоизлучения и мощности ИИ.

Благодаря тому, что входные и выходные торцы волоконного световода находятся в одной среде (воздухе), то апертура входящего и выходящего световых потоков будут одинаковы как показано на рис.2.13.

Рассмотрим относительно простые конструкции ОДПВ на основе двух подводящего и отводящего волоконных световодов. Физическая модель ОДПВ с СИИ при продольном перемещении подвижного отводящего волоконного световода представлена на рис.2.14.

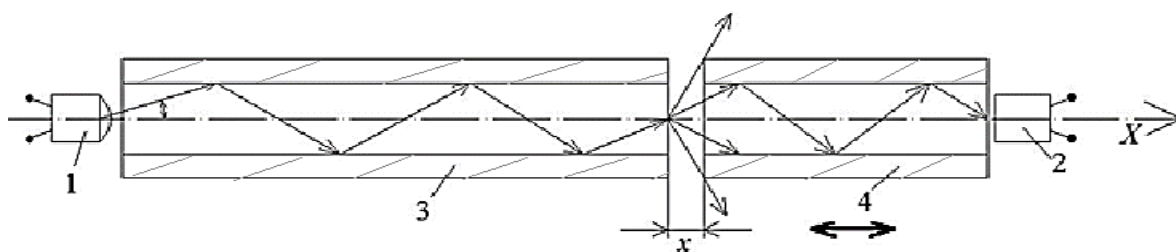
Согласно физической модели на рис.2.14 в начальный момент торцы подводящего волоконного световода 3 и отводящего волоконного световода 4 прижаты к друг другу по оси  $x$ . При продольном перемещении СВ 4 по оси  $x$

изменяется световой поток  $\Phi_{осв}(x)$  падающий на входной торец СВ 4, согласно физической модели (рис.2.14) имеем:

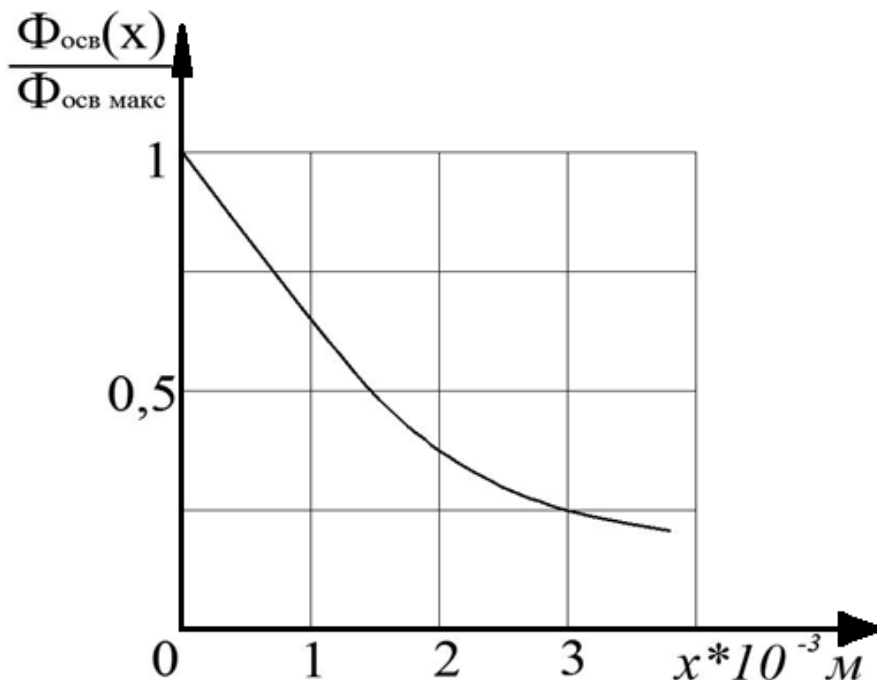
$$\text{при } x = 0 \quad \Phi_{осв}(x) = 0 \quad (2.38)$$

$$\text{при } x \neq 0 \quad \Phi_{осв}(x) = I_0 \frac{\pi D^2}{4x^2}, \quad (2.39)$$

где  $I_0$  – сила света источника излучения;  $D$  – диаметр торца волоконного световода 4.

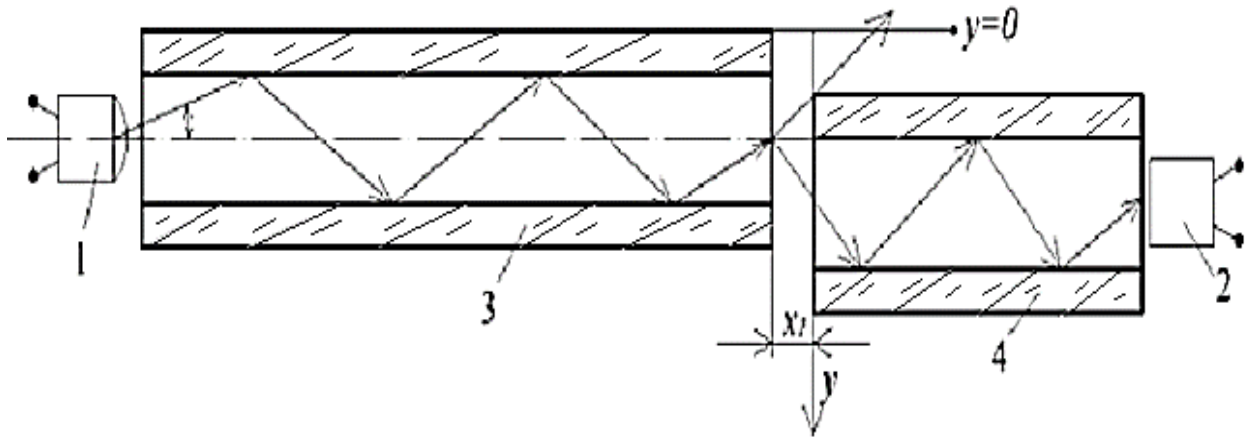


**Рис.2.14.** Физическая модель ОДПВ с продольным перемещением подвижного отводящего волоконного световода: 1, 2 – источник и приемник излучения; 3, 4 – подводный и отводящий волоконные световоды;  $x$  – координата продольного перемещения.



**Рис.2.15.** График изменения относительного значения светового потока  $\Phi_{осв}(x)/\Phi_{осв \text{ макс}}$  в зависимости от продольного перемещения отводящего волоконного световода 4 диаметром  $d_{вс}=0,4 \text{ мм}$  в диапазоне  $0 \div 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис.2.16 приведена физическая модель вышеуказанного ОДПВ при поперечном перемещении отводящего волоконного световода 4 относительно неподвижного подводящего волоконного световода 3.

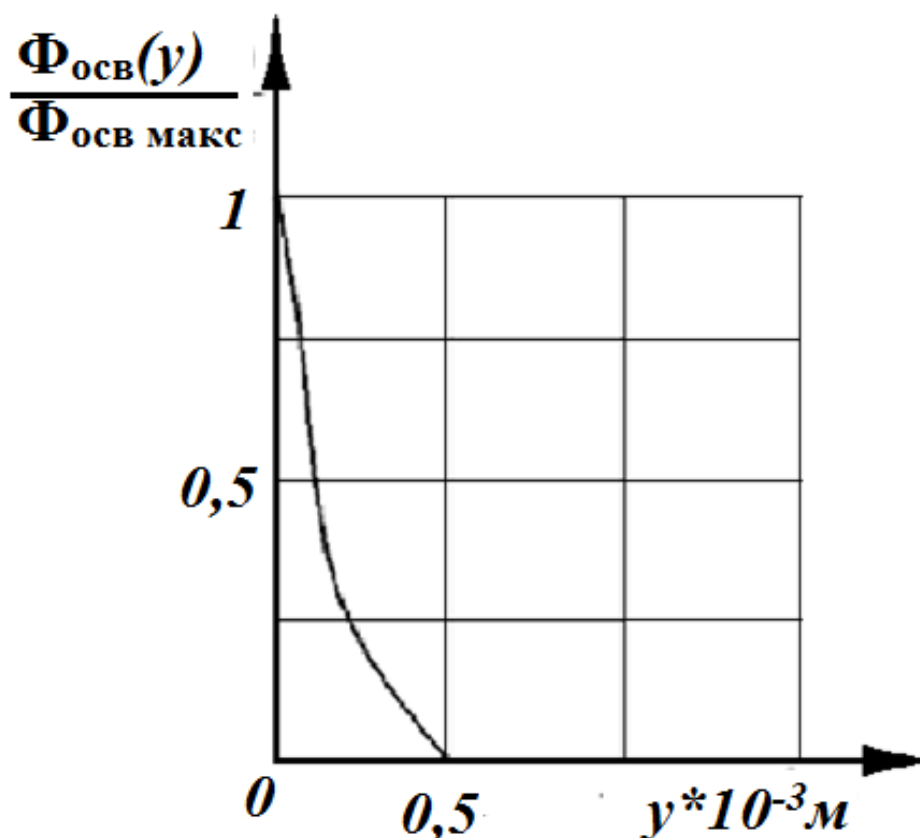


**Рис.2.16.** Физическая модель ОДПВ с поперечным перемещением подвижного отводящего волоконного световода: 1, 2 – источник и приемник излучения; 3, 4 – подводящий и отводящий волоконные световоды;  $y$  – координата поперечного перемещения отводящего волоконного световода 4;  $x_1$  – расстояние между торцами волоконных световодов 3 и 4.

Согласно физической модели на рис.2.16 торцы подводящего 3 и отводящего 4 волоконных световодов в общем случае находятся на некотором расстоянии  $x_1$  друг от друга. При поперечном перемещении СВ 4 по оси  $y$  изменяется световой поток  $\Phi_{осв}(y)$  падающий на входной торец СВ 4. В исходном положении при  $y=0$  световой поток  $\Phi_{осв}(y=0)$  равен

$$\Phi_{осв}(y = 0) = I_0 \frac{\pi D^2}{4x^2} = I_0 S_{осв}(x_0) \frac{1}{x_1^2}, \quad (2.40)$$

где:  $S_{осв}(y = 0) = \frac{\pi D^2}{4}$  функция  $S_{осв}(y)$  в зависимости от расстояния  $x_1$  и площади торца СВ 4 при перемещении  $y$  изменяется от максимального значения  $S_{осв}(y = 0)$  до минимального значения  $S_{осв}(y = D_{св})$ . Экспериментально для волоконных световодов 3 и 4 диаметром  $D_{св} = 0,4$  мм при  $x_1 = 0,5$  мм получен график зависимости  $\Phi_{осв}(y)/\Phi_{осв\ max}$  в зависимости от поперечного перемещения волоконного световода 4 в диапазоне  $0 \div 1 \cdot 10^{-3}$  м (рис.2.17).



**Рис.2.17.** График изменения  $\Phi_{осв}(y)/\Phi_{осв макс}=f(y)$ . График  $\Phi_{осв}(y)/\Phi_{осв макс}$  на рис.2.17 имеет импульсный характер.

## 2.5. Математическая модель ОДПВ с продольным перемещением светоотражающего модулирующего тела.

На рис.2.18 представлена физическая модель ОДПВ при продольном перемещении светоотражающего внешнего модулирующего тела (ВМТ).

В рассматриваемой физической модели ОДПВ торцы подводящего 3 и отводящего 4 световой поток от ВМТ расположены коаксиально на расстоянии  $x$  от ВМТ, что создает эффективное отражение от поверхности ВМТ, при этом выходной торец подводящего ВС 3 отодвинут на расстояние  $x_0$  от плоскости расположения торца ВС 4, что также устраняет фоновую засветку входного торца СВ 4 и создает необходимую индикатрису излучения от торца подводящего ВС 3.

В исходном положении ВМТ прижат к торцам отводящего ВС 4 при  $x=0$ . В этом случае световой поток  $\Phi_0(x)$  от ВМТ не отражается и не достигает входного торца отводящего ВС 4.



При продольном перемещении ВМТ световой поток  $\Phi_0(x)$  от подводящего ВС 3 отразившись от ВМТ начинает освещать входной торец СВ 4.

Согласно физической модели на рис.2.18 поверхность освещения выходного торца ОВС 3 будет увеличиваться, следовательно будет увеличиваться и световой поток  $\Phi_0(x)$  падающий на приемник излучения 2 при увеличении продольного перемещения по координате  $x$ .

Диаметр освещенной поверхности торца ОВС 3 будет:

$$D_{\text{овс}} = D_{\text{п}} + 4y_{\text{п}}, \quad (2.41)$$

где:  $D_{\text{п}}$  – диаметр торца ПВС 3;  $y_{\text{п}}$  – параметр, связанный с  $D_{\text{овс}}$ .

$$\text{tg}U_0 = \frac{D_{\text{п}}}{2x_0} = \frac{y_{\text{п}}}{x} \quad (2.42)$$

где:  $U_0$  – угол между осью и углом вхождения луча;  $x_0$  – расстояние между торцами ПВС и ОВС.

Из (2.42) следует:

$$y_{\text{п}} = \frac{D_{\text{п}}x}{2x_0} \quad (2.43)$$

$$D_{\text{овс}} = D_{\text{п}} + 2x \frac{D_{\text{п}}}{x_0} \quad (2.44)$$

Освещаемая поверхность входного торца ОВС 4 равна

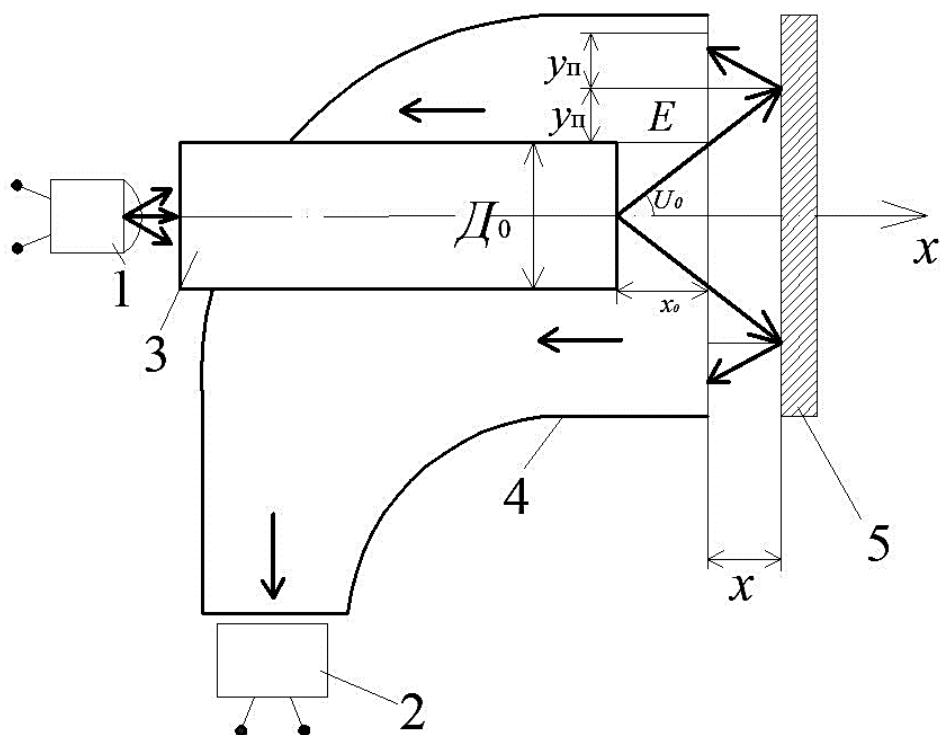
$$S_{\text{овс}}(x) = \pi D_{\text{п}}^2 \frac{x}{x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0}\right) \quad (2.45)$$

Световой поток падающий на торец ОВС 4 и следовательно на ПИ 2 равен

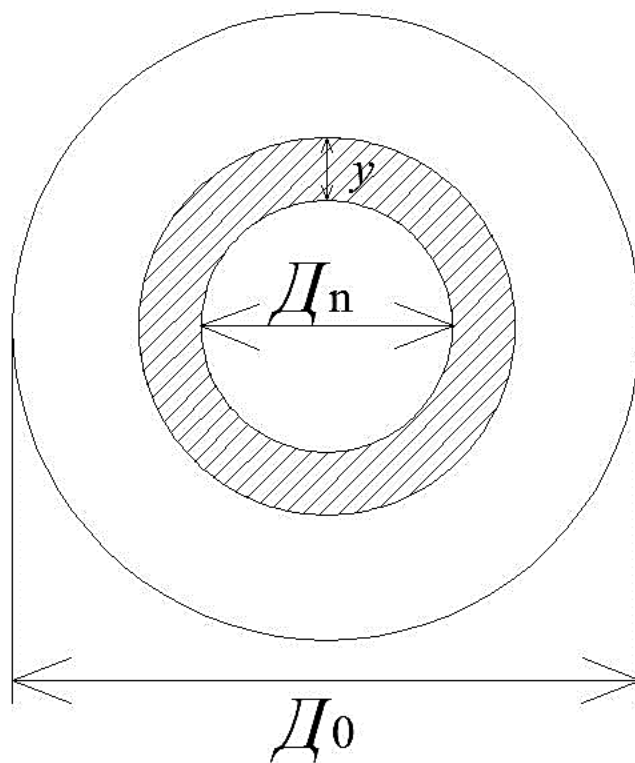
$$\Phi_{\text{овс}}(x) = I_0 \frac{S_{\text{овс}}(x)\rho_1}{(x_0 + 2x)^2} \quad (2.46)$$

где:  $I_0$  - сила света от ИИ 1;  $\rho_1$  – коэффициент отражения поверхности ВМТ 6.

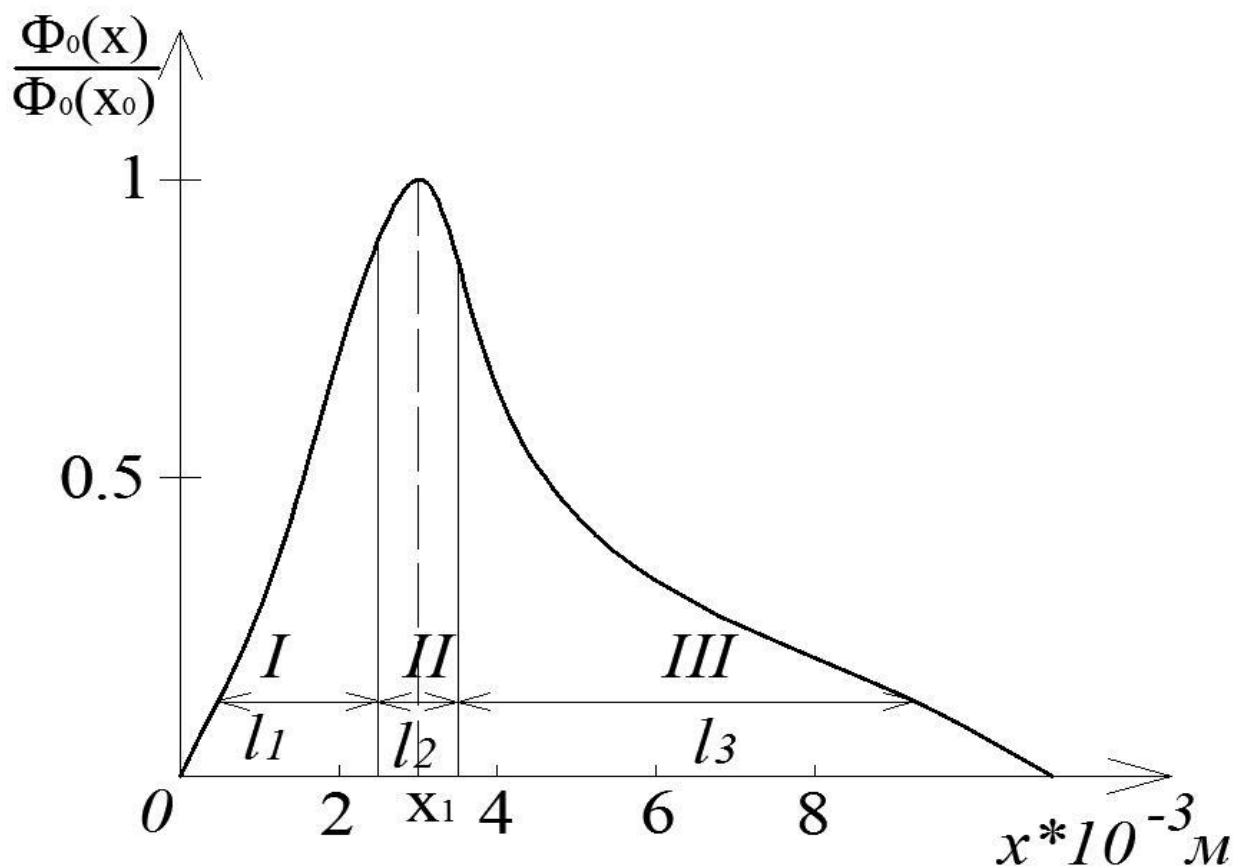
Анализ графика на рис.2.20  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)=f(x)$  показывает, что чувствительность ОДПВ имеет максимальное значение на I участке и минимально на участке II. Участок III имеет меньшую чувствительность чем на участке I, также может быть использован для контроля малых линейных перемещений [6, 55].



**Рис.2.18.** Физическая модель ОДПВ при продольном перемещении светоотражающего модулирующего элемента.



**Рис.2.19.** Освещаемая поверхность торца ВС 4 при продольном перемещении ВМТ по координате  $x$ .



**Рис.2.20.** Зависимость  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)$  от величины предельного перемещения ВМТ.

## 2.6. Математическая модель ОДПВ при поперечном перемещении ВМТ по координате $Y$ .

На рис.2.21 показана физическая модель ОДПВ при поперечном перемещении (сверху вниз по координате  $y$ ) метки 6 на ленте 5, согласно которой световой поток  $\Phi_0(y)$  начинает освещать светоотражающую метку 6 не при  $y=0$ , а при начальном значении

$$y_H = \frac{D \cdot x}{2x_0} \quad (2.47)$$

При дальнейшем перемещении светоотражающей метки 6 освещается поверхность  $S_{осв}(y)$  изменяется в виде сегмента, площадь которой изменяется по выражению

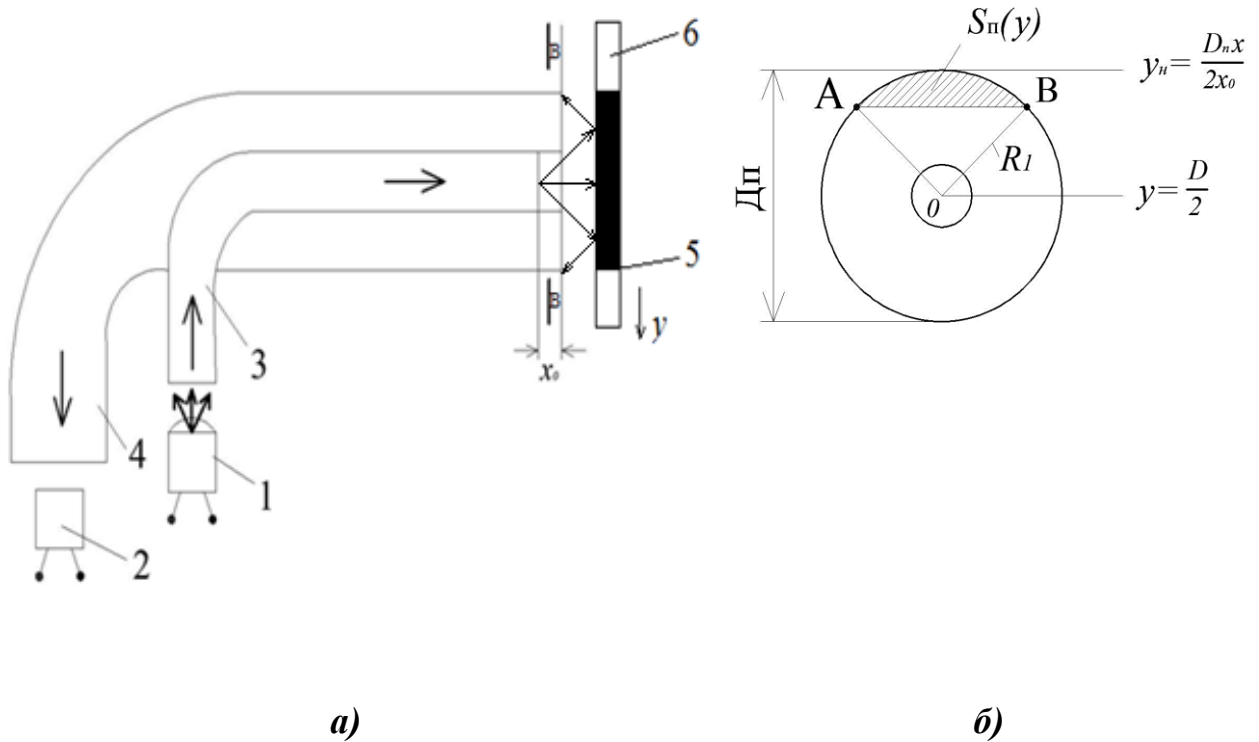
$$S_{осв}(y) = \frac{2}{3} AB \cdot y, \quad (2.48)$$

где:  $AB$  – основание сегмента.

При

$$AB = 2\sqrt{R_1^2 - (R_1 - y)^2} \quad (2.49)$$

$$S_{\text{осв}}(y) = \frac{4}{3}\sqrt{R_1^2 - (R_1 - y)^2} \cdot y \quad (2.50)$$



**Рис.2.21.** Физическая модель ОДПВ при поперечном перемещении по координате  $Y$ :  $a$ - $б$ ) – вид по В-В.

В свою очередь отраженный от метки 6 световой поток  $\Phi_{om}(y)$  падает на входной торец ОВС 4 с площадью  $S_{\text{осв}}(y)$ , который начиная с  $y_H = \frac{D}{2x_0}$  изменяется по формуле

$$S_{\text{осв}}(y) = \frac{4}{3}\sqrt{R_{\text{овс}}^2 - (R_{\text{овс}} - y)^2} \cdot y \quad (2.51)$$

до значения координаты

$$y = R_{\text{овс}} - R_{\text{пвс}}. \quad (2.52)$$

Далее при изменении  $y$  по выражению

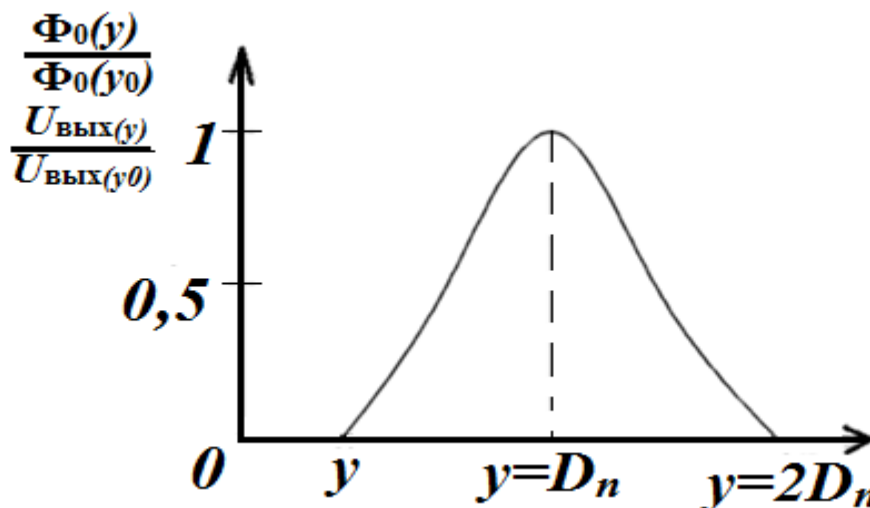
$$S_{\text{овс}}(y) = \frac{4}{3}\left[\sqrt{R_{\text{овс}}^2 - (R_{\text{овс}} - y)^2} - \frac{4}{3}\sqrt{R_{\text{пвс}}^2 - (R_{\text{пвс}} - y)^2}\right] \cdot y. \quad (2.53)$$

Световой поток  $\Phi_{\text{овс}}(y)$  при перемещении метки 6 по координате  $y$  падающий на приемник излучения 2 определяется выражением

$$\Phi_{\text{овс}}(y) = I_0 \frac{S_{\text{овс}}(y) \rho_1}{(x_0 + 2x)^2} \quad (2.54)$$

и изменяется согласно графика на рис. 2.22.

