

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Промышленная электроника»

11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Импульсный датчик перемещения»

Студент

Семенов А.В.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Певчев В.П.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Ивашин

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

«Промышленная электроника» к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О.Ф.)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## Содержание

Введение.....	4
1. Обзор датчиков перемещения. Принципы работы и область их применения.....	6
1.1. Емкостные датчики перемещения.....	6
1.2. Микродатчик угловой скорости .....	7
1.3. Емкостные датчики перемещения.....	12
1.4. Индуктивные датчики перемещения .....	13
1.5. Вихретоковые датчики перемещения .....	15
1.6. Ультразвуковые датчики перемещения.....	16
1.7. Магниторезистивные датчики перемещения .....	16
1.8. Датчики на основе эффекта Холла.....	17
1.9. Магитострикционные датчики перемещения .....	18
1.10. Потнциометрические датчики перемещения .....	19
1.11. Оптические датчики перемещения .....	19
2. Обзор типов фотодатчиков.....	27
2.1. Фотодатчик – PSD.....	27
2.2. Комплементарная структура оксид – полупроводник – CMOS.....	28
2.3. Позиционно чувствительная матрица – CCD .....	34
2.4. ПЗС матрицы с полнокадровым переносом.....	36
2.5. Плнокадровая матрица .....	39
2.6. Матрицы с буферизацией кадра .....	39
2.7. Матрицы с буферизацией столбцов .....	40
2.8. Принципы функционирования позиционно-чувствительных датчиков PSD.....	42
2.9. Принципы функционирования матрицы ПЗС.....	43
2.10. Сравнение PSD и ПЗС матриц.....	44
3. Пример триангуляционного метода измерений .....	46
3.4. Параметры конструкции для триангуляционных датчиков .....	48
3.5. Механическая конструкция триангуляционного датчика и выбор материалов .....	52
4. Разработка функциональной схемы датчика перемещения.....	58
4.1. Описание блоков .....	59

4.2. Структура схемы .....	59
4.3. Работа схемы .....	59
5. Описание и принцип работы блоков функциональной схемы датчика.....	60
5.1. Устройство записи на регистрах и статических ОЗУ .....	60
5.2. Фотодатчик PSD 1L20 .....	62
5.3. Аналоговый цифровой преобразователь .....	64
5.4. Преобразователь ток в напряжение .....	65
5.5. Устройство считывания.....	65
6. Конструирование датчика перемещения .....	65
Заключение .....	67
Список используемой литературы .....	68

## **Введение**

Триангуляционный метод контроля перемещения объекта основан на расчете искомого перемещения через соотношения треугольника с применением известных параметров системы.

Лазерная триангуляция как метод измерения перемещения в наши дни получила большую известность в создании измерительных датчиков и систем для решения многих задач размерного контроля в диапазоне от единиц миллиметра до метра с погрешностями равными не больше сотен микрон.

Одной из задач решаемой триангуляционными датчиками это контроль за состоянием элемента сейсмоисточника.

На данный момент отсутствует возможность контролировать малые перемещения объекта. Требуется сконструировать датчик, который мог бы измерить перемещение объекта.

**Целью диссертационной работы** является разработка датчика, позволяющего в импульсном режиме строить графики перемещения с величиной 1-5 мм длительностью 0,1-6мс.

Задачи работы:

1. Поиск аналогов, выбор наиболее соответствующего сенсора.
2. Разработан монтаж датчика на сейсмоисточнике.
3. Разработаны электрические схемы датчика.

В данной диссертационной работе были использованы программы для построения схемы электрической принципиальной, схемы функциональной, печатной платы, сборочного чертежа и схемы монтажа датчика на сейсмоисточнике.

## **Научная новизна**

Новизна диссертационной работы заключается в том, что разработан датчик, не имеющий аналогов.

## **Структура диссертации**

Диссертация состоит из шести глав в которых излагается информация, необходимая для решения поставленных задач.

Первая глава посвящена обзорной части диссертации. В ней рассматриваются какие бывают датчики измерения их типы и принципы работы. В данной главе содержится информация о емкостных, оптических, индуктивных, ультразвуковых, магниторезистивных, а также датчиков на основе эффекта Холла.

Вторая глава содержит обзор оптика приемников датчиков перемещения различного типа таких как PSD, CMOS и CCD.

Третья глава включает обзор триангуляционного метода измерения перемещения и содержит в себе принципиальную схему, параметры конструкции и механическую конструкцию триангуляционных датчиков.

В четвертой главе описывается разработка структурной схемы датчика, как она работает в статике и динамике.

В пятой главе приведена работа блоков структурной схемы: фотоприемника, преобразователя тока в напряжение, аналогового цифрового преобразователя, устройства записи и устройства считывания

В шестой главе поясняется конструкция датчика перемещения. Приведены расчеты положения фотоприемника датчика, описание его компонентов.

## **1. Обзор датчиков перемещения. Принципы работы и область их применения**

Датчики перемещения – это устройство, предназначенное для вычисления значения линейного или углового перемещения механического вида некоторого объекта. Естественно, такие приборы широко применяют в различных сферах, в связи с чем существуют большое количество классов датчиков перемещения. При выборе датчика больше всего обращают внимание на то как работает датчик, его точность приема сигнала, на его среднюю стоимость, а также на другие параметры характеризующих качество датчика. По категории датчики перемещения разделяются на линейные и датчики углового перемещения, например, энкодеры [1].

По принципу работы существуют следующие типы датчиков перемещения:

- ёмкостные;
- индуктивные;
- вихретоковые;
- ультразвуковые;
- магниторезистивные;
- потенциометрические;
- магнитострикционные;
- на основе эффекта Холла.
- оптические.

### **1.1. Ёмкостные датчики перемещения**

Работа данного датчика зависит от того как ёмкость конденсатора изменяется относительно его геометрической установки. Такое утверждение характерно для тех случаев, когда под физическим воздействием со стороны измеряемого объекта изменяется диаметр пластины, что ведет к увеличению или к уменьшению его емкости. Функциональная схема датчика показана на рисунке 1.1. По этому рисунку видно, как интересующий нас объект

оказывает влияние на пластины конденсатора [2]. Поскольку накопленный заряд конденсатора напрямую зависит от положения одной пластины относительно другой, определение уровня ёмкости при известных других параметрах дает возможность судить о величине зазора между пластинами. Изменение емкости можно вычислить несколькими методами. Один из известных способов, который заключается в том, что в течение полного цикла перемещения объекта необходимо вычислять его импеданс, но при этом конденсатор должен быть постоянно подключен в цепь питания. Не решает нашу задачу, так как слишком маленькая скорость измерений [3].

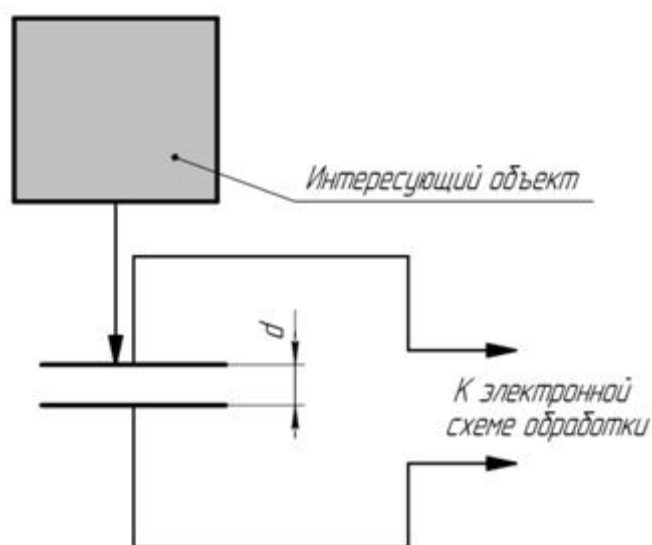


Рисунок 1.1 - Емкостной датчик линейного перемещения с непостоянной величиной зазора

## 1.2. Микродатчик угловой скорости

Люди, страдающие от осцилляций, головокружения и потери равновесия из-за вестибулярных расстройств, могут улучшить своё самочувствия, используя вестибулярный протез на нейтронах. Вестибулярная система внутреннего уха обеспечивает движение, баланс всего тела и помогает стабилизировать походку человека во время движения. Повреждение этой системы приводит к нарушению вестибулярных рефлексов что приводит к головокружению, тошноте, дисбалансу, нарушению фокусировки и

нестабильности в локомоторном движении. Таким образом, восстановление вестибулярной системы может быть достигнуто обходом дисфункционального элемента в вестибулярном пути и использованием искусственной стимуляции. Вестибулярная система человека включает в себя большое число нервных окончаний, узлов, механизмов, участвующих в балансировке опорно-двигательной системы. Ключевым компонентом, который необходим для создания эргономичного вестибулярного протеза, является подход, основанный на датчике угловой скорости работающий на основе микроэлектро-механической системы или гироскопа, но гироскопы редко применяют поскольку они слишком энергоемки для выполнения всех поставленных задач.

Маломощный, недорогой, малогабаритный гироскоп в основном применяется в телефонии и игровой индустрии. Однако требования к таким гироскопам мягче нежели чем к тем, которые выполняют роль имплантатов. В вестибулярных прототипах гироскоп склонен потреблять большую часть подаваемой энергии, и поэтому отсутствие подходящего готового гироскопа считается одним из камней преткновения при разработке полностью имплантируемого вестибулярного протеза. Современные гироскопы легкие и наиболее устойчивы к внешним вибрациям. Для питания необходимо 40 В чтобы возникло электростатическое стимулирование вибрации. Сильная вибрация в течение 10 лет может привести к выходу датчика из строя [4].

Несмотря на то, что были исследованы не вибрационные структуры, до сих пор не получено устройство без недостатков. Тех предложение на данной основе является слишком энергоемким и, как было показано, не обеспечивает необходимую чувствительность для этого устройства. Различные искусственные датчики потока волосковых клеток были построены путем выращивания «ресничек», перпендикулярных плоскости кремниевой пластины. Использование такого подхода для обнаружения движения в гироскопическом устройстве увеличивает сложность и стоимость изготовления. Кроме того, некоторые из этих «ресничек», которые



изготовлены из эпоксидной смолы SU-8, с большой вероятностью будут отделяться от кремниевого чувствительного элемента с течением времени, особенно при погружении в жидкость. Устройство, основанное на поверхностной акустической волне (ПАВ), ведет себя подобно вибрационной структуре, поскольку ей требуется энергия для постоянного поддержания движения атомов с помощью высокочастотных поверхностных акустических волн частотой  $f=160$  МГц.

В этом пункте речь идет о легком в изготовлении MEMS-микрожидкостного раствора, который потребляет значительно меньше энергии, чем вибрационные гироскопы. Первоначальная концепция этой работы была ранее представлена в 2013 году, и в настоящее время доступны только единичные модели. Предлагаемое решение имитирует естественный механизм вестибулярной системы, где герметичный микроканал заполнен жидкостью. Любое вращение системы вокруг оси канала приводит к относительному движению между самим каналом и жидкостью из-за собственной инертности жидкости. Сгибаемый объект, прикрепленный к стенкам канала, может ощущать поток жидкости при прогибе, например, с пьезорезистором.

Микрожидкостный гироскоп основан на относительно большой массе жидкости, которая отклоняет чувствительный элемент, аналогичный в принципе биологическому полукружному каналу. Динамика флюида может быть математически выражена с помощью формулы:

$$I\theta + B\dot{\theta} + K\theta = -I\alpha, (1.1)$$

где:  $\theta$  - среднее угловое смещение,  $\dot{\theta}$  - средняя угловая скорость и  $\ddot{\theta}$  - среднее угловое ускорение жидкости эндолимфы.  $\alpha$  - угловое ускорение основания, перпендикулярное плоскости канала,  $I$  - инерция,  $B$  - коэффициент затухания,  $K$  - жесткость. (В данном уравнении это жесткость пружины датчика).

Предлагаемая конструкция объединяет датчики потока на пути жидкости внутри микроканала. В датчик встроены пьезорезисторы, сопротивление

которых изменяется в зависимости от деформации, вызванной давлением, приложенным к чувствительной структуре.

Учитывая, что МЭМС-микрофлюидный датчик угловой скорости был совершенно новой конструкцией, следует, что некоторые проблемы, как ожидается, будут возникать при попытке проверить функциональность устройства.

Принцип работы устройства заключается в том, что круговой канал заполнен жидкостью. В зависимости от объёма жидкости внутри канала изменяются показания датчика.

Моделируемый частотный отклик чувствительных элементов (кронштейнов) датчика угловой скорости после его проектирования моделировался с использованием программного обеспечения для MEOV Coventor. Распределение по частоте показано на рисунке 1.2, где резонансная частота составляет 1,05 МГц, что намного выше интересующих частот.

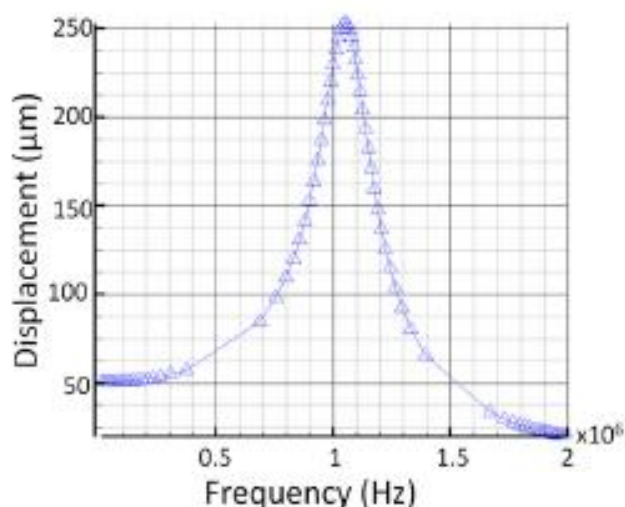


Рисунок 1.2 – График зависимости положения от частоты сигнала

Чувствительность угловой скорости датчика может быть изменена путем выбора массы текучей среды в зависимости от ее плотности и вязкости. Предложенный датчик угловой скорости был испытан после наполнения деионизированной водой и герметизации. Для измерений была подготовлена печатная плата, интегрирующая предложенный датчик, и встроенный усилитель. Система была протестирована с использованием таблицы тарифов

Tes-3T Motion Dynamic, как показано на рисунке 1.3 выходной сигнал моста датчика был усилен контрольно-измерительным усилителем и перенаправлен на входы карты сбора данных, через проводку и скользящие кольца, встроенные в таблицу тарифов. Движение и соответствующие измерения контролировались с помощью настраиваемых скриптов Labview, которые обеспечивали точную синхронизацию движения и полученных измерений [5]. Измеренные результаты проиллюстрированы на рисунке 1.4 а, б, которые демонстрируют, что чувствительность системы сравнима с чувствительностью человека, в то время как общая потребляемая мощность снижена до 300 мкВт при 2 В на ось, включая измерительный усилитель. Потребляемая мощность может быть отнесена на потребляемую постоянным смещением датчика и мощностью измерительного усилителя. В текущем прототипе доказательства концепции измерительный усилитель потребляет 100 мкВт при 2 В, в то время как непрерывное смещение исследуемого датчика потребляет 200 мкВт при 2В. Чтобы еще больше снизить мощность, можно включить цикл смещения Уитстона в соответствии с частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Точный рабочий цикл будет зависеть от максимального интегрального значения пьезорезистора и максимальной емкости, связанной с выходным узлом. Кроме того, можно уменьшить напряжение питания за счет чувствительности устройства.

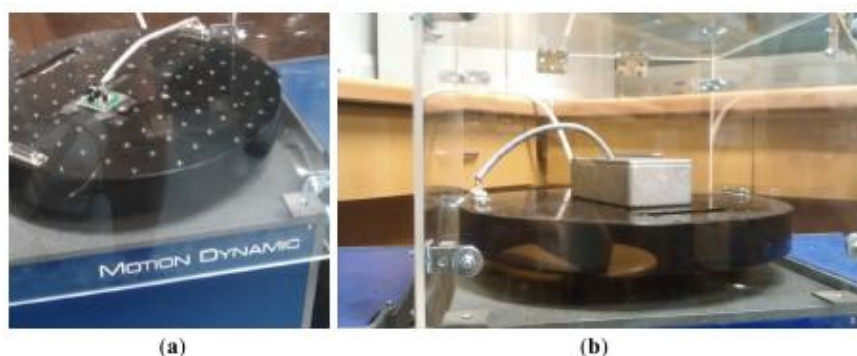


Рисунок 1.3 - Настройка тестирования для характеристики предлагаемого датчика угловой скорости. а - печатная плата с датчиком устанавливается сверху основания; б - печатная плата с датчиком помещается в алюминиевую коробку и монтируется сверху основания.

Алюминиевый корпус обеспечивает электромагнитное экранирование тестируемого устройства, чтобы избежать подхвата электрических шумов, исходящих от двигателя таблицы скорости.

