

стандартный круг проблем, решаемых при проведении любого физического эксперимента. С помощью полученных данных необходимо рассчитать некоторые параметры ИВС. Затем исследование проводится на компьютерной модели, созданной в виде исполняемого файла, и полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

4.1 Краткая теория

Дифракция света представляет собой сложное явление, которое будет исследовано подробно в отдельной работе. Здесь же, для иллюстрации возможностей применения ИВС в физическом эксперименте, рассматривается простейший для расчёта и практически очень важный случай дифракции на длинной прямоугольной щели конечной ширины. В данном случае

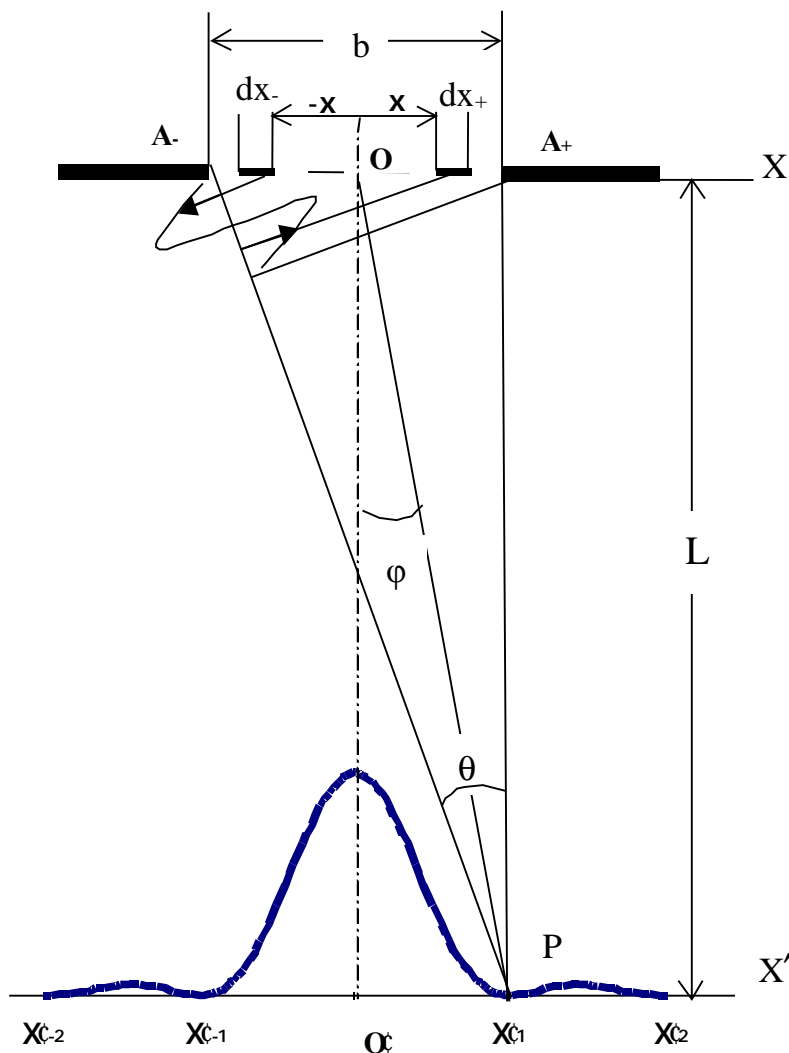


Рис.4.1. Схема дифракции света на щели.

дифракционная картина рассматривается «на бесконечности», что соответствует френелеву приближению. Предполагается, что ширина щели равна b , длина - много больше b . При падении плоской монохроматической волны с волновым числом $k = 2\pi / \lambda$ на щель (см. рис. 4.1), световое поле за щелью можно найти по принципу Гюйгенса - Френеля как результат интерференции когерентных вторичных волн, исходящих из различных точек волнового фронта на щели.