Выходное напряжение мостовой схемы  $U_{\text{вых}}(y)$  также изменяется аналогично по графику на рис.2.22.



**Рис.2.22.** График изменения относительно значения  $\frac{\Phi_0(y)}{\Phi_0(y_0)}$ ,  $\frac{U_{\text{вых}}(y)}{U_{\text{вых}}(y_0)}$  при перемещении ВМТ по координате  $y$ .

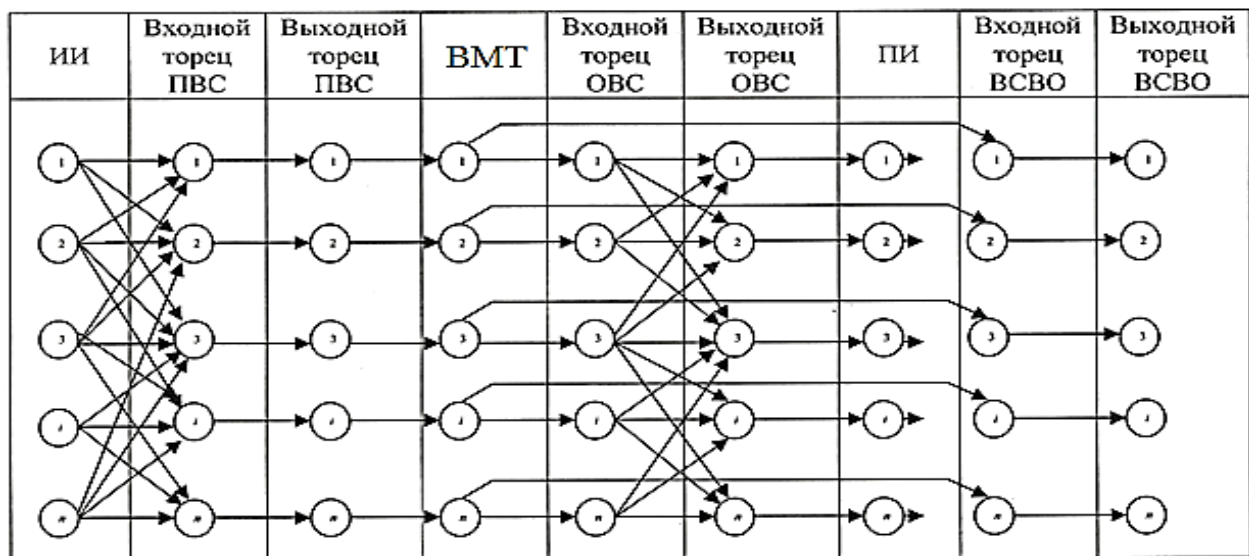
Таким образом, при перемещениях ВМТ 5 по координате  $y$  на участке установки ОДПВ, соответствующей контролируемому перемещению, формируется выходной сигнал в виде импульса для систем контроля и управления.

## 2.7. Графовые модели аналого-цифровых преобразователей перемещений на основе ОДПВ.

На основе ОДПВ разработана обобщенная графовая модель аналого-цифрового преобразователя перемещений на основе ОДПВ, представленная на рис.2.23.

Как указывалось выше для ОДПВ наиболее пригодными являются светодиоды с высокой яркостью и малой светоизлучающей поверхностью. В

качестве подводящих волоконных световодов (ОВС) могут быть использованы как одиночные волоконные световоды, так и волоконные световоды в виде пучков волокон-жгутов. В качестве ВМТ в ОДПВ могут быть использованы оптические экраны, светоотражающие метки (пластины), шторы, различные диафрагмы, а также в качестве ВМТ перемещения выходные торцы ПВС, которые как было показано выше реализованы с продольными или поперечным перемещением относительно входных торцов ОВС. Именно различные комбинации соединений ОВС и их выходных торцов позволяют производить оптическое кодирование входного оптического сигнала несущего информацию об линейном или угловом перемещении объекта. В связи с вышеуказанным основным элементом графовой модели рассматриваемого ОДПВ является цепь  $\Phi_{вхОВС} \rightarrow \Phi_{выхОВС}$  которая реализуется путем укладки входных и выходных торцов ОВС на специальных пластинках (обоймах) по определенному закону кодирования с конкретным шагом.



**Рис.2.23.** Обобщенная графовая модель аналого-цифрового преобразователя перемещений на основе ОДПВ.

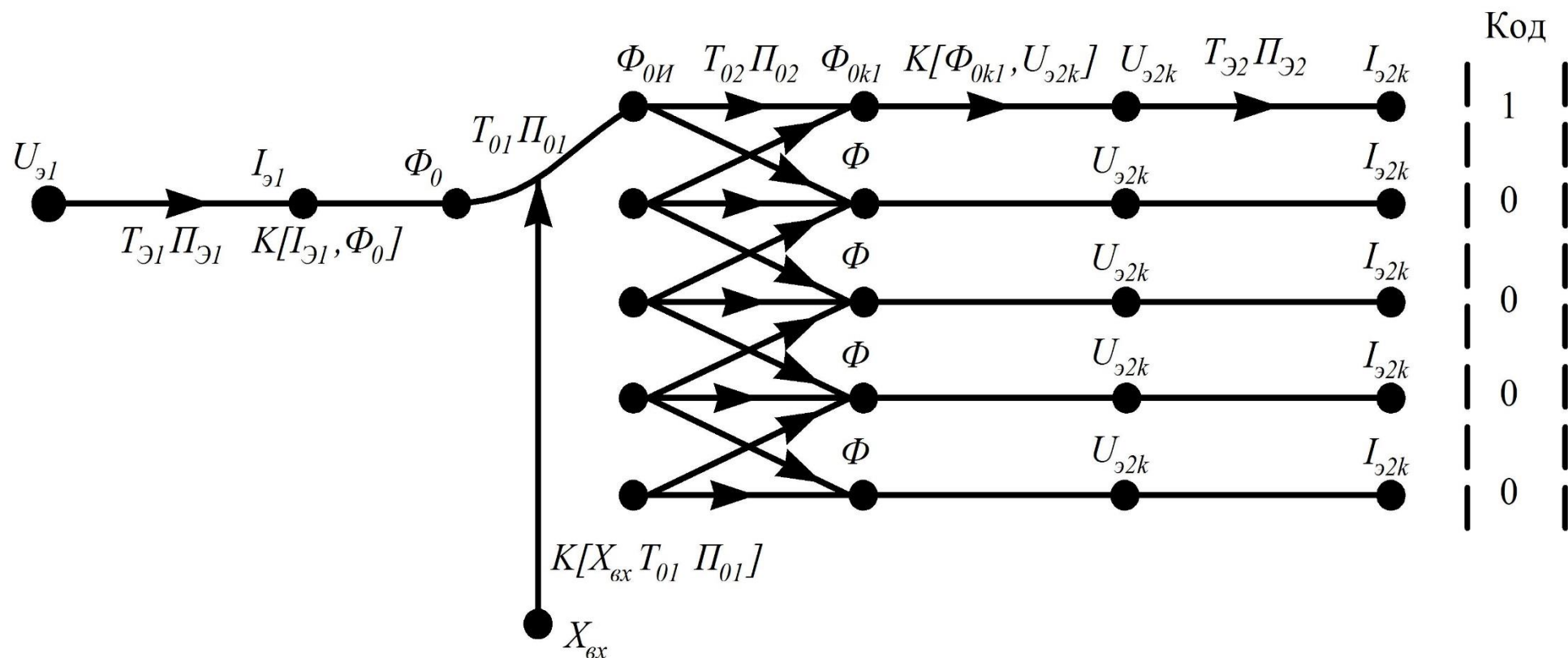
После этапа оптического кодирования суммарный оптический сигнал падает на соответствующий ПИ и далее возникает электрический выходной сигнал на выходе ПИ и со схемой обработки на выходе измерительной схемы имеет электрический кодированный сигнал [43, 73].

Таким образом, в аналого-цифровых волоконно-оптических кодирующих устройствах для ОДПВ перемещений разводка выходных торцов отводимых волоконных световодов определяется типом выбранного кода, числом его разрядов и статической характеристикой (функцией преобразования) волоконно-оптического преобразователя перемещений.

Важно также, что для кодирования выходного оптического сигнала необходима таблица значений входной величины (перемещения) и соответствующие им коды в том или ином исчислении. Например, таблица 2.1 определяет правило раскладки выходных торцов отводящего волоконного световода и их число. На рис.2.24 приведена графовая модель ОДПВ линейных перемещений.

**Таблица 2.1** Значения двоичных кодов для преобразователя линейных перемещений.

Х, мм	Код
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000



**Рис.2.24.** Графовая модель электрических и оптических цепей преобразователя перемещений аналого-цифрового ОДПВ:  $U_{\varepsilon 1}$ ,  $U_{\varepsilon 2k}$  – электрические напряжения;  $I_{\varepsilon 1}$ ,  $I_{\varepsilon 2k}$  – электрические токи;  $\Phi_0$ ,  $\Phi_{0i}$ ,  $\Phi_{0k1}$  – оптические потоки;  $T_{\varepsilon 1}$ ,  $T_{01}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_{\varepsilon 2}$  – схемные функции электрических и оптических цепей;  $\Pi_{\varepsilon 1}$ ,  $\Pi_{01}$ ,  $\Pi_{02}$ ,  $\Pi_{\varepsilon 2}$  – параметры электрических и оптических цепей;  $K[I_{\varepsilon 1}, \Phi_0]$ ,  $K[\Phi_{0k1}, U_{\varepsilon 2k}]$  – межцепные коэффициенты связи между электрическими и оптическими цепями ОДПВ;  $X_{\text{вх}}$  – входная величина (линейное перемещение);  $K[X_{\text{вх}}, T_{01}, \Pi_{01}]$  – коэффициент связи между входной величиной  $X_{\text{вх}}$  и схемной функцией  $T_{01}, \Pi_{01}$ .



### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОЛЫМИ И ВОЛОКОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ.

#### 3.1. Основные характеристики ОДПВ.

В ОДПВ любого типа продольные или поперечные перемещения ВМТ преобразуются в изменение параметров светового потока  $\Phi_0$  в соответствующих световодах от сосредоточенного (СИИ) или распределенного источника излучения (РИИ). Далее световые потоки  $\Phi_0$  падая на соответствующие приемник излучения (ПИ) изменяют их параметры и изменяются выходные напряжения  $U_{вых}$  в измерительных схемах.

Принципиально в преобразователях получается промежуточный аналоговый (непрерывный) сигнал. Для получения дискретных сигналов в ОДПВ используются процессы квантования по уровню и по времени. Именно в процессе квантования в ОДПВ преобразуют непрерывный сигнал в дискретный из предварительного непрерывного сигнала.

В ОДПВ имеют место следующие виды квантования:

- 1) квантование по уровню и эти ОДПВ относятся к группе релейных преобразователей;
- 2) квантование по времени и данные ОДПВ относятся к группе импульсных преобразователей;
- 3) квантование по уровню и по времени и данные ОДПВ можно назвать аналого-цифровыми преобразователями.

Для разработки ОДПВ и устройств на их основе необходимо исследовать основные характеристики, к которым относятся статические и динамические характеристики, чувствительность, надежность, точность и другие.

Статическая характеристика ОДПВ является зависимостью в установившемся состоянии между значениями входного  $X_{вх}$  и выходного  $X_{вых}$  сигналов. Особенностью конструкций рассматриваемых ОДПВ как показано в главе 1 является наличие следующих основных элементов: источника излучения

(ИИ); приемника излучения (ПИ); световода (полого или волоконного) (СВ); измерительной схемы (ИС) с формирователем выходного сигнала, которые в зависимости от принципа построения ОДПВ соединены определенным образом для выполнения необходимой функции преобразования. На основе вышеизложенного можно констатировать, что статическая характеристика любого ОДПВ определяется параметрами всех указанных элементов и в дальнейшем анализ статических характеристик ОДПВ будет осуществляться как с учетом их математических моделей, так и видом измерительных схем [11, 37].

В ОДПВ релейного типа промежуточный непрерывный сигнал (рис.3.1, а) преобразуется в выходной дискретный сигнал (рис.3.1, б).

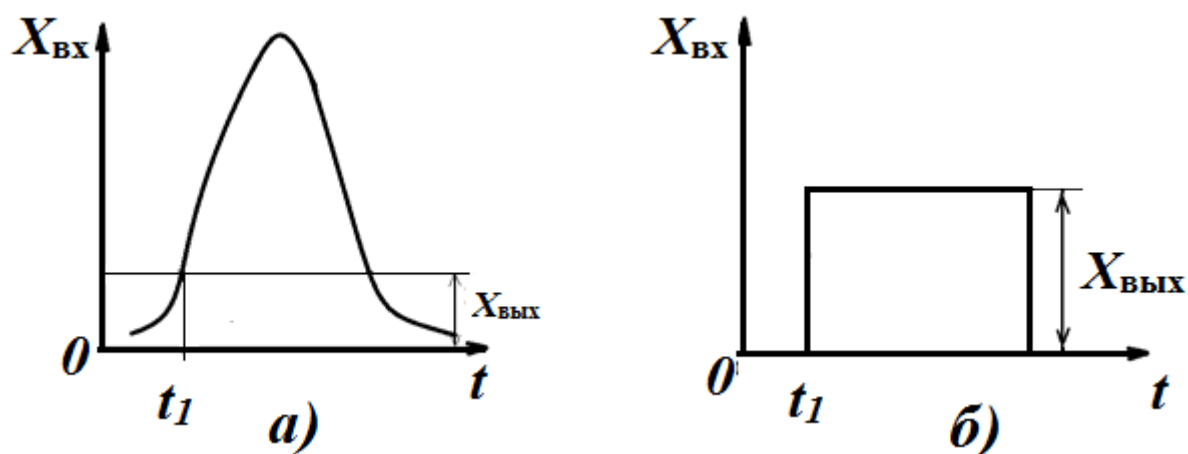


Рис.3.1. Дискретные сигналы релейного типа.

В ОДПВ импульсного типа входные сигналы преобразуются в последовательности импульсов:

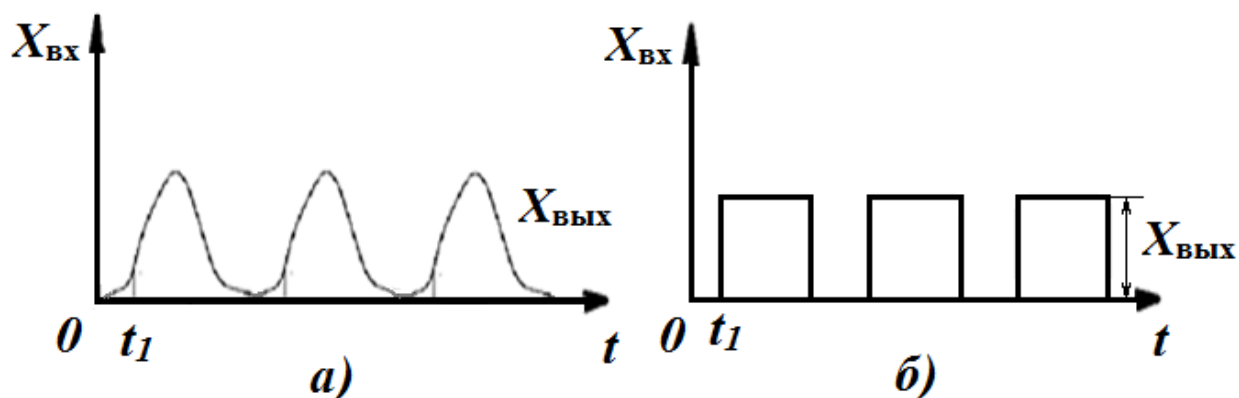


Рис.3.2. Дискретные сигналы импульсного типа.

В ОДПВ сигнал аналого-цифрового типа преобразуется в выходной цифровой сигнал на основе геометрического кодирования.

Таким образом, статическая характеристика ОДПВ определяется последовательным преобразованием входной величины в непрерывный сигнал последующим преобразованием в соответствующий дискретный сигнал. Для формирования статической характеристики ОДПВ существенную роль играют измерительные схемы в виде делительных или мостовых схем [12] в плечи которых включаются различные приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, и другие. Например, в мостовой измерительной схеме рис.3.3 в, одним из основных плеч является фоторезистор с сопротивлением  $R_{\text{фр1}}$ , а в другое плечо (смежное) обычно включается компенсационный фоторезистор  $R_{\text{фр2}}$  для компенсации различных внешних неинформативных воздействий (например, изменения температуры окружающей среды, фоновые засветки и другие). В другие плечи мостовой измерительной схемы включены постоянные электрические сопротивления  $R_3$  и  $R_4$ .

Для получения стандартного выходного сигнала в измеряемом диапазоне в виде электрического тока от 0 до 5 мА или в виде электрического напряжения от 0 до 2 В выход мостовой схемы подключен на вход операционного усилителя ОУ [25, 34, 35].

Для расчета выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  мостовой схемы (рис.3.3, в) используется формула

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{R_{\text{фр1}} R_4 + R_{\text{фр2}} R_3}{[R_{\text{фр1}} + R_{\text{фр2}}](R_3 + R_4)}, \quad (3.1)$$

где:  $U_M$  – напряжение питания мостовой схемы.

В исходном состоянии измерительная схема находится в равновесии ( $U_{\text{вых}}=0$ ), так как  $R_{\text{фр1}} = R_{\text{фр2}} = R_{\text{фр3}} = R_{\text{фр4}}$ . При перемещении внешнего модулирующего тела происходит перераспределение светового потока, что приводит к изменению значения  $R_{\text{фр1}}$ . Если  $R_{\text{фр1}}$  изменится на величину  $R_{\text{фр1}} \cdot \epsilon_1$ , то формулу (3.1) можно переписать в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{R_{\text{фр1}}(1 + \varepsilon_1) + R_{\text{фр2}}R_3}{[R_{\text{фр1}}(1 + \varepsilon_1) + R_{\text{фр2}}](R_3 + R_4)}, \quad (3.2)$$

где:  $\varepsilon_1 = \Delta R_{\text{фр1}} / R_{\text{фр1}}$  - относительное изменение сопротивления плеча  $R_{\text{фр1}}$ ;

$$\Delta R_{\text{фр1}} = R_{\text{фр1}}(x) - R_{\text{фр1}}(x = 0)$$

Значения сопротивлений  $R_{\text{фр1}}(x)$  определяются по характеристике  $R_{\text{фр1}} = f[\Phi_0(x)]$  для конкретных конструкций ОДПВ с учетом изменений  $\Phi_0(x)$  при перемещении внешнего модулирующего тела.

Выражение (3.2) можно преобразовать путем деления последовательно на  $R_{\text{фр2}}$  и  $R_4$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{K\varepsilon_1}{(K + 1)(K + 1 + K\varepsilon_1)}, \quad (3.3)$$

где:  $K = R_{\text{фр1}} / R_{\text{фр2}} = R_3 / R_4$  - коэффициент симметрии мостовой измерительной схемы.

При относительно небольших изменениях сопротивления  $R_{\text{фр1}}(\varepsilon_1 \ll 1)$  выражение статической характеристики можно представить в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{K\varepsilon_1}{(K + 1)^2} \quad (3.4)$$

Аналогично для делительной схемы (рис.3.1, а) выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , если  $R_I$  является сопротивлением приемника излучения (фоторезистора или фотодиода) равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{М}} \cdot K\varepsilon_1}{R_1 + R_2} \quad (3.5)$$

При изменении  $\Phi_0(x)$  сопротивление приемника излучения изменится на  $R_1\varepsilon_1$  и станет равным  $R_1(1 + \varepsilon_1)$ , что приводит к изменению  $U_{\text{ВЫХ}}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{М}}}{R_1(1 + \varepsilon_1) + R_2} R_1(1 + \varepsilon_1) - \frac{U_{\text{М}} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.6)$$

или

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{k\varepsilon_1}{(k + 1)(k + 1 + k\varepsilon_1)}, \quad (3.7)$$

что аналогично выражению (3.3), то есть формулы для мостовой и делительной схем одинаковы.

Если в плечи делительной или мостовой схем при дифференциальной конструкции ОДПВ включаются два приемника излучения, при этом при воздействии входной величины  $x_{\text{вх}}$  сопротивление одного плеча, например  $R_1$  будет увеличиваться и станет равным  $R_1(1 + \varepsilon_1)$  и сопротивление плеча  $R_2$  уменьшится и будет равным  $R_2(1 + \varepsilon_2)$ , то формула выходного напряжения примет вид (рис.3.3, в):

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{м}} \frac{k}{(k + 1)} \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{k + 1 + k\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad (3.8)$$

при  $k \approx 1$ ;  $\varepsilon_1 \ll 1$  и  $\varepsilon_2 \ll 1$  можно записать

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{м}} \frac{k}{(k + 1)^2} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (3.9)$$

Анализ характеристик мостовых схем показывает, что с точки зрения нелинейности, наиболее предпочтительны схемы с двумя и с четырьмя приемниками излучения в плечах схем (рис.3.3, г).

В связи с тем, что рассматриваемые ОДПВ используются в приборах со встроенными микропроцессорами для согласования выхода ОДПВ с микропроцессором необходима предварительная обработка выходного сигнала: усиление, преобразование выходного напряжения, подавление помех и другое [36, 38].

Одним из важнейших элементов предпроцессорной обработки сигналов ОДПВ являются операционные усилители ОУ (рис.3.3, г). При этом с помощью операционных усилителей эффективно осуществляется повышение чувствительности статических характеристик ОДПВ и дальнейшее преобразование в дискретную форму.

Для дальнейших расчетов необходимо определить относительные значения  $e_1$  в зависимости от изменения суммарного светового потока  $\Phi_0(x)$ , падающего на приемник излучения преобразователя [35].

Проанализируем делительную измерительную схему показанную на рис.3.4, которая аналогична схема на рис.3.3, а и может быть рассмотрена как цепочка, состоящая из последовательно соединенных сопротивлений  $R_2$  и  $R_{фр1}$ , на которую подается как на всю мостовую схему напряжение питания  $U_M$ . В этом случае напряжение  $U_{вых}$  на сопротивлении  $R_{фр1}$  можно найти из выражения:

$$U_{вых} = U_M - I_{ц} * R_{фр1} = R_3 * I_{ц}, \quad (3.10)$$

где:  $U_M$  - напряжение, приложенное к делителю,  $I_{ц}$  - ток в цепи делителя.

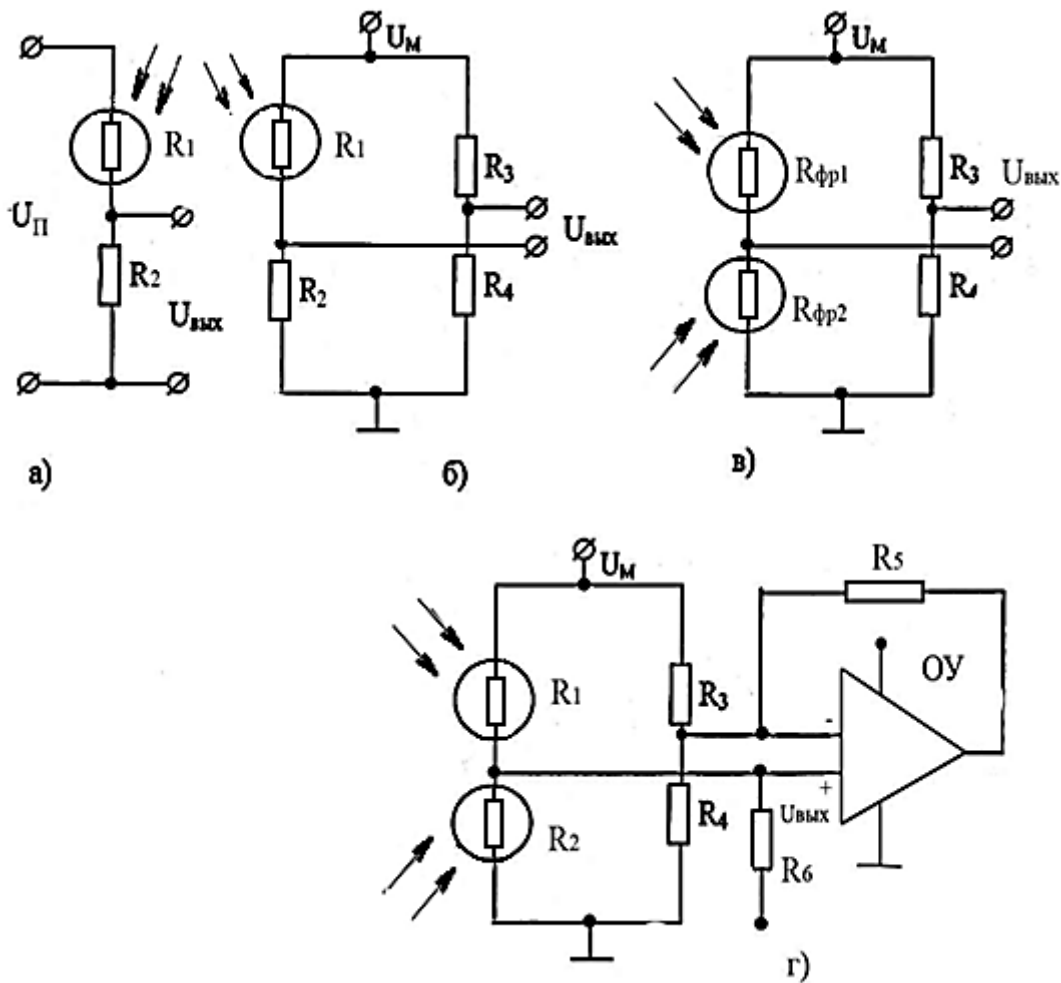


Рис.3.3. Измерительные схемы ОДПВ: а - делительная; б, в, г – мостовые.

Так как величина фототока  $I_{\phi}$  есть функция светового потока  $\Phi_0(x)$ , падающего на приемник излучения и при малых значениях светового потока эта зависимость линейная, то можно записать

$$I_{\phi} = S_{фр1} * \Phi_0(x), \quad (3.11)$$

где:  $S_{фр1}$  - интегральная чувствительность  $R_{фр1}$ .