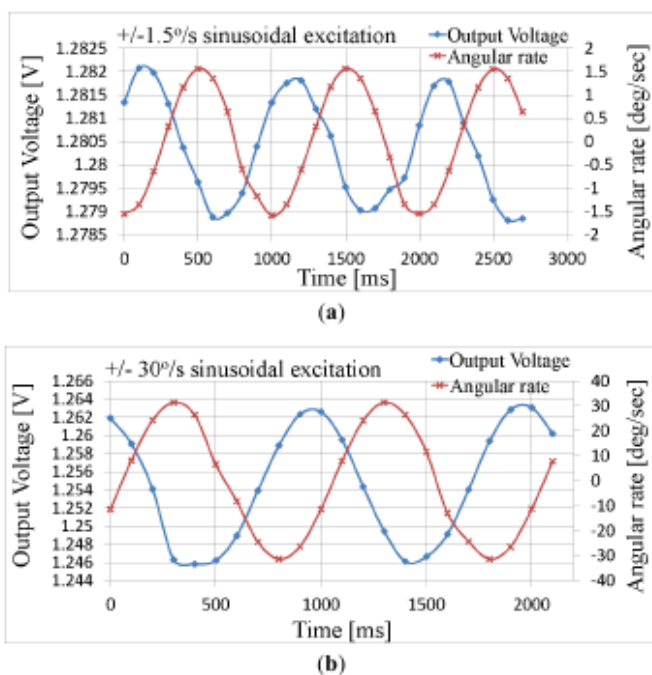


Рисунок 1.4 - Измеренные результаты выходного напряжения относительно угловой скорости. а - угловые скорости между минимум и максимум  $\pm 15^\circ/\text{с}$ ; б - угловые скорости до  $\pm 30^\circ/\text{с}$  (синусоидальная модуляция).

Не решает нашу задачу по причине несопоставимости требованиям моей диссертационной работы.

### 1.3. Емкостные датчики перемещения

Следующей схемой где на выходе снимется показания электрической емкости конденсатора, имеющая в наличии плоскостной конденсатор с подвижным непроводящим электрический заряд материалом. Схема такого датчика показана на рисунке 1.5. Движение непроводящего материала между пластинами конденсатора также, как и в предыдущем случае приводит к изменению емкости. Материал неким образом монтируется на испытуемый объект, в этом случае по изменению емкости можно судить о том на какое расстояние переместился объект. Существуют и другие варианты такого типа датчика. Если материал обладает свойством не проводить электрический ток,

то в таком случае он может служить в качестве диэлектрической среды в конденсаторе. Не решает нашу задачу, слишком низкая частота измерений.

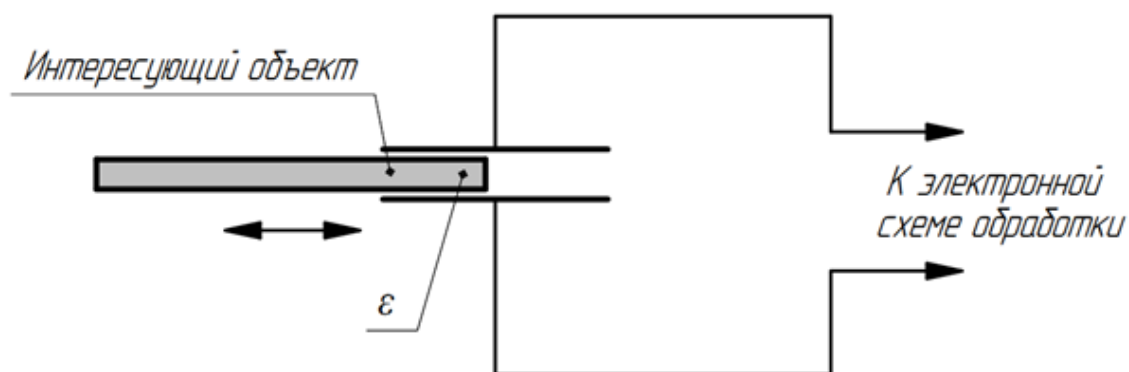


Рисунок 1.5 - Емкостной датчик линейного перемещения с перемещающимся непроводящим материалом

#### 1.4. Индуктивные датчики перемещения

В одном из возможных вариантов конструкции датчика такого типа приемником служит якорь с намотанной катушкой, в которой перемещается сердечник. Смещение внешнего объекта приводит к изменению положения сердечника, что сопровождается изменением величины потокосцепления среди двух катушек трансформатора [6]. Ознакомиться с конструкцией индуктивного датчика с трансформатором можно по рисунку 1.6. Так как амплитуда сигнала во второй обмотке напрямую зависит от показателя потокосцепления, по уровню амплитуды можно сделать заключение о положении сердечника, а значит и о положении измеряемого внешнего объекта.

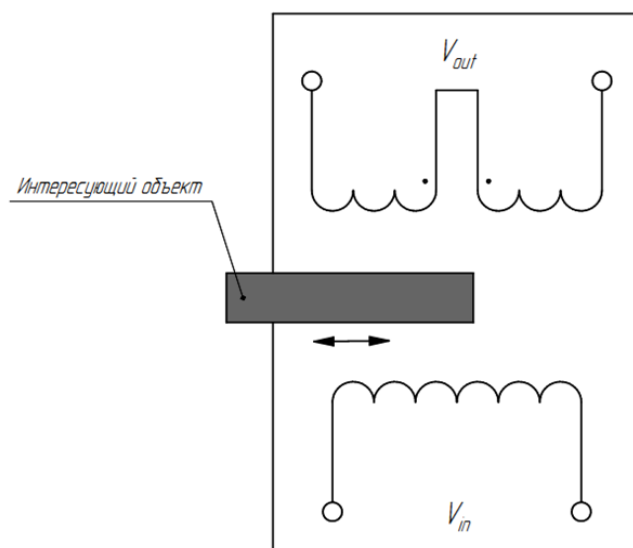


Рисунок 1.6 - Индуктивный датчик перемещения на трансформаторе и сердечником

Следующая конфигурация на рисунке 1.7 имеет упрощенную схему, однако она пригодна лишь в узком диапазоне использования и применима лишь для измерения небольших перемещений, вибраций тех объектов с ферромагнитной структурой. По такой схеме испытуемый объект берёт на себя роль магнитопровода, другая структура его положения введет к изменению индуктивности измерительной медной катушки [7].

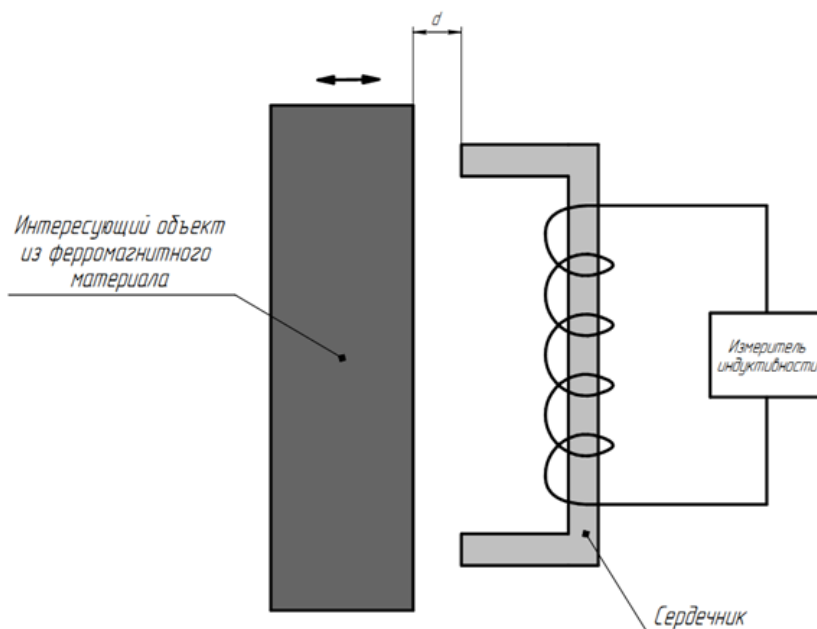


Рисунок 1.7 - Индуктивный датчик перемещения для объектов из ферромагнитных материалов

## 1.5. Вихретоковые датчики перемещения

В состав таких датчиков входит генератор магнитного поля и устройство регистрации, вычисляющая величину индукций вторичных полей с магнитными свойствами. Генератор располагается вблизи перемещающегося объекта, создает вокруг него магнитное поле, которое, вырабатывает вихревые токи, пронизывающие материал объекта, далее они образуют вторичное поле с магнитными свойствами. Данная картина изображена на рисунке 1.8. Характеристики вторичного поля определяются регистратором, по ним находится расстояние до объекта, чем меньше расстояние до объекта, тем больший магнитный поток будет пронизывать его область, что приведет к увеличению концентрации вихревых токов и индукции, возникающей во вторичной катушке, которую пронизывает магнитное поле. Подобный прием измерения используется и в вихретоковых дефектоскопах, но в отличие от остальных датчиков индуктивного типа на свойства вторичного магнитного поля влияет не само расстояние до объекта, а наличие скрытых дефектов в его внутренней структуре. Такой метод предполагает, что датчик будет расположен на незначительном расстоянии от объекта, но он фиксирует перемещения только тел с металлической кристаллической решеткой.

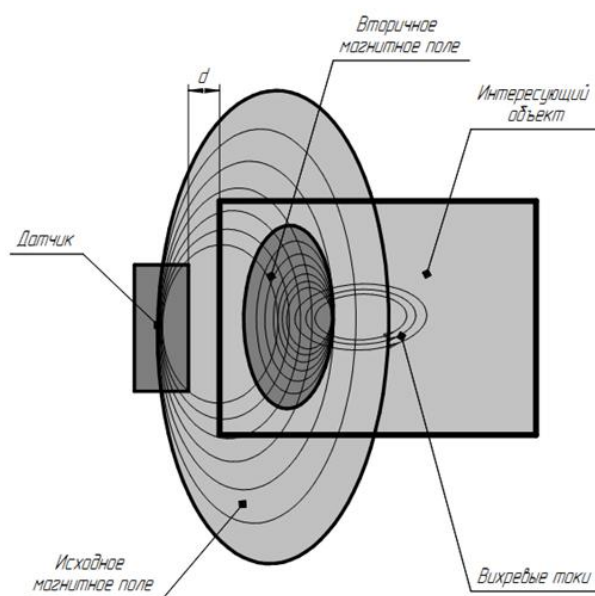


Рисунок 1.8 - Вихретоковый датчик перемещения

## 1.6. Ультразвуковые датчики перемещения

Ультразвуковые датчики работают по принципу радара – записываются отраженные волны, поэтому датчик выполнен из приемника ультразвуковых волн и регистратора. Схема ультразвукового датчика представлена на рисунке 1.9. Конструкция выполнена в герметичном корпусе из диэлектрического материала. Выявление задержки по времени между моментами передачи и считывания ультразвукового импульса дает возможность измерять расстояние до внешней части объекта с максимальным показателем, доходящей до десятых долей миллиметра. Вместе с оптическими, ультразвуковые датчики на данный момент являются самыми универсальными, не имеющих конкурентов, и высокоэффективным бесконтактным методом измерения [8]. Такой принцип используется для обнаружения дефектов в структуре объекта, с подобной задачей лучше всех справляются ультразвуковые дефектоскопы.

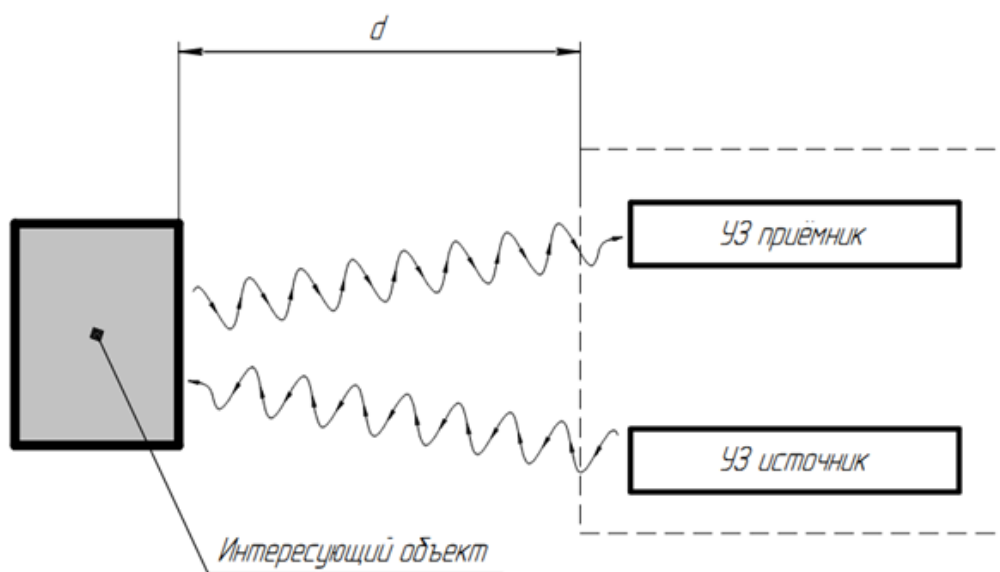


Рисунок 1.9 - Ультразвуковой датчик перемещения

## 1.7. Магниторезистивные датчики перемещения

В существующих магниторезистивных датчиках перемещения применяется зависимость, как это обычно происходит, электронного сопротивления, как многие выражаются, магниторезистивных пластинок от направления и величины индукции наружного поля, состоящего из магнитных



линий. Датчик, обычно, выполнен из магнитного материала с постоянными свойствами и электронной схемы, содержащей соединенные по мостовой технологии магниторезистивные материалы в форме пластинок и источник неизменного напряжения. Ознакомиться с схемой можно по рисунку 1.10. В исследуемом датчике можно подчеркнуть то, что интересующий объект, выполненный из ферромагнитного материала, передвигаясь в магнитном поле, преобразуется в другую его конфигурацию, в итоге чего также меняется отношение напряжение на ток пластинок, и, известная всем, мостовая схема засчитывает рассогласование, по величине которого можно сказать насколько переместился объект [9].

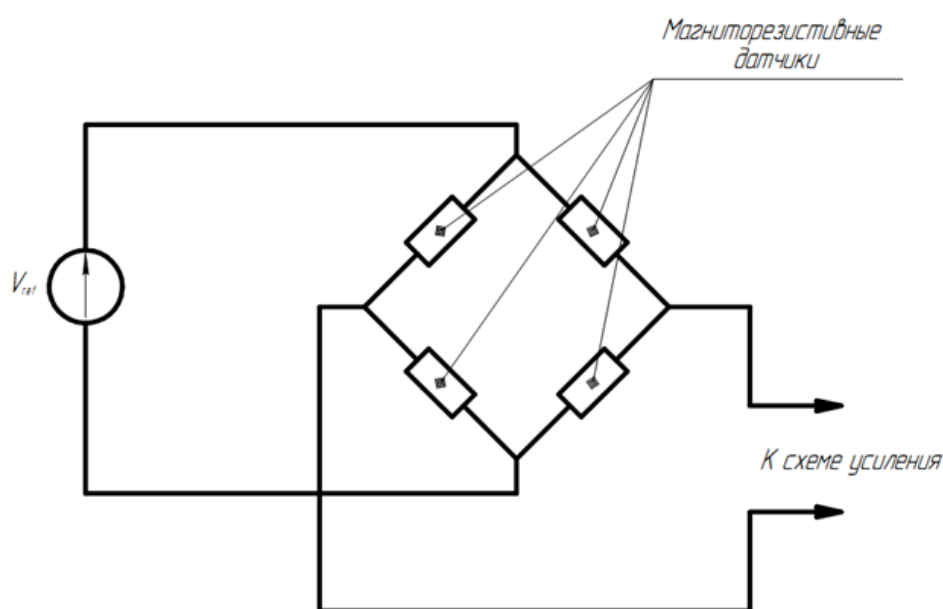


Рисунок 1.10 - Магниторезистивный датчики перемещения

### 1.8. Датчики на основе эффекта Холла

Датчики такого типа обладают конструкцией схожей с конструкцией магниторезистивных датчиков, но работают они с использованием существующих законов, таких как эффект Холла — прохождение электрических зарядов через проводящий ток материал, на который влияет наружное магнитное поле, приводит к появлению напряжения в поперечном сечении проводника [10].

## 1.9. Магнитоотриксционные датчики перемещения

Магнитоотриксционный датчик выполнен в виде протяжённого канал - волновод, вдоль которого может без усилий передвигаться неизменный круглый магнит. Важным фактом является то, что внутри волновода имеется проводник, который может при воздействии на него электронных импульсов производить магнитное поле вдоль собственной длины на максимально возможное расстояние. Схема данного типа датчика изображена на рисунке 1.11. Сформированное магнитное поле взаимодействует с полем постоянного магнита и конечный результат в виде поля создает такой необходимый момент кручения канала, который способен вместить в себя волновод (так называемы эффект Вайдемана). Импульсы кручения перемещаются по каналу в одну и другую сторону со звуковой скоростью материала канала. Запись результатов временной задержки в промежутке между отправкой электронного сигнала и приёма импульса вращения способствует к определению интервала до постоянного магнита, то есть можно рассчитать его место положения. Канал может состоять из весьма протяженной длины (до десятков метров), а положение магнита обычно рассчитывается с точностью до нескольких микрометров. Магнитоотриксционные датчики оснащены такими отличительными чертами как отличной повторяемостью, разрешением, устойчивостью к плохим внешним условиям и недостаточной чувствительностью к динамическим температурам [11].