Каждая полоска щели шириной dx является источником вторичной волны, суммируя которые в точке наблюдения P (т.е. интегрируя по ширине щели), находим величину светового поля в этой точке. Результат интегрирования, очевидно, зависит от положения точки P в плоскости изображения т.е. от линейной координаты x' или угла дифракции φ . Если угол равен нулю, то разность хода волн, излучаемых любыми двумя полосками, расположенными симметрично относительно центра щели O , равна нулю, т.е. эти волны приходят в одинаковых фазах и складываясь усиливают друг друга. Следовательно, в точке O'' изображения щели будет наблюдаться максимум интенсивности светового поля, называемый главным.

Будем увеличивать угол дифракции до значения j_1 такого, что разность хода Δ между крайними точками щели в данном направлении равна длине волны λ . Тогда для любой полоски шириной dx_+ , расположенной на расстоянии x от центра щели O найдется полоска dx_- , расположенная симметрично на расстоянии $(-x)$ от центра щели O , колебания поля волны которой находятся в противофазе с колебаниями поля волны полоски dx_+ . Суммарное поле этих полосок будет равно нулю. Этот же результат получится при сложении полей симметричных полосок по всей ширине щели, следовательно, под углом j_1 на изображении щели будет наблюдаться (первый) минимум. Учитывая, что $\Delta = b \sin j$, и считая угол дифракции j малым, находим координату первого минимума $x'_1 \approx L j_1 \approx L(\Delta / b) = L(\lambda / b)$. При последующем увеличении угла дифракции j мы приходим к значению $j_{3/2}$, при котором $\Delta \approx (3/2)\lambda$. В этом направлении погасят друг друга волны, излучаемые частью щели, проекция которой на направление распространения $\Delta_1 \approx \lambda$. Волны, излучаемые оставшейся частью щели, дадут в этом направлении максимум, называемый первым, амплитуда которого, очевидно, существенно меньше амплитуды главного максимума.

Дальнейшее увеличение угла дифракции приводит к появлению на дифракционной картине ряда последовательно чередующихся минимумов (под углами j_n такими, что $\Delta_n = n\lambda$, $n = \pm 2, 3, \dots$) и максимумов (под углами $j_{n+1/2}$ такими, что $\Delta_{n+1/2} \approx (n+1/2)\lambda$). Расчет по формуле (4.1) дает точные значения углов под которыми наблюдаются максимумы:

$j_{3/2} = 1,43p$; $j_{5/2} = 2,47p$; и т.д.). Дифракционная картина имеет вид, изображенный на рис.4.1, и можно показать, что интенсивность светового поля в плоскости изображения описывается формулой:

$$I(x') = I_0 \frac{\sin^2 x'}{x'^2} \equiv I_0 \operatorname{sinc}^2 x' \quad (4.1)$$

Из рис.4.1 можно также получить условие применимости приближения Фраунгофера, которое означает, что картина дифракции наблюдается "на бесконечности" т.е. в параллельных лучах. Это условие соответствует тому, что угол q между лучами A_+P и A_-P должен быть много меньше угла дифракции φ . Поскольку $\theta \approx b / L$ (см. рис.4.1), а угол дифракции $\varphi \approx \lambda / b$, то из условия $q \ll \varphi$ находим: $b / L \ll \lambda / b$, то есть

$$N_F = \sqrt{L / b} \gg 1, \quad (4.2)$$

где N_F - безразмерный параметр (число Френеля) показывающий сколько зон Френеля на падающем волновом фронте открывает щель для точки наблюдения P и в данном случае характеризующий точность сделанного приближения.

Для того, чтобы перейти от картины дифракции на щели к картине дифракции на проволочке, которая будет реально исследоваться ниже, воспользуемся теоремой Бабине, доказываемой в курсе оптики. Она гласит, что дифракционные фраунгоферовы картины от двух экранов, таких, что отверстия в одном совпадают с непрозрачными областями в другом (эти экраны называются дополнительными)- идентичны, кроме величины главного максимума. Приведём также определение коэффициента контрастности (видности), широко используемого в оптике, т.к. оно потребуется при выполнении одного из заданий. Коэффициент контрастности K есть отношение разности максимальной и минимальной интенсивностей светового потока к их сумме для какого-либо элемента изображения (например, дифракционного максимума и ближайшего минимума):

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4.3)$$

Этот коэффициент используется в оптических системах для установления оптимального соотношения амплитуда/разрешение. Очевидно, что максимальное значение $K_{\max} = 1$ достигается при ширине входной щели датчика малой по сравнению с шириной данного элемента изображения.