Так как величина темнового тока приемника излучения  $I_T$  мала по сравнению с  $I_\Phi$ , то можно записать:

$$I_T = I_\Phi \quad (3.12)$$

с учетом последнего можно записать:

$$\frac{U_M - I_\Phi R_3}{I_\Phi} = R_{\Phi p1} \quad (3.13)$$

или

$$\frac{U_M}{I_\Phi} - R_3 = R_{\Phi p3} \quad (3.14)$$

Подставив значения  $I_\Phi$  при  $x=X_{мин}$  находим следующее

$$\frac{U_M}{\Phi_0(X_{мин})} - R_3 = R_{\Phi p1}(X_{мин}) \quad (3.15)$$

при  $x=X$ ,

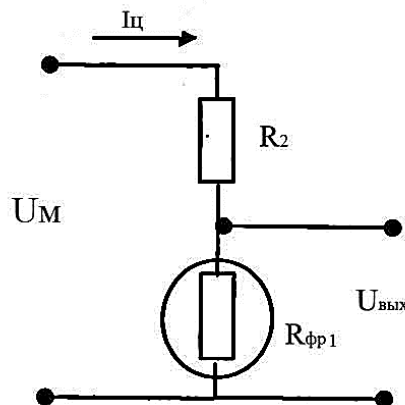
$$\frac{U_M}{\Phi_0(X)} - R_3 = R_{\Phi p1}(X) \quad (3.16)$$

Отсюда можно записать выражение для  $\Delta R_{\Phi p1}$ :

$$\Delta R_{\Phi p1} = R_{\Phi p1}(X_{мин}) - R_{\Phi p1}(X) = \frac{U_m}{S_{\Phi p1}} * \left[ \frac{1}{\Phi_0(X_{мин})} - \frac{1}{\Phi_0(X)} \right], \quad (3.17)$$

и

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \Delta R_{\Phi p1} - R_{\Phi p1}(X_{мин}) \\ &= \frac{1 - \Phi_0(X_{мин})}{\Phi_0(X)} * \frac{1}{\left\{ 1 - S_1 * \Phi_0(X_{мин}) * \frac{R_3}{U_M} \right\}} \end{aligned} \quad (3.18)$$



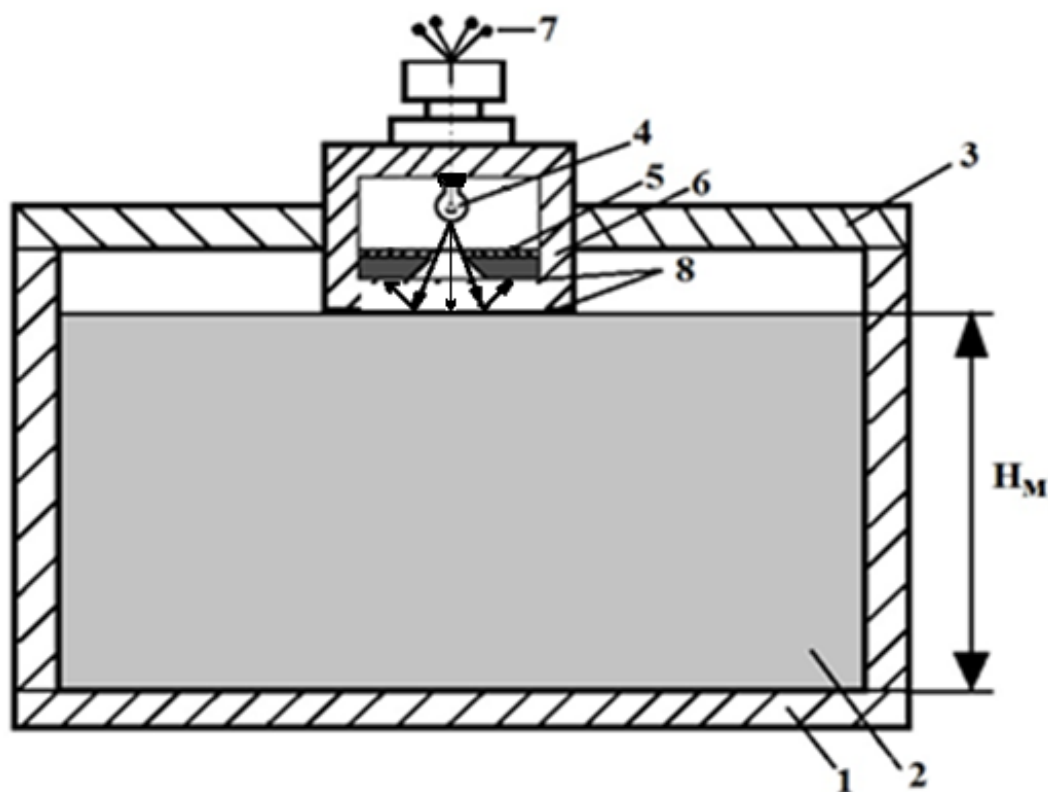
**Рис.3.4.** Делительная измерительная схема ОДПВ.

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K}{(K + 1)^2} \cdot \frac{\Delta R_{\text{фр}}}{R_{\text{фр}}} \quad (3.19)$$

$K$ – коэффициент симметрии моста.

### 3.2. Статические характеристики релейных ОДПВ с СИИ на основе полых световодов.

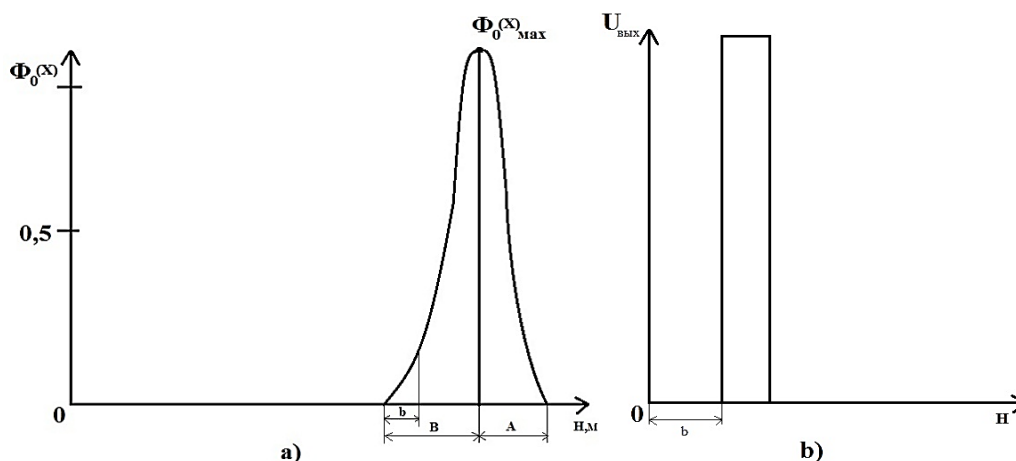
Рассмотрим статическую характеристику ОДПВ с СИИ и полым световодом при продольном перемещении ВМТ, физическая модель которого представлена на рис.3.5 при его использовании для контроля дискретного уровня жидкости в резервуаре [17, 27, 30, 31, 40, 57, 72].



**Рис.3.5.** ОДПВ на основе полого световода для дискретного контроля максимального уровня жидкости. 1 – резервуар; 2 – жидкость; 3 – крышка резервуара; 4 – источник излучения; 5 – приемник излучения; 6 – полый световод; 7 – выводные провода; 8 – защитное стекло.

Исследования и расчет по формулам (2.13) и (2.18) показали, что график изменения статической характеристики  $\Phi_0=f(H)$  имеет вид показанный на рис.3.6, а.





**Рис.3.6.** Статическая характеристика ОДПВ (а) и её дискретный вид (b) для контроля максимального уровня жидкости.

Участок А (рис.3.6, а) статической характеристики составлял  $4 \cdot 10^{-3}$  м, а участок В составлял  $6 \cdot 10^{-3}$  м. Чувствительность преобразователя на основе ОДПВ определяется из выражения (3.20).

$$K = \frac{\pi D_0^2}{2x_0} \left( 1 + \frac{x}{x_0} \right), \quad (3.20)$$

Анализ формулы (3.20) показывает, что для повышения чувствительности ОДПВ на основе полого световода необходимо увеличить  $D_0$  и уменьшить  $x_0$ . На рис.3.7 представлена двухэлементная конструкция ОДПВ, в которой на верхнем ( $H_{\text{max}}$ ) и нижнем ( $H_{\text{мин}}$ ) уровня контролируемой жидкости в верхнем и нижнем торцах полого световода установлены одноэлементные ОДПВ [66, 72].

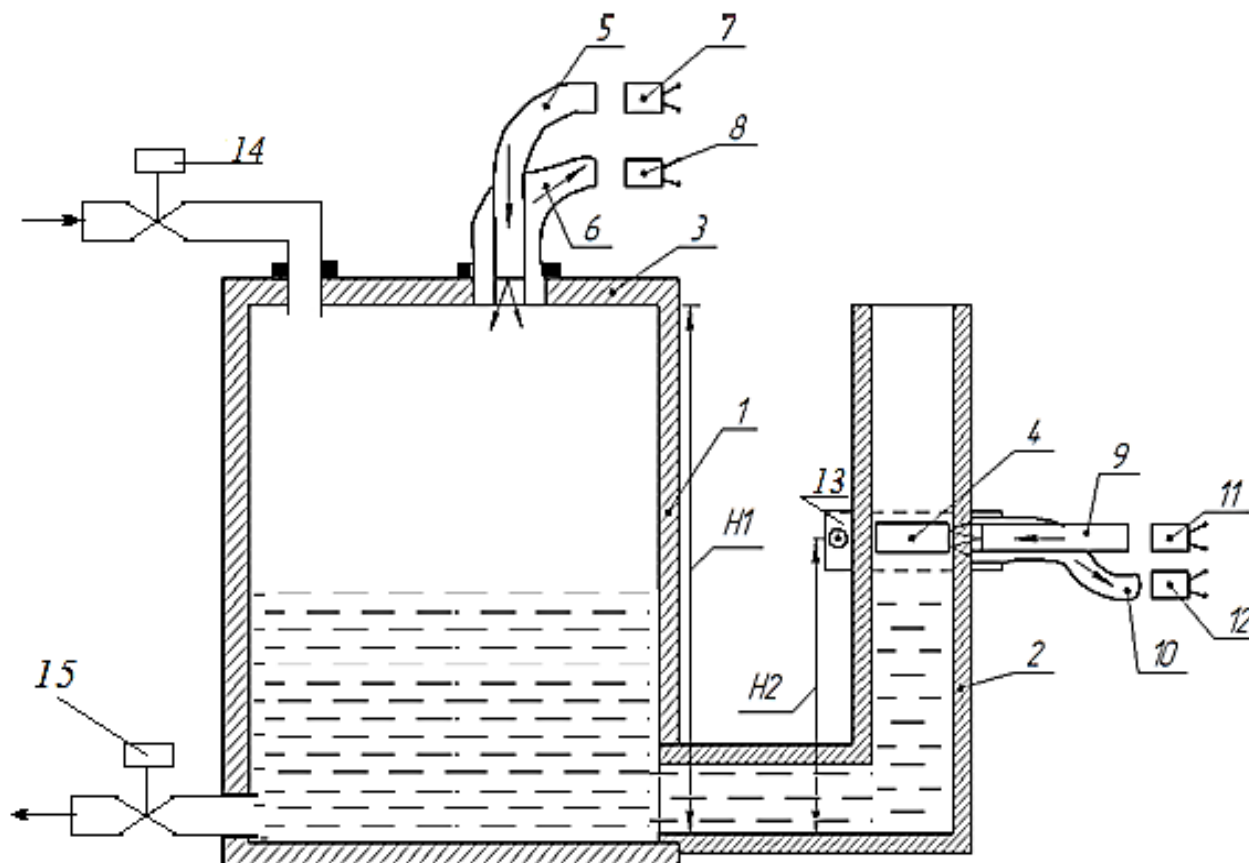
### 3.3 Статические характеристики релейных ОДПВ с СИИ на основе волоконных световодов при продольных и поперечных перемещениях ВМТ.

На рис.3.7 предоставлены устройство контроля уровня жидкости в виде мерного бака 1 (которой используется в расходомерных и других установках) и уровнемерной трубки 2. Первая конструкция ОДПВ установлена в верхней крышке 3 бака 1 и ее подводящий 5 световой поток от ИИ 7 и отводящий 6

волоконные световоды расположены коаксиально и торец световода 6 расположен заподлицо с нижней поверхностью крышки 3.

Коаксиальное расположение торцов световодов 5 и 6 создает осесимметричное распределение эффективной освещенности торца световода 6 световым потоком, отраженным от светоотражающей поверхности уровня жидкости (например, при максимальном уровне  $H_{lmax}$ ).

Кроме того, выходной торец световода 5 (рис.3.7) несколько отодвинут на расстояние  $x_0$  от плоскости расположения входного торца световода 6 с целью устранения фоновой звоетки данного торца световода 6 и создания необходимой индикатрисы излучения между торцом световода 5 и светоотражающей поверхностью уровня жидкости.



**Рис.3.7.** Оптоэлектронное устройство контроля уровня жидкости на основе волоконных световодов.

Рассмотрим физическую модель ОДПВ первой конструкции, в которой (рис.3.7) уровень жидкости перемещается продольно по координате  $x$ .

В начальном положении координата перемещения уровня жидкости  $x=0$  и жидкость касается торцов отводящего ВС 6. В этом случае световой поток  $\Phi_0(x)$  от ВМТ не отражается и не достигает входного торца отводящего ВС 6.

При продольном перемещении ВМТ (уровня жидкости) световой поток  $\Phi_0(x)$  от подводящего ВС 5 отразившись от ВМТ начинает освещать входной торец СВ 6.

Согласно физической модели на рис.3.8 поверхность освещения входного торца ОВС6 будет увеличиваться (рис.3.9), следовательно будет увеличиваться и световой поток  $\Phi_0(x)$  падающий на приемник излучения 8 при увеличении продольного перемещения по координате  $x$ .

Диаметр освещенной поверхности торца ОВС 6 будет:

$$D_{овс.} = D_n + 4y, \quad (3.21)$$

где:  $D_n$  – диаметр торца ПВС 5;  $y$  – параметр, связанный с  $D_{овс.}$ .

$$tg U_0 = \frac{D_{\Pi}}{2x_0} = \frac{y}{x}, \quad (3.22)$$

где:  $U_0$  – угол между осью и углом вхождения луча;  $x_0$  – расстояние между торцами ПВС и ОВС.

Из (3.22) следует:

$$y = \frac{D_{\Pi} x}{2x_0}, \quad (3.23)$$

$$D_{овс} = D_{\Pi} + 2x \frac{D_{\Pi}}{x_0} \quad (3.24)$$

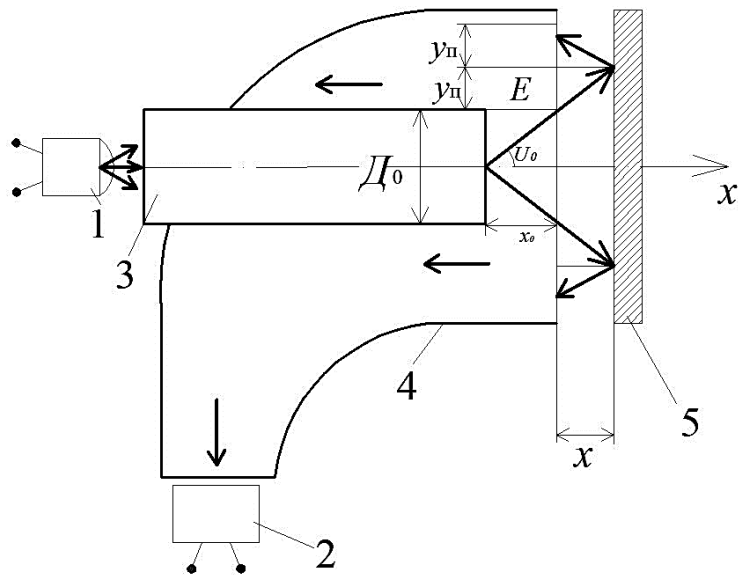
Освещаемая поверхность входного торца ОВС 6 равна

$$S_{овс}(x) = \pi D_{\Pi}^2 \frac{x}{x_0} \left( 1 + \frac{x}{x_0} \right) \quad (3.25)$$

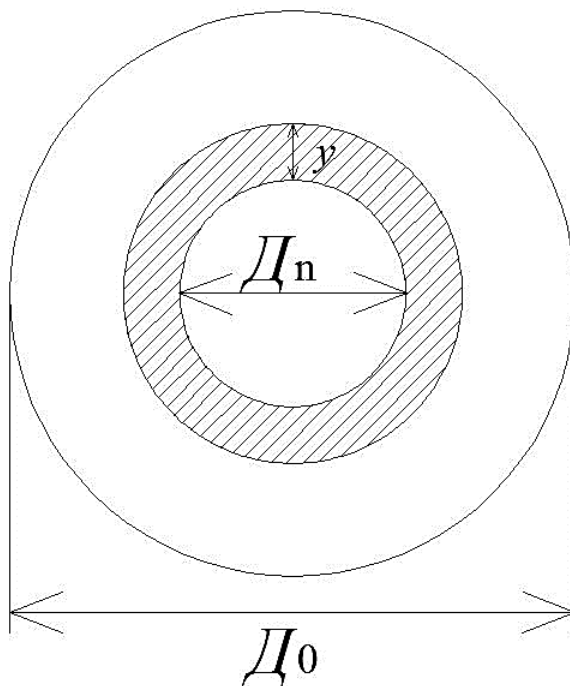
Световой поток падающий на торец ОВС 6 и следовательно на ПИ 8 равен

$$\Phi_{овс}(x) = I_0 \frac{S_{овс}(x) \rho_1}{(x_0 + 2x)^2}, \quad (3.26)$$

где:  $I_0$  – сила света от ИИ7;  $\rho_1$  – коэффициент отражения поверхности ВМТ.

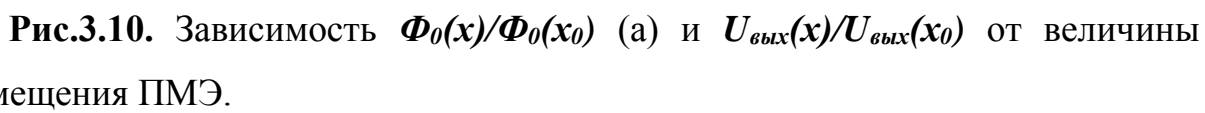


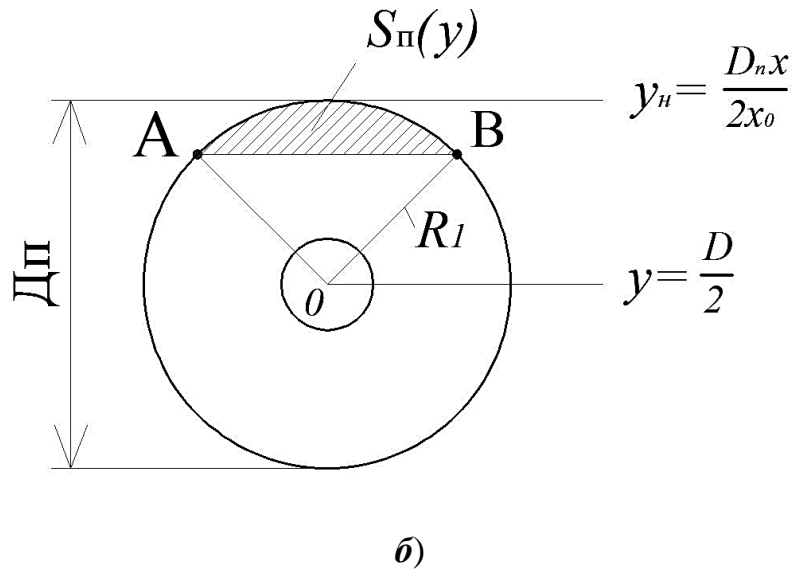
**Рис.3.8.** Физическая модель оптоэлектронного устройства уровня жидкости.



**Рис.3.9.** Физическая модель ОДПВ установленного на верхней крышке и изменение освещаемой поверхности  $S_{осв}(x)$ .

Анализ графика на рис.3.10  $\Phi_0(x)/\Phi_0(x_0)=f(x)$  показывает, что чувствительность ОДПВ имеет максимальное значение на I участке и минимально на участке II. Участок III имеет меньшую чувствительность чем на участке I.





**Рис.3.11.** Физическая модель ОДПВ при поперечном перемещении ВМТ по координате  $y$ : а) – физическая модель; б) – изменение освещенной поверхности  $S_n(y)$ .

На рис.3.11, а показана физическая модель ОДПВ при поперечном перемещении ВМТ 4, по координате  $y$ , согласно которой световой поток  $\Phi_0(y)$  начинает освещать светоотражающую поверхность ВМТ 4  $\Phi_0(y_0)$  не при  $y=0$ , а при начальном значении

$$y_n = \frac{D_n x}{2x_0} \quad (3.27)$$

При дальнейшем перемещении светоотражающей поверхности поплавка освещается поверхность  $S_{осв}(y)$  изменяется в виде сегмента (рис.3.11, б), площадь которой изменяется по выражению

$$S_{осв}(y) = \frac{2}{3} AB \cdot y \quad (3.28)$$

где:  $AB$  – основание сегмента.

При

$$AB = 2\sqrt{R_1^2 - (R_1 - y)^2} \quad (3.29)$$

$$S_{осв}(y) = \frac{4}{3}\sqrt{R_1^2 - (R_1 - y)^2} \cdot y \quad (3.30)$$

В свою очередь отраженный от ВМТ 4 световой поток  $\Phi_{om}(y)$  падает на входной торец ОВС 10 с площадью  $S_{овс}(y)$ , который начиная с  $y_H = \frac{D}{2x_0}$  изменяется по формуле

$$S_{овс}(y) = \frac{4}{3} \sqrt{R_{овс}^2 - (R_{овс} - y)^2} \cdot y \quad (3.31)$$

до значения координаты

$$y = R_{овс} - R_{пвс} \quad (3.32)$$

Далее при изменении  $y$  по выражению

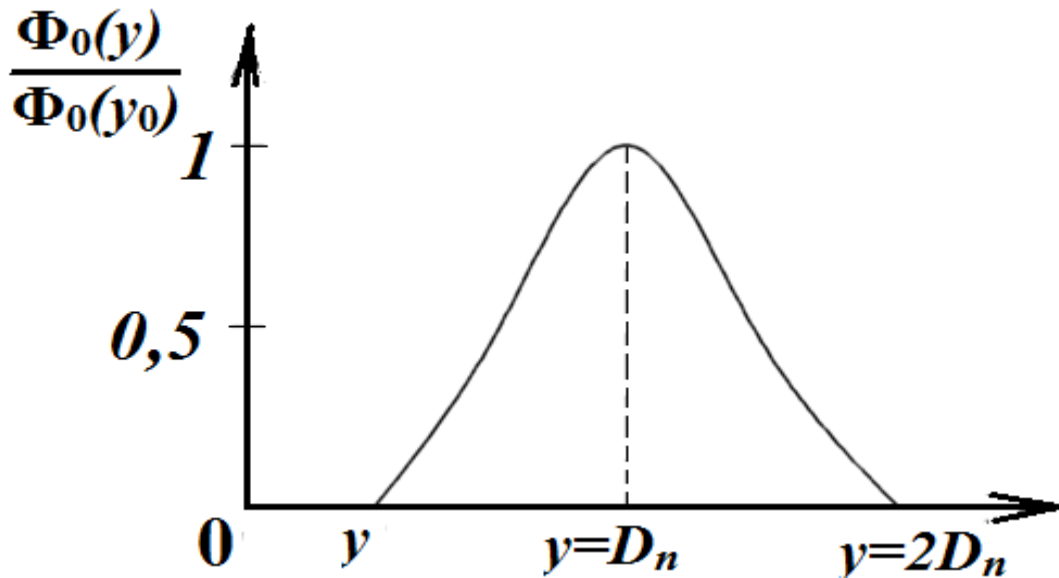
$$S_{овс}(y) = \frac{4}{3} \sqrt{R_{овс}^2 - (R_{овс} - y)^2} \cdot y - \frac{4}{3} \sqrt{R_{пвс}^2 - (R_{пвс} - y)^2} \cdot y \quad (3.33)$$

Световой поток  $\Phi_{овс}(y)$  при перемещении ВМТ 4 по координате  $y$  падающий на приемник излучения 2 определяется выражением

$$\Phi_{овс}(y) = I_0 \frac{S_{овс}(y) \rho_1}{(x_0 + 2x)^2} \quad (3.34)$$

и выходное напряжение мостовой схемы и световой поток  $\Phi_0(y)$  изменяется по графику на рис.3.12.

Световой поток  $\frac{\Phi_0(y)}{\Phi_0(y_0)}$  падающий на  $S_{овс}(y)$  изменятся согласно графика на рис.3.12.



**Рис.3.12.** График изменения относительного значения  $\frac{\Phi_0(y)}{\Phi_0(y_0)}$  при перемещении ПМЭ по координате  $y$ .

Таким образом, при перемещениях ВМТ 4 по координате  $y$  на участке установки ОДПВ, соответствующей контролируемому перемещению, формируется выходной сигнал в виде импульса для систем контроля и управления.

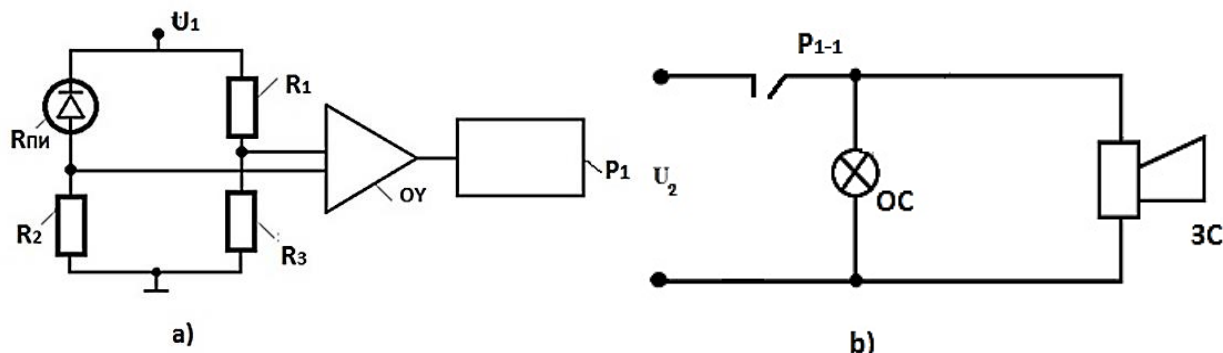
В целом процесс преобразования сигнала об уровне жидкости  $H_1$  при приближении к максимальному значению  $H_{1max}$  график измерения  $\Phi_0$  имеет вид показанный на рис.3.12. На основании теоретических и экспериментальных исследований получено, что при приближении  $H_1$  к  $H_{2max}$  нижняя и расстояния  $x=8-10$  мм  $\Phi_0$  увеличивается и достигает максимума при  $x=4$  мм и при дальнейшем увеличении до  $H_1=H_{1max}$  световой поток  $\Phi_0$  становится равным нулю ( $\Phi_0=0$ ) из-за отсутствия отражения световом потоке оси поверхности уровня жидкости ( $x=0$ ). (рис.3.12).

При включении приёмника излучения в мостовую схему (рис.3.13, а) и равенстве сопротивления приемника излучения  $R_{ни}$  сопротивлениям других плеч мостовой схемы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  при достижении максимального светового потока  $\Phi_{0max}$  (рис.3.12) выходное напряжение равновесного моста будет равно нулю ( $U_{вых}=0$ ). Операционный усилитель ОУ (рис.3.13) не будет подавать напряжение на реле  $P_1$  и его нормально закрытый контакт  $P_{1-1}$  будет замыкать цепи оптической ОС и звуковой ЗС сигнализаций о достижении максимального уровня  $H_{1max}$ . При снижении уровня жидкости  $H_1 < H_{1max}$  светоотражающая поверхность уровня переместится ниже, световой поток  $\Phi_0$  в ОДПВ резко уменьшится. Мостовая схема выйдет из равновесия и появится выходное напряжение  $U_{вых} \neq 0$ , которое через ОУ и реле  $P_1$  отключит цепи ОС и ЗС, при этом, могут быть подключены к схеме контроля и управления насосы и другие устройства.

Принцип построения второй конструкции ОДПВ аналогичен первой конструкции ОДПВ (рис.3.7.). При достижении уровня жидкости  $H=H_1$  поплавков 4 окажется напротив торцов световодов 9 и 10 и световой поток  $\Phi_0$  достигнет максимума  $\Phi_{0max}$ , при этом сопротивление приемника излучения 12 резко изменится и мостовая схема (аналогично как на рис.3.13) выйдет из равновесия



( $U_{вых} \neq 0$ ). При этом выходное напряжение  $U_{вых}$  через ОУ включит реле  $P$ , которое нормально открытым контактом включит оптическую и звуковую сигнализации.



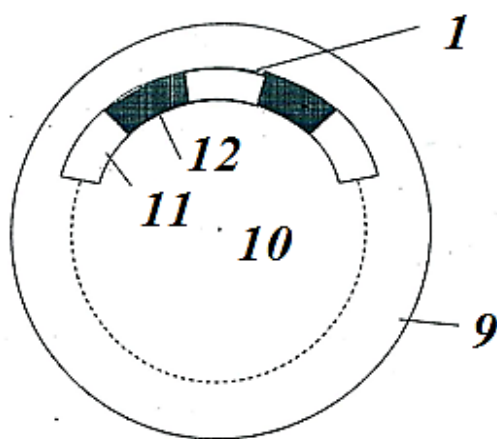
**Рис.3.13.** Мостовая измерительная схема (а) и цепи оптической ОС и звуковой ЗС сигнализации (б):  $U_1$  и  $U_2$  – напряжение питания схем.

### 3.4. Статические характеристики импульсных ОДПВ с СИИ на основе полых и волоконных световодов для контроля параметров вращающегося диска.