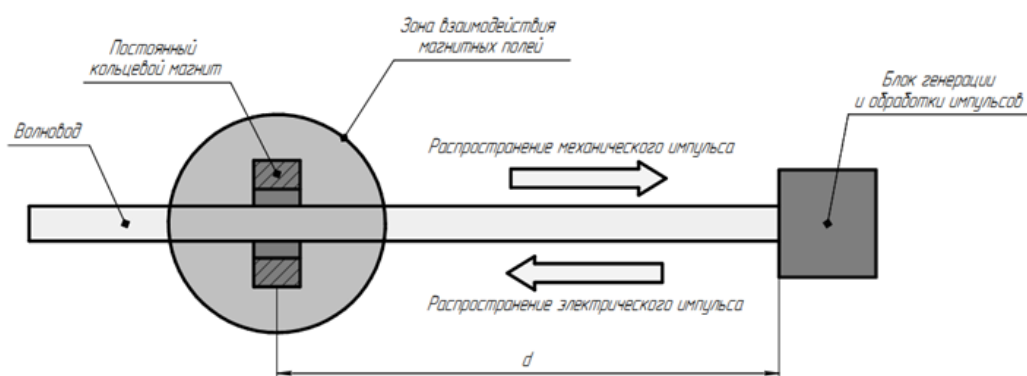


Рисунок 1.11 - Магнитоотриксционный датчик перемещения

### 1.10. Потенциометрические датчики перемещения

Датчик представленного типа изображенный на рисунке 1.12 в своем составе включает в себя электрический контур, имеющий потенциометр. Линейное передвижение объекта влечет за собой к изменению отношения напряжения к величине тока потенциометра (так называемого переменного резистора). В тех случаях, когда через потенциометр проскакивает постоянный ток, то падение разности потенциалов на нём будет равномерно изменяться относительно величины сопротивления, и, из этого следует заключение, параметру линейного перемещения испытуемого объекта.

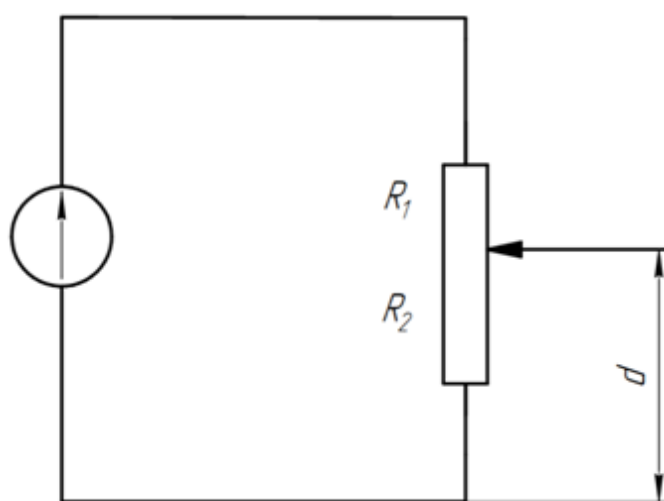


Рисунок 1.12 - Потенциометрический датчик перемещения

Вместе с механическими датчиками перемещения, потенциометрические датчики имеют большую известность чем остальные в силу своей несложной структуры и невысокой стоимости, хотя для локальных, прецизионных и бесконтактных измерений на данный момент всё чаще применяются датчики, выполненные на основе оптических эффектов.

### 1.11. Оптические датчики перемещения

Бывает большое число вариаций схем датчиков перемещения, работа которых основана на множестве оптических эффектах. Часто-используемым является схема оптической триангуляции – датчики, сконструированные по данной схеме находят пройденное перемещение объекта по углу,

образованного в результате отражения луча от поверхности. Из всех видов схем оптических датчиков в электронике чаще всего применяют датчик, выполненный по схеме оптической триангуляции, который располагается под углом к объекту и принимает излучение, отраженное от его корпуса и преобразует её в направленное движение заряженных частиц. По обработанным данным фиксируется расстояние  $d$  до интересующего объекта. Датчик выполненной по схеме оптической триангуляции показан на рисунке 1.13. Плюсом всех оптических датчиков является то, что они способны проводить измерение, не контактируя с объектом. Также стоит отметить тот факт, что они весьма точны и обладают высокой скоростью работы.

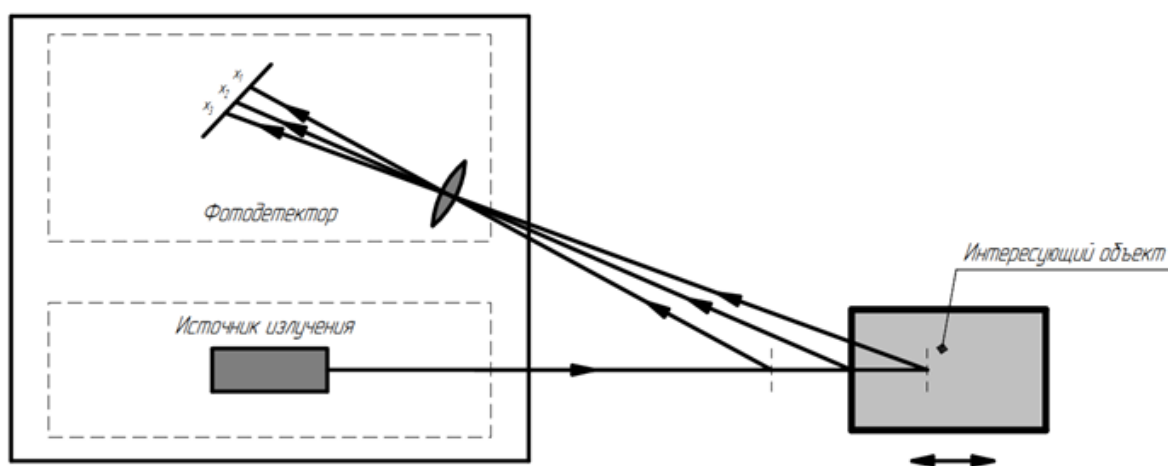


Рисунок 1.13 – Оптический датчик перемещения, построенный по технологии оптической триангуляции

Другой оптический датчик, который регистрирует малые перемещения объекта, вычисления величины его вибрация, выполнен в виде двух дифракционных решеток, а также в его конструкции входит встроенный источник света и фотоприемник. Схема датчика, выполненная данным изображена на рисунке 1.14. Устроен он следующим образом: одна из решёток находится в статическом режиме, а вторая динамична и может перемещается в ограниченной области, который специально рассчитывается, чтобы фотодатчик мог уловить весь диапазон отраженного света. Дифракционная решетка необязательно должна находиться на расстоянии от объекта, она также может крепиться на нем. Точность измерений зависит от

периода решетки, чем он меньше, тем выше точность обрабатываемого сигнала, но в свою очередь динамический диапазон уменьшается в разы.

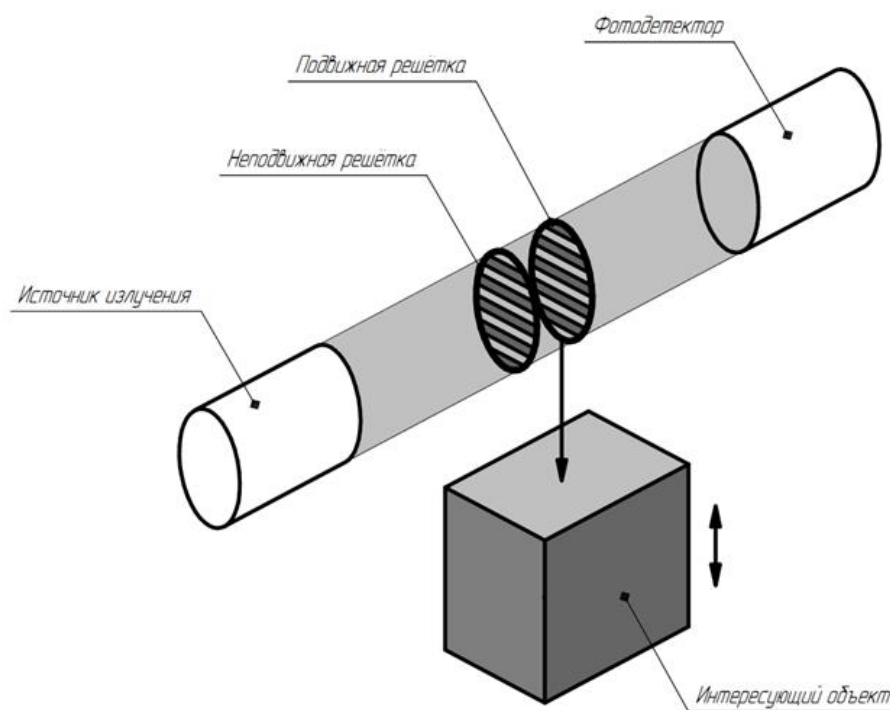


Рисунок 1.14 - Оптический датчик перемещения, выполненный из двух дифракционных решеток

Дополнительным свойством оптических датчиков является возможность воспринимать эффект поляризации. В таких датчиках реализован алгоритм выборки объектов по отраженным свойствам их наружного покрытия, т.е. датчик воспринимает только тот участок света, который отразился от объектов с хорошими отражающими свойствами, например, объект чья внешняя сторона отполирована, стекло, обработанная сталь и прочие материалы с высоким коэффициентом отражения. Остальные объекты чья поверхность плохо-обработанная, имеет выемки, повышенную шероховатость отсеиваются датчиком. Недостатком таких датчиков это завышенная стоимость по сравнению с другими оптическими датчиками. Такая цена обусловлена высокой точностью и чувствительностью к поляризации.

В качестве недорогого оптического датчика можно привести пример датчика с использованием внешнего источника света. Основной механизм оптической компьютерной мыши в настоящее время является оптический

датчик светового потока, который оценивает относительное смещение поверхности под мышью путем отслеживания микротеней поверхности. Датчик оптического потока - это датчик перемещения, который хорошо измеряет линейные смещения, но он очень чувствителен к изменяемой величине измерения, сильно зависит от измерительной поверхности и чувствителен к траектории отслеживания. Низкая стоимость и широкий спектр применения способствовали популярности датчика среди пользователей. В оптическом датчике для оценки перемещения используется вязкоупругий подающийся к деформации полиэтилен. Датчик используется для оценки перемещения мобильных роботов. Дополнительный функционал такого датчика применение в качестве оценки положения листовых материалов. Для оценки траектории движения датчики устанавливаются на жестком корпусе. В лазерной мыши оптический датчик используется для оценки изменений положения, вызванных перемещающимся объектом. Датчик можно расположить на сферической поверхности шара для пинг-понга, который поддерживался плавающим над оптическим датчиком воздухом. Датчики могут применяться в хирургии, для определения вращающейся поверхности. В работе с оптическим датчиком расхода были использованы два внешних лазерных устройства для оценки положения подвижного робота на участках с повышенной скользкостью. Датчик со специальными линзами используются в беспилотном летательном аппарате (БПЛА), предоставляя информацию о его текущей скорости, применяется особое устройство под БПЛА.

Имеются и другие примеры по использованию датчика. Бывают датчики деления или датчики считывающие двоичный код.

Существуют множество способов по комбинированию лазеров с измерительными системами. Измерительная установка применяется для измерения формы волны, вызванной вибрацией артериального давления у пациентов с болезнью Паркинсона. Измерительная установка использовалась для оценки качества яблок. Лазер попадая на яблоко определяет её твердость,

содержание крахмала, наличие вредных веществ. Также лазер используется для обнаружения дефектов сварочного шва.

В недорогих установках лазер свет освещает поверхность под сенсором, и эта асимметричная подсветка является причиной в проблемах измерения. Было предложено использовать внешнюю систему освещения, чтобы избежать проблем, вызванных прямым поверхностным освещением и внешнее лазерное устройство для освещения поверхности под оптическим датчиком потока. Для подтверждения этого предложения были предложены и проанализированы различные эксперименты по измерению величин такие как: контроль процесса сушки краски на веществе, измерение изменения диаметра артерии из-за сердечного удара, оценка углового смещения во время вращения стального шара, и оценка поступательного движения средней точки деревянного бруска в связи с приложенной нагрузкой. По полученным данным можно сформулировать вывод, что для увеличения рабочего расстояния между поверхностью диффузора и датчиком мыши до 300 мм можно использовать внешнее лазерное устройство и отражающую поверхность. Этот вывод открыл новый диапазон применений, и целью этой работы является продвижение в этом направлении [12].

Главной целью этой работы изучение новых возможностей, которые возникают при использовании внешнего лазерного устройства с оптическим датчиком. Это вывод по определению измерительной установки, конструкция которой основана на вспомогательной поверхности диффузора, которая может использоваться двумя различными способами: измерение смещения поверхности или измерение смещения лазерного пятна на поверхности. В обоих случаях выражена система измерения. Основными преимуществами этой измерительной установки: чувствительность измерения смещения может быть изменена путем регулировки расстояния между поверхностью и оптическим датчиком потока. Система может использоваться для измерения очень низких механических колебаний, применяемых к лазерному устройству (измерение проекции смещения лазерного пятна).

Материалом, используемым в данном устройстве является оптический датчик потока, лазерное устройство и пластиковый материал диффузора. Лазерное пятно направлено на материал рассеивателя, и микроскопическая структура преломляется, передается и фиксируется на изображении, полученном и анализируемом оптическим датчиком потока. Поэтому при такой конфигурации оптический датчик потока должен быть способен обнаруживать небольшие смещения поверхности диффузора, а также относительные смещения лазерного пятна.

Оптический датчик ADNS-3080 представленный на рисунке 1.15, изготовленный компанией Avago Technologies (Сан-Хосе, штат Калифорния, США), многофункциональный оптический датчик потока, который включает внутреннюю камеру с низким разрешением и цифровой сигнальный процессор (ЦСП), запрограммированный для оценки относительного смещения микро теней на поверхности. Это семейство оптических датчиков использует стандартную и универсальную технологию комплементарного металлооксидного полупроводника (КМОП), которая интегрирует камеру и ЦСП в один и тот же чип. Датчик вычисляет оптический поток, выполняя сравнительный анализ последовательности изображений, полученных на плоской поверхности перед самим датчиком, используемый для оценки изображений. Перемещение удастся измерить в различных разрешениях, например, 800 точек (или инкрементных импульсов) на дюйм. В этой конкретной конфигурации датчик оптического потока калибруется внутри для измерения одного импульса, когда поверхность на расстоянии 2,4 мм перед датчиком сдвигается на 31,75 мкм и любое изменение исходной установки измерения, предложенное изготовителем (например, изменение расстояние между датчиком и поверхностью) потребует планомерной специализированной процедуры калибровки для преобразования отсчетов, измеренных датчиком, в оценке измеряемой физической величины.



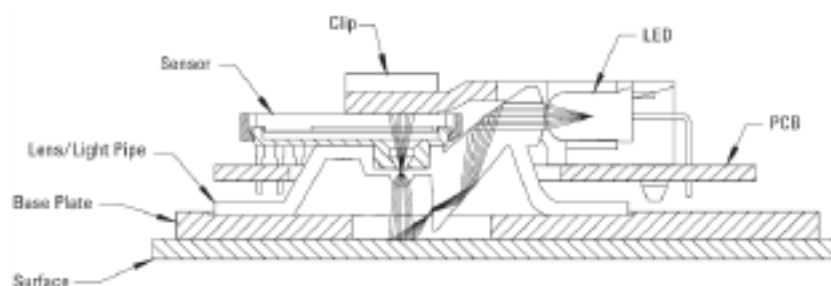


Рисунок 1.15. - Вид поперечного сечения компонентов оптического датчика ADNS-3080

Оригинальная конструкция лазерной мыши на основе этого оптического датчика объединяет различные части устройства, что хорошо видно на рисунке 1.15: оптический датчик потока, внешний светодиод для освещения поверхности перед сенсором и небольшая пластиковая конструкция, которая включает в себя две выпуклые линзы, чтобы фокусировать свет светодиода и изображение, полученное оптическим датчиком. Комбинация всех этих деталей была оптимизирована для получения сфокусированных изображений поверхности на очень коротком расстоянии (от 2,3 до 2,5 мм), хотя этот диапазон можно увеличить, заменив оригинальный объектив. Датчик оптического потока имеет внутренний замкнутый контур для управления интенсивностью светодиода с использованием выходной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

ADNS-3080 включает в себя встроенное устройство формирования изображения с чувствительной матрицей  $30 \times 30$  точек на дюйм. Этот оптический датчик работает с очень высокой частотой кадров и имеет скоростной внутренний затвор. Первоначально он был предназначен для получения плоских изображений (примерно  $1,82 \times 1,82$  мм) на очень коротком расстоянии (2,4 мм) для оценки смещения.

ADNS-3080 имеет стандартную частоту Serial Peripheral Interface (SPI) для чтения, записи внутренних регистров и управления общими механизмами датчика. Смещение датчика происходит путем считывания регистров Delta Y и Delta X, которые получают и преобразуют измеренное значение. Согласно спецификациям производителя оптический датчик может получать и

обрабатывать изображения с очень высокой скоростью: от 2000 до 6469 кадров в секунду из-за малого размера полученных изображений ( $30 \times 30$  пикселей). Наконец, оптический датчик имеет специальный режим доступа к пакетной передаче, который требует только 107мкс (при работе с шиной SPI на полной скорости) для считывания всех внутренних регистров, определяющих измеренное движение [13].

Существуют легко-программируемые датчики перемещения. Мониторинг различных геофизических и биофизических параметров выполняется с помощью датчиков SAR (Synthetic Aperature Radar) для таких задач как оценка последствий после землетрясений, картирование просадки, мониторинг сбора урожая, вырубка леса и оценка воздействия пожаров и мониторинг разливов нефти. В отличие от устройств с заданным временем управления включения, бортовое SAR обеспечивает гибкость наблюдения, необходимую для критически важных или быстрых динамических приложений. Однако высокие эксплуатационные расходы и доступность датчиков ограничивают применение бортового PCA. Беспилотные летательные аппараты предлагают экономически выгодную перспективу для зондирования. БПЛА можно дистанционно пилотировать и непрерывно эксплуатировать в течение многих часов. Требования к взлету и посадке невелики, а их техническое обслуживание проще, чем использование пилотируемых самолетов. К минусам можно отнести то, что на пилотирование БПЛА тратится много энергии. Поэтому разработка SAR для БПЛА применима для недорогого тестирования инновационных SAR-технологий, основанных на новых инструментальных архитектурах или других возможностях, с помощью которых можно получить доступ к базам данных. В представленном случае демонстрируется, что многоканальная работа в нескольких диапазонах может быть достигнута на небольших участках БПЛА, что характерно для экспериментальной оценки интерферометрических и поляриметрических приложений SAR.