При увеличении ширины щели контраст уменьшается, а сигнал датчика - увеличивается. Если коэффициент контрастности близок к нулю (при "очень большой" ширине щели), получаем значительный выигрыш в амплитуде сигнала, но теряем в пространственном разрешении сигнала. Эти выводы иллюстрирует Рис.4.2, где изображены картины, полученные при открытой (5.6 мм) –а) и закрытой (0.1 мм) –б) апертурных щелях. Из приведённых графиков можно определить коэффициент контрастности K . Для случая а) $K \approx 0.2$; для случая б) $K \approx 1$.

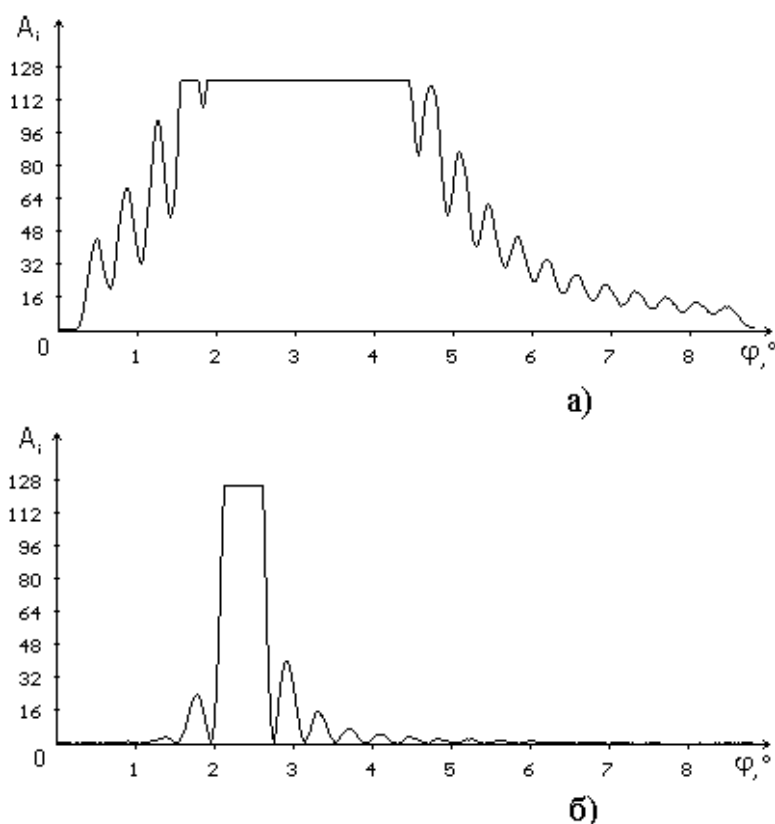


Рис.4.2. Дифракционная картина при разной ширине апертурной щели фотодатчика

4.2. Лабораторная установка

Схема установки приведена на рис.4.3. В её состав входит полупроводниковый лазер 1; линза 2, формирующая сферическую волну; изменяемая по ширине щель 3; зеркало 4, расположенное на поворотном столике; шаговый двигатель 5, вращающий поворотный столик; апертурная щель 6; датчик светового потока (фотодиод) 7; универсальный многоканальный интерфейс (УМИ) 8, персональный компьютер 9.