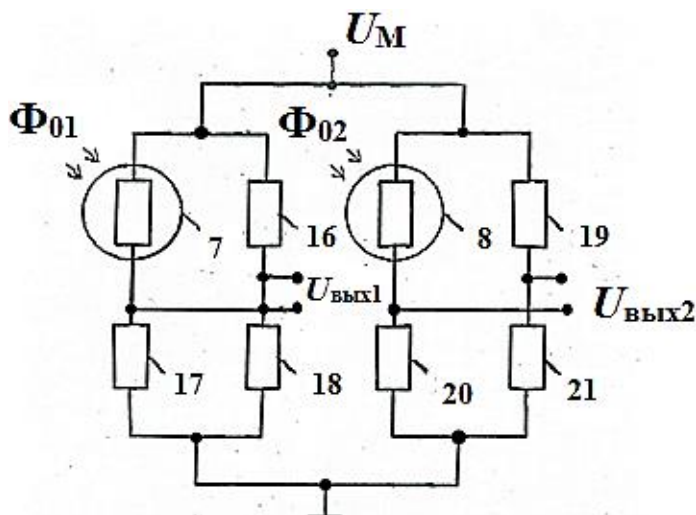
На рис.3.14, а, б представлены конструкции импульсных ОДПВ, первая из которых (рис.3.14, а) выполнена на основе полого световода и состоит из: полого световода 1, дугообразного торца 2 с отверстиями 3, 4 и 5, источника излучения 6, приемников излучения 7 и 8, диска 9, его вращения 10, светлых 11 и тёмных 12 меток (рис.3.15). Вторая конструкция ОДПВ (рис.3.14, б) предназначена для работы в агрессивных условиях и кроме вышеуказанных элементов содержит также волоконный световод 13 сопряжённый с источником излучения 6 и волоконные световоды 14 и 15 сопряжённые с приемниками излучения 7 и 8. Бесконтактное устройство для контроля параметров вращающегося диска содержит также измерительную схему (рис.3.16) с двумя мостовыми схемами, из которых одна с приемником излучения 7 и с сопротивлениями 16, 17, 18 и другая с приемником излучения 8 и с сопротивлениями 19, 20, 21 с выходными напряжениями  $U_{вых1}$  и  $U_{вых2}$  и напряжением питания  $U_m$  [65, 68, 70, 73, 76].



входит светотражающая метка 11 после метки 12 и начинается процесс увеличения светового потока  $\Phi_{01}$ , отраженного от метки 11 и падающего на приемник излучения 7, который будет продолжаться до прихода метки 12. Таким образом, при перемещении светотражающей метки 11 относительно начала приемника излучения 7 по часовой стрелке, световой поток  $\Phi_{01}$  падающий на 7 по координате времени  $\tau$  на участке  $\tau_0, \tau_1$  согласно графика на (рис.3.17) будет увеличиваться, далее на участке  $\tau_1, \tau_2$  будет неизменным и на участке от  $\tau_2$  до  $\tau_3$  будет падать до исходного значения. Аналогично при входе метки 12 под светочувствительную поверхность приемника излучения 8 (рис.3.17) световой поток  $\Phi_{02}$ , падающий на 8 будет увеличиваться на участке  $\tau'_0, \tau'_1$  далее будет стабильным на участке  $\tau'_1, \tau'_2$  и при подходе светопоглощающей метки 11 будет падать до исходного значения. Таким образом, форма изменения световых потоков  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  падающих на приемники излучения 7 и 8, а следовательно и выходных напряжений мостовых схем  $U_{вых1}$  и  $U_{вых2}$  имеют вид импульса, при этом поток  $\Phi_{02}$  запаздывает по отношению к потоку  $\Phi_{01}(U_{вых1})$  на время  $\Delta\tau$ , что позволяет получить информацию о направлении вращения диска 9.



**Рис.3.15.** Вращающийся диск ОДПВ с светлыми и темными метками



**Рис.3.16.** Мостовая измерительная схема ОДПВ.

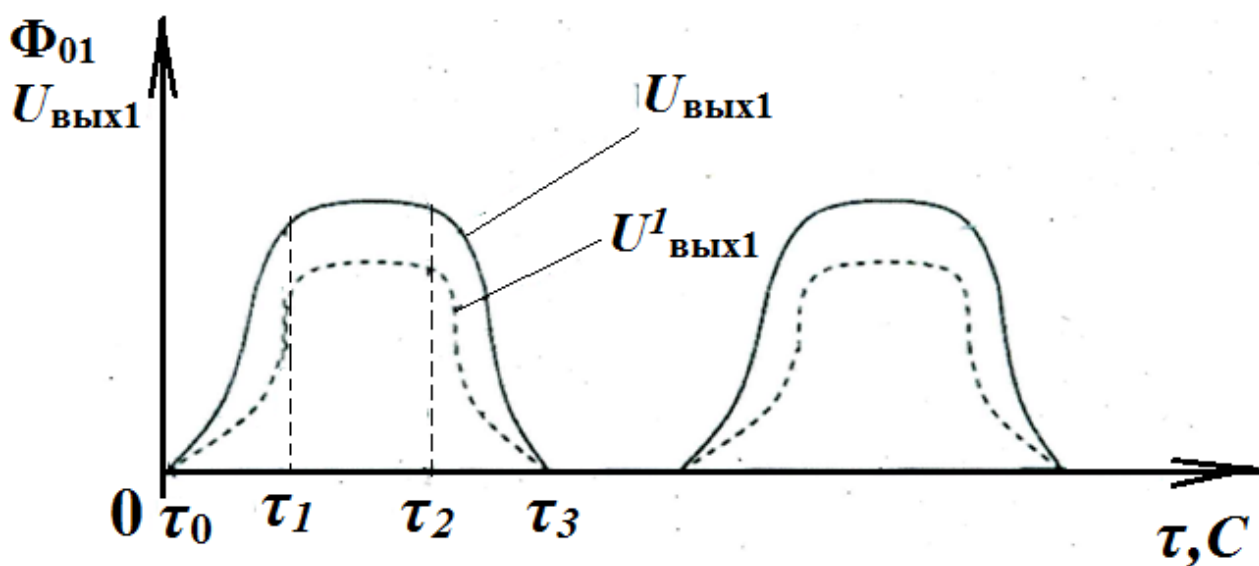


Рис. 3.17. График изменения  $\Phi_{01}$  при прохождении участков  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

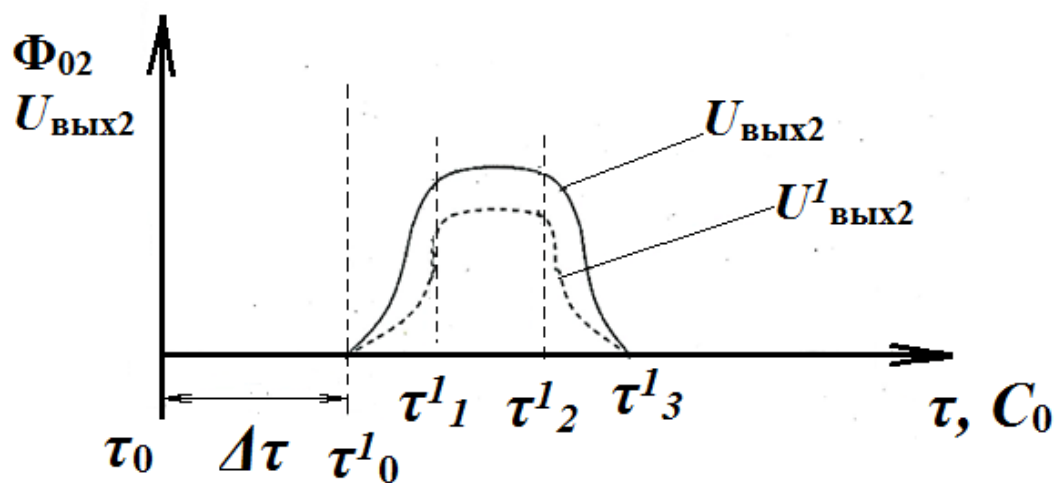


Рис. 3.18. График изменения  $\Phi_{02}$  поясняющее запаздывание на  $\Delta \tau$ .

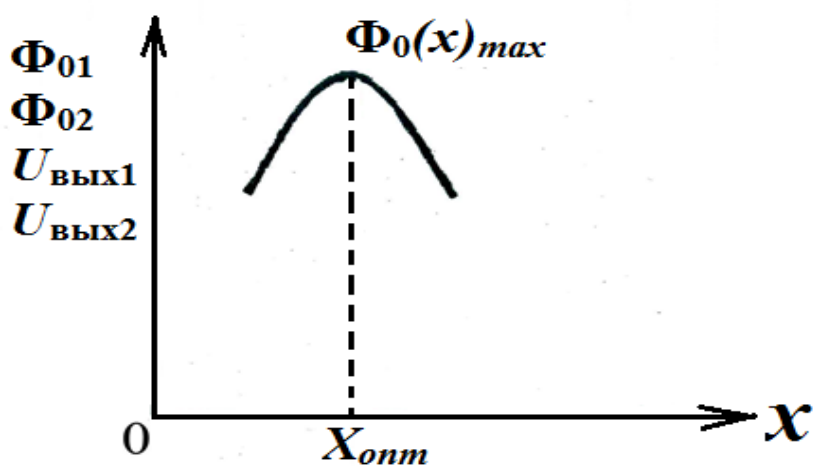


Рис. 3.19. График изменения  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  подающие на приемники излучения ОДПВ.

На основе рис.3.19 можно определить воздействие осевого перемещении диска 9 (по координате  $x$ ) на величину выходных напряжений  $U_{вых1}$  и  $U_{вых2}$ . Поверхность освещения  $S_{осв}$  приемников излучения 7 и 8 зависит от расстояния  $X$  от торца 2 от диска 9. При весьма малых значениях  $X$ , световые потоки  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  могут не достигнуть поверхности приемников излучения 7 и 8. Если рассмотреть максимальный угол распространения лучей от источника излучения 6 в полость отверстия 4 равный  $U_0$  при диаметре освещений поверхности диска 9  $D_0$ , то тангенс угла  $U_0$  равен:

$$\operatorname{tg} U_0 = \frac{D_0}{2x_0} = \frac{y}{x}, \quad (3.35)$$

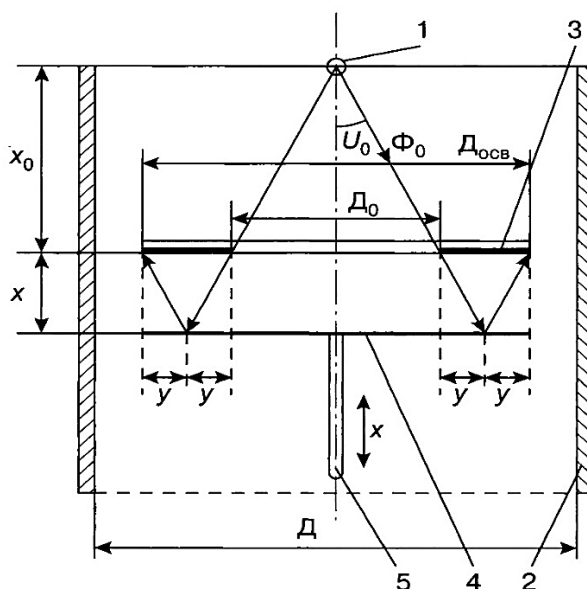
где:  $y$  – расстояние определяющее площадь освещенности приемника излучения

$$y = x \frac{D_0}{2x_0}$$

Максимальные световые потоки  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  будут при значении  $y$  равном диаметру приемников излучения 7 и 8. В процессе эксплуатации из-за изменений величины  $x$  световые потоки  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  будут изменяться согласно графика на (рис.3.12) 7, где оптимальное значение  $x=x_{opt}$  равно диаметру приемника излучения. Для определения скорости вращения необходимо подсчитать число импульсов в единицу времени, а для определения углового перемещения необходимо подсчитать число импульсов за определенный период времени. Таким образом ОДПВ на нижнем торце которого по дуге расположены три отверстия, из которых над центральным отверстием расположен источник излучения, а в двух симметричных боковых отверстиях расположены приемники излучения, светочувствительные поверхности которых установлены заподлицо с внешней поверхностью торца корпуса, которые могут быть сопряжены с волоконными световодами, и под которым, на диске по кругу нанесены поочередно оптические светоотражающие и светопоглощающие метки, имеющие форму и размеры, совпадающие, с формой и размерами торца корпуса позволяет, с высокой чувствительностью и точностью определять скорость и направление диска, а также его осевое и угловое перемещение.

### 3.5. Статические характеристики оптоэлектронного дискретно преобразователь для автоматических измерений перемещений и размеров.

Оптоэлектронные преобразователи весьма перспективны для измерения перемещений и размеров различных объектов, в том числе гранул материалов добывающей и перерабатывающей отраслей пищевой промышленности: клубней, зерна, семян, помола и др. Среди оптоэлектронных преобразователей недостаточно исследованы и разработаны преобразователи на основе полых световодов, которые при использовании кольцевых приёмников излучения с сосредоточенными источниками излучения, расположенных симметрично по оси полого световода, позволяют с высокой чувствительностью и точностью измерять малые перемещения при непрерывном автоматическом контроле.

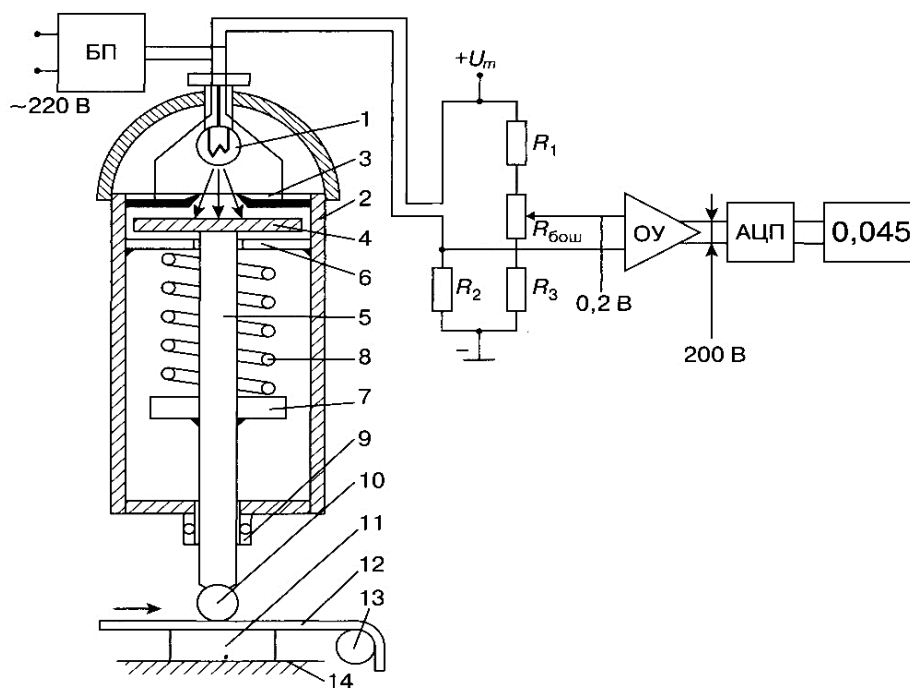


**Рис.3.20.** Физическая модель оптоэлектронного преобразователя перемещений: 1-сосредоточенный источник излучения; 2-полый светодиод; 3-приёмник излучения; 4-продольный светоотражающий диск; 5-стержень.

Оптоэлектронный преобразователь на основе полого световода (рис.3.20), состоит из сосредоточенного источника излучения 1, полого световодиода 2, приёмника излучения 3 и продольного перемещающегося светоотражающего диска 4, модулирующего световой поток  $\Phi_0(x)$  при перемещениях и жёстко связанного со стержнем 5, на который воздействует перемещение  $x$ . Световой

поток  $\Phi_0$ , распространяясь от источника излучения 1, находящегося на расстоянии  $x_0$  от приёмника излучения 3, и проходя через отверстие, падает на светочувствительную поверхность диска 4 и далее, отражаясь от него, - на светочувствительную поверхность приёмника излучения 3.

На рис.3.21 представлены конструкция и измерительная схема оптоэлектронного преобразователя для автоматического контроля толщины ленточных материалов, которые транспортируются с помощью витков или других устройств. С целью контроля толщины ленточного материала 12 оптоэлектронный преобразователь устанавливают на определенную толщину (номинальную), которая определяется стандартом и требованиями к измеряемому материалу. В процессе измерений отклонения толщины (размера) фиксируются автоматически, и выходной сигнал преобразователя используется для автоматического управления толщиной материала.



**Рис.3.21.** Конструкция и измерительная схема оптоэлектронного преобразователя перемещений: 1-источник излучения (лампочка накаливания); 2-полый световод; 3-кольцевой фоторезистор; 4-светоотражающий диск; 5-стержень; 6 и 7-упоры; 8-пружина; 9-направляющий наконечник; 10-ролик; 11-измерительная опора; 12-ленточный материал; 13-валок; 14-основание.

В исходном положении при  $x=0$  диск 4 прижат к приёмнику излучения 3, световой поток  $\Phi$  не проходит к светочувствительной поверхности приёмника излучения 3, и выходное напряжение мостовой измерительной схемы  $U_{вых}$ , в плечо которой включён приёмник 3 (см. рис.3.20), равно 0 [50].

При наличии перемещения  $x(x \neq 0)$  световой поток  $\Phi_0$ , входящий в отверстие приёмника излучения 3 под углом  $U_0$ , падает на диск 4 и, отражаясь от него, попадает на приёмник излучения, образуя освещённую кольцевую поверхность диаметром  $D_{осв}$ :

$$D_{осв} = D_0 + 4y, \quad (3.36)$$

где  $D_0$  - диаметр отверстия приёмника излучения 3;  $y$  - параметр, зависящий от перемещения  $x$ .

Учитывая, что тангенс угла  $U_0$  равен:

$$\operatorname{tg} U_0 = \frac{D_0}{2x_0} = \frac{y}{x}, \quad (3.37)$$

параметр  $y$  определяется из выражения

$$y = x \frac{D_0}{2x_0}. \quad (3.38)$$

Тогда

$$D_{осв} = D_0 + 2x \frac{D_0}{x_0}. \quad (3.39)$$

Освещаемая поверхность приёмника излучения 3 при перемещении диска 4 на расстояние будет определяться по формуле

$$S_{осв}(x) = \frac{\pi(D_0 + 4y)^2}{4} - \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi}{4} [(D_0 + 4y)^2 - D_0^2]. \quad (3.40)$$

Кольцевой приёмник излучения в виде фоторезистора  $R_{фр}$  включается в мостовую измерительную схему (см. рис.3.21).

Выходное напряжение мостовой схемы преобразователя определяется как

$$U_{вых} = U_m \frac{K}{(K+1)^2} \times \frac{\Delta R_{фр}}{R_{фр}}, \quad (3.41)$$

где  $K$  - коэффициент симметрии мостовой схемы;  $\Delta R_{фр}$  - приращение сопротивления фоторезистора при изменении  $x$ .



Полученная формула для расчёта изменения сопротивления фоторезистора имеет следующий вид:

$$\Delta R_{\text{фр}} = U_{\text{фр}} \frac{I}{I_{\text{ц}}(x)} - \frac{I}{I_{\text{ц}}(x_{\text{min}})}, \quad (3.42)$$

где  $U_{\text{фр}}$  - напряжение на фоторезисторе;  $I_{\text{ц}}$  - ток в цепи фоторезистора.

При малых освещённостях ток

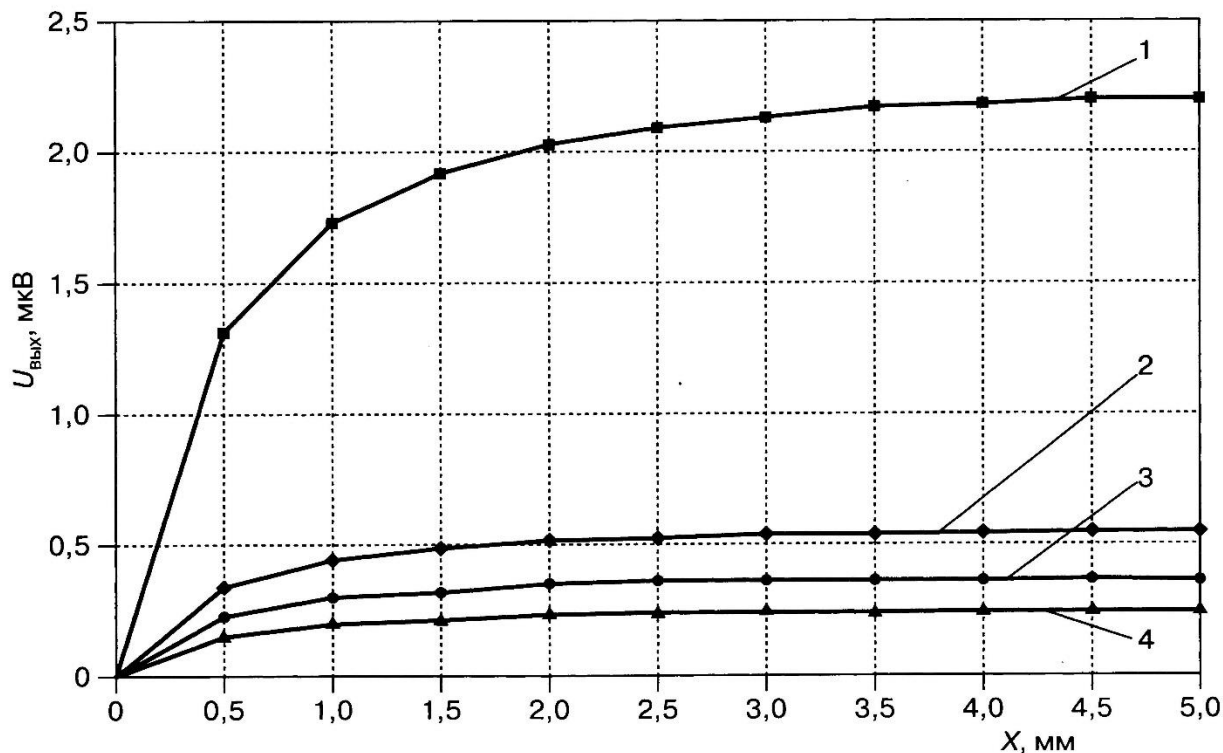
$$I_{\text{ц}} = I_{\text{ф}} = K_{\text{ф}} \Phi(x), \quad (3.43)$$

где  $I_{\text{ф}}$  - фототок терморезистора;  $K_{\text{ф}}$  - коэффициент пропорциональности;

$$\Phi(x) = I_0 \frac{S_{\text{осв}}(x)}{(x_0 + 2x)^2} \rho_1 e^{k_x(x_0 + 2x)}, \quad (3.44)$$

где  $I_0$  - сила света источника излучения;  $\rho_1$  - коэффициент отражения поверхности диска 4;  $k_x$  - коэффициент поглощения светового потока.

На рис.3.22 приведены статические характеристики оптоэлектронного преобразователя при различных коэффициентах отражения  $\rho_1$  диска 4. Максимальная чувствительность достигнута при  $\rho_1=0,1$ .



**Рис.3.22.** Сравнительная характеристика зависимостей выходного напряжения от перемещения: кривая 1 при  $\rho_1=0,1$ ; кривая 2 при  $\rho_1=0,4$ ; кривая 3 при  $\rho_1=0,6$ ; кривая 4 при  $\rho_1=0,9$ .

### 3.6. Динамические характеристики ОДПВ.

Учитывая высокие требования со стороны систем контроля уровнем и расходом к быстродействию преобразователей, важное значение имеет анализ динамические характеристик ОДПВ.

Для обобщенного анализа динамических характеристик ОДПВ можно использовать динамическую графовую модель с элементами, определяющими динамические режимы работы и представленными в операторной форме. В общем виде такая динамическая графовая модель ОЭПВС имеет вид, приведенный на рис.3.23.

На основании динамической графовой модели можно непосредственно записать передаточные функции отдельных элементов и всей конструкции ОДПВ.

$$W(p)=U_{\varepsilon}(p)/X_{\varepsilon x}(p)=U_{\varepsilon 1}(p)*W_{\varepsilon 1}(p)*[I_{\varepsilon 1}(p),\Phi_{01}(\theta,p)]*W_{\varepsilon 1}(p)* \\ *W_{02}(p)*K[\Phi_{02}(\theta,p)U_{\varepsilon 2}(p)*W_{\varepsilon 2}(p)]*K[X_{\varepsilon x}(p),T_{03}(p)*\Pi_{03}(p)], \quad (3.45)$$

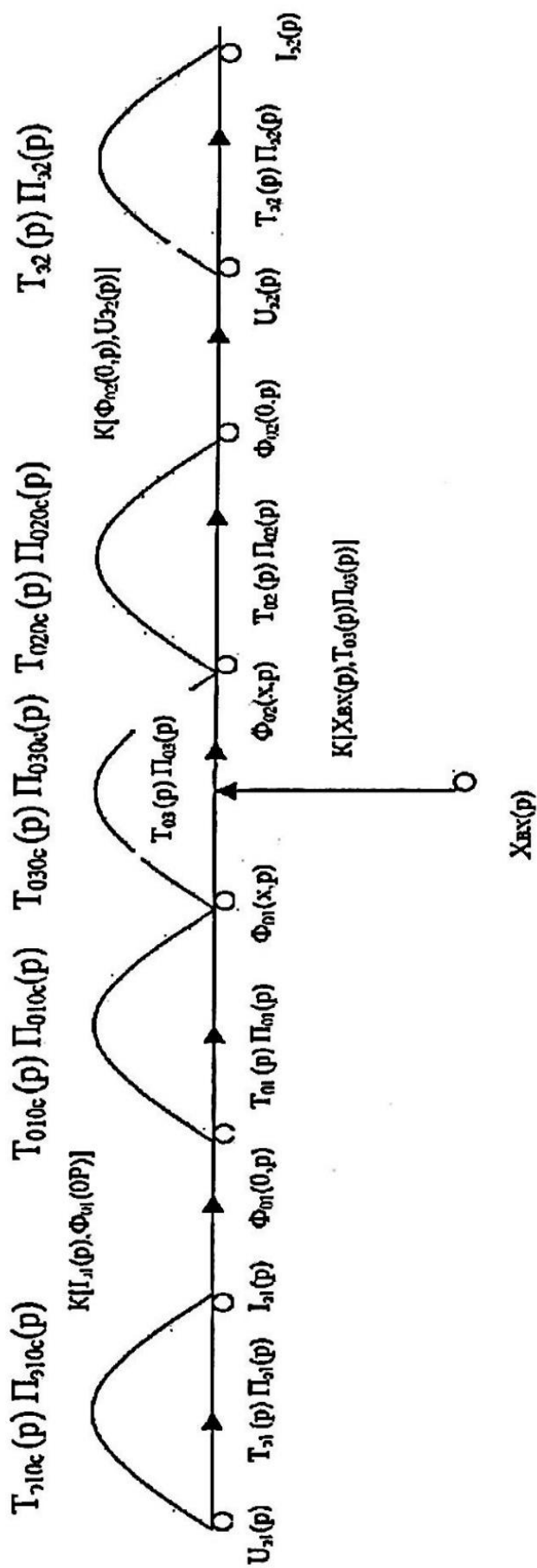
где:  $W_{\varepsilon 1}(p)$  – передаточная функция цепи источника излучения;

$W_{01}(p)$ ,  $W_{02}(p)$  – передаточные функции подводящих световой поток и отводящих световой поток оптических цепей;  $W_{\varepsilon 2}(p)$  – передаточная функция цепи приемника излучения.

Таким образом, можно считать, что при воздействии  $X_{\varepsilon x}$  в виде перемещения, уровня и других величин в ОДПВ реакция всей цепи преобразования определяется в основном динамическими свойствами цепи приемников излучения, динамические свойства которых в свою очередь определяются электрическими параметрами  $C_{\text{ни}}$  (емкостью) и  $R_{\text{ни}}$  (сопротивлением) соответствующего приемника излучения. С учетом вышеизложенного динамическая характеристика примет вид

$$W(p)=K[I_{\varepsilon 1},\Phi_{01}(\theta)]*K[\Phi_{02}(\theta),U_{\varepsilon 2}]*K[X_{\varepsilon x},T_{03},\Pi_{03}]*[R_{\text{ни}}/(C_{\text{ни}}*R_{\text{ни}}*p+1)] \quad (3.46)$$

Таким образом, динамическая характеристика ОДПВ в упрощенном виде соответствует апериодическому звену первого порядка и будет существенно проявляться при колебаниях измеряемой величины (уровня жидкости и при перемещениях) с большой скоростью.