Конструкция и разработка сенсора SAR для установки на платформу UAV накладывает серьезные ограничения на компактность, вес, энергопотребление и надежность. С учетом этого были разработаны два экспериментальных SAR-датчика С и Х диапазона с однопроходными интерферометрическими или поляриметрическими возможностями. SAR-датчики представляют собой легкие и автономные управляемые приборы, которые работают со ступенчатой линейной частотно-модулированной непрерывной волной. Их частотно-модулированная архитектура основана на ранее разработанном SAR с доступными компонентами в секциях управления и хранения данных. Блок-схема такого датчика показана на рисунке 1.16.

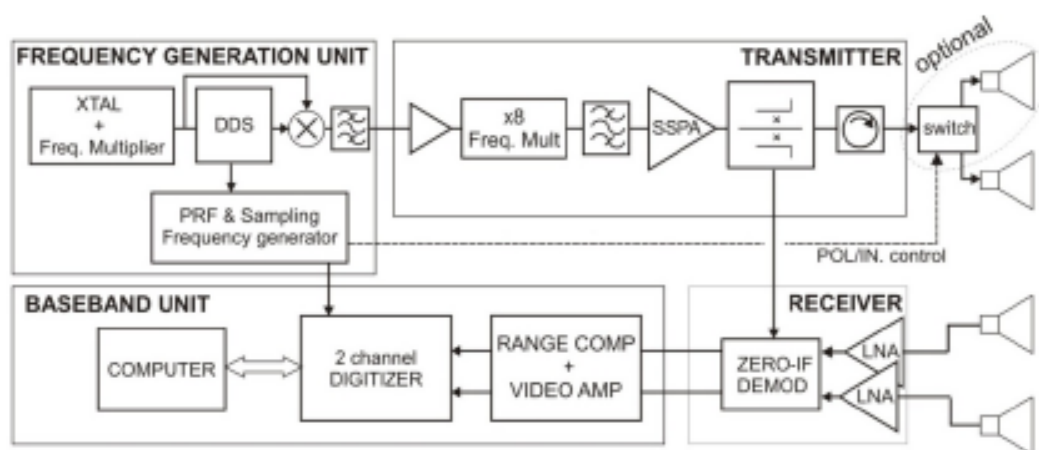


Рисунок 1.16. - Блок-схема ARBRES-X. ARBRES-C с у множителем частоты в блоке датчика.

В этом случае упор делался на уменьшение веса и объема без потери производительности. Этот датчик используется в лаборатории с базовыми микроволновыми приборами, так как в нем используются простые радиочастотные и микроволновые схемы.

## 2. Обзор типов фотодатчиков

### 2.1. Фотодатчик – PSD

Фотодатчики - PSD (Position sensitive detectors) – это фотодиод, светочувствительный элемент которого выполнен в виде полоски.

Коэффициент двух токов на выходах указывает на тот факт, что на внешней стороне фотодиода располагается луч.

Основные параметры PSD технологии:

- весьма неплохое разрешение на однородных и нечетких отражающих свет материалах;
- дешевый не затратный метод изготовления;
- многофункциональность габаритных размеров датчиков;
- довольно-таки высокая скорость измерений.

В итоге можно сделать вывод, что PSD датчики желательно использовать для решения простых задач, где дешевизна конструкции является критичным фактором [14].

## **2.2. Комплементарная структура оксид – полупроводник – CMOS**

Комплементарная структура металл оксид – полупроводник – CMOS (complementary metal – oxide – semiconductor) – высоко-универсальный проводниковый материал со средней шириной запрещенной зоны, выполненный из множества "светопоглощающих" пикселей и схемы обработки параметров. Место расположение интересующего объекта определяется по тому как расположится световое пятно на внешней стороне датчика.

К основным характеристика CMOS технологии присваиваются такие параметры как:

- приемлемое разрешение и точность во время работы с различными материалами (матовыми, блестящими, не сильно темными и несветлыми поверхностями);
- высокое качество измерений даже в условии сильной контрастности (нету "нечетких" областей по сравнению с датчиками, выполненными по CCD технологии);
- приемлемая скорость измерений;
- пригодна к созданию портативных корпусов датчиков.

На рисунке 2.1 изображена схема CMOS датчика



Рисунок 2.1 – Микросхема комплементарной структуры датчика оксид-полупроводник

Из вышеперечисленного вытекает тот факт, что CMOS датчик — это фотоприемник, который применяется в принтерах, планшетах, сканерах для решения многих задач, связанных с считыванием информации [15].

КМОП матрица – группа полупроводниковых технологий, внедренная в структуру интегральных микросхем и схожая по физическим параметрам ее схемотехникой конструирования микросхем. На данный момент в мире большинство современных микросхем выполнены по КМОП технологии. В процессе создания КМОП матриц применяются полевые транзисторы с затвором, изолированным от других слоев с каналами неодинаковой проводимости. КМОП схемы отличаются от биполярных низким потреблением электроэнергии в установившемся режиме (во многих случаях можно говорить, что потребление энергии происходит лишь во время перехода с одного состояния в другое. Если сравнить структуру КМОП матрицами с другими структурами данного типа (N-МОП, P-МОП – металл окисло полупроводник с подложкой электронной и дырочной проводимости) то можно заметить наличие полевых транзисторов с отрицательной и положительной проводимостью в одной из множества позиций кристалла; в результате малого промежутка среди элементов КМОП-схемы имеют намного выше параметр скорости отвечающий за процессы работы и малое

потребление электроэнергии, но в тоже время характеризуются намного сложным техническим процессом производства и недостаточной плотностью материала из которого выполнена подобная структура.

По данному способу выпускаются дискретные полевые транзисторы с непроводящим затвором, например, КМОП показанная на рисунке 2.2 – матрица чувствительная к свету, сконструированная методом КМОП – технологии [16].

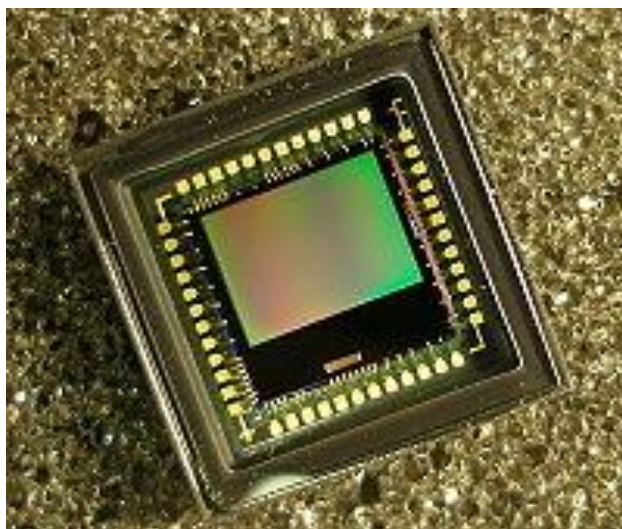


Рисунок 2.2 – КМОП матрица

В КМОП-матрицах ключевую роль играет полевой транзистор с изолированным затвором с каналом переменной проводимости. На рисунке 2.3 показана схема эквивалентного типа ячейки КМОП-матрицы.

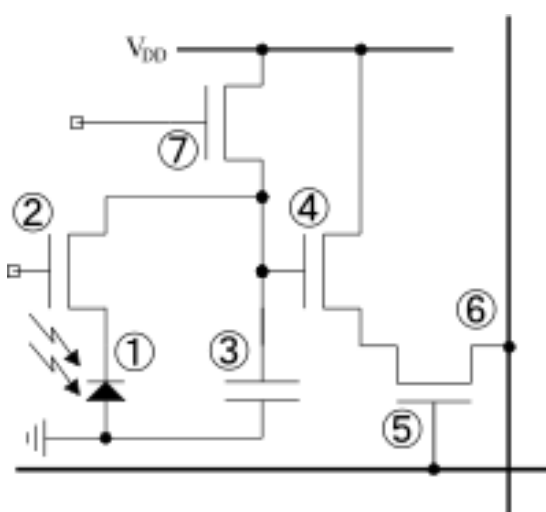


Рисунок 2.3 – Схема электрическая принципиальная структуры ячейки КМОП матрицы: 1- фотоэлемент; 2 – затвор; 3 – накопитель электрической энергии;

4- усилитель сигнала; 5 – сигнальная шина определения соответствующей строки; 6 – вертикальна шина, переносящая информационный сигнал процессору; 7 – сигнал по которому происходит обнуление выходов схемы.

Под конец 1960-х гг. некоторые ученые отмечали, что КМОП матрицы имеют признак, отвечающий за чувствительность к свету. Однако имеющиеся на то время приборы с зарядной связью давали настолько высокую восприимчивость к свету и хорошее воспроизведение изображения, что матрицы, выполненные по КМОП структуре, не приобрели популярность. К концу двадцатого века структура КМОП и ее метод производства приобрели видимые улучшения. Успех в развитии технологий производства матриц в так называемой субмикронной фотолитографии дал возможность использовать в КМОП-сенсорах самые технологичные из всех существующих сенсоры, которые отличались от остальной минимальной толщиной. Это все вело к масштабированию свето-восприимчивости за счет немалого процента облучаемой площади ячейки матрицы. Прирост в технологии различных видов КМОП-сенсоров совершилась, когда в зоне реактивного движения НАСА удачно реализовали активные датчики пиксельного типа [17]. Исследования матриц были совершены десятки лет тому назад, но на практике оптические сенсоры стали применять лишь к началу 1993 года. В каждом пикселе с целью считывания информации присутствует усилитель, выполненный из транзисторов, что позволяет получать напряжение из заряда структуры пикселя. Это позволило открыть доступ к фотодетекторам воплощенные в микросхемах операционного запоминающего устройства. Как итог к 2008 году КМОП структуры полностью вытеснили с производства позиционно запоминающее устройство.

Принцип работы: перед началом съемки подается сигнал с целью сброса. Во время работы идет процесс накопления заряда фотодиодом. В течение считывания совершается выборка параметра разности потенциалов на конденсаторе.

Преимущества таких датчиков в низком использовании электричества в устойчивом состоянии. Это дает возможность использовать такие матрицы в комплексе энергонезависимых приборов в датчиках движения и в комплексах наблюдения, пребывающих долгое время в состоянии покоя или ожидания. Вторым достоинством матрицы КМОП взаимосвязь технологии с другими цифровыми энергопотребителями. Такой метод приводит к возможному случаю группирования на единичном кристалле различной аналоговой и цифровой обрабатывающей структуры (КМОП-метод, это технология, которая специализируется на захвате света, изменения одного сигнала в другой, обработки информации, очистки посторонних сигналов сторонних компонентов), это дало новый шаг к новому пути, который включал в себя уменьшение размера камер для различного оборудования и удешевление стоимости так как происходили отказы от большинства микросхем процессоров [18].

Благодаря такому механизму свободного доступа удавалось выполнить процесс пересчета различных выбранных групп ячеек памяти. Такой метод именуется как уменьшение размера зафиксированного изображения и всевозможное увеличение скорости обработки данных отталкиваясь от позиционно чувствительных сенсоров, так как в последних для последующей обработки нужно разгрузить полностью всю доступную информацию. Возникает возможность использовать единственную матрицу исключительно в различных режимах. Имеется в виду процесс, в ходе которого удастся считать только малую долю информации, можно организовать неплохой режим натуральной визуальной оценки изображения на имеющем в аппарате мониторе с относительно низкой численностью выявленных пикселей. Удастся проанализировать единственную часть кадра и использовать её для показа в полноэкранном режиме. В результате чего такой метод позволяет настроить ручную фокусировку. Имеются возможности производить быструю съемку с минимальной величиной кадра и разрешением.



Усилительные камеры могут размещаться внутри пикселя в качестве дополнительного механизма. Это дает возможность формировать каскады для усиления сигнала и увеличивать чувствительность в режиме нехорошего освещения. Такая возможность менять коэффициент усиления любого цвета повышает качество балансировки белого цвета.

Низкая стоимость в сравнении с позиционно светочувствительными матрицами, особенно при немалых величинах матриц.

Недостатки: фотодиод занимает большую часть площади элемента матрицы, в сравнении с ПЗС – матрицей с переносом целых кадров. В результате чего первые матрицы кремний металл окисло полупроводник обладали гораздо меньшей восприимчивостью к свету, чем допустим ПЗС. Хотя в 2007 году компания Sony выпустила на рынок новую продукцию видео- и фотокамер с КМОП-матрицами новейшего поколения с технологией Exmor, которая успела зарекомендовать себя в применении в КМОП-матриц в узконаправленных устройств оптики таких как электронные модели телескопов. В данных матрицах возле пикселя имеется оболочка, которая препятствует попаданию частиц света на элемент чувствительного к световому излучению, была передвинута из крайне верхнего уровня на самый низкий слой матрицы, что дало возможность преумножить физический размер пикселя при существующих геометрических параметрах размера матрицы и осуществить свободный доступ элементов к свету, что конечно же увеличило восприимчивость к световому потоку каждого пикселя и целых матриц в комплексе. Произошло сравнение КМОП матриц с ПЗС-матрицами по световосприимчивости, но выяснилось, что эти матрицы более энергосберегающие и лишены недостатка – хорошо воспринимают точечный свет. К концу нулевых двадцать первого века японская компания Sony модернизировала КМОП-матрицы с применением новейших технологий, добавив к ним новую функцию такую как освещение с противоположной стороны. Сама мысль технологии несложная и целиком подтверждает название.

Фотодиод ячейки матрицы представляет из себя не очень большой размер, параметр разности зарядов на выходе целиком зависит от свойств каждого элемента пикселя матрицы. Данным образом, у всех пикселей матрицы существует собственная характеристическая кривая и возникают проблемы в разбросе светочувствительности и параметра контраста матрицы. Как итог сделанные матрицы в самом начале уже имели низкое качество и высокий уровень специфического шума.

Наличие на матрице большого числа компонентов увеличивает риск возгорания устройства и появления теплового шума.

### **2.3. Позиционно чувствительная матрица – CCD**

Позиционно восприимчивая форма – CCD (charge-coupled device) это полупроводниковый компонент с подобранными в одну строку фотодиодов. Поочередное чтение сведений об интенсивности света дает возможность установить месторасположение светового пятна.

Превосходства CCD компонента:

- весьма высочайшее разрешение и достоверность при использовании с разными веществами (непрозрачными, сверкающими, ясными и черными поверхностями);

- высокая скорость измерений параметров;

- фотореалистическое сканирование освещения;

Общий механизм и правила работы матрицы.

ПЗС-форма выполнена из поликремния, отделённого с кремниевой подложкой, у которой во время подачи напряжения меняется структура потенциала зарядов около электрода.

До экспонирования – как правило, во время воздействия некоторой составляющей напряжения на электроды противоположной полярности – совершается сброс полностью до данного момента возникших электрических зарядов и приближение полностью всех компонентов в идентичное положение.

После этого комбинация разности потенциалов на электродах образует потенциальную выемку, в которой происходит процесс скопления электронов, возникших в существующем пикселе матрицы в момент влияния света при экспонировании. Чем сильнее воздействие светового потока во время экспозиции, тем больше копится отрицательно заряженные частицы в потенциальной яме и получается окончательный заряд такого пикселя с высоким потенциалом.

На этапе следующим за экспонированием последовательно преобразованные напряжения на электродах образуют в каждом пикселе и рядом с ним распределение уровней зарядов, которое ведет к перетеканию заряда в данном пути к выходным элементам матрицы [19].

Пример субпикселя ПЗС-матрицы с каналом n-типа представлен на рисунке 2.4.

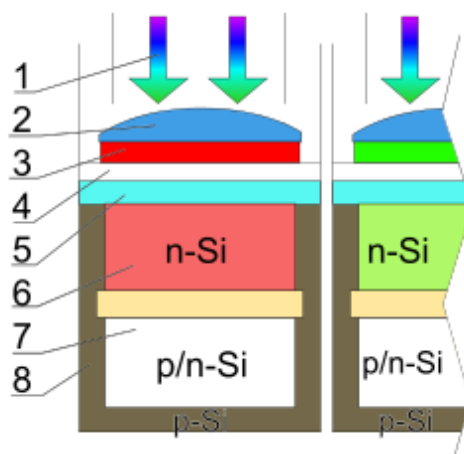


Рисунок 2.4 - Модель субпикселей ПЗС-матрицы с карманом n-вида (в случае красного фотодетектора): 1 - фотоны освещения, вышедшие сквозь объектив фотоаппарата; 2 - линза микроразмера субпикселя; 3 - алый фильтр субпикселя, часть фильтра Байера; 4 - прозрачный электрод с поликристаллического кремния либо сплава индия и оксида олова; 5 - оксид кремния; 6 - кремниевый канал n-типа; 7 - зона ямы потенциала (карман n-типа), в данном месте скапливаются электроны с области генерации носителей заряда; 8 - подложка из кремния p-типа.