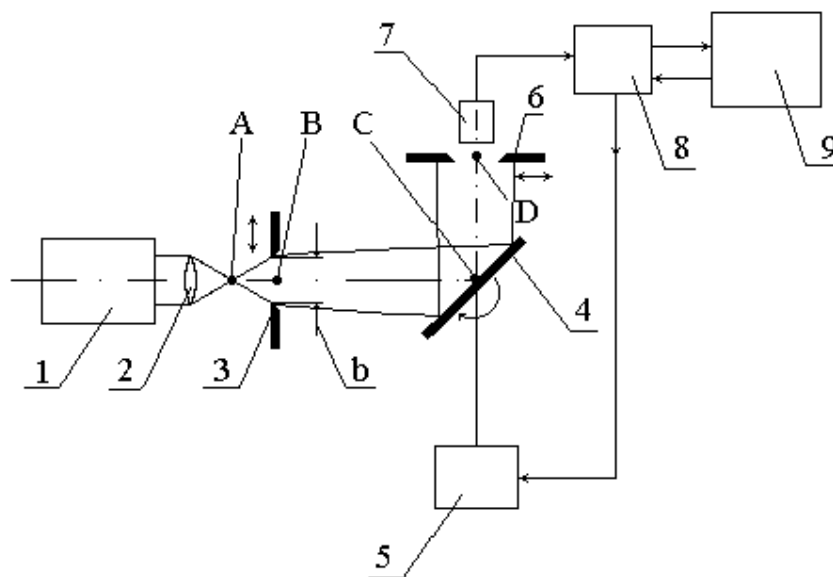


Рис.4.3. Схема экспериментальной установки

Установка работает следующим образом. Свет от лазера дифрагирует на щели 3, отражается от зеркала 4 и попадает через апертурную щель 6 на фотодиод 7. Сканирование дифракционной картины осуществляется путем вращения столика, на котором укреплено зеркало 4. При этом дифракционная картина смещается относительно закреплённого фотодатчика 7.

Узлы установки с номерами 5-9 образуют ИВС, основным элементом которой является универсальный многоканальный интерфейс, на описании устройства и управления которым остановимся подробнее.

Универсальный многоканальный интерфейс

Интерфейс представляет собой восьмиканальную систему сбора данных с программным управлением чувствительностью входных усилителей по двум каналам, а также с программным управлением шаговым двигателем и реле. Интерфейс соединён с компьютером через плату сопряжения, находящуюся внутри компьютера. На рис.4.4 схематично показана структура ИВС. На схеме приняты следующие условные обозначения: КК – компьютер с платой сопряжения (ПС), обмен между которыми ведётся при помощи шины данных (ШД), шины адреса (ША), сигналов записи (WR) и считывания (RD) портов ввода- вывода и сигнала сброса RES. Плата сопряжения конвертирует эти сигналы при помощи дешифратора адреса (ДШ) и буферного усилителя (БУ) в управляющие линии выборки портов на запись (ВП WR) и считывание (ВП RD), а также формирует более мощную по нагрузочной способности шину данных (ШД). Интерфейс включает в себя входные усилители (БУ), АЦП - аналого-цифровой преобразователь, P1 - регистр данных АЦП, P2 - регистр состояния, P3 - регистр для настройки чувствительности нулевого и первого каналов, P4 - регистр номера канала, P5 - регистр управления шаговым двигателем (ДВ) и реле (РЛ).