**Рис.3.23.** Динамическая графовая модель ОДПВ:  $T_{010}(p)$ ;  $T_{020}(p)$ ;  $T_{030}(p)$  – схемные функции оптических цепей;  $T_{\varepsilon 10}(p)$ ,  $T_{\varepsilon 2}(p)$  – схемные функции электрических цепей источников и приемников излучения;  $P_{010}(p)$ ;  $P_{020}(p)$ ;  $P_{030}(p)$  – параметры оптических цепей;  $P_{\varepsilon 10}(p)$ ,  $P_{\varepsilon 2}(p)$  – параметры электрических цепей;  $K[L_1(p), \Phi_{01}(0,p)]$ ,  $K[\Phi_{02}(0,p), U_2(p)]$  – коэффициенты связей между оптическими и электрическими цепями.

Например, пусть колебания уровня жидкости происходят по синусоидальному закону:

$$H(t)=H_0+H \cdot \sin \omega t \quad (3.47)$$

Тогда выходной параметр ОДПВ будет изменяться по закону:

$$R_{\text{фр1}}(t) = R_{\text{фр1}} + \frac{R_{\text{фр1}}}{\sqrt{1+(T\omega)^2}} \cdot \sin(\omega t - f) \quad (3.48)$$

Если в ОДПВ предназначенных для контроля уровня жидкости  $T_{\text{поп}}$  (постоянная времени поплавка или поверхности жидкости) намного больше постоянной времени приемника излучения  $T_{\text{ни}} \quad T_{\text{нон}} \gg T_{\text{ни}}$ , то динамическая характеристика таких ОДПВ не окажет существенного влияния на результат измерения уровня. По аналогии с выражением (3.52) при большой частоте  $\omega$  следования импульсов (рис.3.14 б) амплитуда выходного сигнала в соответствии с (3.52) и может быть уменьшена в  $1+T^2\omega^2$  раз, а фаза сдвинута на угол  $f=\arctg T\omega$  при подсчете последовательности импульсов, при учете штучных изделий, скорости вращения диска и другие.

Известно [25], что постоянная времени  $T_{\text{фр}}$  фоторезисторов зависит от освещенности и от времени выдержки их в темноте. При длительной выдержке фоторезисторов в темноте постоянная времени нарастания фототока  $T_{\text{фрн}}$  увеличивается в 3-4 раза. Для фотодиодов постоянная времени определяется выражением

$$T_{\text{фд}}=R_n C(1+\beta_{\text{ф}} R_n), \quad (3.49)$$

где:  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $C$  – емкость  $p-n$  – перехода;  $\beta_{\text{ф}}$  – коэффициент преобразования звена обратной связи в структурной схеме фотодиода.

Значения постоянных времени для фоторезисторов составляет  $T_{\text{фр}}=0,08-0,2$  с, а для фотодиодов  $T_{\text{фд}}=10^{-5}$  с.

В ОДПВ с поперечным перемещением подвижного элемента при мгновенном освещении всего фоторезистора нарастание светового тока  $I_c(t)$  происходит согласно выражению

$$I_0(t) = I_c + I_{\text{ф}} (1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}), \quad (3.50)$$

где:  $I_H$ ,  $I_\Phi$  – соответственно темновой и фототок фоторезистора;  $t_H$ ,  $T_H$  – соответственно время нарастания фототока  $I_\Phi$ . При мгновенном частичном освещении полностью затемненного фоторезистора нарастание тока определяется из выражения

$$I_{\text{цн}}(t) = \frac{mU}{R_T \left[ K_c(1-m) \left( 1 - e^{-\frac{t_H}{T_H+m}} \right) \right] + mR_H}, \quad (3.51)$$

а спад тока при последовательном затемнении фоторезистора

$$I_{\text{цсп}}(t) = \frac{mU}{R_T \left[ K_T(m-1) \left( 1 - e^{-\frac{t_{\text{сп}}}{T_{\text{сп}}+1}} \right) \right] + mR_H}, \quad (3.52)$$

где:  $K_c = S_c/S$  – отношение освещенной части ко всей площади фоторезистора;  
 $t_{\text{сп}}$ ,  $T_{\text{сп}}$  – соответственно время спада и постоянно времени спада фототока;  
 $U$  – напряжение цепи;  $m$  – отношение темнового сопротивления к световому сопротивлению фоторезистора.

### 3.7. Исследование погрешностей ОДПВ.

Погрешности ОДПВ могут быть классифицированы по различным признакам:

- 1) по степени неопределенности;
- 2) в зависимости от условий работы;
- 3) в зависимости от источника и причин возникновения и т.д.

По степени неопределенности погрешности делятся на систематические и случайные, а в зависимости от условий работы – на основные и дополнительные (рис.3.24). Источники основной погрешности имеют место при нормальных условиях эксплуатации, т.е. при неизменных условиях работы, а именно: при номинальном напряжении питания и токе, нормальной температуре окружающей среды, отсутствии внешних физических полей электромагнитных, электрических, тепловых и других. Источники дополнительных погрешностей проявляются при отклонении от нормальных условий эксплуатации [39, 71].

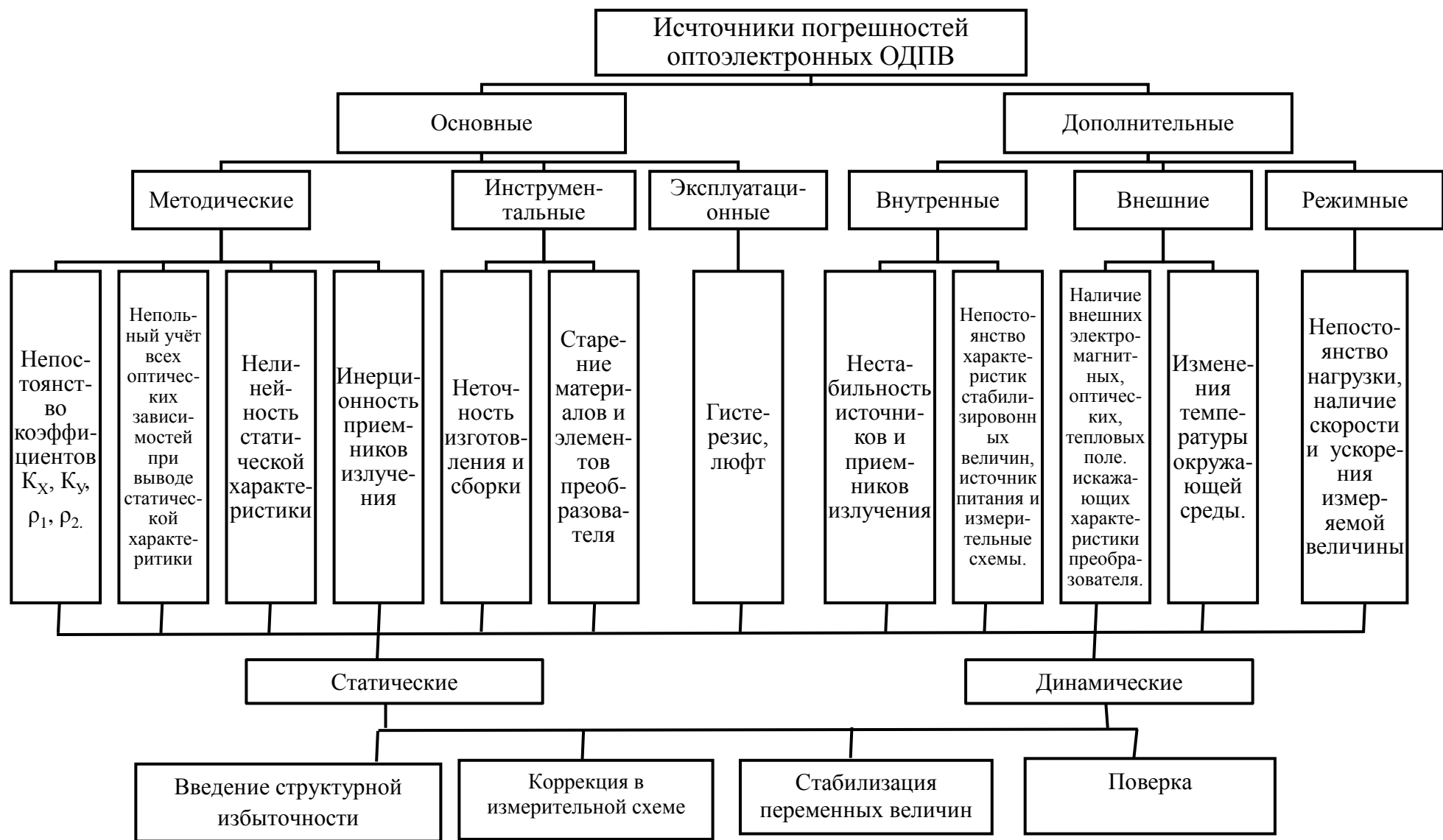


Рис.3.24. Классификация источников погрешностей ОДПВ.

В свою очередь, источники основной погрешности делятся на методические, инструментальные и эксплуатационные, а дополнительные на внутренние, внешние и режимные.

Методические источники погрешностей заключаются, прежде всего, в неполном учете известных и неизвестных закономерностей при выводе статической характеристики ОДПВ. Кроме того, к методическим погрешностям ОДПВ следует отнести нелинейность статических характеристик и их инерционность. Методические погрешности в большинстве случаев могут быть учтены при настройке, и поэтому их можно отнести к систематическим погрешностям.

Инструментальные источники основной погрешности зависят от совершенства изготовления собственно преобразователя и составляющих его элементов, конструктивных особенностей, а также совершенством технологии производства, тщательностью изготовления элементов и узлов, их сборки и наладки и др.

Эксплуатационные источники основной погрешности проявляются из-за гистерезиса характеристики преобразователя, люфта между подвижными деталями конструкции, из-за старения деталей конструкции и др.

К внутренним источникам дополнительной погрешности относятся нестабильность источников и приемников излучения и других элементов преобразователя.

Инструментальные погрешности вызываются отклонением поперечных и продольных размеров световодов при неточном изготовлении или обработке. Это приводит к погрешности воспроизведения заданных размеров вдоль световода.

В ОДПВ неточность или непостоянство диаметра световода приводит к возникновению погрешности. Выше было показано (глава 3), что с увеличением длины световода влиянием изменения  $d$  и  $L$  в соответствующих преобразователях, можно пренебречь.

К инструментальным источникам погрешностей следует отнести неточность установки приемников и источников излучения.

В ОДПВ погрешность из-за неточности сборки имеет место при установке ИИ и ПИ не по оси полого световода (не соосность), при неперпендикулярности светочувствительной поверхности приемника излучения к прямому световому потоку. При использовании волоконно-оптических устройств (ВОУ), квантующих световой поток неточность изготовления торцов волоконных световодов и смещение квантов относительно оптической щели полого световода. Для ОДПВ с дискретным выходным сигналом абсолютная суммарная погрешность от неточности изготовления волоконно-оптического не превышает половины шага квантования.

$$\Delta=0,5h_{кв} \text{ или } =0,6*10^{-3}м \quad (3.53)$$

Погрешность от неточности изготовления ОДПВ для преобразователя перемещений в диапазоне  $(0*400) * 10^{-3}м$  не превышает 0,15%. При этом, уменьшение высоты квантующих элементов позволило существенно уменьшить эту погрешность. Кроме рассмотренных, для ОДПВ, используемых для получения информации о перемещениях столба (уровня) жидкости, концентрации растворов, прозрачности их и др. могут иметь место погрешности вследствие отклонения установки преобразователей от вертикальной, величины которых определяется углом отклонения. Величина относительной погрешности преобразователя в пределах  $20^\circ$  не превышает значения до 0,08%.

Наиболее значительно проявляются погрешности при колебаниях температуры внешней и контролируемой среды при колебаниях влажности, давления, при наличии вблизи преобразователей различных физических полей: электромагнитных, тепловых, световых, а также при наличии значительных источников излучения.

Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению электрических сопротивлений приемников излучения, активных сопротивлений. Кроме того, изменяются параметры и геометрические размеры световодов.



Проанализируем статическую характеристику ОДПВ через общее выражение типа:

$$U_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}}, R_{\text{ФД}}, \alpha_{\text{ФД}}, I, \rho_1, \rho_2, D, D_0, L) \quad (3.54)$$

где  $R_{\text{ФД}}, \alpha_{\text{ФД}}$  - сопротивление и температурный коэффициент сопротивления фотодиода;  $I$  - сила света;  $\rho_1, \rho_2$  - коэффициенты отражения;  $D, D_0$  - Диаметры полого световода и отверстия диафрагмы;  $L$  - длина полого световода.

Зависимость  $R_{\text{ФД}}$  от температуры  $T$  выражается формулой:

$$R_{\text{ФД}} = AR_0 e^{-\frac{B}{T}} \quad (3.55)$$

где  $A$  и  $B$  - коэффициенты.

Эту зависимость можно линеаризовать и привести к виду:

$$R_{\text{ФД}} = R_0(1 - \alpha_0 \Delta T) \quad (3.56)$$

где  $\alpha_0$  - температурный коэффициент,  $R_0$  — значение сопротивления при начальной температуре.

С целью упрощения анализа при небольшом диапазоне изменения температуры  $\Delta T$  изменениями  $I, \rho_1, \rho_2, D, D_0, L$  - пренебрегаем.

Температурная погрешность ОДПВ в основном определяется температурной чувствительностью приемника излучения и мостовой схемы к изменениям  $T$  и может быть представлена в виде:

$$\gamma_T = \frac{dF}{dR_{\text{ФД}}} \frac{dR_{\text{ФД}}}{dT} \Delta T = -\alpha_0 R_0 \frac{dF}{dR_{\text{ФД}}} \Delta T = K_T \Delta T \quad (3.57)$$

где:  $F$  - функция преобразования измерительной схемы,  $K_m$  - температура чувствительности ОДПВ.

Оценку суммарной погрешности ОДПВ целесообразно произвести на основе положения информационной теории измерительных устройств [15, 20], с точки зрения которой погрешность измерительных устройств однозначно определяется значением энтропийной погрешности ( $\Delta_s$ ), а энтропийный коэффициент  $K$ , зависит от вида закона распределения плотности вероятности погрешностей элементов.

$$\Delta_s = K_\sigma * \sigma_\Sigma$$

Значение суммарной среднеквадратической погрешности  $\sigma_{\Sigma}$  для ОДПВ, состоящих из " $n$ " элементов, определяется из выражения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2 + \sigma_n^2} \quad (3.58)$$

$\sigma_i$ - среднеквадратическая погрешность  $i$  – го элемента ОДПВ.

Определим расчетное значение погрешности ОДПВ на основе структурной схеме (рис.3.16). Ниже анализируются основные элементы ОДПВ с точки зрения возможных источников погрешностей: фоторезистор (ФР); мостовая измерительная схема ИС; операционный усилитель Ус и реле Ре результатов измерения  $y$  к.

ФР имеет аддитивную погрешность, нормированную предельным значением  $\gamma_{\text{фр}}=0,2\%$ . ФР подключен к мостовой измерительной схеме ИС, также имеющую аддитивную погрешность  $y_{\text{ис}}= 0,1\%$ .

Измерительная схема ИС питается от стабилизатора СТ, который с усилителем Ус питается от общего блока питания БП. В качестве Ус используется операционный усилитель, который линеаризует статическую характеристику и имеет большое входное сопротивление. Выходной элемент ОДПВ – электромагнитное реле Ре.

Прежде всего, разделим все составляющие погрешности на аддитивные и мультипликативные и в соответствии с законом распределения найдем их среднеквадратические отклонения. Все расчеты выполняются в относительных приведенных значениях и при промежуточных округлениях сохраняется один лишний недостоверный десятичный знак в их значениях.

Пусть аддитивная погрешность всего комплекта преобразователя обусловлена аддитивными погрешностями ФР, ИС и Ре, а мультипликативная - колебания напряжения питания ИС и Ус, а также зависимостью от температуры чувствительности усилителя Ус и реле Ре. Закон распределения погрешности ФР можно принять нормальным с энтропийным коэффициентом  $K_{\text{фр}}=2,07$  [4]. Отсюда среднеквадратическое отклонение (СКО) равно:

$$\sigma_{\text{фр}} = \frac{\gamma_{\text{фр}}}{K_{\text{фр}}} = \frac{0,2}{2,07} = 0,097\% \quad (3.59)$$

Аналогично для измерительной схемы ИС при нормальном законе распределения погрешности имеем:

$$\sigma_{\text{ис}} = \frac{0,2}{2,07} = 0,048\% \quad (3.60)$$

Погрешность электромагнитных реле по стандарту указывается с запасом на старение. Поэтому предельную погрешность  $P_e$  можно оценить значением  $\gamma_{\text{pe}}=0,8\gamma_k$  где  $\gamma_{\text{pe}}$  - основная погрешность, соответствующая классу точности.

Отсюда  $\gamma_{\text{pe}}=0,8*0,5=0,40\%$ . Закон распределения погрешностей электромеханических приборов близок к трапецеидальному с энтропийным коэффициентом  $K_{\text{ук}}=1,9$ . Поэтому  $\sigma_{\text{pe}} = \frac{\gamma_{\text{pe}}}{1,9} = \frac{0,40}{1,9} = 0,21\%$ . Аддитивная погрешность прибора будет образована суммой трех составляющих. Поэтому СКО погрешности нуля ОДПВ составит:

$$\sigma_{\text{н}} = \sqrt{\sigma_{\text{фр}}^2 + \sigma_{\text{ис}}^2 + \sigma_{\text{pe}}^2} = \sqrt{0,097^2 + 0,048^2 + 0,21^2} = 0,236\% \quad (3.61)$$

Для определения энтропийного коэффициента суммы этих погрешностей необходимо обратиться к кривым зависимости энтропийных коэффициентов от относительных весов дисперсии.

Относительный вес дисперсии трапецеидального распределения в суммарной дисперсии составляет  $P = \frac{\sigma_{\text{pe}}^2}{\sigma_{\text{н}}^2} = \frac{0,21^2}{0,236^2} = 0,79$ . При этом значение  $P$  величина  $K_a=2,0$ . Отсюда энтропийное значение погрешности нуля ОДПВ составит:

$$\gamma_{\text{н}} = K_{\text{н}}\alpha_{\text{н}} = 2,00 * 0,236 = 0,47\% \quad (3.62)$$

Переходя к суммированию мультипликативных погрешностей, примем следующие исходные данные. Пусть коэффициент влияния температуры на чувствительность  $P_e$  равен  $\phi_{\text{pe}}=0,2\%10^\circ\text{K}$  и усилителя  $\phi_{\text{yc}}=+0,1\%10^\circ\text{K}$ .

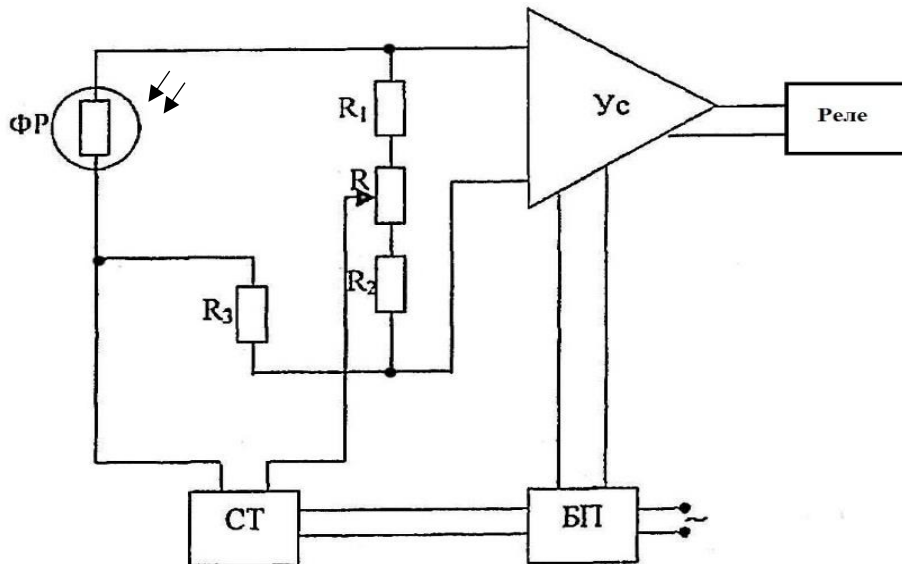


Рис.3.25. Измерительная схема ОДПВ.

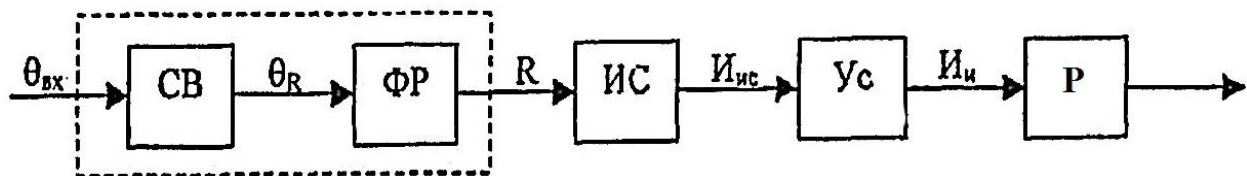


Рис.3.26. Структурная схема ОДПВ.

Если усилитель располагается в корпусе указателя, то оба они находятся всегда при одной и той же температуре и, следовательно, их температурные погрешности достаточно жестко коррелированы между собой и должны суммироваться не геометрически, а алгебраически. Отсюда результирующий коэффициент влияния температуры равен  $\varphi_{\theta} = -0,2 + 0,1 = -0,1\% 10^{\circ} K$ .

Предположим, что ОДПВ предназначен для работы в цеховых условиях при температуре от +5 до +35 °С, т.е. при температуре  $(20 \pm 15)^{\circ} C$  и все значения температур равновероятны. Тогда температурная составляющая мультипликативной погрешности имеет равномерное распределение

$$\gamma_{\theta_m} = 0,1 * \frac{15}{10} = 0,15\% \quad (3.63)$$

и

$$\sigma_{\theta} = \frac{\gamma_{\theta}}{K_{\theta}} = \frac{0.15}{1.73} = 0.087\% \quad (3.64)$$

Пусть колебания напряжения сети, от которой питается рассматриваемый ОДПВ, находятся в пределах  $\pm 10\%$  и имеют треугольный закон распределения вероятности. ИС питается через стабилизатор с коэффициентом стабилизации  $K=25$ . Тогда колебания напряжения питания ИС, а следовательно, и мультипликативная погрешность его выходного напряжения имеют также треугольные распределения в пределах  $y_{ис}=10/25=0,40\%$  с СКО:

$$\sigma_{ист} = \frac{\gamma_{ист}}{\sqrt{6}} = \frac{0,4}{\sqrt{6}} = 0,163\% \quad (3.65)$$

Ус питается нестабилизированным напряжением, но благодаря глубокой отрицательной обратной связи коэффициент влияния питающего напряжения на коэффициент усиления снижен до значения  $\Psi_{\theta ус} = 0,3/[10(\Delta U/U)]$ . Поэтому мультипликативная погрешность ОДПВ, вызванная случайным колебанием напряжения питания, будет распределена также по треугольному закону в пределах  $y_{уст} = \pm 0,30\%$  с СКО

$$\sigma_{ист} = \frac{\gamma_{ист}}{\sqrt{6}} = 0,3\sqrt{6} = 0,122\% \quad (3.66)$$

Так как обе погрешности от колебания напряжения вызываются одной и той же причиной, то они коррелированы между собой и складываются алгебраически, а не геометрически, хотя каждая из них случайна. Поэтому:

$$\begin{aligned} y_{ит} &= y_{уст} + \gamma_{\theta м} = 0,3 + 0,4 = 0,7\% \\ \sigma_{и} &= \sigma_{уст} + \sigma_{ист} = 0,122 + 0,163 = 0,285\% \end{aligned} \quad (3.67)$$

Погрешности от колебания температуры и колебания напряжения независимы и поэтому складываются геометрически, т.е. с СКО мультипликативной составляющей:

$$\sigma_{м} = \sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_{\theta}^2} = \sqrt{0,285^2 + 0,087^2} = 0,298\% \quad (3.68)$$

Суммарная погрешность ОДПВ складывается из аддитивной и мультипликативных погрешностей по правилам суммирования независимых погрешностей:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{н}^2 + \sigma_{м}^2} = \sqrt{0,236^2 + 0,298^2} = 0,38\% \quad (3.69)$$

Энтропийные коэффициенты суммируемых погрешностей  $K_n=2,00$  и  $K_m=2,04$  достаточно большие и их СКО близки между собой

$$\sigma_n = 0,236 \text{ и } \sigma_m = 0,298 \quad (3.70)$$

поэтому можно сделать вывод, что общий энтропийный коэффициент  $K_\Sigma=2,07$

$$\text{и } \Delta_{\text{ОДПВ}} = 2,07 * 0,38 = 0,79\% \quad (3.71)$$

Таким образом, можно принять класс точности ОДПВ не превышающим 1,0 %.

### **3.8. Надежность современных оптоэлектронных элементов с волоконными и полыми световодами.**

Прогресс современной техники, расширение круга задач, возложенных на системы управления, высокие требования к точности помехозащищённости, быстродействие привели к усложнению систем, предназначенных для выполнения комплекса задач. Но усложнение системы резко снижает надежность современного управления.

Ненадежность не только резко снижает эффективность использования системы, но и приводит к огромным экономическим потерям, неоправданному повышению стоимости эксплуатации аппаратуры, резко снижает надежность современного оптоэлектронного оборудования. Низкая надежность приводит к тому, что стоимость эксплуатации такого оборудования в течение одного года превышает в несколько раз стоимость самого оборудования, что приводит к огромным экономическим потерям и резко снижает эффективность использования системы.

Возникновение проблем надежности обусловлено, главным образом, следующими причинами: повышением ответственности функций, выполняемых аппаратурой - так называемой ценой отказа; ростом сложности аппаратуры; отставанием качества элементов от их количественного применения.

Рассмотрим одну из основных проблем надежности, ОЭЭ связанную с усложнением технических объектов. Тенденция функционально - структурного усложнения технических объектов (переходом к качественно новым методам, обеспечивающим повышение производительности, быстродействие, точность и

улучшающие другие свойства). Объективной «платой» за качественное совершенствование, является возрастание структурной сложности. Практика проектирования показывает, что темпы роста сложности технических систем находятся в противоречии с требованиями по их безотказной работе даже в случае применения самой современной элементной базы. Дело не только в увеличении количества компонентов, сложность систем повышается за счет развития многофункциональности и объединения традиционных методов и техники с методами и техникой вычислительных комплексов, на которые возлагаются функции обработки и анализа данных для принятия решений по изменению режимов работы системы в целом. Решение задач эффективного управления качеством систем возможно на основе методов теории надежности.

Вторая проблема связана с необходимостью предварительного учета влияния на систему при ее эксплуатации различных факторов объективного характера, параметры которых могут меняться в значительных диапазонах. Возникает задача изучения, нормирования и выработки рекомендаций по нейтрализации их воздействий.

Третья проблема связана с ростом количества элементов, используемых в системе. Этот рост требует повышения их качества. Исследования в этом направлении дали следующий результат-увеличение надежности элементов резко отстает от роста сложности системы.

Четвертая проблема - ответственность функций, выполняемых системой. В связи с комплексной автоматизацией производственных процессов на управляющие устройства возлагаются исключительно ответственные задачи, которые должны решаться безотказно в течение всего периода работы системы.

Анализ оценки и основных способов повышения надежности современных оптоэлектронных элементов с волоконными и полыми световодами являются следующие:

- Наиболее рациональными способами повышения надежности на стадии проектирования является резервирование и использование систем встроенного автоматического контроля, предназначенных для сокращения времени

устранения неисправностей и прогнозирования отказов, а также для автоматического включения резервных элементов;

- Выбор наиболее надежных элементов. Выбор того или иного типа элемента должен быть связан с анализом технических требований к надежности;

- Облегчение режимов работы элементов. Улучшить условия работы элементов можно, во-первых, уменьшая вредное влияние окружающей среды и внешних воздействий и, во-вторых, облегчая электрические режимы работы;

- Создание систем с ограниченными последствиями отказов элементов. Отказы элементов сложной системы не равноценны. Одни отказы приводят к потере работоспособности, другие лишь ухудшают характеристики системы, третьи нарушают контроль человека за работой системы и т.д.;

- Стандартизация и унификация элементов. Унифицированные и стандартизованные системы всегда более надежны. Это объясняется тем, что такие системы, как правило, доведены до совершенства на основании богатого опыта эксплуатации;

- Тренировка и отбраковка элементов с внутренними дефектами. Тренировкой элементов достигается сокращение этапа приработки, характеризующегося повышением интенсивностью отказов. Элементы с внутренними дефектами часто отбраковывают при тяжелых условиях работы;

- Организация текущего и выходного контроля. Текущий контроль обычно производится на различных стадиях сборки и наладки системы. Качество этого контроля оказывает существенное влияние на надежность системы;

- Выходной контроль элементов, поступающих со смежных предприятий. При их производстве, могут быть допущены отклонения от заданной технологии производства, а, следовательно, отклонения характеристик от номинальных значений;

- Правильный выбор изоляционных материалов. Они должны выдерживать механические и электрические нагрузки во всех диапазонах эксплуатационных



условий. При выборе материалов необходимо учитывать, как конструктивные, так и производственно-экономические факторы;

- Удобство технического обслуживания и восстановления. Важным эксплуатационным требованием к системе является удобство технического обслуживания и восстановления. Поэтому при конструировании должны предусматриваться:

- встроенные датчики, позволяющие проверять параметры системы;
  - комплекс удобной, легкой и достаточно точной измерительной аппаратуры;
  - легкий и свободный доступ к элементам системы, исключающий повреждение других элементов при замене отказавших;
  - простота операций при настройке и регулировке системы;
- Испытания опытных образцов. Целью испытаний опытных образцов является выявление слабых с точки зрения надежности элементов системы, недостаточная надежность которых обусловлена ошибками проектирования.