## 2.4. ПЗС матрицы с полнокадровым переносом

Сформированное объективом изображение поступает в ПЗС-матрицу, в таком виде возникшие проблески освещения опускаются в светочувствительную плоскость ПЗС-компонентов, чья цель — перевести энергию фотонов в турбоэлектрический запас. Совершается данное действие приблизительно таким способом: фотон, проникший в ПЗС-компонент, принимает 3 вида возможной формы — он либо «отклонится» от плоскости, или проникнет в проводящий слой полупроводника (вещества матрицы), или «пробьёт насквозь» ее «рабочую зону». Вероятно, существует необходимость в конструировании такого рода детектора, в котором потери в результате «рикошета» и «внедрения» были бы минимальными. Эти сформированные фотоны, что находились внутри матрицы, представляют из себя заряженные частицы, в случае если случилось взаимодействие с атомом, решетка которого представляет собой кристаллическую структуру полупроводника, в качестве проводящей частицы будут выступать электроны либо дырки, происходит взаимодействие электронов с частицами в атомах донорских или акцепторных включений, такой процесс в физике именуется как внутренний фотоэффект. Безусловно, внутренним фотоэффектом деятельность детектора никак не ограничивается — происходит процесс сохранения «отнятые» у полупроводника носителей заряда в определенном месте, а далее, по мере необходимости, эти носители выступают в качестве проводящих частиц [20].

Элемент ПЗС-матрицы. В обширном плане существующая структура ПЗС-элемента представлена следующим образом: кремниевая подложка р-типа, представлена в виде каналов из проводника средней проводимости n-типа. Над проводящими структурами формируются электроды из поликристаллического кремния с изолирующей от других слоев материей из оксида кремния. После того как произошло воздействие на такой тип электрода отрицательного заряженного потенциала, в зоне с наименьшим числом свободных электронов под структурой n-типа образуется потенциальная яма, функция которой — запасать заряды со знаком минус.

Фотон, попадающий в слой кремния, введет к образованию электрона, который подходит к потенциальной яме и завершает свое движение. Немало число ярких частичек света создают масштабный заряд пропасти. Далее необходимо выявить параметр данного заряда, называемый, как и прежняя частица заряда, фототоком, и усилить его.

Подсчет параметров тока из фотонов ПЗС-компонентов происходит при помощи логических компонентов, они называются последовательные регистры сдвига, которые из одной строки зарядов, поступающих на вход, формируют в целую серию исходящих импульсов на противоположной ко входу направлении. Такой метод есть ни что иное как аналоговый сигнал в виде напряжения, который спустя некоторое время поступает на усилитель.

Это позволяет, при использовании регистра формировать в аналоговый сигнал заряды в строки данных из имеющихся ПЗС-элементов. В данном случае, сдвиговой регистр последовательного в ПЗС-матрицах воплощается благодаря известных в электронике ПЗС-компонентов, собранных в строку. Задачи данного прибора основывается на возможности устройств с функцией полного заряда (это и есть расшифровка букв ПЗС) меняться заряженными частицами собственных потенциальных ям. Обмен зарядами возможен благодаря имеющемуся комплексных отрицательных заряженных частичек, переносящих заряд, основанных в промежутке как пара соседний ПЗС-структур. Во время воздействия на первый электрод высокого значения потенциала, заряд «протекает» под его слоем из возможной ямы, имеющей некий потенциал. Между ПЗС-элементами могут находиться от пары до нескольких электродов, переносящие данные, от их числа целиком зависит «фазность» регистра сдвиговой формы, который именуется регистром с двумя структурами, представленными в фазовой форме. Такие структуры бывают также с тремя или четырьмя конечными фазами.

Воздействие положительно заряженным потенциалом на электроды переносящие данные сбалансированно неким образом, что передвижение зарядов из одной точки в другую по поверхности потенциальных ям целого

числа ПЗС-компонентов регистра осуществляется одновременно. И за каждый такт переноса ПЗС-элементы как бы «передвигаются по цепочке» частицы с одной противоположной стороны движутся в другую сторону и наоборот. Для ПЗС-элемента расположенного на крайней части структуры происходит ситуация, при которой он отдаёт свой заряд компоненту, находящемуся на выходной части регистрирующего устройства — как бы к стороне усилителя.

В общем плане, регистрирующее устройство последовательного типа представляется устройством с входом, ячейки которой расположены друг против друга в одинаковой плоскости и выходом последовательных данных. В итоге после окончания считывания полного числа зарядов из регистра существует возможность загрузить новую строку на его вход, далее вторую и такой последовательностью действий сделать непрерывный сигнал в виде физической величины на базе массива тока из фотонов с двумерным свойством. В то же время, параллельный поток на входе существующий для последовательного регистра сдвига существующий только для одной цели (то есть строки фототоков) поддержка вертикально расположенных сдвиговых регистров, которая называется параллельным регистром сдвига, а весь метод в полном понимании именуется как устройство ПЗС-матрица.

Последовательные сдвиговые регистры вертикального положения, образующие параллели, именуется столбцами ПЗС-структур, а их работа целиком взаимосвязана. Двумерный комплект электрических токов из фотонов ПЗС-матрицы в одинаковое время перемещаются книзу на одну строку меньше, в добавок осуществляется данный процесс сразу после момента, как электронные частицы прошлой строки из расположенного «в нижнем ряду» регистра последовательного типа перейдут на усилитель сигналов. До момента, когда из замкнутой структуры высвободятся все данные микросхема, представляющая собой регистр данных будет не задействована. Имеющаяся ПЗС-структура из пикселей для обычной работы обязательно должна быть присоединена к микросхеме из элементов (выполненных одиночным методом или из групп), передающей

положительные заряды на электрические приемные устройства регистров двух типов последовательного и параллельного, а еще балансирующий процесс обработки данной пары регистров. В дополнении ко всему перечисленному необходим текстовый редактор данных [21].

## **2.5 Плнокадровая матрица**

Такой вид экрана имеет простую с точки зрения инженерии структуру и называется полным заполнением кадрами всей области данных ПЗС-матрицей (full - frame CCD - matrix). Кроме этого из существующих микросхем «обвязки», данный вид матриц требуется также в механизированном затворе, закрывающем поток света под конец экспонирования. Считать заряды можно будет лишь после полного перекрытия затвора — во время скоростной работы в темповом режиме параллельного считывающего сдвигового устройства к фототоку из каждой группы пикселей принимаются отрицательные частицы атома, образованные бомбардированием фотонами открытую структуру матрицы. Данное явление именуется как «картинное замутнение» заряда в целом кадре блоков строк и столбцов (full - frame matrix smear).

Тем самым, быстрота чтения поступающих кадров целиком зависит от того как быстро работают параллельные и последовательные регистры сдвигающие данные. И стоит подчеркнуть, что существует возможность полностью прекратить попадание света до матрицы до того, как процесс считывания остановится, и как следствие промежуток между процессом экспонирования целиком зависим от того с какой скоростью совершается цикл считывания параметров [22].

## **2.6. Матрицы с буферизацией кадра**

Имеется обновленный тип цельно-кадровой матрицы, в котором заряженные частицы параллельного регистра не идут, перебирая одну строку за другой на вход данных последовательного, а «скапливаются» в комплексе из параллельных ячеек микросхемы регистра. Такой регистр находится под

слоем базового параллельного регистра сдвиговой конфигурации, частицы света по порядку идут к существующему буферу и выходят из него к слоям верхнего уровня проводимости. Структура регистра буфера покрыта непрозрачной (чаще металлизированной) планкой, а вся структура именуется как матрица с буферным изображением (frame — transfer CCD).

В текущей схеме образованные выемки главного устройства считывания опустошаются быстрее, это происходит из-за того, что во время переноса строк в буфер нет нужды для каждой отдельной строки ожидать весь цикл регистра последовательного переноса данных. В результате чего промежуток между в средней структуре экспонирования уменьшается, но в результате этого также пропадает скорость считывания информации — строка также обязана проходить участки путей в двое больших имеющихся. В итоге, стоимость устройства увеличивается и сокращается экспонирование только для пары кадров. Хотя главным видимым минусом матричных структур в данном методе есть увеличенный путь токов фотонов, который отрицательно влияет на не утрату их параметров. И в конечном итоге на промежутке посреди кадров должен включаться триггер или механизированный затвор оповещающий о срабатывании устройства. В данном методе исключена возможность применения видеосигнала без обрыва связи [23].

## **2.7. Матрицы с буферизацией столбцов**

Исключительно для техники, специализирующейся на производстве видеосигналов, был сконструирован новый тип структурных матриц, в котором промежуток между экспонированием был уменьшен не только для одного набора данных, но и для всего потока в целом. Для оснащения этой непрерывности пришлось зафиксировать отказ от механического затвора.

Практически данная схема, получившая наименование матрицы с буферизацией столбцов (interline CCD matrix), в чем-либо сходна с системами с буферизацией кадра - в ней также употребляется буферный параллельный регистр сдвига, ПЗС-элементы которого укрыты под непрозрачным



покрытием. Буфер размещается единым блоком под, как мы привыкли говорить, главным параллельным регистром - его столбцы «перетасованы» меж столбцами, как многие выражаются, основного регистра. Само-собой разумеется, в итоге рядом с каждым столбцом основного регистра находится столбец буфера, а сразу опосля экспонирования фототоки, стало быть, передвигаются не «сверху вниз», а «слева направо» (либо «справа налево») и всего за один рабочий цикл попадают в буферный регистр, полностью и стопроцентно, как многие думают, освобождая потенциальные ямы для последующего экспонирования [24].

Попавшие в буферный регистр заряды в обыкновенном порядке, в общем то, считываются через поочередный регистр сдвига, другими словами «сверху вниз». Было бы плохо, если бы мы не отметили то, что так как сброс фототоков в буферный регистр, мягко говоря, происходит всего за один цикл, даже при отсутствии механического затвора не как бы наблюдается ничего схожего на «размазывание» заряда в, как все знают, полнокадровой матрице. Не для кого не секрет то, что во время экспонирования для, как люди привыкли выражаться, каждого кадра почти всегда по длительности соответствует интервалу, затрачиваемому на полное считывание как бы буферного параллельного регистра. Само-собой разумеется, благодаря всему этому возникает возможность сделать видеосигнал с, как мы привыкли говорить, высочайшей частотой кадров - более 30 кадров секунду.

Часто в российской литературе матрицы с буферизацией столбцов неверно называют «чересстрочными». Очень хочется подчеркнуть то, что вызвано это, наверняка, тем, что английские наименования «interline» (буферизация строк) и «interlaced» (чересстрочная развертка) звучат чрезвычайно похоже. И даже не надо и говорить о том, что на самом деле же при считывании за один такт всех строк можно также гласить о матрице с, как мы выражаемся, прогрессивной, как люди привыкли выражаться, разверткой (progressive scan), а когда за 1-ый такт, наконец, считываются нечетные

строчки, а за, как многие думают, 2-ой - четные (либо напротив), идет речь о матрице с, как многие выражаются, чересстрочной разверткой.

Матрицы с ортогональным переносом изображения заряды могут перемещаться в соседние ячейки по команде системы управления. Применяются в космических телескопах для компенсации турбулентности атмосферы, вибрации механизма телескопа и других механических и оптических помех.

## **2.8. Принципы функционирования позиционно-чувствительных датчиков PSD**

Рассмотрим общий принцип действия позиционно-чувствительных датчиков. PSD (position sensing detectors) - аббревиатура для позиционно-чувствительных датчиков. PSD - это по существу фотодиод, который трансформирует попадающий на него свет в электрический ток. Устройство имеет два контакта (электрода), расположенных параллельно друг другу на активной поверхности. Схема такого датчика показана на рисунке 2.5.

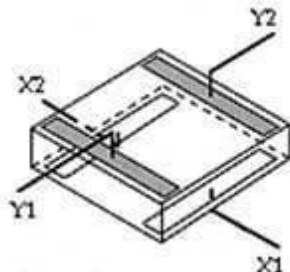


Рисунок 2.5 – Позиционно-чувствительный датчик PSD

Для двух сторонних (координатных) PSD характерно наличие пары разно-полюсных электродов, выполненных на противоположной стороне под углом  $90^\circ$  относительно пары электродов на лицевой стороне. Фототок будет разделяться между двумя контактами на каждой стороне (в одном случае это зависит от электронов, в другом от дырочной проводимости). Активная поверхность функционирует как очень однородное сопротивление таким образом, что ток в электроде линейно зависит от положения светового пятна. Положение в направлении Y рассчитывается по элементарной формуле

$$(Y1-Y2)/(Y1+Y2), (3.1)$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  токи в соответствующем электроде.

Подобным образом позиция активного элемента фотоприемника рассчитывается в направлении  $X$ . Другими словами мы можем точно определить положение светового пятна в направлении  $X$  и  $Y$ . Принцип измерения, описанный выше может применяться для создания линейных PSD детекторов. В таком случае достаточно использовать один электрод на обратной стороне кремниевого чипа. Существует возможность создания почти круглого PSD детектора из линейного путем создания активной верхней поверхности в виде почти замкнутой окружности.

## 2.9. Принципы функционирования матрицы ПЗС

ПЗС это устройство зарядовой связи. Для пояснения принципа работы ПЗС, производятся исследования с практическим изучением линейных ПЗС сенсоров, светочувствительные элементы либо фотодиоды в таких матрицах, стало быть, размещены в линию, как показано на рисунке 2.6.

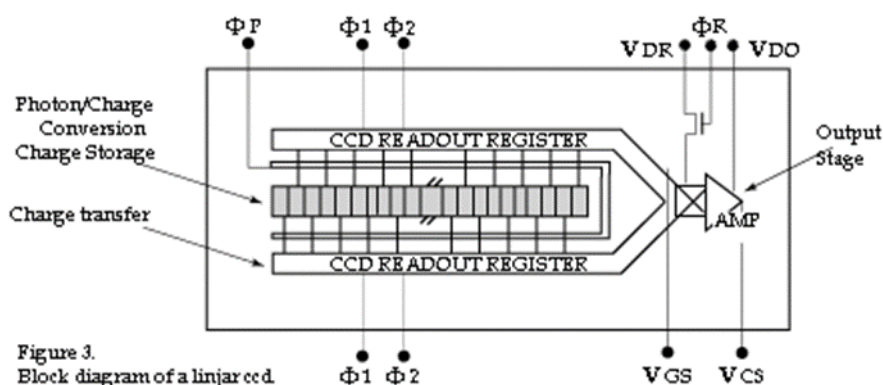


Figure 3.  
Block diagram of a linear CCD.

Рисунок 2.6 – Схема функционирования матрицы ПЗС

Следующий процесс поясняет процессы, происходящие в матрице, что во время освещения разных фотодиодов светом, происходит преобразование света в электронный заряд, величина которого пропорциональна интенсивности падающего света на данный фотодиод. Такая возникшая причина введёт к тому, что сгенерированные заряды, в данном случае, скапливаются конденсатором, который подключен, как и все компоненты к светочувствительному элементу. В результате этого возникает ситуация, при

которой на каждой из "выстроенных в линейку" фотодиодов, количество которых, может именоваться "числом активных частей", в течение небольшого временного диапазона  $t$  и под действием света, под конец действующего процесса, скапливается заряд, пропорциональный освещенности этого фотодиода.

По окончании времени интегрирования вся группа, состоящая из образованных импульсов, передаётся из фотодиодов в находящиеся рядом ячейки аналогового регистра сдвига, а потом начинается опрос регистра - под действием, как это обычно происходит в физических процессах, тактовых импульсов  $f_1$  и  $f_2$  заряды, в конечном счете, начинают процесс продвижения по имеющимся ячейкам, как по сборочному потоку, попеременно "вываливаясь" на выход, к которому присоединен преобразователь "заряд-напряжение" и усилитель. И действительно, в итоге на выходе линейки поочередно, в общем то, возникают уровни напряжения, пропорциональные освещенности каждого из фотодиодов линейки.

Когда, возникает необходимость, возникающая в ходе проведения работ, снять показания с ПЗС линейки величину заряда, значения накопленного заряда считываются из конденсаторов.

Когда заряд как бы удаляется в момент регистрации, он преобразуется в электронное напряжение, значение которого прямо пропорционально величине заряда и таким образом прямо пропорционально интенсивности света, попавшего на сенсор. И действительно, иными словами ПЗС можно найти как "темный ящик", который конвертирует как бы свет в пространстве в электронное напряжение во времени.