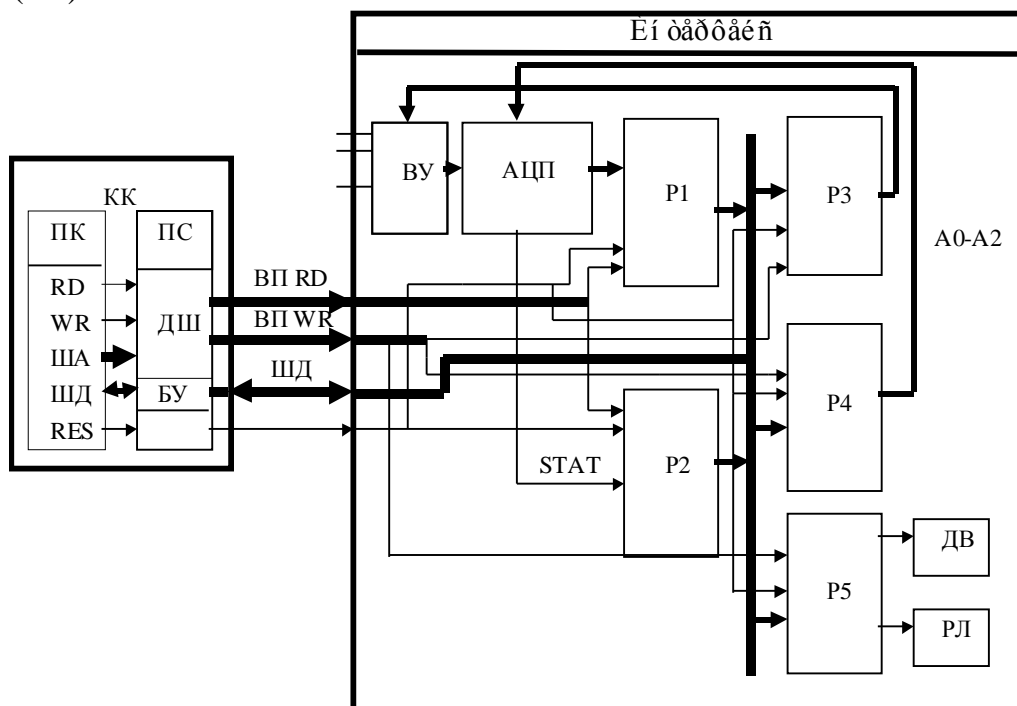


Рис.4.4. Структура ИВС

Управление интерфейсом осуществляется программным образом при помощи портов ввода-вывода указанных ниже в табл.4.1.

Таблица 4.1

№ п/п	Адрес порта	Направление передачи	Назначение порта
1	864	Считывание	Содержит байт данных (8 бит) АЦП
2	865	Считывание	Содержит регистр состояния (сигнал готовности)
3	866	Считывание	Зарезервирован
4	867	Считывание	Зарезервирован
5	864	Запись	Установка чувствительности нулевого и первого каналов
6	865	Запись	Установка номера активного канала
7	866	Запись	Управление движением шагового двигателя и коммутацией реле
8	867	Запись	Зарезервирован

Регулировка чувствительности входных усилителей.

Перед тем, как исследуемый аналоговый сигнал поступит в АЦП, он должен быть приведён к необходимому уровню, т.е. ослаблен или усилен. Диапазон допустимых входных напряжений используемого АЦП - от -1В до +1В. Сигнал, например от фотодиода, может иметь уровень порядка от нескольких милливольт до сотен милливольт. Отсюда видно, что необходимо изменять коэффициент усиления входного усилителя как минимум на два порядка. В УМИ реализовано программное управление чувствительностью входных усилителей только двух (нулевого и первого) каналов в пределах от 1мВ до 1В. Для регулировки чувствительности этих каналов необходимо записать определённое число в порт с адресом 864. По этому адресу находится восьмибитный регистр, причём старшие четыре разряда управляют чувствительностью первого канала, а младшие четыре - чувствительностью нулевого канала. Поэтому, чтобы установить коэффициент усиления для нулевого или первого каналов, необходимо записать в младшие или старшие четыре бита соответственно значения X_i из следующей табл.4.2:

Таблица 4.2

X_i	Диапазон изменения входных напряжений
0	-1В..+1В
1	-0.5В..+0.5В
2	-0.2В..+0.2В
3	-0.1В..+0.1В
4	-0.05В..+0.05В
5	-0.02В..+0.02В
6	-0.01В..+0.01В
7	-5мВ..+5мВ
8	-2мВ..+2мВ
9	-1мВ..+1мВ

Следует отметить, что установка чувствительности при записи в порт 864 происходит одновременно для нулевого и первого каналов. Поэтому для изменения коэффициента усиления для каждого из каналов необходимо сделать запись следующего вида

outport(864,16*X1+X0);

Здесь **X1**- число из табл.4.1, обозначающее диапазон допустимых входных напряжений для канала 1, **X0** - для канала 0. Например, требуется установить по нулевому каналу чувствительность 20 мВ, по первому - 0,5 В. Тогда в порт 864 необходимо записать (**X1=1**, **X0=5**, см. табл.4.1) :

outport(864, 16*1+5);

Если один из этих каналов не используется, то необходимо соответствующее число X положить равным нулю. При включении УМИ **X1=0** и **X0=0**.