### **Виды механизмы и причины отказов современных оптоэлектронных элементов.**

**Таблица 3.1.**

<b>Виды отказов</b>	<b>Механизмы отказов</b>	<b>Причины отказов</b>
Деградация спектрофотометрических параметров излучателей	Деградация внутреннего квантового выхода, увеличение концентрации центров безизлучательной рекомбинации, диффузия примесей и дефектов к переходу	Перегрузка по току, ионизирующее излучение, дефекты в объеме полупроводника, механическое воздействие на кристалл
	Старение материалов оптических сред, уменьшение коэффициента пропускания света	Превышение температуры, тепловое старение полимеров, ионизирующее излучение
	Отслоение оптических сред от кристалла, изменение коэффициента пропускания света	Превышение градиента температуры, несоответствие материалов по КТР

Увеличение темнового тока фотоприемника	Накопление заряда на поверхности фотоприемника, инверсия знака проводимости	Наличие влаги и загрязнений внутри корпуса, негерметичность
Обрыв проволочных соединений	Механические усилия, возникающие при смене температуры, усталостные явления	Превышение градиента температуры, несоответствие материалов по КТР, низкая прочность соединений
	Коррозия металлизации	Наличие влаги и загрязнений внутри корпуса, негерметичность
	Электромитация	Электрическая перегрузка
	Обрыв из-за механических воздействий	Превышение пределов стойкости к механическим воздействиям, низкая прочность соединений

На надежную работу ОЭЭ оказывают влияние, параметры и характеристики излучателей, оптических разъемов, кабеля, фотоприемника. Для получения оптимального согласования излучателя с оптическим волокном необходимо, чтобы излучатель отвечал ряду требований. Это прежде всего малая излучающая площадка, соизмеримая с диаметром волокна, что обеспечивает высокую энергетическую яркость источника; длина волны излучения, соответствующая минимальному поглощению света при его прохождении по волокну; возможность простой стыковки излучателя с волокном; сохранение излучающих характеристик в заданном диапазоне температур и сохраняемость изделия при воздействии различных механических факторов.

Основным параметром при стыковке источников излучения с оптическими волокнами является коэффициент ввода излучения  $\eta = \eta_s \eta_\phi$ , где  $\eta_s = S_e / S_n$  – коэффициент ввода излучения по площади;

$$\eta_\phi = \frac{\int_0^{\theta_{кр}} Q_v(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} Q_v(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (3.72)$$

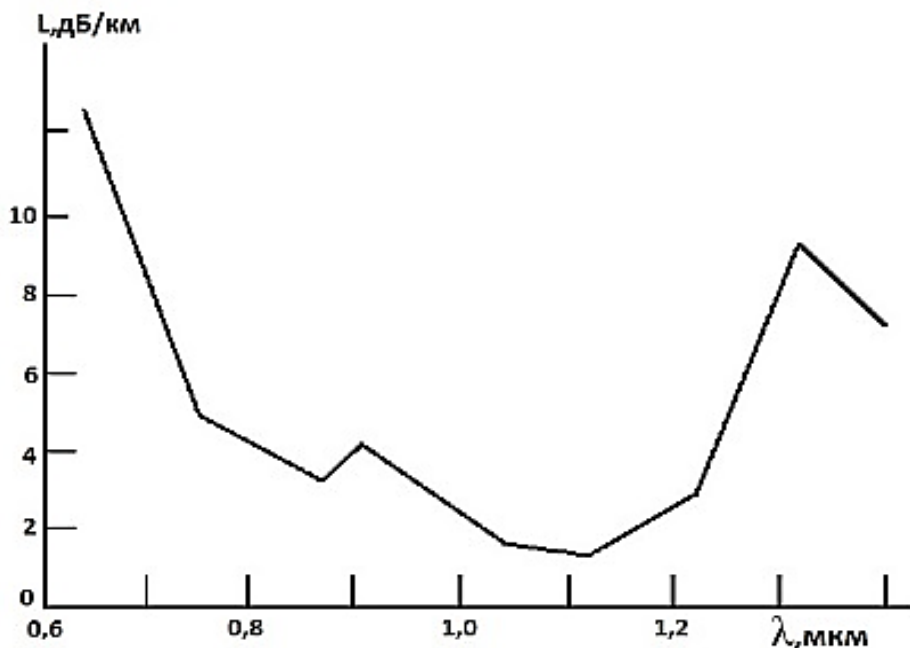
1- коэффициент ввода излучения по углу;  $S_e$  - площадь поперечного сечения волокна;  $S_n$  - площадь излучающей площадки диода;  $Q_v(\theta)$ -световая энергия;  $\theta$  –угол.

Мощность излучения, введенная в волокно, сильно зависит от числовой апертуры волокна:

$$P_c = F_y \left( \frac{n+1}{2} \right) \frac{S_{сц}}{S_{ист}} (NA)^2 P_{ист}, \quad (3.73)$$

где  $P_c$  - мощность излучения, вводимая в световод;  $P_{ист}$  - мощность, излучаемая источником;  $F_y$  - коэффициент заполнения;  $S_{сц}$  - площадь сердцевины волоконного световода;  $S_{ист}$  - активная площадь источника,  $n$  - показатель диаграммы излучения  $(\cos \theta)^n$ ;  $NA = n \cdot \sin \theta = (n_2^2 - n_1^2)^{1/2}$  - числовая апертура;  $n_1$  - коэффициент преломления оболочки волокна;  $n_2$  - коэффициент преломления сердцевины волокна.

Значения  $NA$  обычно лежат в пределах 0,15-0,50. С увеличением  $NA$  растет дисперсия для светодиодов, что ограничивает практически достижимые значения эффективности ввода излучения при использовании максимально возможных значений  $n$ .



**Рис.3.27.** Кривая ослабления сигнала в стеклянном волокне для различных длин волн.

Показатель  $n$  для светодиодов равен единице, а для лазеров и СИД со встроенными линзами величина  $n$  может принимать значения 2-4, поскольку инжекционные лазеры имеют суженные диаграммы направленности. Повысить

коэффициент ввода излучения СИД можно также, изменяя геометрию излучателя. Выходная мощность излучателя сосредоточена в пучке с угловыми размерами  $120^\circ \times 40^\circ$  (для диодов с активной краевой поверхностью) или соответствует ламбертовской диаграмме направленности (для диодов с активной плоской поверхностью).

Потери на ввод излучения в оптическое волокно достигают значительной величины, например, для оптического волокна с числовой апертурой 0,14 потери составляют около 14 дБ для излучателей с вводом излучения вдоль ***p-n***-перехода (краевых излучателей) и 19 дБ для поверхностных излучателей. Краевые излучатели позволяют получать более высокую эффективность сопряжения с волокном, чем диоды с активной плоской поверхностью, однако меньшая эффективность сопряжения с волокном с избытком компенсируется их более высокой мощностью излучения.

## **4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ И ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ.**

### **4.1. Общие вопросы проектирования ОДПВ и устройств на его основе.**

Проектирование ОДПВ и устройств на его основе состоит из двух этапов: первый - это этап выбора структуры преобразователя и второй - этап выбора параметров преобразователя. При этапе структурного проектирования для заданных исходных данных необходимо выбрать оптимальную структуру конструкции ОДПВ с продольным или поперечным перемещением внешнего модулирующего тела. Как правило, исходные данные охватывают основные требования и приводятся с конкретными числовыми данными. Это - диапазон перемещений, точность показаний, чувствительность, надежность и другие. Кроме основных требований могут быть указаны дополнительные требования, связанные с условиями монтажа, эксплуатации и области применения. Выбор структуры измерительного преобразователя, как показано ниже, осуществляется на основе морфологических таблиц элементов ОДПВ. После выбора структуры осуществляется переход к параметрическому проектированию с целью проектирования оптимальных параметров для выбранной структуры ОДПВ. На этом этапе критерии оптимизации составляются на основе математических моделей, полученных в главе 2. Критерии оптимизации отображают основные требования к ОДПВ, например, это могут быть максимум чувствительности, максимум точности, минимум времени переходного процесса и другие [2, 9, 32, 33].

Для выбора конструкции ОДПВ необходимо создать банк известных основных элементов ОДПВ; и тогда выбор конкретной конструкции ОДПВ соответствующей заданным требованиям, будет сведен к выбору из банка разработанных.

Все элементы ОДПВ ранжируются в морфологической таблице по показателям качества. Приняты следующие показатели качества ОДПВ: 1 –

чувствительность; 2 – цена; 3 – надежность; 4 – погрешность; 5 – линейность; 6 – диапазон по входу; 7 – потери в Вт; 8 – быстродействие; 9 – экологичность; 10 – вес.

В морфологических таблицах ОДПВ даются технические реализации соответствующих элементов.

Можно выделить следующие виды источников излучения: сосредоточенный, распределенный на торце, сосредоточенный с волоконным световодом, кольцевой, дискретный и другие.

Приемники излучения тоже делятся на различные виды: кольцевой, дискретный, кольцевой с сосредоточенный волоконным световодом, распределенный с волоконным световодом и другие.

Внешнее модулирующее тело (продольно или поперечно перемещающееся) может быть представлено в виде: пластины или диска с отражающей поверхностью, пластины или диска с рассеивающей поверхностью, шарообразной с отражающей поверхностью, шарообразной с рассеивающей поверхностью, конусообразной поверхностью и другие.

При выборе оптимальных конструкций ОДПВ, выделив основные элементы, необходимо рассмотреть возможные варианты комбинаций этих элементов в единой структуре для получения новых конструкций ОДПВ. Следует указать, что выбор структуры на основе морфологических таблиц путем ранжирования вариантов элементов конструкций, еще не дает окончательную конструкцию, так как на этом этапе имеет место преимущественно механическое соединение основных элементов. Однако, уже на этом этапе можно определить несколько (первые 2-3) исходных структур ОДПВ для дальнейшей разработки. Для выбора окончательной структуры ОДПВ (рис.4.1) необходимо полученные первые 2-3 конструкции сравнить с имеющимися аналогами и прототипами в сочетании с применением обобщенных приемов. При этом важно иметь в виду, что новая конструкция ОДПВ должна быть на уровне лучших отечественных и мировых образцов, а это возможно, если найденная структура ОДПВ будет на уровне изобретения.

И только после этого целесообразно проводить ее расчет и проектирование.

В настоящее время широко выпускаются элементы оптико-электронных преобразователей: волоконные световоды, источники и приемники излучения, соединители, ответвители, модуляторы и другие, что обеспечивает высокую эффективность их применения. Однако, ввиду того, что ОДПВ до настоящего времени не были достаточно исследованы и разработаны, недостаточно внимания уделялось разработке и применению основных элементов и особенно полых и волоконных световодов в ОДПВ. Поэтому целесообразно рассмотреть кратко основные требования к элементам ОДПВ.

Основные требования к источникам излучения ОДПВ: низкая мощность, надежность, воспроизводимость характеристик, малые габариты, масса, доступная цена, а также соответствующие спектральные характеристики для согласования с приемником излучения, удобство и эффективность ввода излучения в световод.

Основные требования к приемникам излучения ОДПВ: высокая чувствительность, согласование спектральной характеристики с источником излучения, высокое быстродействие, удобство и эффективность сопряжения со световодом, а также малые габариты, масса и цена.

Основные требования к полым и волоконным световодам высокая точность геометрических размеров (диаметр, толщина стенки, длина), высокая точность выполнения качества внутренней и внешней поверхности, высокое качество материалов, из которых изготавливаются полые и волоконные световоды, надежность при механических воздействиях (растяжение, сжатие, вибрация), безопасность и огнестойкость и другие.

Высокие требования предъявляются и к другим элементам конструкции: экранам, внешним модулирующим диафрагмам, щелям в полном световоде, оптическим линзам и другим элементам.

Результаты разработки и исследования ОДПВ показывают, что источниками излучения, выпускаемыми стандартно пригодными для работы в

комплекте ОДПВ, являются: лампы накаливания, газоразрядные лампы, светодиоды, лазерные диоды и другие. Таким требованиям, как высокий срок службы, высокая мощность излучения, высокий уровень распределения светового потока вдоль световода наиболее полно удовлетворяют лампы (миниатюрные лампы) накаливания и светодиоды. Они имеют низкую цену, просты по конструкции, надежны в эксплуатации и обеспечивают длину волны в диапазоне  $\lambda = 0,8 - 1,6 \text{ мкм}$ , что хорошо согласуется со многими преемниками излучения. Поэтому в большинстве конструкций ОДПВ целесообразно использовать лампы накаливания и светодиоды.

Высоким требованиям работы в конструкции ОДПВ удовлетворяют приемники излучения, такие как фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, матричные фотоприемные устройства и ПЗС, которые, как указывалось выше, хорошо согласуются с источниками излучения при длине волн  $\lambda = 0,36 - 1,6 \text{ мкм}$ .

Среди измерительных схем ОДПВ наиболее распространенными являются делительные и мостовые измерительные схемы. В этих достаточно простых схемах происходит предварительная обработка сигнала о контролируемой величине. При том входной сигнал ОДПВ может содержать наряду с полезным сигналом и неинформативные сигналы (помехи). Поэтому выходной дискретный сигнал ОДПВ необходимо тщательно обработать, используя ряд современных средств: фильтрацию, сглаживание, линеаризацию, распознавание «образа» контролируемой величины и другие. С учетом сложности объекта контроля и технологического процесса, в условиях которого функционирует ОДПВ, актуальным является применение микропроцессорных измерительных систем для обработки сигналов ОДПВ и повышения точности контроля объекта.

## **4.2. Структурное проектирование ОДПВ.**

На рис.4.1 приведена схема алгоритма выбора структуры ОДПВ. Выбор структуры ОДПВ начинается вводом требований (блок 1). Требованиями, как было указано в главе 1, являются: высокая чувствительность, высокое быстродействие, широкий диапазон преобразований, высокая надежность,



большая эффективность, низкая стоимость, малые габариты, малая масса и технологичность изготовления.



**Рис.4.1.** Схема алгоритма выбора структуры ОДПВ.

На основании морфологических таблиц: 4.1; 4.2; 4.3; 4.4 выбираются варианты элементов ОДПВ: источники и приемники излучения; световоды и внешние модулирующие тела [75].

Указанные морфологические таблицы обобщенные приемы оказались эффективными при разработке дискретных преобразователей уровня, расхода, перемещений и других устройств на основе ОДПВ.

Таким образом, с помощью предложенной методики производится формирование вариантов структуры ОДПВ, из которых выбираются первые 2-3 предпочтительных конструкции, сравнивающиеся с аналогами и прототипами. При отсутствии существенного отличия применяют обобщенные приемы и, изменяя структуру, достигают соответствия конструкции как поставленным требованиям, так и требованиям существенной новизны.

Если же эти требования не выполняются, то, варьируя опять обобщенными приемами и изменяемыми элементами, достигаем совершенствования конструкции ОДПВ до соответствия предъявленным требованиям. Улучшения у проектируемых ОДПВ можно добиться изменением геометрических форм и размеров световодов, источников и приемников излучения, физических свойств, среды, материалов, элементов, параметров измерительной системы, а также применением новых материалов и технологий изготовления.

### **Пример выбора структуры ОДПВ**

В главах 2, 3 приведены математические модели и основные характеристики ОДПВ с кольцевым приемником излучения и продольно перемещающимся внешним модулирующим телом в виде светоотражающих или светопоглощающих пластинок. Так же было показано, что при продольном перемещении светоотражающего тела начальный диапазон изменений светового потока  $\Phi_0(x)$  имеет высокую чувствительность в диапазоне 0-1 мм и на этой основе можно разработать дискретный преобразователь перемещений на основе ОДПВ.

Для выбора структуры дискретного преобразователя перемещений по вышеизложенной методике (рис.4.1) были разработаны соответствующие морфологические таблицы (4.1, 4.2, 4.3, 4.4) элементов ОДПВ: источника

Таблица 4.1.

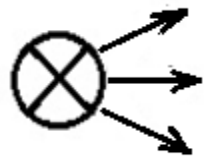


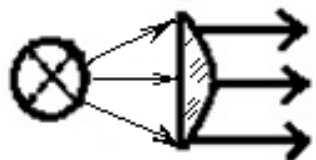
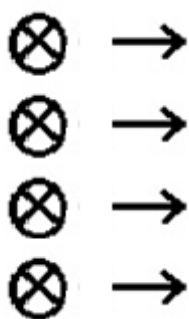
Морфологическая таблица элементов										
1. Вид источника излучения										
1.1. Сосредоточенный			1.2. Распределенный на торце			1.3. Сосредоточенный с волоконным световодом				
	1	1.		3	1.		2	1.		
	1	2.		2	2.		5	2.		
	3	3.		2	3.		1	3.		
	3	4.		2	4.		1	4.		
	2	5.		1	5.		4	5.		
	2	6.		5	6.		4	6.		
	2	7.		4	7.		5	7.		
	1	8.		3	8.		5	8.		
	3	9.		4	9.		1	9.		
	1	10.		5	10.		2	10.		
1.4. Сосредоточенный с линзой			1.5. Дискретные							
	4	1.		5	1.	Чувствительность				1.
	3	2.		4	2.	Цена				2.
	5	3.		4	3.	Надежность				3.
	4	4.		5	4.	Погрешность				4.
	3	5.		5	5.	Нелинейность				5.
	3	6.		1	6.	Диапазон по входу				6.
	1	7.		3	7.	Потери в Вт				7.
	4	8.		2	8.	Быстродействие				8.
	2	9.		5	9.	Экологичность				9.
	4	10.		3	10.	Вес				10.

Таблица 4.2.


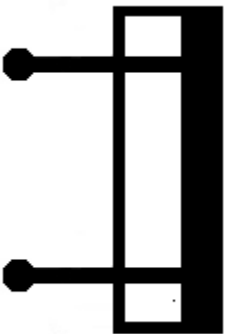

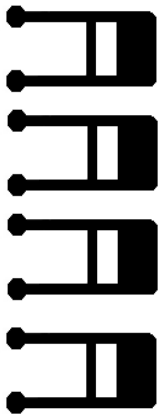
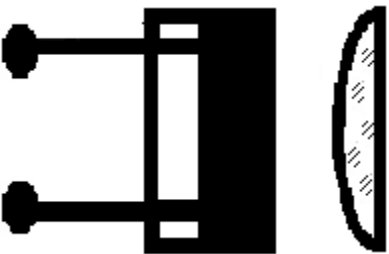
Морфологическая таблица элементов ОДПВ									
2. Вид приемника излучения									
2.1. Кольцевой (щелевой)			2.2. Распределенный			2.3. Сосредоточенный			
	1	1.		2	1.		3	1.	
	4	2.		2	2.		5	2.	
	3	3.		5	3.		1	3.	
	4	4.		5	4.		1	4.	
	3	5.		2	5.		5	5.	
	4	6.		1	6.		5	6.	
	1	7.		3	7.		4	7.	
	2	8.		4	8.		3	8.	
	4	9.		3	9.		1	9.	
	4	10.		2	10.		3	10.	
2.4. Дискретно расположенные сосредоточенные приемники излучения			2.5. Сосредоточенный с линзой						
	4	1.		5	1.	Чувствительность			1.
	1	2.		3	2.	Цена			2.
	2	3.		4	3.	Надежность			3.
	3	4.		2	4.	Погрешность			4.
	1	5.		4	5.	Нелинейность			5.
	2	6.		3	6.	Диапазон по входу			6.
	5	7.		3	7.	Потери в Вт			7.
	1	8.		5	8.	Быстродействие			8.
	5	9.		2	9.	Экологичность			9.
	1	10.		5	10.	Вес			10.

Таблица 4.3.




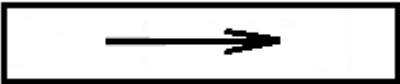
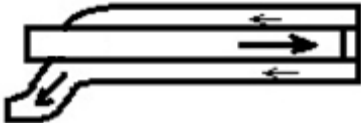
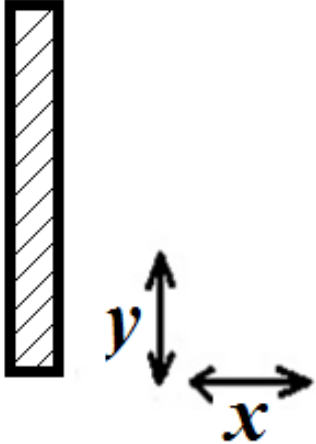


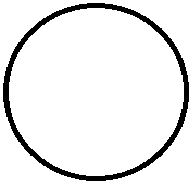
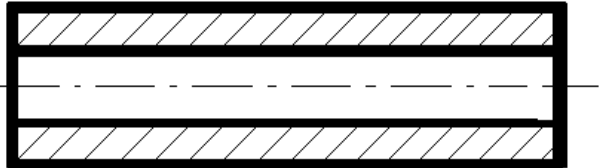
Морфологическая таблица элементов ОДПВ									
3. Вид источника излучения									
3.1. Полый световод цилиндрический			3.2. Составной полый световод			3.3. Щелевой полый световод			
	1	1.		4	1.		5	1.	
	1	2.		3	2.		2	2.	
	3	3.		2	3.		5	3.	
	1	4.		2	4.		3	4.	
	3	5.		4	5.		5	5.	
	1	6.		4	6.		5	6.	
	4	7.		2	7.		5	7.	
	3	8.		1	8.		2	8.	
	2	9.		3	9.		1	9.	
	1	10.		4	10.		5	10.	
3.4. Волоконный световод одномодовый			3.5. Коаксиальный волоконный световод						
	3	1.		2	1.	Чувствительность			1.
	5	2.		4	2.	Цена			2.
	2	3.		1	3.	Надежность			3.
	5	4.		4	4.	Погрешность			4.
	1	5.		2	5.	Нелинейность			5.
	2	6.		3	6.	Диапазон по входу			6.
	3	7.		1	7.	Потери в Вт			7.
	4	8.		5	8.	Быстродействие			8.
	5	9.		4	9.	Экологичность			9.
	2	10.		3	10.	Вес			10.

Таблица 4.4.

Морфологическая таблица элементов ОДПВ		
4. Вид внешнего модулирующего тела		
4.1. Пластина	4.2. Лента (диск) с отверстиями	4.3. Лента (диск) с светлыми и темными полосами
		
4.4. Шарообразный	4.5. Цилиндрический	
		

излучения (таблица 4.1), приемника излучения (таблица 4.2), полого световода (таблица 4.3), внешнего модулирующего тела (таблица 4.4).

Все представленные варианты элементов ОДПВС проранжированы по критериям качества: чувствительность, цена, надежность, погрешность, нелинейность, диапазон по входу, потери в Вт, быстродействие, экологичность, вес.

Вариант ОДПВ (Рис.4.2) 1.1-2.1-3.2-4.1 был использован для контроля толщины пленки.

На рис.4.2 приведена конструкция ОДПВ для дискретного контроля толщины пленки с подвижным элементом в виде плоского светотражающего круглого диска.

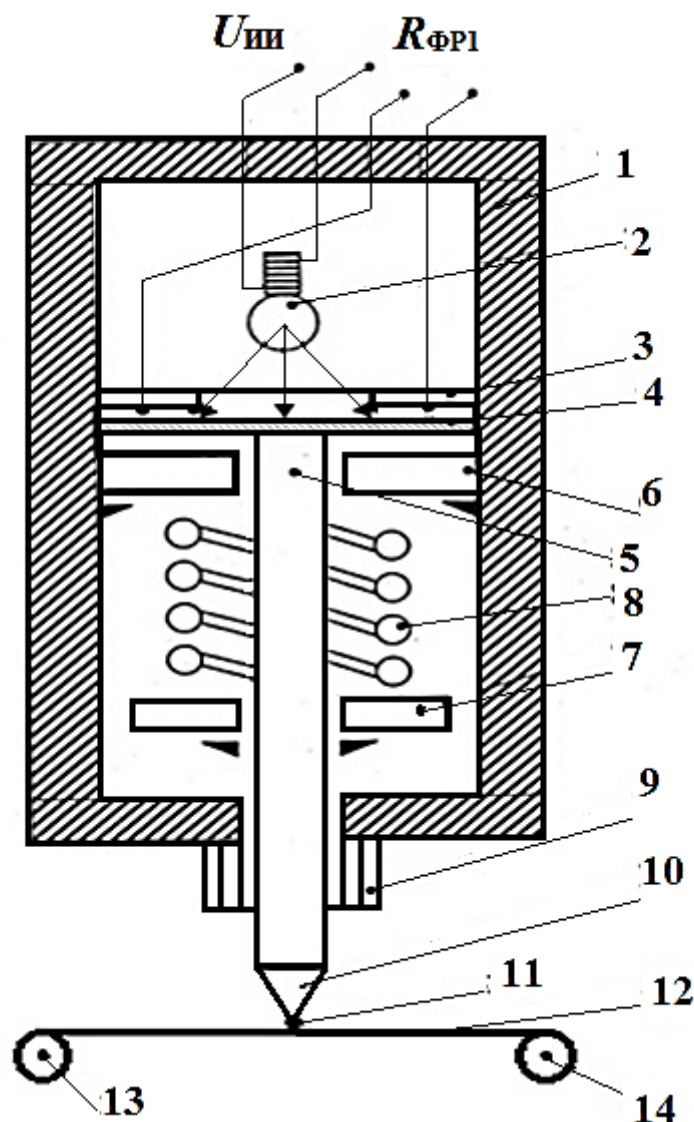


Рис.4.2. Конструкция ОДПВ.

Данная конструкция состоит из трубчатого корпуса 1 (металлическая или пластмассовая трубка); источника излучения 2 (лампа накаливания типа ОП4-4-1, напряжением 4 В, мощностью 4 Вт); кольцевого фоторезистора 3 (тип ФСК-6); светоотражающего плоского диска 4, укрепленного на подвижном стержне 5; выступов 6 и 7, жестко укрепленных соответственно на внутренней стенке корпуса 1 и стержне 5, между которыми расположена пружина 8. Стержень 5 выводится через трубку 9 и имеет наконечник 10.

В основе принципа действия ОДПВ с продольно перемещающимся светоотражающим диском 4 лежит изменение светового потока  $\Phi_0$ , падающего на светочувствительную поверхность кольцевого приемника излучения 3. В исходном положении светоотражающий диск 4 плотно прижимается к приемнику излучения 3, и величина светового потока  $\Phi_0$ , падающего на приемник излучения 3, минимальна (или равна нулю при точном изготовлении поверхностей приемника излучения 3 и диска 4). В процессе измерения диск 4 перемещается относительно приемника излучения 3 благодаря пружине 8, которая в исходном положении сжата. Перемещение заостренного наконечника 10 с шарообразным выступом 11 изменяет величину светового потока  $\Phi_0$  и на выходе преобразователя появляется дискретный электрический сигнал соответствующий контролируемому параметру толщине пленки 12 (или другого изделия), например, при перемотки с валков 13 в 14 (рис.4.2).