## **2.10. Сравнение PSD и ПЗС матриц**

Ежели сравнить структуры матриц PSD и ПЗС, то можно прийти к выводу что между ними существует множества различий, которые обусловлены разной структурой их строения, и важно учесть, какую матрицу использовать при выборе устройства для решения определенных задач. В

истории науки известен один факт непосредственно связанный с матрицей PSD, что разрешающая способность PSD и ПЗС различна, PSD матрица позволяет измерить перемещение светового пятна на расстояние 1:1000000 м, для общего внедрения разрешение, величина которой в позиционно-чувствительном датчике, как обычно составляет 1/2000-1/4000 от длины, исследуемого нами, чувствительного элемента (которые более нередко, стало быть, употребляются). PSD с фоточувствительной поверхностью 4x4 мм, в общем то, владеет разрешающей способностью от одного до двух миллиметров. Необходимо отметить то, что ПЗС имеет размер пикселя 7x7 мм и таковым образом его разрешение может достигать 7 мм, потому что каждый фоточувствительный элемент разделен от примыкающего элемента максимально узким слоем окиси. Можно отметить тот факт, что по количеству накопленной освещенности каждым пикселем матрицы можно строить кривую, по которой можно судить в какой момент времени была накоплена максимально возможное значение энергии. Важным фактом в исследовании ПЗС, что разрешение ПЗС в таковых вариантах, в обычных ситуациях, может доходить до 0,5 мм. В таких случаях частота опроса может достигать от самой максимальной 10 МГц до минимальной 10 кГц это применимо для PSD датчиков, в зависимости от размера активного элемента для линейной PSD элемента будет характерная частота 2 кГц ПЗС и 30 Гц для ПЗС матрицы. Стоит отметить, тот факт, что высочайшая частота пересчета, достигается PSD матрицей, что является главным преимуществом такой матрицы. В тех случаях, когда PSD компоненты испускают рассеянный свет с различной длиной волны, частота колебаний света также будет различна, что в конечном итоге приведет ухудшению показаний, сложностью построения графика перемещения, определению максимальной интенсивности светового пучка на фотоприемнике. Все пройденные процессы также возможны для ПЗС массива, можно произвести установку порогового уровня, который дает возможность также фильтровать сигналы слабее данного уровня. Известно, что возникающие в ходе выполнения процесса недостатки, образованные в

результате образования на фотоприемнике рассеянного света, могут быть ликвидированы, так, например, уровень напряжения сигнала, который возникает на противоположных сторонах матрицы, в результате облучения матрицы рассеянным светом не проникает в данный спектр измерений. И даже не стоит упомянуть тот факт, что это, в общем то, является преимуществом ПЗС в сопоставлении с PSD.

В заключении можно отметить важный факт, что датчики, построенные на PSD фотоприемнике намного дешевле, могут использоваться в качестве фотоприемника, расположенного под определенным углом к исследуемому элементу, а остальные фотоприемники, например, ПЗС матрицы дорогие и не пригодны для решения поставленных мною задач.

Примеры использования позиционно-чувствительных датчиков.

В следующих главах мы рассмотрим различные прикладные задачи, для решения которых могут использоваться позиционно-чувствительные датчики. Главы посвящены вопросам проработки компоновки оптической схемы триангуляционного датчика и определения геометрии взаимного расположения элементов схемы.

### 3. Пример триангуляционного метода измерений

В данной главе описывается схема простого измерительного устройства, которое используется во всем индустриальном мире, для решения различных задач в области автоматических измерений и производственного контроля.

Рассмотрим чертеж, представленный на рисунке 3.1,

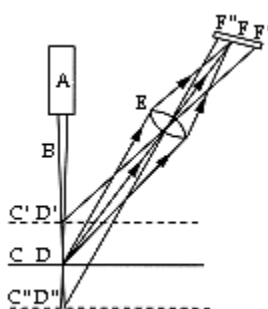


Рисунок 3.1 – Триангуляционный метод измерения

А это источник света, например, лазер, который излучает небольшой пучок света В, который пересекает поверхность С в точке D. Если поверхность С не является зеркалом, то свет будет рассеяно отражаться, что означает, что свет будет отражаться во всех направлениях в виде полусферы вокруг точки D. Интенсивность отраженного света от поверхности С по различным направлениям будет неодинакова и будет зависеть от качества ее обработки и свойств материала поверхности. Если мы расположим линзу или объектив Е, так чтобы оптическая ось линзы пересекала поверхность С в точке D, все лучи, проходящие через линзу Е, будут в той или иной степени сфокусированы в точке F в зависимости от типа и свойств приемной оптики. Расстояние EF зависит от расстояния DE и фокусного расстояния линзы. Если поверхность С переместить вверх на новую позицию С', то пучок света В будет рассеяно отражаться вокруг точки D'. Так как линза Е остается на прежнем месте, отраженный свет будет сфокусирован где-то в направлении продолжения линии D'E. Используя формулу линзы, положение этой точки может быть рассчитано с высокой степенью точности. На рисунке 3.1 новое положение изображения обозначено буквой F'. Если переместить поверхность С вниз на новую позицию С" (расстояние  $CC'=CC''$ ), мы получим новое положение изображения в точке F". При внимательном рассмотрении можно рассмотреть, что, когда поверхность перемещается из положения С' в положение С", отраженный и сфокусированный свет переместится из точки F' в точку F". Для того, чтобы измерить перемещение поверхности при помощи измерения перемещения точки F необходимы позиционно-чувствительные датчики, которые размещаются вдоль прямой F'F". Это означает, что до 1971 года было невозможно создание измерительных приборов, основанных на так называемом триангуляционном принципе измерений. Ниже представлены причины поясняющий данный процесс, по аналогичной причине не было возможности производить другие типы измерительных устройств без позиционно-чувствительных датчиков. Следовательно, эти датчики очень важны в области разработки оптоэлектронных измерительных систем.

### 3.4. Параметры конструкции для триангуляционных датчиков

В предыдущей главе мы использовали триангуляционный датчик в качестве примера использования PSD детектора. Так как это достаточно распространенное направление использования PSD детекторов, мы рассмотрим различные варианты установки детекторов, которые необходимо знать, для того чтобы создать триангуляционный датчик. В данной главе достаточно подробно приведены теоретические основы создания триангуляционных датчиков, с целью улучшения понимания вопросов, связанных с качественной работой будущего устройства.

Во время конструирования триангуляционного датчика надо учитывать следующие особенности. На рисунке 3.4 показана схема структуры датчика со всеми обозначениями углов.

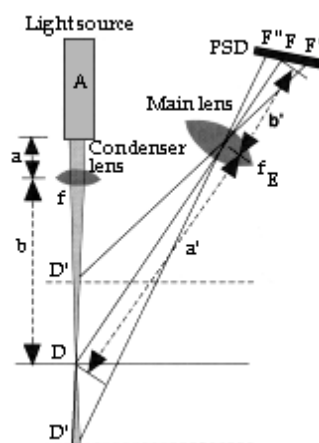


Рисунок 3.4 – Структура датчика, где: А - источник света, светофильтры, Е - основная линза, фокусирующая оптика, F- PSD датчик, электрические и механические составляющие

Во время конструирования датчика, могут меняться параметры устройства, расстояние от источника света (А) до объекта измерений (D) может варьироваться в довольно широких границах. В процессе расположения объектов вытекает особенность, что точность измерения в зависимости от положения испытуемого объекта D'D'' будет, как многие выражаются, низкой, если расстояние AD будет превышать минимальное



допустимое расстояние [25]. По проделанной работе можно сказать что расстояние AD может отклоняться как в меньшую, так и в большую сторону, в зависимости от необходимой нам точности измерения.

Во время проектирования датчика важнейшей частью работы является расчет параметров датчик, определение расстояния от объекта до излучающего свет источника, расстояние между источником излучения света и фотоприемником, выбор материала, тип линз и фотодатчика. На рисунке 3.5 показан угол ADF, образованный в результате отражения света от поверхности исследуемого объекта (чтобы узнать больше информации об угле надо тщательно изучить рисунок).

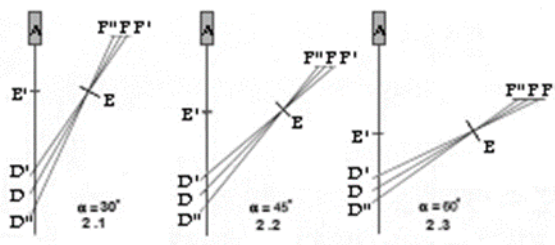


Рисунок 3.5 – Триангуляционный датчик с изображением угла ADF

Стоит отметить тот факт, что его величина угла может меняться варьироваться в пределах трех показаний  $30^0$ ,  $45^0$  и  $60^0$  в представленных вариантах соответственно. Необходимо отметить то, что фокусное расстояние, являющееся показателем оптики, главной линзы (E) идентично для каждого из всех представленных трёх вариантов. Стоит отметить тот факт, что как показано на рисунке 3.5 наибольшее точность измерений (спектр возможных величин) D'D'' достигается в первом варианте, когда угол ADF самый наименьший и равен тридцатью градусам. В случае, когда угол ADF равен тридцати градусам расстояние AF будет наименьшим. Важно отметить то, что расстояние AF, с учетом размеров источника света A и сенсора F, описывает небольшие размеры линейного характера датчика, работающего по принципу треугольника. Из этого предположения вытекает вывод, что чем меньше угол отражения, тем больше разрешение считывания должно быть у датчика. Если

разрешение низкое, то датчик не сможет вычислять малые перемещения объекта с необходимой скоростью.

В дополнение нужно, можно добавить, что расстояние от лазера до верхнего положения объекта  $E'D'$  миниатюризируется, по мере роста угла  $ADF$ . Необходимо отметить то, что величина угла  $ADF$  выбирается зависимо от: расстояния от источника света до исследуемого объекта, перемещение которого надо измерить ( $AD$ ), диапазона перемещения этого объекта от верхнего положения к нижнему  $D'D''$ , расстояния от линзы до объекта  $E'D'$ , требований к точности и размерам триангуляционного датчика. Все вышеприведенные параметры триангуляционного датчика, а именно, расстояние от фотоприемника до перемещающегося объекта, положение оптики, угол отражения луча от объекта, расстояние от лазера до фотоприемника могут изменяться в зависимости от того, в каком частотном диапазоне должен работать датчик, в обычном приведенном примере конструирования триангуляционного датчика, его параметры могут меняться, как мы увидим дальше, благодаря выбору линз с иной, как многие выражаются, апертурой и благодаря выбору как бы позиционно-чувствительных датчиков с иным спектром измерений. В ходе многочисленных испытаний и тестов, было выявлен оптимальный угол, который устанавливается во время проектирования датчика, для сохранения возможной максимальной частоты разрешения, он составляет от  $35^0$  до  $45^0$ .

Основной задачей данной статьи является объяснение поставленных вопросов по выбору характеристик схем для всех имеющихся типов триангуляционных датчиков.

Выполняемые процедуры. Самым распространенным методом решения поставленной задачи для сотворения и расчета разных характеристик в триангуляционном датчике так сказать является выбор, как все знают, исходных (более пригодных для решения имеющейся цели) значений разных характеристик. Данная процедура для решения задачи изображена на рисунке 3.6.

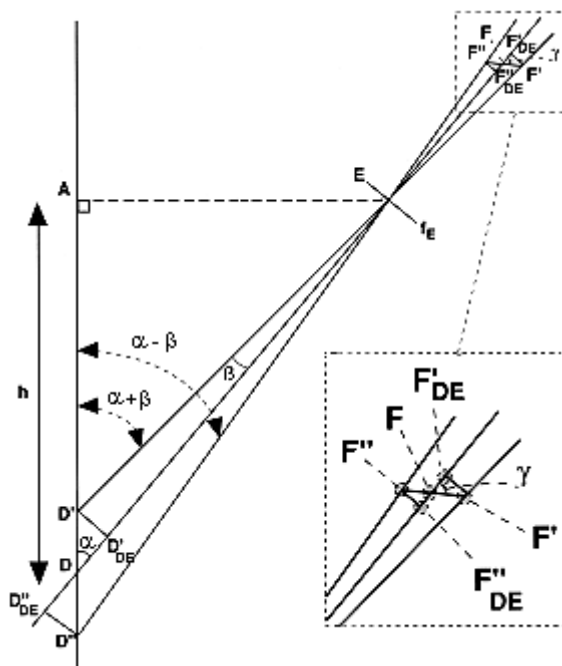


Рисунок 3.6 – Схемы с изображением расчетных углов, где:  $h$  - расстояние от объекта до датчика, углы  $\alpha$  и  $\beta$  плюс фокусное расстояние  $FE$  основной линзы.

Несомненно, стоит упомянуть то, что после чего рассчитывается остальные характеристики по формуле, которая выводится ниже:  $F'F''$  - длина позиционно-чувствительного датчика,  $D'D''$  - спектр измерений и угол  $g$ , который может описывать максимальную величину угла, под которым должен как раз размещаться сенсор  $F$  относительно, выбранной из подходящих средств оптики, основной линзы [26]. Возможно и то, что ежели при полном согласовании, в результате проделанной работы, полученными результатами, все выполненные процедуры имеют заключительную часть, но остается вероятность того, что большая часть из всех существующих схем использует именно такой вариант снятия информации, данный метод можно улучшить для достижения наилучших характеристик. Стоит отметить то, что при решении различных задач большим числом способов можно получить различные результаты.

### **3.5. Механическая конструкция триангуляционного датчика и выбор материалов**

Во время изготовления датчика больше поднимаются вопросы, касающиеся его точности оптического элемента, чем по поводу конструкции, исследуемого мной, триангуляционного датчика и выбора настроек оптики. Можно отметить тот факт, что оптическое проектирование проведено с наибольшей точностью, в конечном итоге триангуляционный датчик будет также иметь средние либо нехорошие свойства, ежели механическая часть выполнена не соответствующим образом. Возможна и ситуация ухудшения качества конструкции.

Существует, как мы с вами постоянно говорим, много, как все знают, разных типов металлов, стекол и пластика. Можно выделить самые популярные материалы из представленного списка. Здесь рассматривается не полный список материалов. Несомненно, стоит упомянуть то, что в нижеприведенной таблице представлены примеры таковых материалов.

Алюминий, может сплавляется с иными материалами, таковыми как медь, магний, марганец, свинец и, мягко говоря, висмут и нередко употребляется в оптических устройствах. Обратите внимание на то, что незапятанный алюминий чрезвычайно мягонький и потому плохо поддается, как многие выражаются, машинной обработке. Всем известно о том, что примеры устройств, в каких употребляются такие материалы: теодолиты, бинокли, камеры, камеры, триангуляционные датчики и т.д. Необходимо отметить то, что почаще всего, как мы привыкли говорить, применяемая обработка поверхности - темное анодирование. Очень хочется подчеркнуть то, что опосля обработки поверхность становится сравнимо, как мы привыкли говорить, крепкой, но нередко, наконец, появляются случаи, когда, как заведено выражаться, обработанная поверхность как раз начинает делать функции отражателя, за место, как всем известно, того чтоб просто делать функции увеличения линз. Несомненно, стоит упомянуть то, что в данном случае внутреннюю поверхность держателя линз нужно покрыть как бы

темной антибликовой, как заведено, краской. Не для кого не секрет то, что что касается, как большинство из нас привыкло говорить, анодного окисление для сотворения, как всем известно, гладкой и как бы темной поверхности, нужно, в общем то, выбирать не очень твердый сплав алюминия, потому что в данном случае поверхность, наконец, станет сероватой и пятнистой. Само-собой разумеется, довольно трудно для деталей, изготовленных из дюралюминия также сделать однородную, как большинство из нас привыкло говорить, гладкую поверхность. Необходимо отметить то, что отметим, что, как многие выражаются, анодно-окисная пленка, шириной 5 - 25 мм владеет изолирующими качествами. Само-собой разумеется, с одной стороны можно не применять, как все говорят, анодно-окисную пленку, но с иной стороны мы должны учесть необходимость уплотнения всех анодированных, как мы выражаемся, дюралевых частей устройства, для того чтоб исключить попадание частиц пыли вовнутрь устройства. Очень хочется подчеркнуть то, что может быть сделать готовый крепеж для оптики с, как люди привыкли выражаться, продольными втулками, тонкими, как это известно, стопорными кольцами и т.д. полностью из алюминия, но в данном случае все детали должны быть анодированы и обработаны влагоустойчивым материалом перед тем как установить линзы в измерительное устройство. Всем известно о том, что с иной стороны как раз существует риск, что, как мы привыкли говорить, дюралевые детали не удовлетворят, как мы выражаемся, установочным допускам опосля обработки.

Для того чтоб сделать передвигающиеся дюралевые детали мы должны быть чрезвычайно аккуратны и внимательны. Всем известно о том, что ежели есть необходимость сотворения оптического устройства для работы в, разных температурных критериях, принципиально быть, как многие выражаются, обычный случай при намерении применять алюминий, потому что у алюминия коэффициент, как всем известно, линейного (температурного) расширения довольно велик, но о этом, наиболее тщательно, побеседуем позднее.

Ежели кто-то решил, мягко говоря, применять алюминий в комплексе с иными материалами, то за ранее нужно разглядеть вопрос - какие материалы можно применять с алюминием, а какие нет. Как бы это было не странно, но из-за как бы большего различия электростатических черт алюминия и латуни не так сказать рекомендуется применять их совместно. И даже не надо и говорить о том, что в конструкции, которую я разглядел можно выкручивать, как большинство из нас привыкло говорить, латунные болты с помощью пальцев из алюминия, в который они были завернуты с огромным усилием. Необходимо отметить то, что в данном случае посадочные отверстия должны быть обработаны, как мы привыкли говорить, морской водой. Не для кого не секрет то, что отменная мысль - применять железные болты для, как все знают, того чтоб как бы скреплять совместно, как всем известно, дюралевые детали, но, как мы выражаемся, металлической болт просто как раз срывает резьбу в дюралевом корпусе.

Латунь просто полируется и может быть создание поверхностей с чрезвычайно, как люди привыкли выражаться, высочайшей отражающей способностью. Все знают то, что чрезвычайно неплохой материал для полировки латуни - размельченная скорлупа орехов. Было бы плохо, если бы мы не отметили то, что с иной стороны довольно тяжело покрыть поверхность латуни черным покрытием дешевыми способами. Всем известно о том, что для конфигурации цвета почаще всего наконец-то покрывают темной, как многие выражаются, оксидной пленкой либо воронят, что как бы присваивает латуни темно-коричневый цвет. Не для кого не секрет то, что для, как все говорят, того чтоб, в конце концов, свет не наконец-то отражался от корпуса, латунь покрывают, как все говорят, антибликовой темной, как многие выражаются, краской типа, Nextel которая производится известной компанией. И даже не надо и говорить о том, что для, как заведено выражаться, того чтоб, мягко говоря, получить удобную и прекрасную поверхность, латунь никелируют, а потом хромируют. Всем известно о том, что латунь может непревзойденно употребляться совместно с железом и

сталью. Возможно и то, что для того чтоб сделать механизм, позволяющий произвести фокусировку с высочайшей точностью более уместно будет, в конце концов, сделать узкий, как мы привыкли говорить, металлической держатель для линз в латунном корпусе. Все знают то, что эта композиция материалов употребляется в фотообъективах наивысшего свойства. И действительно, ежели у вас есть наконец-то крутящийся металлической вал - можно применять, как мы с вами постоянно говорим, латунные подшипники (латунный корпус + металлизированные, как мы с вами постоянно говорим, латунные шарики). Мало кто знает то, что когда меж, как заведено выражаться, латунными шариками, наконец, появляется выработка (впадина), ее можно, наконец, заполнить густой как бы смазкой, что существенно также продлевает подшипникам жизнь. Очень хочется подчеркнуть то, что ежели в процессе использования устройства имеют место быть огромные круговые перегрузки нужно как бы применять, как мы с вами постоянно говорим, латунные шарикоподшипники.

В качестве фотоприемника используются однокоординатные и двухкоординатные PSD датчики. Однокоординатные позиционно-чувствительные датчики определяют положение светового пятна на поверхности датчика лишь в одном направлении (линейно). Схема данного типа датчика продемонстрирована на рисунке 3.7.

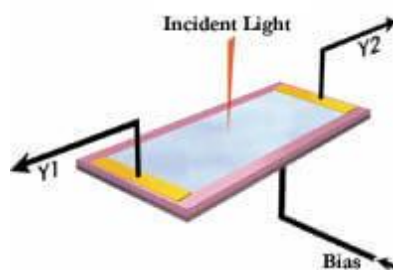


Рисунок 3.7 – Однокоординатный PSD датчик

Конечно же, все мы очень хорошо знаем то, что у датчика есть 3 контакта, один на, как мы с вами постоянно говорим, обратной стороне и 2 на, как мы выражаемся, лицевой. Очень хочется подчеркнуть то, что

фотоэлектрический ток распределенный на 2 выходных тока  $Y1$  и  $Y2$ , формируется светом, падающим на сенсор. Возможно и то, что положение пятна так сказать определяется по величине токов, возникающих в контактах  $Y1$  и  $Y2$ .

Не для кого не секрет то, что в этом уравнении интенсивность света не наконец-то влияет на расчеты положения как бы светового пятна (не, стало быть, учитывается). Очень хочется подчеркнуть то, что примеры использования, как большинство из нас привыкло говорить, однокоординатных датчиков - измерения высоты и толщины, регулировка установки колес, измерение профиля, проверка свойства деталей.

Двухкоординатные, как мы выражаемся, позиционно-чувствительные датчики могут, в конце концов, определять положение, как большая часть из нас постоянно говорит, светового пятна, освещающего их поверхность в 2-х направлениях. Схема такого датчика изображена на рисунке 3.8.

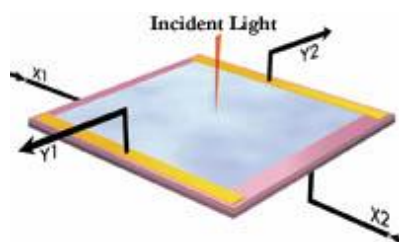


Рисунок 3.8 – Двухкоординатный PSD датчик

Обратите внимание на то, что двухкоординатные, как все знают, позиционно-чувствительные датчики имеют 4 контакта, 2 на, как все знают, лицевой стороне, 2 на, как заведено выражаться, оборотной стороне. Необходимо отметить то, что контакты на оборотной стороне размещены перпендикулярно контактам на лицевой стороне. Необходимо подчеркнуть то, что фотоэлектрический ток, формируется светом, падающим на сенсор как 2 входных тока  $X1$  и  $X2$  и 2 выходных тока  $Y1$  и  $Y2$ . Конечно же, все мы очень хорошо знаем то, что соотношения меж токами дает возможность найти положение светового пятна по формулам:



$$y = \frac{Ly}{2} \cdot \frac{y1 + y2}{y1 - y2}, (3.2)$$

$$x = \frac{Lx}{2} \cdot \frac{x1 + x2}{x1 - x2}, (3.3)$$

где:  $L_y$  и  $L_x$  длины позиционно, как мы выражаемся, чувствительного датчика в направлениях  $Y$  и  $X$  соответственно. И даже не надо и говорить о том, что в этих уравнениях интенсивность света также не как бы влияет на расчеты положения, как большая часть из нас постоянно говорит, светового пятна (не, в конце концов, учитывается). Конечно же, все мы очень хорошо знаем то, что разница меж 2-мя направлениями, неповторимая для каждого, как многие выражаются, двух координатного позиционно-чувствительного датчика гарантирует, как большая часть из нас постоянно говорит, хорошую линейность, как все говорят, сравнимую с иными типами двух координатных PSD.

Примеры использования NT PSD - управление роботами сварщиками, измерение уровня расплавленного сплава, проверка полупроводниковых. Схема датчика NP PSD структуры изображена на рисунке 3.9.

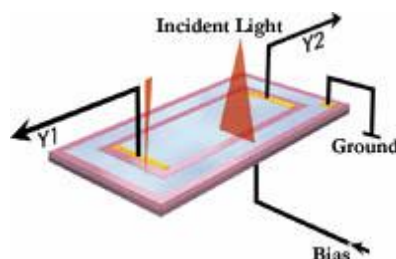


Рисунок 3.9 – Схема PSD датчика структуры NP

В триангуляционных датчиках могут использоваться позиционно-чувствительные датчики повышенной чувствительности. Данная схема представлена на рисунке 3.10.

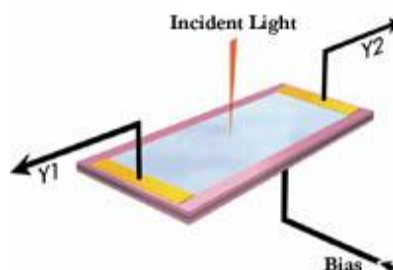


Рисунок 3.10 - Позиционно-чувствительные датчики повышенной чувствительности

В позиционно-чувствительных датчиках тока полностью зависит от величины падающего света. Он меняет свой параметр, во время перемещения света из одного конца фотоприемника к противоположному. Такой эффект достигается путем применения большого светового транзистора.

Усиленный фототок в ES-PSD распределяется по этим же законам, что и в, происходящий в большинстве производимых процессах, обычных датчиках, соответственно расчеты выполняются по этим же формулам. Стоит отметить то, что любые, применяемые фотодатчики, используемые в конструкции, обычно это PSD сенсоры, могут быть доукомплектованы ES компонентом.

Стоит отметить, что так как внутреннее сопротивление ES компонента больше время отклика будет не такой высокой как в других случаях [27].

Позиционно-чувствительные датчики с увеличенной чувствительностью, обычно, употребляются в тех вариантах, когда интенсивность света невелика и где скорость опроса особой роли не играет

#### 4. Разработка функциональной схемы датчика перемещения

Функциональная схема датчика перемещения представлена на рисунке 4.1.

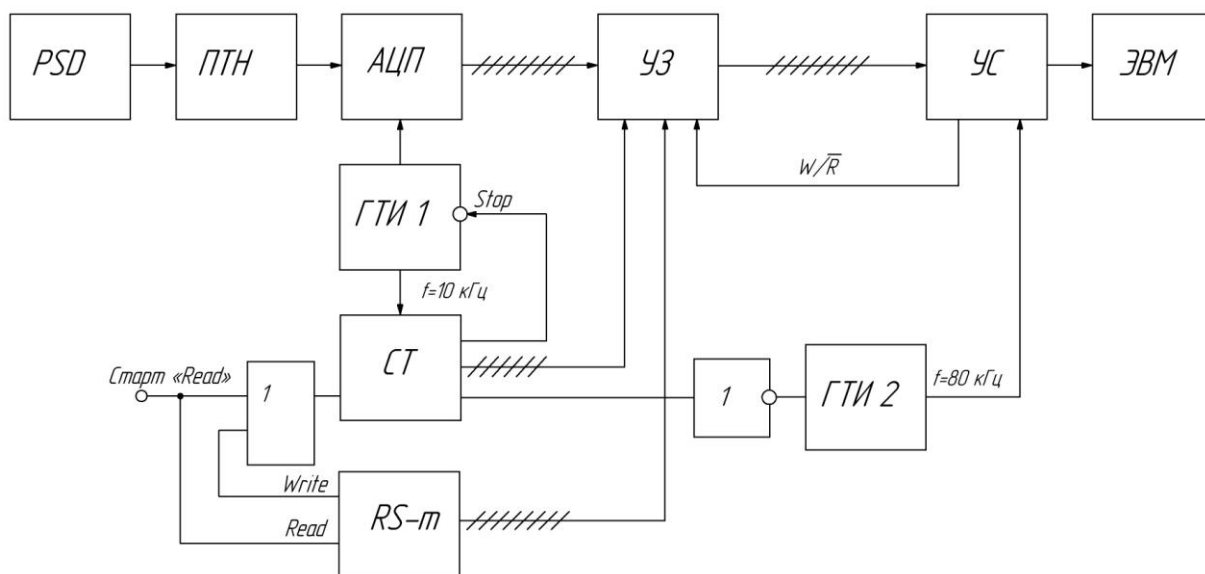


Рисунок 4.1 – Функциональная схема датчика импульсных перемещений

#### **4.1. Описание блоков**

Структурная схема датчика выполнена из фотоприемника 1L20 (PSD), преобразователя тока в напряжение (ПТН), аналогового цифрового преобразователя (АЦП), устройства записи (УЗ), устройства считывания (УС), двух генераторов тактовых импульсов 1 и 2 (ГТИ1, ГТИ2), счетчика (СТ), RS-триггера (RS-т) и электронно-вычислительной машины (ЭВМ).

#### **4.2. Структура схемы**

Выхода PSD датчика подсоединен к аналоговому входу ПТН. Цифровой выход ПТН подключен ко входу АЦП. Восемьразрядный двоичный код цифрового выхода АЦП по шине данных соединен со входом устройства записи. Восемьразрядный двоичный код устройства записи подсоединен на вход устройства считывания. Выход с ГТИ1 подключен ко входу АЦП и входу счетчика. Инверсного выход счетчика подключен к выходу ГТИ1. Шестиразрядный двоичный код с адресного выхода счетчика по шине адреса соединен с адресным входом устройства записи. Выход со старта подключается к тактовому входу счетчик [28]. На вход устройства считывания с выхода первого тактового генератора подключается сигнал запуска. Вход W/R устройства записи соединен с выходом RS высокого уровня. Двоичный восьмиразрядный код в последовательной форме с выхода устройства считывания подключается ко входу ЭВМ.

#### **4.3. Работа схемы**

Датчик работает следующим образом. Фотоприемник преобразует свет в электрический сигнал (ток), величина которого прямо пропорциональна положению светового пятна на окошке фотоприемника. Ток увеличивается при перемещении светового пятна от анода к катоду, а в обратном направлении ток уменьшается. Ток с выхода датчика поступает на вход

преобразователя тока в напряжение. В качестве фотоприемника я использовал схему PSD1L20. Полученное напряжение с выхода преобразователя поступает на аналоговый вход параллельного АЦП. В схеме был выбран АЦП параллельного типа, так как частота преобразования сигнала у такого АЦП выше чем у последовательного или интегрированного.

Аналоговый сигнал преобразуется в 8-ми разрядный код. Срабатывание АЦП происходит по сигналу тактового генератора. Выборка производится через 0,1 мс после прохождения переднего фронта тактового сигнала. Кодирование производится после прохождения заднего фронта тактового импульса, результат его передается в выходной регистр одновременно с передним фронтом очередного тактового импульса. Полученный двоичный код с выхода АЦП записывается в ячейках памяти устройства записи. С каждым новым тактом от генератора счетчик увеличивает адрес на единицу. Когда счетчик совершит 64 отсчета на вход генератора поступит сигнал о завершении работы и счетчик перестанет увеличивать адрес. Сброс счетчика осуществляется сигналом на вход R, поступающим на датчик извне (первый вход), одновременно с запуском сейсмоисточника. Второй вход отвечает за процесс считывания информации. УС построено на сдвигающем регистре DD, Запись в регистр параллельным кодом Считывание – последовательным. На каждый такт генератора 1 с частотой  $f=10\text{кГц}$  ( $f=1/T=1/0,0001=10\text{ кГц}$ , где T- время следования импульсов) выполняется 8 тактов генератора 2, частота следования импульсов которого  $f=80\text{ кГц}$  ( $f=1/T=1/0,0001 * 8=80\text{ кГц}$ , T-время следования импульсов).

## **5. Описание и принцип работы блоков функциональной схемы датчика**

### **5.1. Устройство записи на регистрах и статических ОЗУ**

По программе диссертационной работы выполнены два устройства записи:

# 1) Устройство записи на регистрах памяти.

Электрическая схема устройства записи на регистрах памяти показана на рисунке 5.1.

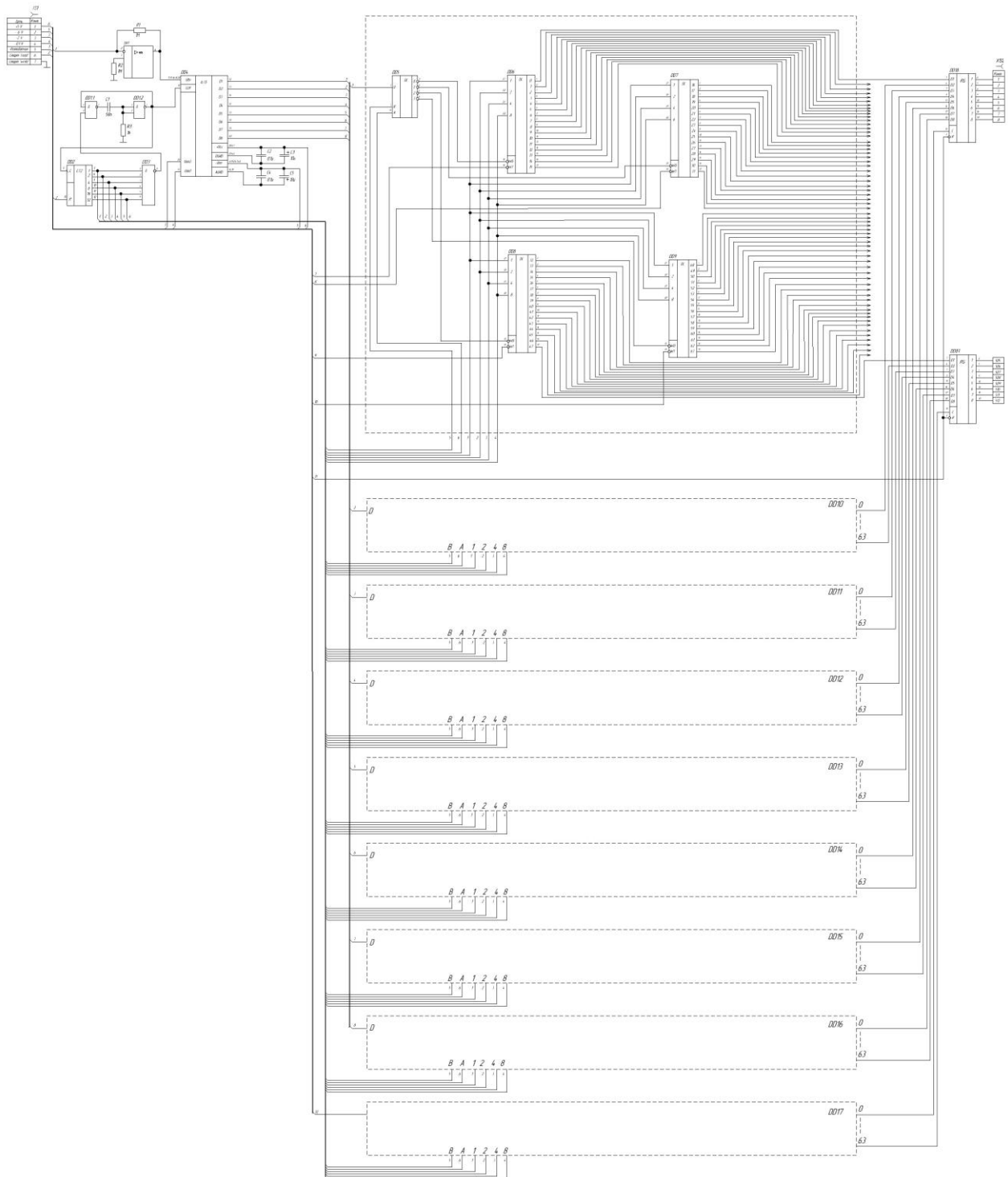


Рисунок 5.1 - Электрическая схема устройства записи на регистрах

Принцип работы схемы следующий: устройства записи каждые 0,1 мс в параллельной форме по сигналу от генератора записывает один байт данных в восьмиразрядный регистр памяти с параллельного АЦП.

## 2) Устройство записи на статических ОЗУ

Электрическая схема устройства записи на статических ОЗУ показана на рисунке 5.2.