#### **4.3. Параметрическое проектирование преобразователей ОДПВ.**

Главной задачей параметрического проектирования устройств и преобразователей на основе ОДПВ является получение их основных характеристик, удовлетворяющих поставленным требованиям и наилучших с точки зрения принятого критерия оптимизации. Одной из трудностей при проектировании ОДПВ является выбор критерия оптимальности  $I$ . Обычно исходными данными при проектировании ОДПВ являются дискретные значения в диапазоне преобразований  $X$  [ $X_{мин}$ ,  $X_{макс}$ ], параметры источника питания, параметры окружающей среды и другие. В результате оптимального



параметрического проектирования ОДПВ например, на основе полого световода необходимо найти оптимальные  $I_{\text{опт}}, D_{\text{опт}}, D_{1\text{опт}}, \beta_{1\text{опт}}, \beta_{2\text{опт}}, L_{1\text{опт}}$ , которые в общем случае составляют параметры ОДПВ.

$$\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \dots, a_n\} \quad (4.1)$$

В результате оптимизации необходимо найти такие параметры ОДПВ, при которых достигается оптимальное значение критерия оптимальности  $I(\bar{a})$ , т.е.

$$I(\bar{a}) = \text{opt } I(\bar{a}), \quad \bar{a} \in D\bar{a}, \quad (4.2)$$

где  $\text{opt } I(\bar{a})$  - оптимальное значение  $I(\bar{a})$ ,

$D\bar{a}$  - область допустимых решений.

Если обозначить  $\Pi$  - область поиска, то

$$\Pi = \{\bar{a}: b_i \leq a_i \leq c_i, \quad i = \overline{1, n}\} \quad (4.3)$$

где  $b$  и  $c$  - минимальные и максимальные значения  $a_i$ .

В процессе проектирования необходимо учитывать, что ОДПВ должен выполнять свои функции и оставаться исправным при условии, что входная величина  $X_{\text{вх}}$  не выходит из диапазона преобразований, т.е.  $X_{\text{вх}} \in (X_{\text{мин}}, X_{\text{макс}})$ , где  $X_{\text{мин}}, X_{\text{макс}}$ —минимальные и максимальные значения входной величины, подлежащие дискретному контролю.

Для поиска оптимальных параметров используются математические модели ОДПВ при продольных и поперечных перемещениях внешнего модулирующего тела формулы (2.1) - (2.18). Анализ данных математических моделей показывает, что они, во-первых, информативны, во-вторых, адекватны реальным процессам преобразования (экспериментальные данные приведены в главе 2 и хорошо подтверждают адекватность математических моделей), в-третьих, выходные величины и параметры математических моделей достаточно точно отражают связь варьируемых параметров с входными воздействиями, в-четвертых, данные математические модели достаточно просты и легко реализуются. Все вышеизложенное свидетельствует о том, что данные математические модели удовлетворяют требованиям используемым для оптимального проектирования. Наибольшее число задач проектирования приборов на основе ОДПВ связано увеличением чувствительности, повышением

точности, получением линеаризованной статической характеристики, повышением надежности и расширением диапазона. В связи с этим рассмотрим некоторые задачи оптимального проектирования устройств на основе ОДПВ по критериям: максимум чувствительности, линейности статической характеристики и точности [63, 74].

#### 4.3.1. Задача проектирования устройств на основе ОДПВ по критерию чувствительности и линейности статической характеристики.

Задача проектирования ОДПВ по критерию чувствительности и линейности статической характеристики формулируется следующим образом. Выбрана структура и, следовательно, определена статическая характеристика ОДПВ, например, уровнемера в виде

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{K}{(K+1)^2} \left[ 1 - \frac{\Phi_0(X_{\text{мин}})}{\Phi_0(X)} \right]; \quad (4.4)$$

где значения распределений светового потока  $\Phi_0(x)$  определяются из формулы (2.5).

В общем случае статическую характеристику (4.4) можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = f[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})], \quad X_{\text{вх}} \in X_{\text{вхмин}} \cdot X_{\text{вхмакс}}, \quad \bar{a}(\bar{y}) \in D\bar{a}, \quad (4.5)$$

где:  $\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  - вектор варьируемых параметров;

$\bar{y} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}$  - вектор влияющих параметров;

$n$  - число варьируемых параметров;

$m$  - число влияющих параметров.

В результате оптимального проектирования требуется найти оптимальный вектор параметров  $\bar{a}(\bar{y}) \in D\bar{a}$  так, чтобы

$$\begin{aligned} I[\bar{a}(\bar{y})] &= \text{opt } I[\bar{a}(\bar{y}), x_{\text{вх}}], \quad D\bar{a} = \\ &= \{\bar{a}: b_i \leq a_i \leq c_i, \quad a_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}\}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Задача повышения линейности статической характеристики решается путем аппроксимации реальной нелинейной статической характеристики преобразователя линейной зависимостью

$$U_{\text{вых.л}} = A \cdot X_{\text{вх}} + B. \quad (4.7)$$

Используя квадратичный интегральный критерий близости функций имеем

$$\text{Мин } I = \int_{X_{\text{вхмин}}}^{X_{\text{вхмакс}}} \{U_{\text{вых}}(X_{\text{вх}}) - A * X_{\text{вх}} - B\} dX_{\text{вх}} \quad (4.8)$$

или

$$\text{Мин } I = \int_{X_{\text{вхмин}}}^{X_{\text{вхмакс}}} \{f[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})] - A * X_{\text{вх}} - B\} dX_{\text{вх}}. \quad (4.9)$$

Решив задачу, находят значения  $A = A[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})]$ ,  $B = B[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})]$ ,  $\bar{a} \in D\bar{a}$  и параметры  $\{\bar{a}\}$ , при которых реализуются эти коэффициенты. Задача обеспечения высокой чувствительности легко решается после задачи обеспечения высокой линейности статической характеристики, так как эти задачи очень тесно связаны. Для решения задачи повышенной чувствительности необходимо определить оптимальные значения вектора  $\bar{a}(\bar{y}) = a(\bar{y})$ , которые обеспечивают

$$\text{Макс } I = A[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})], \bar{a} \in D\bar{a}, X_{\text{вх}} \in (X_{\text{вхмин}}, X_{\text{вхмакс}}). \quad (4.10)$$

#### 4.3.2. Проектирование по критериям точности и быстродействия.

Как показано в главе IV, точность ОДПВ определяется наиболее полно на основе энтропийной погрешности и задача оптимального параметрического проектирования по критерию точности может быть решена путем нахождения оптимального вектора параметров  $\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  так, чтобы для

$$I[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})] = \text{мин } \Delta \varepsilon[X_{\text{вх}}, \bar{a}(\bar{y})], X_{\text{вх}} \in (X_{\text{вхмин}}, X_{\text{вхмакс}}), \bar{a} \in D\bar{a}. \quad (4.11)$$

Также, как показано в главе IV быстродействие ОДПВ или устройства на его основе определяется динамическими характеристиками ОДПВ и основным показателем быстродействия и инерции является постоянная времени  $T$ . На основании постоянных времени отдельных элементов можно оценить постоянную времени всего устройства  $T_{\text{пр}}$ .  $T_{\text{пр}}$  можно также получить на основании аппроксимации кривых переходного процесса, полученных

теоретически или экспериментально. Проектирование по критерию быстродействия можно свести к задаче нахождения минимума постоянной времени  $T_{пр}$ .

$$I[X_{вх}, \bar{a}(\bar{y})] = \min T_{пр}[X_{вх}, \bar{a}(\bar{y})], \quad X_{вх} \in (X_{вх\min}, X_{вх\max}), \quad \bar{a} \in D\bar{a}. \quad (4.12)$$

Расчет и выбор оптимальных параметров ОДПВ выполняется по алгоритму, приведенному на рис.4.3.

После общей методики структурного проектирования осуществляется переход к поэтапной схеме расчета и параметрического проектирования ОДПВ. Рассмотрим кратко основные этапы алгоритма, приведенного на рис.4.3.

В модуле 1 производится подготовка массива исходных данных на основании требований со стороны систем контроля и управления.

В модуле 2 осуществляется расчет распределения светового потока  $\Phi_0(x)$  в полом или волоконных световодах ОДПВ и достигается заданное распределение с помощью модулей 3 и 4.

В модуле 5 осуществляется расчет параметров приемника излучения и измерительной схемы, результаты которого используются для формирования критерия оптимизации, ограничений и выбора метода поиска оптимума.

В модуле 6 осуществляется выбор критериев оптимизации.

В модуле 7 осуществляется выбор начальных приближений по варьируемым параметрам  $\bar{a}^H = \{a_1^H, a_2^H, \dots, a_n^H\}$

В модуле 8 осуществляется определение области поиска П.

В модуле 9 осуществляется проверка на принадлежность начальных приближений  $\bar{a}^H$  области допустимых значений  $Da$ .

В модуле 10 осуществляется выбор метода параметрической оптимизации.

В модуле 11 осуществляется проверка на много экстремальность исходной задачи.

В модуле 12 осуществляется проверка принадлежности оптимального решения  $\bar{a}$  области поиска П.

В модуле 13 осуществляется вывод расчетных данных и параметров оптимизации (в виде таблиц или графиков).

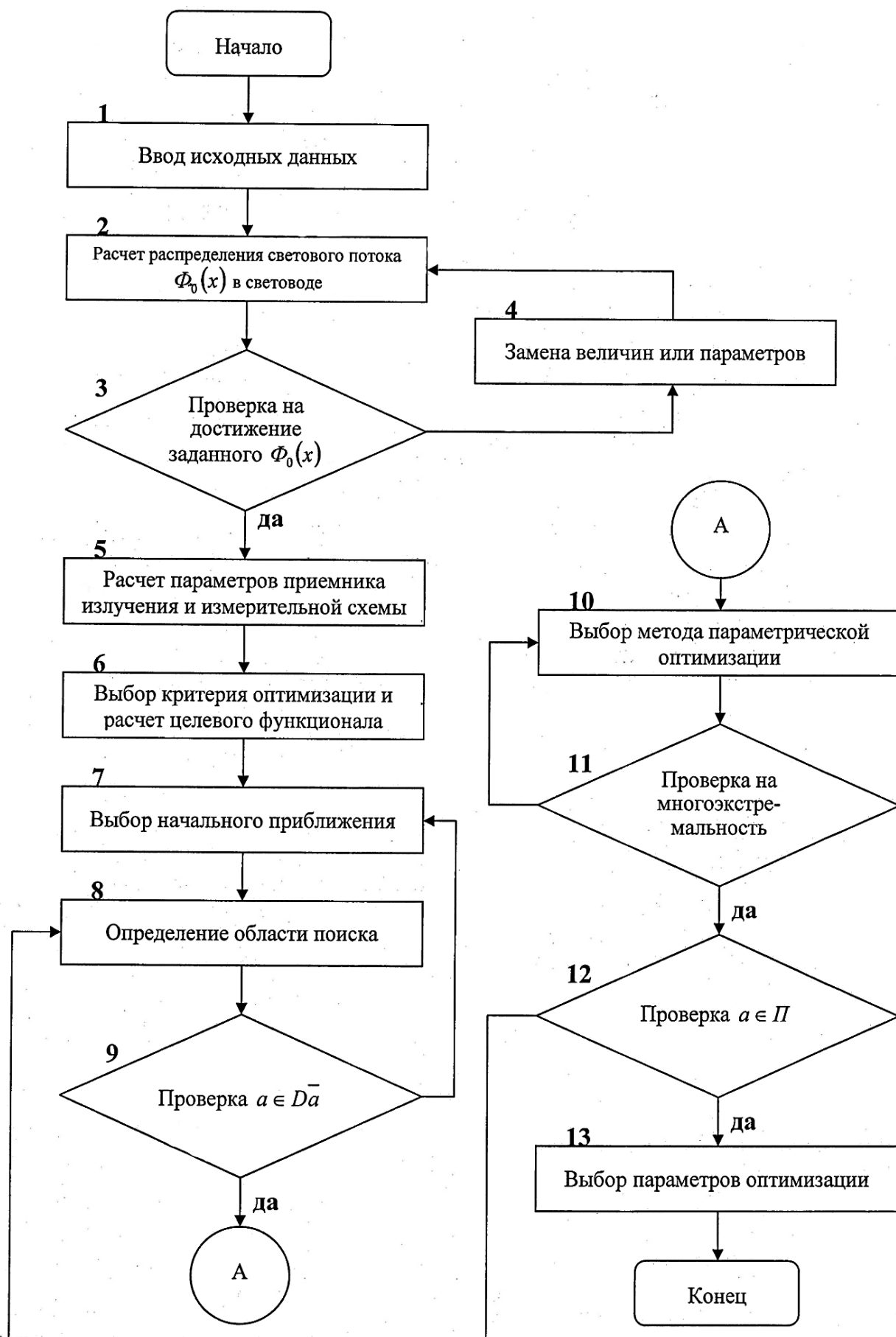


Рис.4.3. Алгоритм расчета и оптимизации ОДПВ.

#### **4.4. Микропроцессорное устройство на основе ОДПВ для контроля и управления большими линейными перемещениями.**

Цифровые оптоэлектронные преобразователи линейных перемещений находят широкое применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами, в специализированных системах измерения, управления и контроля, в значительной степени определяя их точностные и надежность характеристики. Особенностью таких преобразователей является наличие двух основных узлов: ОДПВ, непосредственно воспринимающего измеряемое перемещение и вторичного преобразователя-электронного узла, обрабатывающего полученную информацию и представляющего ее в цифровой форме.

Основой работы устройства является неподвижная оптическая линейка, состоящая из 200 дискретно расположенных фототранзисторов (3). На подвижной рейке расположен светодиод (1), работающий в инфракрасном диапазоне. Воздействуя на рейку, происходит перемещение светодиода относительно оптической линейки. Световой поток  $\Phi$  через полый световод 2 освещает несколько фототранзисторов (3). Микроконтроллер поочередно опрашивает состояние фототранзисторов, в результате получает код (4), пропорциональный освещенности. Аппроксимируя значение кодов, находятся промежуточные значения (5), в которых находится максимум (6), соответствующий положению светодиода (рис.4.4).

После нахождения положения светодиода вычисляется расстояние, в зависимости от выбранного режима, до левого или правого края оптической линейки.

Структурную схему прибора можно разделить на 7 функциональных блоков. Элементы оптической линейки 1 коммутируются коммутатором 2, которым управляет микроконтроллер 4. Аналоговый сигнал с оптической линейки поступает на вход АЦП контроллера.

Датчик температуры 3 подключен к аналоговому входу АЦП контроллера. Органами управления 5 являются две кнопки. Регистр-дешифратор 6

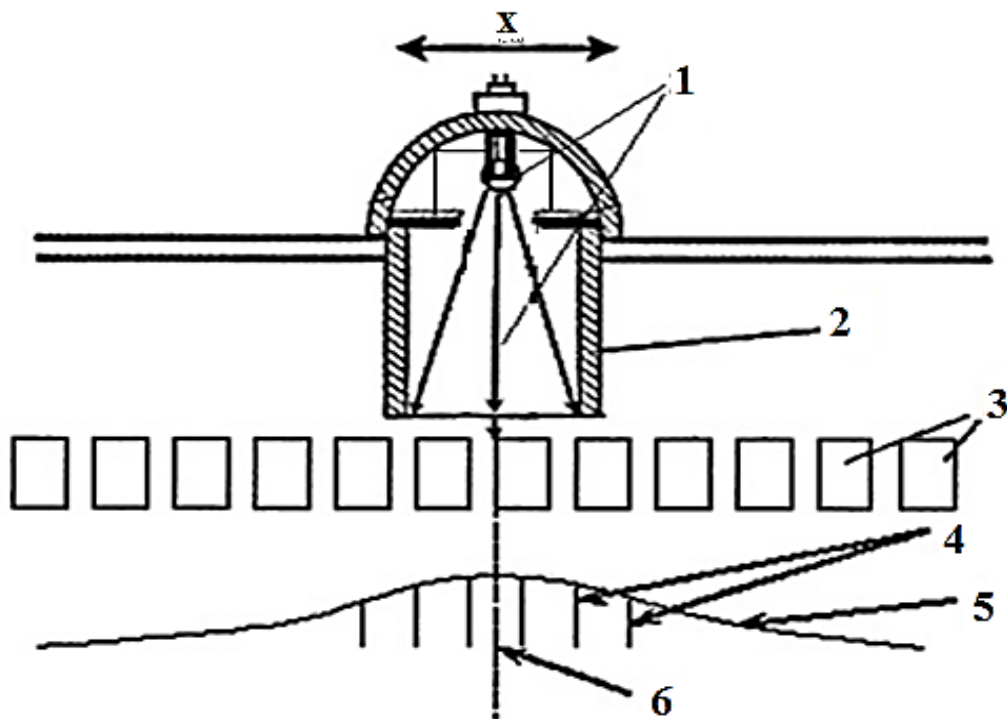
предназначен для хранения двоичной информации, преобразования ее в семисегментный код и выдачи на жидкокристаллический индикатор 7.

Прибор рассчитан для работы с сетевым источником питания 5В или аккумуляторной батареей 6В.

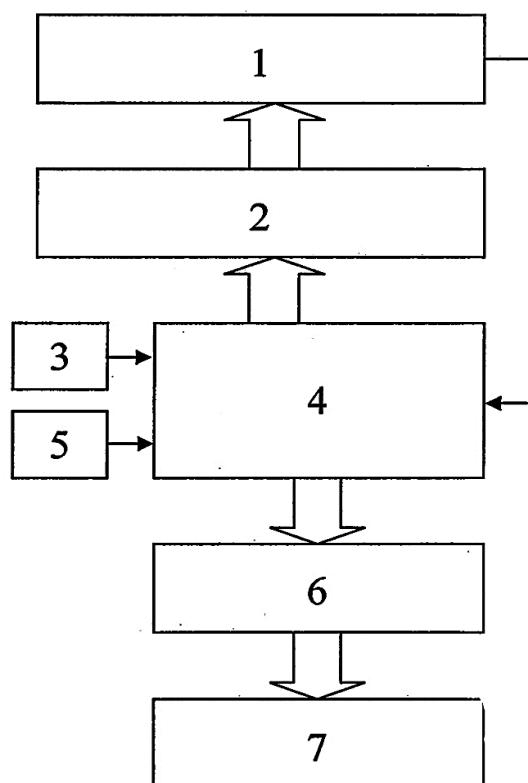
После подачи напряжения питания прибор готов к работе. В случае, если питание находится ниже нормального, прибор отобразит этот факт периодическим морганием индикации. В случае, если питание находится ниже предельного, прибор прекратит свою работу и погасит индикатор.

Технические характеристики прибора:

Напряжение питания	5-6 В
Шаг оптической линейки	0,065 мм
Рабочая температура прибора	0-50°С
Вес, менее	300 г
Габариты	140х190х40 мм
Диапазон перемещений	130 мм
Погрешность прибора	0,06 мм

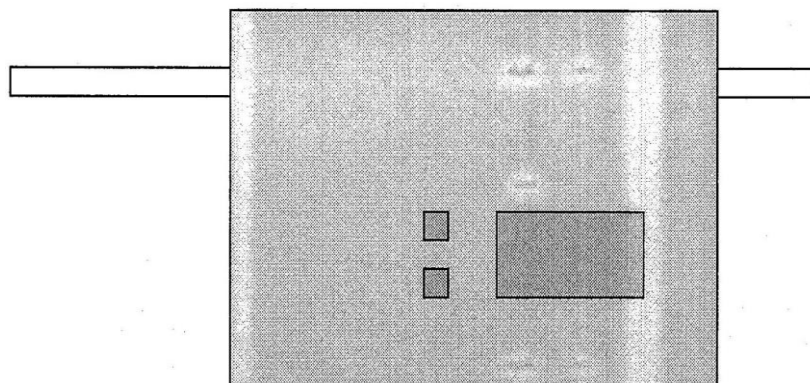


**Рис.4.4.** Схема поясняющая принцип работы ОДПВ больших линейных перемещений.



**Рис.4.5.** Структурная схема преобразователя на основе ОДПВ для контроля линейных перемещений.

На фронтальной стороне прибора размещены табло жидкокристаллического индикатора и кнопки управления. В верхней части прибора расположена подвижная рейка для измерения линейного перемещения. В правой торцевой части расположен разъем для подключения источника питания. Внешний вид прибора изображен на рис.4.6.



**Рис.4.6.** Внешний вид оптоэлектронного микропроцессорного преобразователя линейных перемещений



#### **4.5. Микропроцессорное устройство на основе ОДПВ для учета продукции на технологических линиях.**

Широкое применение находят оптоэлектронные преобразователи в системах автоматического учета штучных изделий (продукции, полуфабрикатов и заготовок) что позволяет объективно судить о ритме работы производства и выполнения плановых заданий вести правильно планирование и учет расходуемых материалов, и производить учет выработки каждого рабочего.

Введение автоматического учета является важным этапом в автоматизации различных видов производств. Объективная информация, выдаваемая устройствами автоматического учета, может служить исходными данными, вводимыми в ЭВМ, используемые для автоматического учета и анализа хозяйственной деятельности предприятия и для планирования всех взаимосвязанных процессов производства [12, 16, 46, 53, 61, 77].

Устройство для учета продукции предназначено для цифрового счета движущихся по конвейеру штучных изделий на основе ОДПВ.

##### **ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ:**

Диапазон счета, единицы	от 0 до 9999999999;
Разрешающая способность	1 единица;
Погрешность счета $\pm$ единица на	100000 сосчитанных изделий;

На табло счетчика индуцируется:

- количество бутылок за смену, при включении кнопки «За смену»;
- суммарное (накопительное) количество пропущенных бутылок с начала запуска счетчика, при включении кнопки «Сумма».

Счетчик имеет выход для соединения с компьютером, находящимся у в диспетчерской, где можно наблюдать за показаниями счетчика.

Скорость движения бутылок на конвейере 1000 бутылок/мин.

Счетчик имеет защиту от дребезга бутылок при остановке и движении конвейера (раз сосчитанная бутылка повторно не считается);

Счетчик имеет память и обеспечивает сохранение суммарной (накопительной) информации при отключении электропитания.

Срок хранения суммарной информации не менее 1,5 года.

Информация за смену при отключении электропитания не сохраняется.

Задержка включения аварийной сигнализации при отказе ОПВМ датчика или при перекрытии оптического канала посторонним предметом - 1 сек.

Количество счетчиков, подключаемых к компьютерной сети - 15 штук.

Дальность связи по экранированному 4-х проводному кабелю - до 500м.

Напряжение питающей сети 220(+10-20) В. м +3,6В. аккумуляторной батареи.

Частота питающей сети  $50 \pm 1$  Гц.

Потребляемая мощность 3 ВА.

Габаритные размеры счетчика:

- блока счетчика, индикации и питания, не более 200х200х90 мм.
- оптоэлектронного датчика, не более 80 х 80 х 120 мм.

Масса счетчика:

- блока счетчика, индикации и питания, не более 2 кг.
- оптоэлектронного датчика, не более 0,5 кг.

Рабочие условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от 15 до 35°C;
- относительная влажность от 30 до 70 %;
- атмосферное давление 60... 106 кПа.
- отсутствие воздействий агрессивных сред, пыли, воды, солнечной радиации и др.
- отсутствие механических нагрузок - вибрационных, ударных, скручивающих, ветровых и др.

Общий вид счетчика приведен на рис.4.7.

Блок счета, индикации и питания состоит из корпуса 1 (рис.4.7) и крышки 2. Внутри корпуса расположена печатная плата. На печатной плате собраны: блок питания (трансформатор, выпрямитель, стабилизатор напряжения), элементы счета и индикации.

На передней панели блока расположены: десятиразрядный жидкокристаллический индикатор для отображения данных, светодиод красного свечения для индикации аварии - 4;

-два зеленых светодиода - для отображения состояния оптических каналов - 5.

-две кнопки (Кн1 - отображение суммарной информации -6, Кн2 - отображение сменной информации -7, при одновременном нажатии двух кнопок производится обнуление сменной информации).

На боковой панели основного блока расположены разъемы для подключения электропитания - 8 и для подключения к линии связи - 9.

Внутри основного блока расположены:

- акустический излучатель для подачи аварийного звукового сигнала;

- четыре переключателя, позволяющие устанавливать сетевой код счетчика, а также производить обнуление памяти.

ОДПВ состоят из световодов 10 и 11 с источниками излучения 12, 13; дополнительных световодов 14 и 15 с приемниками излучения 16 и 17.

ОДПВ со световодами 10 и 11 идентичны по схеме и конструкции. ОПВМ соединяются кабелем с блоками счета индикации и питания. Расстояние между ОДПВ в два раза меньше расстояния между осями движущихся вплотную двух бутылок – 18 (при 0,5 л. бутылках это расстояние равно 38 мм.). Предыдущие и последующие бутылки не мешают счету. Счетчик защищен пломбой от вскрытия.

Светодиоды излучают инфракрасные оптические импульсы, которые фотодиодом преобразуются в электрические импульсы. Эти импульсы операционными усилителями ДА1 усиливаются.

При отражении движущейся на конвейере бутылкой луча первого ОДПВ 10, формируется импульс на элементах ДА1, который подготавливает к проведению счетного импульса.

При пересечении луча второго ОДПВ 11 формируется импульс на элементах ДА1. Этот импульс считывается счетчиком и фиксируется на табло.

При остановке конвейера, дребезге и при неоднократном пересечении бутылкой луча первого или второго фотодиода не происходит счет. Для визуального наблюдения за прохождением бутылок через зоны ОДПВ на передней панели основного блока дополнительные индикаторы -зеленые светодиоды, которые гаснут, когда бутылка пересекает луч соответствующего ОДПВ.

При одновременном перекрытии двух оптических каналов посторонним предметом включается аварийная звуковая сигнализация и загорается красный светодиод на передней панели блока. При одновременном нажатии на кнопки «сумма» и «за смену» происходит обнуление информации «за смену». Для предотвращения сброса суммарной информации при отключении электропитания, счетчик снабжен буферным аккумулятором, который обеспечивает сохранение информации в счетчике. При этом показание «сумма» Счетчика до отключения электрической сети и после включения сети питания должно быть одинаково.

При включении электропитания микроконтроллер производит тестирование оптических датчиков и памяти. Затем считывает из памяти суммарную информацию и выставляет ее в устройство индикации *UI*. С частотой 750Гц контролер поочередно включает светоизлучающие ИК-диоды и проверяет прохождение луча через первый и второй оптические каналы. Последовательное перекрытие 1-го и затем 2-го оптического канала контролер воспринимает как прохождение одной бутылки. При этом исключается возможность ложного срабатывания счетчика от оптических и электрических помех путем статистической обработки результатов контроля состояния оптических каналов. Далее результат счета суммируется, обновляется информация на табло и записывается в статическую память. Сменная информация в память не записывается, а только отображается на табло. При получении сигнала запроса от компьютера, адресованного данному счетчику, контролер проверяет правильность принятого кода и в случае достоверности осуществляет передачу суммарной информации на компьютер. Если принятый

запрос адресован другому счетчику, то контролер не отвечает. На счетчике имеются места для пломбирования.

Микропроцессорные оптоэлектронные устройства учета продукции внедрены 194 шт на технологических линиях АО «Узвинпром-Холдинг».

Счетчик устанавливается на металлоконструкции. Датчик счетчика устанавливается соосно на металлоконструкции над конвейером движения бутылок. Расстояние между датчиками должно быть равно ширине конвейера бутылок. Высота установки датчиков от ленты конвейера должна быть равна высоте пересечения лучей излучателей на уровне горлышка бутылок (от верхней части бутылки ниже на 1,5 - 2 см.).

Блок счета, индикации и питания устанавливается сверху на крышке датчиков или на боку крышки.

При проведении проверки применяются следующие образцовые средства поверки:

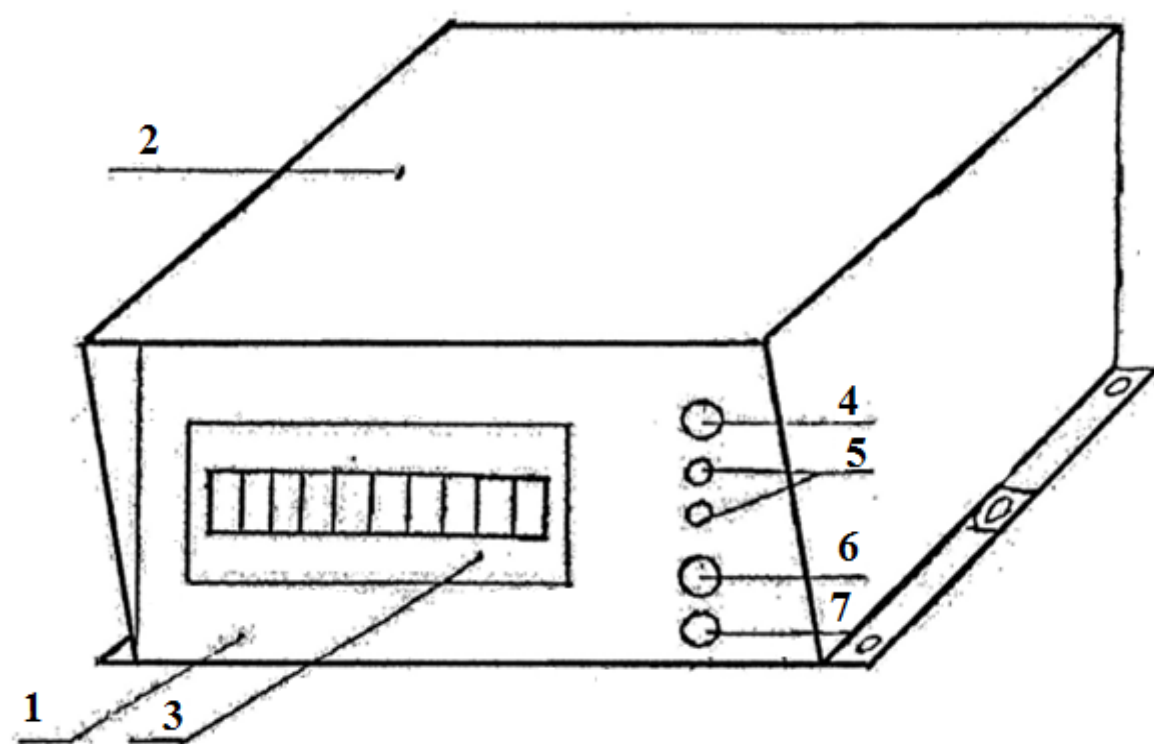
- счетчик ходов типа СХ-106;
- вольтметр переменного тока, класс точности не ниже 1, с диапазоном измерения от 0 до 300 В. (например, Э316);
- лабораторный автотрансформатор 220В. (например, ЛАТР-1М);
- термометр лабораторный с ценой деления 0,1 °С с пределом измерения до 100 °С (например, ТЛ-20).

Условия проверки.

Проверку производить при соблюдении следующих условий:

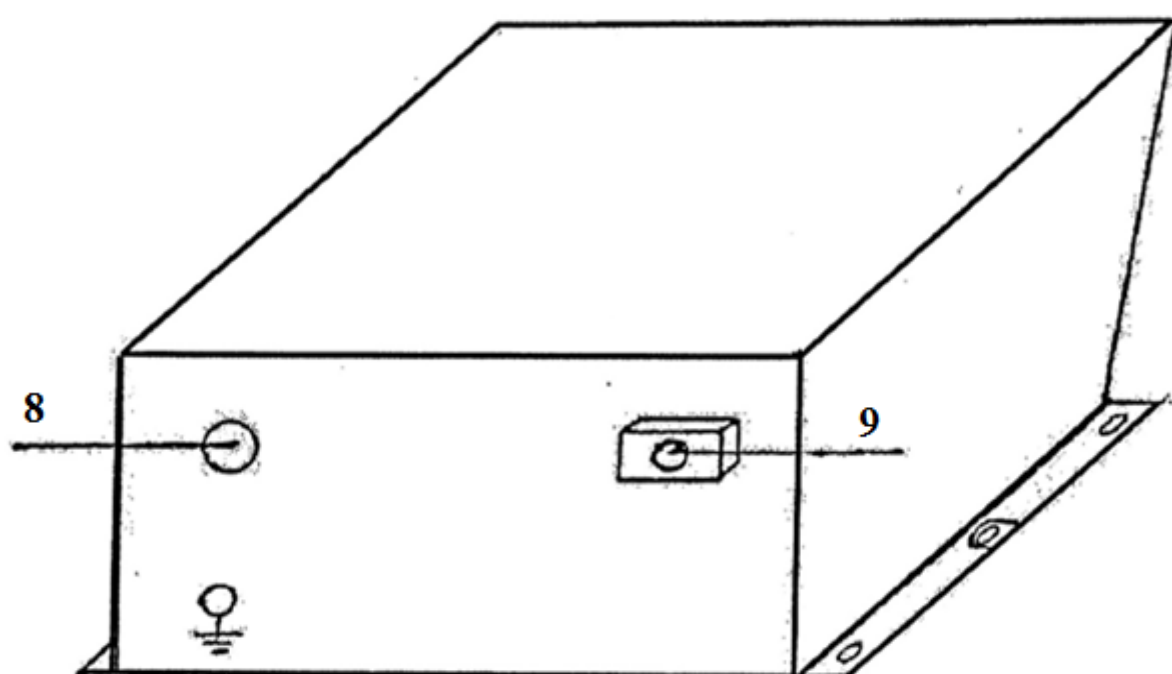
- температура окружающего воздуха  $20^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха от 30 до 70 %;
- напряжение питания сети  $220 \pm 4,4 \text{ В}$ ;
- частота питающей сети  $50 \pm 1 \text{ Гц}$ ;
- отсутствие вибрации, тряски, ударов, внешних электрических и магнитных полей (кроме магнитного поля Земли).

ВИД СПЕРЕДИ



а)

ВИД СЗАДИ



б)

Рис.4.7.

ВИД СВЕРХУ

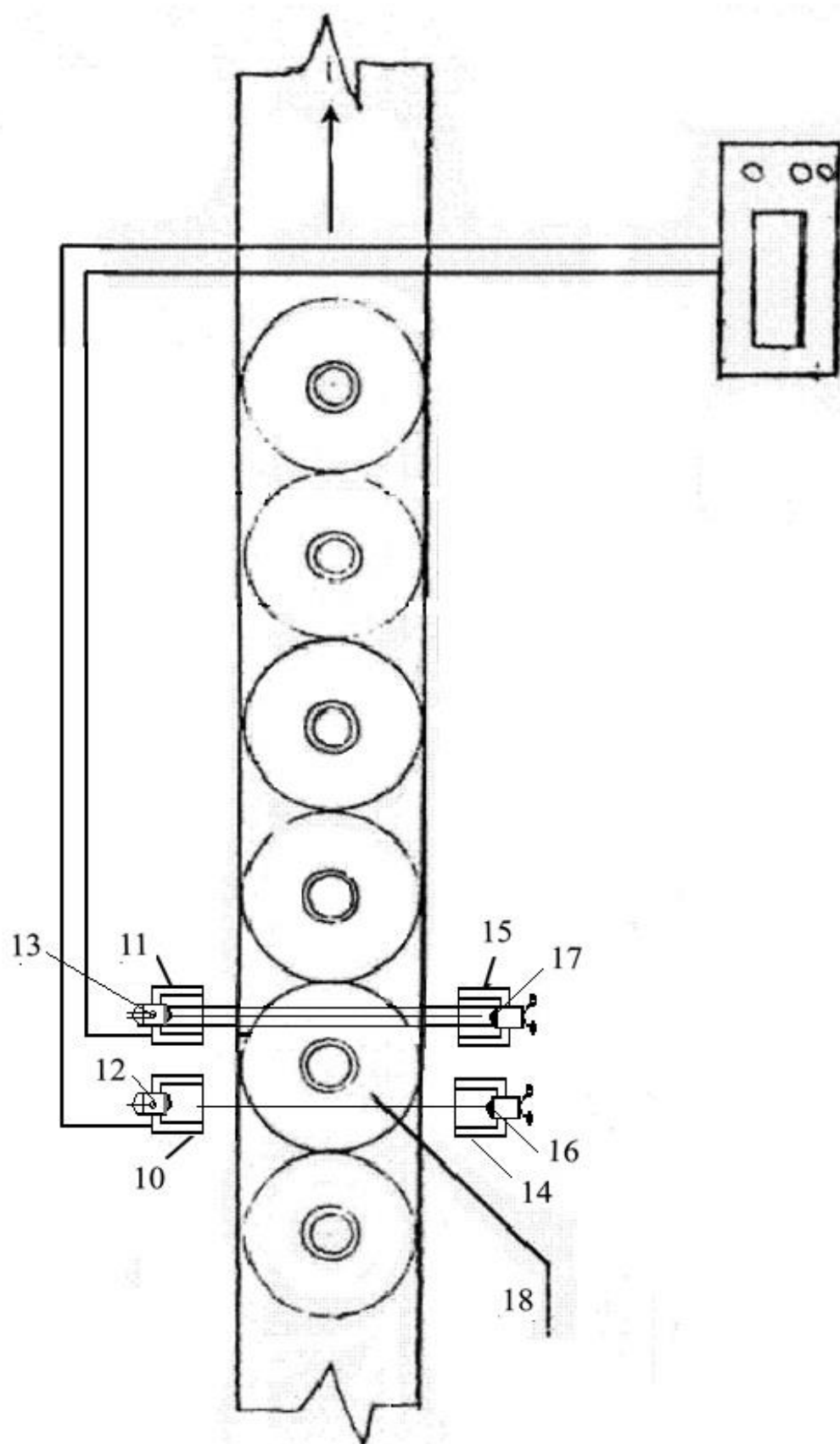


Рис.4.8.

Проверку функционирования счетчика и определение погрешности счетчика проводят на стенде. Стенд состоит из П-образного корпуса. В средней части имеется флажок шириной 2 см., укрепленный на оси. Ось соединена с одной стороны с осью однофазного электродвигателя с числом оборотов 76 об/мин, с другой стороны со счетчиком ходов СХ-106. Фотодатчики счетчика устанавливаются так, чтобы между ними проходил (вращался) флажок стенда.

Блок счета, индикации и питания устанавливается сверху книжки стенда. При включении электродвигателя за оборот вала флажком 2 раза пересекается зона фотодатчиков. Это будет соответствовать скорости движения на конвейере  $76 \times 2 = 152$  бут/мин. При этом показание счетчика стенда СХ-106 умножается на 2.

Проверку функционирования определяют на стенде. Включают электродвигатель стенда на определенное время. При этом показания счетчика бутылок должно изменяться в возрастающей последовательности от 0 до 9999999999. Показания табло счетчика должно обнуляться при одновременном нажатии на кнопки «Сумма» и «За смену». При обесточивании питания счетчика показания «Сумма» счетчика до отключения сети и после включения сети должно быть одинаково.

При определении погрешности счетчика бутылок на стенде производится отсчет до 10000 единиц не менее трех раз.

Погрешность счетчика бутылок определяется по формуле:

$$\Delta = n - 2m,$$

где  $n$  и  $m$  - соответственно среднее арифметическое значение показание счетчика бутылок и образцового счетчика хода СХ-106.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Коробко А.А., Пятигорский В.М. «Полые протяженные световоды на современном этапе». // «Светотехника», 2003. №3. С.14-23.
2. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. «Дискретные оптоэлектронные преобразователи на основе полых световодов для систем контроля уровня и расхода». Сборник научных докладов 2-ой МНТПК «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления», ч.1. Ташкент, 1999. С.108-116.
3. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Сиддиков И.Х. «Анализ статических характеристик оптоэлектронных первичных преобразователей на основе протяженных световодов». Материалы семинара «Применение оптико-электронных приборов и волоконной оптики в народном хозяйстве» МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского. М. 1989. С.141-149.
4. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. «Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов». М.: Энергоатомиздат, 1987. -105 с.
5. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. Ходжаев С.С., Сиддиков И.Х. «Графовые модели оптоэлектронных первичных преобразователей», ДАН Р.Уз., №6, 1997, С.12-15.
6. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. «Дискретные оптоэлектронные преобразователи на основе полых световодов для систем контроля и уровня и расхода», Сборник научных докладов II международной научно-теоретической и практической конференции «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления», часть 1, Т. 1999. С.108-116.
7. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. «Математические модели оптоэлектронных преобразователей на основе полых световодов». Сборник научных трудов: «Фотоэлектрические и волоконно-оптические преобразователи для систем управления и вычислительной техники» КуАИ. Куйбышев, 1986. С.104-113.
8. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г. Азимов А.Р., Шипулин Ш.Ю., Титов Е.В. «Оптоэлектронные измерительные преобразователи на основе полых

световодов с внешней модуляцией», сборник научных статей: Методы и средства систем обработки информации. Курск, 1997. С.86-91.

9. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Максимова Н.Ф. «Общие вопросы проектирования оптико-электронных устройств на основе полых световодов». Известия ВУЗов. Приборостроение, т.34. №3. 1991. С.87-92.
10. Азимов Р.К., Ходжаев С.С., Сиддигов И.Х., Шипулин Ю.Г. «Моделирование с применением ЭВМ распределения светового потока в сложных световодах». Доклады АН Р.Уз. №6. Т. 1985. С.15-18.
11. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
12. Бадеев А.В., Мещеряков В.А., Мурашкина Т.И. «Классификация амплитудных волоконно-оптических преобразователей». // Датчики и системы. 2003. №2. С.20-25.
13. Бусурин В.И., Лярский В.Ф., Садовников В.Н. «Оптоэлектронные преобразователи на основе управляющих световодных структур». М.: Радио и связь, 1984. – С.168.
14. Вейнберг В.Б., Сатаров Д.К. «Оптика световодов». Л.: Машиностроение, 1977. 132 с.
15. Галкин С.Л., Игнатъев А.В., Бабаджан А.И. «Волоконно-оптический датчик линейных перемещений». // Приборы и системы управления. 1992. №2. С.21.
16. Геда Н.Ф. «Измерения параметров приборов оптоэлектроники». М.: Радио и связь, 1981. 368 с.
17. Гофштейн-Гард А.Л., Коган Л.М., Рассохин И.Т. «Оптоэлектронный датчик уровня жидкости». // Приборы и системы. 2002, №4. С.52-53.
18. Зак Е.А. «Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией». М.: Энергоатомиздат, 1989. – С.115.
19. Иванов В.С., Котюк А.Ф. «Современные и перспективные проблемы в области оптико-физических измерений» // Измерительная техника. 2001. №3. С.14-24.

20. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Кузин А.Ю. «Волоконно-оптические датчики как перспективные элементы систем дистанционной передачи размеров единиц физических величин и их многофункциональных преобразований» // Измерительная техника. 2002. №5. С.22-33.
21. Игумнов Н.И., Павлухин О.Н. «Полый световод для инфракрасного диапазона». В кн.: Вопросы теории, и техники автоматических систем. // Днепропетровск, 1974. С.63-65.
22. Калинчук Н.Н., Саляхов Р.Я., Сулейманов Н.Г. «Фотоэлектрические устройства с использованием полых световодов». В кн.: Информационные системы и устройства с распределенными параметрами. Труды УАИ, Уфа, 1975, вып.97, С.85-90.
23. Конюхов Н.Е., Плюют А.А., Шаповалов В.М. «Оптоэлектронные измерительные преобразователи». // Л.: Энергия, 1977. – 160 с.
24. Конюхов Н.Е., Шаповалов В.М., Марков П.И. «Принципы построения функциональных оптоэлектронных аналого-цифровых преобразователей перемещений на основе светопроводящего волокна». В сборнике научных трудов Уральского электромеханического института инженеров транспорта, Свердловск, вып.41, 1973. С.34-52.
25. Корндорф С.Ф., Дубиновский А.М., Муромова Н.С. «Расчет фотоэлектрических цепей». М.: Энергия, 1967. 199 с.
26. Кравцов Н.В., Жаров А.Г., Панфилов А.С. «Датчики уровня, основанные на использовании явления полного внутреннего отражения (световоде)». – Приборы и системы управления, 1968, №11, С.39-41.
27. Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г. «Световодные датчики» М.: Машиностроение. 1990. – 256 с.
28. Крупкина Т.Ю., Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г. «Распределение мощности светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя». // Датчики и системы. 2005. №8. С.5-8.

29. Кузьмин К.Г., Мелевич И.А., Поляков А.В., Чубаров С.И. «Прецизионный волоконно-оптический датчик на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы». // Измерительная техника. 1999. №7. С.32-36.
30. Новиков Б.В., Скрипкарь Л.Н. «Расчет коэффициента полезного действия полых цилиндрических зеркальных световодов». // Оптико-механическая промышленность. 1963. №12. С.22-24.
31. Патент ИН DP 9600274.1/ГФ «Поплавковый преобразователь расхода жидкости в канале» // Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Азимов А.Р., Шипулин Ш.Ю., Официальный вестник, №2, 1997.
32. Порфирьев Л.Ф. «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах». Л.: Машиностроения. Ленинград отд-ние, 1989. 387 с.
33. Свечников С.В., Смовж А.К., Коганович Э.Б. «Фото-потенциометры и функциональные фоторезисторы». М.: Энергоатомиздат, 1996. 184 с.
34. Ураксеев М.А., Марченко Д.А., Шишкин С.Л. «Современные оптические измерительные устройства». // Приборы и системы управления, 2001. №3 С.52-55.
35. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. Серия: Мир электроники. Издательство: Техносфера, 2005. 592 с.
36. Шипулин Ю.Г. «Микропроцессорная система диагностирования параметров оптоэлектронных преобразователей с полыми световодами». // Вестник ТашГТУ, 2006, №3. С.19-21.
37. Шипулин Ю.Г. «Перспективы развития первичных преобразователей систем управления, со встроенными микропроцессорными устройствами в условиях рыночной экономики». Тезисы докладов. Системный анализ, моделирование и управление сложными процессами и объектами на базе ЭВМ. Т.: 1993. С.27.
38. Шипулин Ю.Г. «Расчет оптоэлектронных преобразователей на основе полых световодов с внешней модуляцией». // Проблемы энерго и ресурсосбережения, №2, 2006, С.70-73.

39. Шипулин Ю.Г. «Анализ погрешностей оптоэлектронных преобразователей перемещений методом структурно-параметрических схем». В кн.: Измерение и контроль при автоматизации производственных процессов. Тезисы Всесоюзной конференции, Барнаул, 1982, ч.1. С.159-160.
40. Шипулин Ю.Г. «Оптоэлектронная измерительная система уровня подземных вод». Первая ВНТПК – Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления, «Автоматизация-97», Т. – 1997. С.115-119.
41. Шипулин Ю.Г., Азимов А.К. «Аналоговые оптоэлектронные преобразователи на основе полых световодов для систем контроля уровня и расхода». Вестник ТашГТУ №1-2 · 1999. С.43-46.
42. Шипулин Ю.Г, Азимов Р.К., Азимов А.Р., Шипулин Ш.Ю, «Моделирование и расчет оптимальных параметров оптоэлектронных преобразователей перемещений на основе полых световодов». Сборник докладов Первой ВНТПК «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления». Ташкент. 1997. С.99-102.
43. Shipulin Yu.G. «Intelligence optic electronic converters for level checking», WCIS-2000, World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, b-Quadrat Verlag. P.240-244.
44. Ненашев А.Л., Якунин А.Г. «Разработка программно-технического комплекса для идентификации псевдорегулярных объектов на конвейерной линии». // Ползуновский вестник. – Барнаул 2009. - №1-2. С.288-292.
45. Ненашев А.Л. «Интеллектуальные системы контроля на конвейерных линиях на основе нейросетевых технологий». // Ползуновский альманах. – Барнаул 2008. - №2. С.78.
46. Коган Л.М. «Счет мелких деталей в приборостроении». // «Приборостроение», 1960. №7. С.18-23.
47. Шипулин Ю.Г., Азимов Р.К., Холматов У.С., Максудов С.А., Хамдамов Б.М. «Интеллектуальная микропроцессорная система контроля режима работы зажигания двигателя внутреннего сгорания». //Узб. Журнал. «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». – 2008. –№1-2. С.238-243.

48. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Максудов С.А., Хамдамов Б.М., Холматов У.С. «Проектирование интеллектуальных измерительных преобразователей на основе графовых моделей». // Международный журнал. Химическая технология. Контроля и управления. -2008. -№2. С.42-45.
49. Алматаев О.Т., Холматов У.С., Шипулин Ю.Г. «Система контроля, регистрации и управления параметрами вибрацией технологических агрегатов». // Научный-технический журнал. Фергана. 2010. №2. С.61-63.
50. Шипулин Ю.Г., Холматов У.С., Раимжонова О.С., Алматаев О.Т. «Оптоэлектронный преобразователь для автоматических измерений перемещений и размеров». // Мир измерений. Стандарты и качество. Ежемесячный метрологический научно-технический журнал. 2013. №1(143). Москва. -2013. С.41-43.
51. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Алматаев О.Т. Холматов У.С. «Микропроцессорные поверочно-испытательные установки для расходомеров и счетчиков жидкостей». // Монография. Ташкент, издательство Итапресс-2014. С.97.
52. Хамдамов Б.М., Шипулин Ю.Г., Абдураимов Ф.А., Холматов У.С. «Интеллектуальный оптоэлектронный прибор для контроля расхода воды в открытых каналах». //Республика Киргизистан журнал. Наука образование техника 2015. № 2 (52). Ош. -2015. С. 37-42.
53. Холматов У.С. «Микропроцессорное оптоэлектронное устройство контроля и счёта штучных изделий». // Научный вестник Машиностроение, 2016. -№-1. Андижан. 2016. С.77-79.
54. Шипулин Ю.Г., Раимжонова О.С., Холматов У.С., Абдуллаев Т.М. «Физические модели и характеристики оптоэлектронных преобразователей угла наклона технологических установок» // Научный вестник Машиностроение, 2016. -№-2. Андижан. 2016. С.91-96.
55. Shipulin Yu.G., Holmatov U.S., Abdullayev T.A. «Intelligent multifunctional fiber optic liquid level sensor». // Journal of Korea multimedia society,

- PROCEEDINGS, Ninth world conference on intelligent systems for industrial automation. South Korea, Seoul – Uzbekistan, Tashkent. 2016. -№5. С.105-109.
56. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Максудов С.А., Махмудов М.И., Рустамов Э., Алматаев О.Т., Холматов У.С., Раимжонова О.С. «Устройство для измерения скорости и определения направления горизонтального ветра». // Патент на изобретение № IAP 04754. Ташкент. 20.08.2013г.
57. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Жумаев О.А., Махмудов М.И., Рустамов Э., Алматаев О.Т., Холматов У.С., Раимжонова О.С. “Волоконно-оптический преобразователь уровня жидкости”. // Патент на изобретение № IAP 04937. Ташкент. 07.07.2014г.
58. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Шипулин Ш.Ю., Холматов У.С., Раимжонова О.С., Абдуллаев Т.М., Исмаилов Х.А. “Оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений”. // Положительное решение по заявке № IAP 2013138. 19.02.2013.
59. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Шипулин Ш.Ю., Холматов У.С., Раимжонова О.С., Абдуллаев Т.М., Исмаилов Х.А. “Оптоэлектронные датчики угла и направления наклона объектов”. // Положительное решение по заявке № IAP 2012223. 10.10.2013. от 31.01.2017.
60. Максудов С.А., Хамдамов Б.М., Холматов У.С., Шипулин Ю.Г. «Оценка контроля технического состояния оптоэлектронных измерительных систем». // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2009». Ташкент. 2009. С.233-235.
61. Холматов У.С. «Бесконтактный оптоэлектронный преобразователь скорости вращения тел». // Материалы международной научно-технической конференции. Навои. 2010. С.524.
62. Холматов У.С., Жумаев О.А., Алматаев О.Т., Шипулин Ю.Г. «Электромеханические и оптоэлектронные преобразователи периодических сигналов произвольной формы». // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2010». Ташкент. 2010. С.242-244.

63. Раимжонова О.С., Холматов У.С., Шипулин Ю.Г. «Проектирование микропроцессорных оптоэлектронных преобразователей по критерию чувствительности». // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2011». Ташкент. 2010. С.243-244
64. Раимжонова О.С., Холматов У.С., Абдураимов Ф.А., Шипулин Ю.Г. «Исследование фоторезистивных оптоэлектронных преобразователей угловых перемещений». // Сборник статей. Современные материалы, техника и технологии в машиностроении. Международная научно-практическая конференция. Андижан. 2012. С.211-215.
65. Шипулин Ю.Г., Джамалов А.М., Холматов У.С. «Микропроцессорное устройство контроля шероховатости поверхностей композиционных материалов». // Сборник статей. Современные материалы, техника и технологии в машиностроении. Международная научно-практическая конференция. Андижан. 2012. С.294-300.
66. Холматов У.С., Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Абдураимов Ф.А., Алматаев О.Т. «Оптоэлектронные дискретные преобразователи уровня жидкостей». // Сборник статей. Современные материалы, техника и технологии в машиностроении. Международная научно-практическая конференция. Андижан. 2012. С.363-367.
67. Раимжанова О.С., Холматов У.С., Алматаев О.Т., Шипулин Ю.Г. «Микропроцессорная оптоэлектронная цифровая система передачи данных». // Республиканской научно-технической конференции «Новые композиционные материалы на основе органических и неорганических ингредиентов». Ташкент. 2012. С.214-216. О.Т. Алматаев, Ю.Г. Шипулин
68. Шипулин Ю.Г., Холматов У.С. и др. «Волоконно-оптические преобразователи на основе модуляции параметров оптического излучения». // Ишлаб чиқариш ва олий таълимда инновациялар ва инновацион технологиялар. Сборник республиканской научно-практической конференции. Андижан. 2013. 1-часть. С.152-157.



69. Шипулин Ю.Г., Холматов У.С. и др. «Поиск принципов построения волоконно-оптических преобразователей перемещения». // Ишлаб чиқариш ва олий таълимда инновациялар ва инновацион технологиялар. Сборник республиканской научно-практической конференции. Андижан. 2013. 1-часть. С.220-223.
70. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Холматов У.С., Алматаев О.Т. «Волоконно-оптический преобразователь уровня жидкости». // XI Международная научно-техническая конференция «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» Распознавание-2013. Курск. -2013. С.121-124.
71. Шипулин Ю.Г., Шипулин Ш.Ю., Исмоилов Х.А., Холматов У.С. «Оценка характеристик погрешности оптоэлектронных измерительных преобразователей на основе планирования эксперимента». // «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». Сборник материалов международной научно-технической конференции. Андижан 1-том. 2014. С.140-146.
72. Алматаев О.Т., Холматов У.С. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Максудов С.А. «Оптоэлектронные преобразователи рефлексивного типа для автоматизации жидкостных и газовых поверочных расходомерных установок». // Механика Научные исследования и учебно-методические разработки. Белорусский государственный университет транспорта. № 8. Гомель. 2014. С.27-34.
73. Шипулин Ю.Г., Раимжонова О.С., Холматов У.С., Худойназаров Д.Х. «Интеллектуальные оптоэлектронные датчики для систем управления на основе полых и волоконных световодов». // Материалы Республиканской научно-технической конференции. Нукус. 2015. С.207-210.
74. Шипулин Ю.Г., Холматов У.С., Абдуллаев Т.А., Исмоилов Х.А. «Анализ шумовых факторов в волоконных и полых оптических датчиках информационно-измерительных систем». // «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении» III Международная научно-практическая конференция 3-секция. Андижан. 2016. С.8-12.

75. Азимов Р.К., Шипулин Ш.Ю., Холматов У.С., Абдуллаев Т.А., Исмоилов Х.А. «Морфологический метод структурного проектирования оптоэлектронных преобразователей на основе полых и волоконных световодов (ОЭПВС)». // «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении» III Международная научно-практическая конференция 3-секция. Андижан. 2016. С.15-19.
76. Шипулин Ю.Г., Холматов У.С., Райимжонова О.С., Алматаев О.Т. «Надежность современных оптоэлектронных элементов с волоконными и полыми световодами». // «Инновацион ривожлантириш муаммолари: ишлаб чиқариш, таълим, илм-фан» мавзусидаги вазирлик миқёсидаги илмий-амалий анжуман мақола ва тезислар тўплами 1-секция. Андижан-2017. С.13-17.
77. Холматов У.С. «Оптоэлектронные реле-высокоточные счетчики деталей на конвейере». // «Инновацион ривожлантириш муаммолари: ишлаб чиқариш, таълим, илм-фан» мавзусидаги вазирлик миқёсидаги илмий-амалий анжуман мақола ва тезислар тўплами 1-секция. Андижан-2017. С.50-52.



**Ю.Г. ШИПУЛИН, У.С. ХОЛМАТОВ.**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ  
СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ И  
ПОЛЫХ СВЕТОВОДОВ.**

**Монография.**

**Формат 60x84 ¼ . Гарнитура «Times New Roman»  
Офсетная печать. Усл.печ.л. 4,375  
Тираж 50.**

**Отпечатанно в типографии УПП ООО «Katrant»  
г. Ташкент, ул. Шота Руставели, 156.**