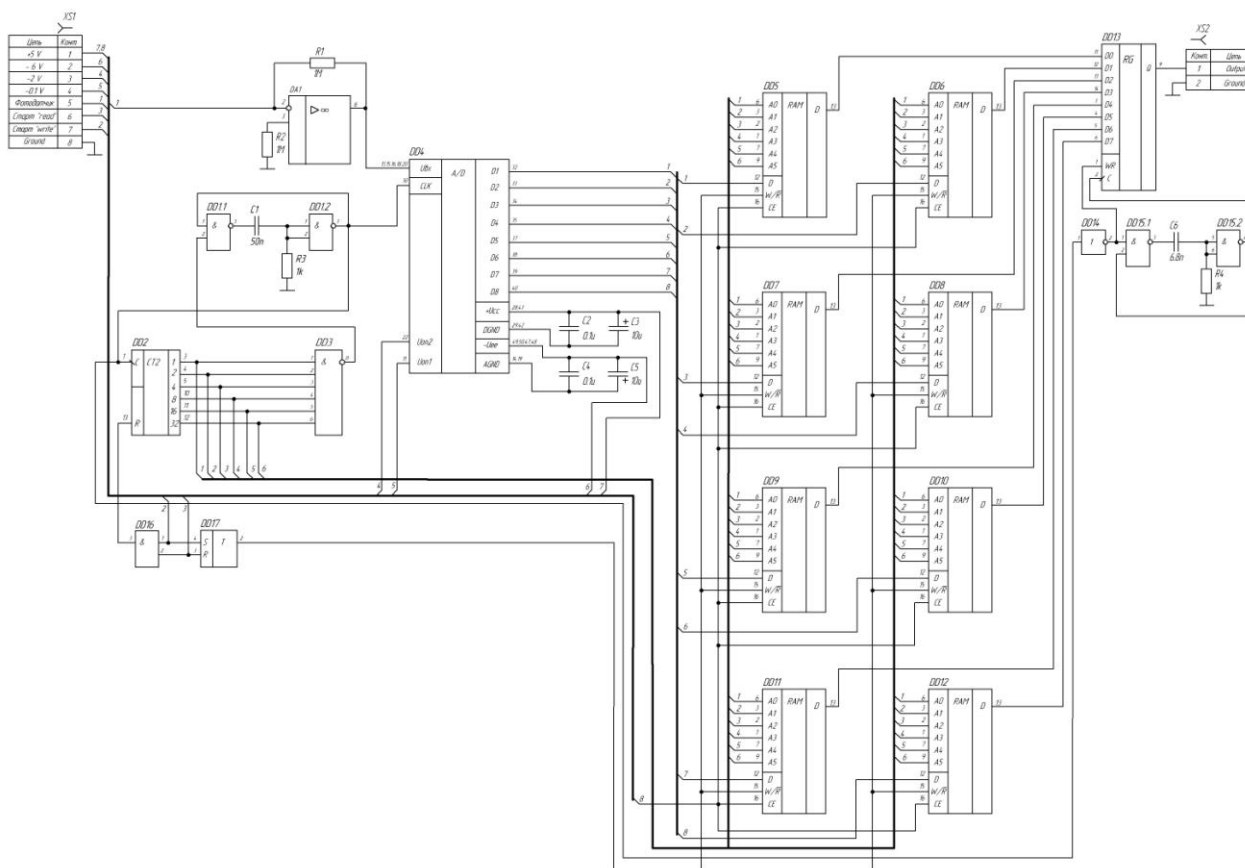


Рисунок 5.2 – Устройство записи на статическом ОЗУ

Принцип работы схемы следующий: устройство записи каждые 0,1 мс по внешнему сигналу записывает в микросхему ОЗУ восьмиразрядный двоичный код с параллельного АЦП.

## 5.2. Фотодатчик PSD 1L20

Функционирование фотодатчика PSD 1L20 соответствует принципу работы фотодиода. Микросхема датчика представлена на рисунке 5.3. Это аналоговое устройство и поэтому имеет высокое разрешение по перемещению

объекта. Разрешение определяется отношением сигнал-шум системы. 1L20 работает в смещенном режиме. Области применения: измерение расстояния и высоты, оценка соответствия горизонтальной и вертикальной плоскости, положения и измерения перемещения объекта, измерение вибрации [29].



Рисунок 5.3 – Фотодатчик PSD 1L20

Электрические параметры:

- активная область:  $20 \times 3 \text{ мм}^2$ ;
- нелинейность положения  $0,1..0,2 \text{ \% } (\pm)$ ;
- темновой ток:  $I_d = 50..250 \text{ нА}$ ;
- шум тока:  $I_{\text{noise}} = 0,5..1,0 \text{ пА/Гц}$ ;
- время нарастания (10 – 90%):  $t_r = 0,5..1,0 \text{ мкс}$ ;
- обратное напряжение (смещение):  $V_r = 5..20 \text{ В}$ .

Фотодатчик представляет собой 22-контактный керамический DIP-корпус,  $31,8 \times 9,9 \text{ мм}^2$ , с защитным окном. Разрешение PSD очень большое. Производительность измерительной системы на основе PSD ограничена её механическими, оптическими и электрическими компонентами.

Для получения максимальной производительности учитывается:

- модулированный источник света. Модуляция позволяет избежать влияния других источников света;
- стабильная температура;
- механическая стабильна система;
- высокое оптическое разрешение;

- высокое разрешение при разделении суммарных и разностных сигналов.

### **5.3. Аналоговый цифровой преобразователь**

Микросхема представляет собой быстродействующий 8-разрядный АЦП параллельного типа и предназначена для преобразования входных сигналов с преобразователя напряжения в ток в восьмиразрядный двоичный код. Каждый из 256 компараторов напряжения прямым входом подключен к определенной точке резисторного делителя опорного напряжения, а инвертирующие входы компараторов объединены и образуют аналоговый вход АЦП. Линейка компараторов формирует унитарный код, соответствующий уровню входного напряжения. Делителем опорного напряжения, формирующим пороговый уровень компаратора, служит низкоомный резисторный делитель. Варьируя опорными напряжениями на входах делителя можно компенсировать абсолютную погрешность преобразования в конечной точке шкалы и напряжения смещения нуля на входе. Вывод от средней точки делителя служит для корректировки нелинейности (подключая его к верхнему или нижнему входам делителя опорного напряжения в зависимости от знака нелинейности, можно скорректировать нелинейность на  $\pm 0,25\text{МЗР}$ ). Унитарный код линейки компараторов преобразуется в 8-разрядный код дешифратором, построенным на схемах Ии ИЛИ. Логические схемы Иключающее ИЛИ имеют внешние входы "управление выходным кодом, вход 1" и "управление выходным кодом, вход 2", по которым имеется возможность сигналами ТТЛ управлять типом выходного кода. Тип выходного кода можно задать при помощи постоянных уровней напряжений: подключение к напряжению +5 В будет соответствовать высокому уровню, а к шине "земля" - низкому уровню. Работой АЦП управляет один тактовый сигнал. Выборка производится (стробируются компараторы) через 10...22нс после прохождения переднего фронта тактового сигнала. Кодирование производится после прохождения заднего фронта тактового импульса,



результат его передается в выходной регистр одновременно с передним фронтом очередного тактового импульса. Задержка цифрового выхода  $t_{DO}$  не превышает 50 нс. Это дает возможность передним фронтом очередного тактового импульса производить следующую выборку, т.е. в момент, когда на выходе получается результат  $n$ -й выборки на входе производится  $n+2$  выборка, а результат  $n+1$  выборки хранится в промежуточной ступени. Содержит 15623 интегральных элементов. Корпус типа 2136.64-1, масса не более 22 г.

#### **5.4. Преобразователь ток в напряжение**

Преобразователь тока в напряжение выполнен на операционном усилителе. Схема обеспечивает преобразование тока с выхода фотоэлемента в напряжение в отношении 1 В на 1 мкА входного тока. Выходное напряжение в этой схеме определяется по формуле выходное  $U_{вых} = -IR$  -пропорционально входному току.

#### **5.5. Устройство считывания**

Устройство считывания представляет собой восьмиразрядный сдвиговый регистр с параллельным выводом восьмиразрядного сигнала с выхода ОЗУ в последовательный код.

### **6. Конструирование датчика перемещения**

На рисунке 6.1 представлена конструкция триангуляционного датчика импульсных перемещений.

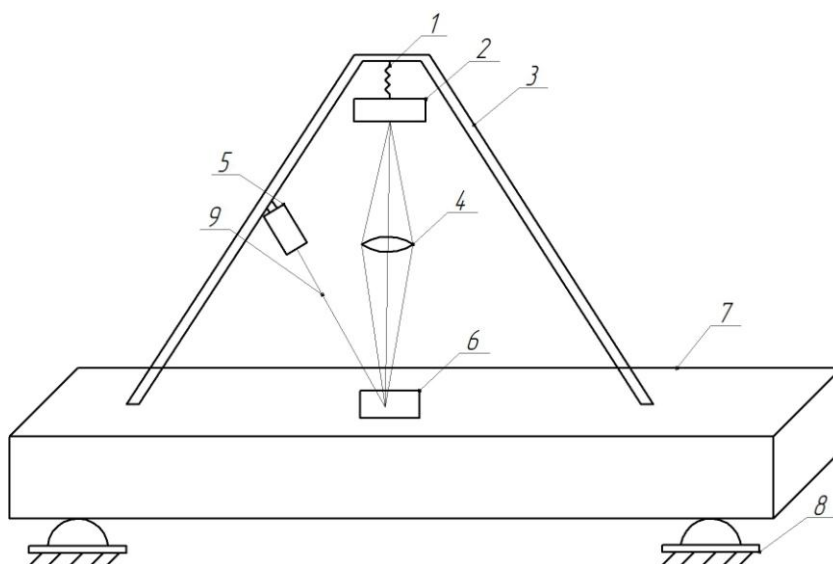


Рисунок 6.1 – Конструкция датчика перемещения

Описание работы датчика перемещений: инфракрасный лазер (5) излучает луч света (9), который отражается от поверхности зеркала (6) габаритными размерами 10x10 см, расположенного на элементе сейсмоисточника (7), установленного на опоре (8). Свет рассеяно отражается от зеркала во всех направлениях в виде полусферы [30]. Фокусирующая линза (4) расположена так, чтобы оптическая ось линзы пересекала поверхность элемента сейсмоисточника в области зеркала, отраженные от зеркала лучи проходят через фокусирующую линзу и пересекают прозрачное окошко фотоприемника 1L20 (2), зафиксированного на подвесе (1), который крепится к стойке (3). Фотоприемник преобразует падающий на него свет в электрический сигнал.

## **Заключение**

1. В ходе выполнения диссертационной работы был разработан датчик импульсных перемещений величиной 0,5-5мм и длительностью 0,1-6,4 мс. Для достижения поставленной цели был произведен поиск аналогов, существующих на данный момент датчиков перемещения, выбор наиболее соответствующего сенсора.

2. Разработан монтаж датчика на сейсмоисточнике.

3. Разработаны электрические схемы датчика.

## Список используемой литературы

1. Датчики перемещения (индуктивный, оптический, емкостной и другие типы) [Электронный ресурс] URL:<http://www.devicesearch.ru/article/3648> (дата обращения 01.09.2017).
2. Оборудование для скоростной съемки (Матрицы камер для скоростной съемки) [Электронный ресурс] URL: <http://www.fastvideo.ru/info/sensor/sensor.htm> (дата обращения 10.09.2017).
3. Фотоника (КМОП – и ПЗС-матрицы) [Электронный ресурс] URL: <http://www.npk-photonica.ru/content/products/ccd-and-cmos-sensors> (дата обращения 25.10.2017).
4. Твердотельные фотоприемники (Физические принципы работы ПЗС-матрицы) [Электронный ресурс] URL: [http://www.security-bridge.com/biblioteka/knigi\\_po\\_bezopasnosti/televidenie/pzsmatricy/](http://www.security-bridge.com/biblioteka/knigi_po_bezopasnosti/televidenie/pzsmatricy/) (дата обращения 16.11.2017).
5. Opticalmeasurementsystems (Лазерные триангуляционные датчики положения (перемещения)) [Электронный ресурс] URL:[http://ru.d-test.ru/catalog/lazernoe\\_izmeritel\\_noe\\_oborudovani/triangulyatsionnye\\_datchik\\_603/](http://ru.d-test.ru/catalog/lazernoe_izmeritel_noe_oborudovani/triangulyatsionnye_datchik_603/) (дата обращения 15.12.2017).
6. Время электроники. Датчики перемещения [Электронный ресурс] URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/printing/doc/739/> (дата обращения 05.01.2018).
7. Импульсные датчики [Электронный ресурс] URL: <http://mash-hhl.info/info/83572/> (дата обращения 08.01.2018).
8. Датчики перемещения (индуктивный, оптический, емкостной и другие типы) [Электронный ресурс] URL:<http://www.devicesearch.ru/article/3648> (дата обращения 10.01.2018).
9. Датчики перемещений, линейные энкодеры [Электронный ресурс] URL: [http://www.sensor.ru/catalog/datchiki\\_peremesheni/](http://www.sensor.ru/catalog/datchiki_peremesheni/) (дата обращения 15.01.2018).

10. Sensor system solutions [Электронный ресурс] URL: [http://www.sensor-systems.ru/category\\_11.html](http://www.sensor-systems.ru/category_11.html) (дата обращения 07.02.2018).
11. Способ измерения перемещения объекта и устройство для его осуществления [Электронный ресурс] URL: <http://www.findpatent.ru/patent/225/2258903.html> (дата обращения 09.02.2018).
12. Modelling of extrinsic fiber optic sagnac ultrasound interferometer used for displacement measurements [Электронный ресурс]: Journal of Fundamental and APPLIED Sciences – URL: <http://www.jfas.info/index.php/jfas/article/view/128/85> (дата обращения: 11.02.2018).
13. Э.И. Гитис Преобразователи информации для электронных ЦВМ, М., «Сов. радио», 1970, с.209.
14. SU 1274651 A1, (КУЗНЕЦОВ С.П. и др.), 23.11.1985.
15. Э.И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М., «Энергия», 1970, стр. 223.
16. Авт. св. СССР № 271131, кл G 06F5/00, 1968.
17. В.М. Поляков Устройство преобразования промежутков времени в цифровой код, М., «Пензенский политехнический институт», 1970.
18. Э.И. Гитис Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств, М., «Энергия», 1975, с.236.
19. Н.И. Васильев и др. Измерение однократных временных промежутков импульсным методом. - «Вопросы радиоэлектроники». Сер. «Общетехническая» 1967, №10.
20. В.М. Шмендин Цифровые электроизмерительные приборы. М., «Энергия», 1972, с.97 (прототип).
21. А.А. Богородицкий Цифровой измеритель промежутков времени, М., «Пензенский политехнический институт», 1970.
22. Soft Pneumatic Bending Actuator with Integrated Carbon Nanotube Displacement Sensor [Электронный ресурс]: Tim Giffney, Mengying Xie,

- Aaron Yong, Andrew Wong, Philippe Mousset, Andrew McDaid and Kean Aw, Mechatronics Engineerin – URL: file:///D:/%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB%202/1.robotics-05-00007/robotics-05-00007.pdf (дата обращения: 13.3.2018).
- 23.Characterization of a Low-Cost Optical Flow Sensor When Using an External Laser as a Direct Illumination Source [Электронный ресурс]: Davinia Font, Marcel Tresanchez, Tomas Palleja, Мерси Teixidy and Jordi Palасн, Department of Computer Science and Industrial Engineering – URL: file:///D:/%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB%202/2.sensors-11-11856/sensors-11-11856.pdf (дата обращения: 10.04.2018).
- 24.ARBRES: Light-Weight CW/FM SAR Sensors for Small UAVs [Электронный ресурс]: Rene Acevo-Herrera, Antoni Broquetas, Jordi J. Mallorqui and Xavier Fabregas, Remote Sensing Lab – URL: file:///D:/англ%202/3.sensors-13-03204/sensors-13-03204.pdf (дата обращения: 15.04.2018).
- 25.Techniques for Clutter Suppression in the Presence of 27 Body Movements during the Detection of Respiratory Activity through UWB Radars UAVs [Электронный ресурс]: Antonio Lazaro, David Girbau and Ramon Villarino, Department of Electronic – URL: file:///D:/англ%202/4.sensors-14-02595/sensors-14-02595.pdf (дата обращения: 17.04.2018).
- 26.Bio-Inspired Micro-Fluidic Angular-Rate Sensor for Vestibular Prostheses [Электронный ресурс]: Charalambos M. Andreou, Yiannis Pahitas and Julius Georgiou, Department of Electrical and Computer Engineering – URL: file:///D:/англ%202/5.sensors-14-13173/sensors-14-13173.pdf (дата обращения: 03.05.2018).
- 27.Emergency Navigation without an Infrastructure [Электронный ресурс]: Erol Gelenbe and Huibo Bi, Intelligent Systems and Networks Group – URL: file:///D:/англ%202/6.sensors-14-15142/sensors-14-15142.pdf (дата обращения: 04.05.2018).

28. An Energy Efficient Distance-Aware Routing Algorithm with Multiple Mobile Sinks for Wireless Sensor Networks [Электронный ресурс]: Jin Wang, Bin Li, Feng Xia, College of Information Engineering – URL: <file:///D:/англ%202/7.Y04404152158/sensors-14-15163-v2.pdf> (дата обращения: 07.05.2018).
29. High Linearity Position Sensing Detector [Электронный ресурс] URL: <http://pdf.dzsc.com/1L2/1L20.pdf> (дата обращения 09.05.2018).
30. 1L Series – Single – Axis Position Sensing Detectors [Электронный ресурс] <http://www.on-trak.com/1lseries.html> (дата обращения 23.05.2018).