Управление АЦП

АЦП служит для преобразования аналогового напряжения с фотодатчика в цифровой код. Цифровой код поступает через плату сопряжения в компьютер для обработки. Код имеет разрядность 8 бит, т.е. диапазон возможных значений от 0 до 255. В интерфейсе используется достаточно «медленный» АЦП с полным временем дискретизации 160 мс. Необходимо отметить, что это не просто АЦП, но система сбора данных (ССД) на основе АЦП. Структура ССД изображена на рис.4.5.

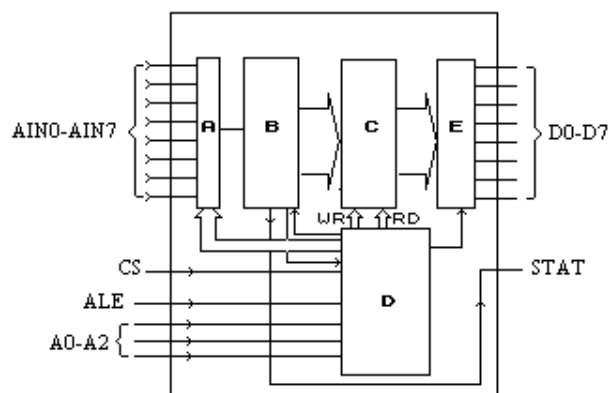


Рис.4.5. Структурная схема ССД. А - мультиплексор; В - аналого-цифровой преобразователь; С - оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) с организацией 8 ячеек*8 бит; D - схема фиксации адреса и выбора канала; Е - буферный регистр. AIN0 - AIN7 аналоговые входы; CS - сигнал разрешения считывания данных из буферного регистра; ALE - сигнал записи адреса (номера канала) в ССД; А0-А2 трех проводная шина адреса (номера канала); D0-D7 - выходной код; STAT - сигнал готовности АЦП.

Как видно из рис.4.5, ССД имеет восемь независимых аналоговых входов, на которые можно подать сигналы от различных источников. Хотя в данной лабораторной работе используется всего один вход, необходимо кратко описать всю многоканальную систему. Связано это, в первую очередь, с тем, что при работе с одним каналом требуется учитывать остальные семь. Мультиплексор - это программно управляемый переключатель, который последовательно подключает каждый из восьми аналоговых входов к АЦП для преобразования. АЦП также последовательно оцифровывает значения на этих входах. С выхода АЦП байты данных записываются во встроенное ОЗУ, состоящее из 8 ячеек по 8 бит каждая, причём адрес ячейки для записи соответствует номеру того канала (аналогового входа), который в данный момент подключён мультиплексором к АЦП.

Необходимо отметить, что используемый АЦП может регистрировать как положительные, так и отрицательные входные сигналы. При этом старший бит байта данных указывает знак числа (1 соответствует знаку «+», 0 – знаку «-»).

Блок D выполняет функции управления и организации алгоритма считывания. Буферный регистр предназначен для вывода данных на внешнюю магистраль. Алгоритм работы ССД следующий:

- 1.Мультиплексор подключает AIN7 к АЦП; сигнал готовности STAT равен 0 (не готов);

2. Происходит преобразование напряжения в цифровой код;
3. В ячейку памяти с номером 7 записывается этот код; сигнал STAT переходит в 1 (готов);
4. Семь раз прокручиваются шаги 1 - 3 с номерами каналов и ячейек 6 - 0 соответственно;
5. Возвращение к пункту 1.

Необходимо отметить, что на выполнение шагов 1-3 затрачивается некоторое время Δt_{ch} , т.е. время, затрачиваемое на обработку одного канала. Время дискретизации Δt каждого канала есть сумма всех восьми Δt_{ch} , т.к. преобразование происходит последовательно. Таким образом, полное обновление содержимого ОЗУ ССД происходит за время Δt . В процессе отработки алгоритма ССД формирует сигнал готовности STAT, графически представленный на рис.4.6.

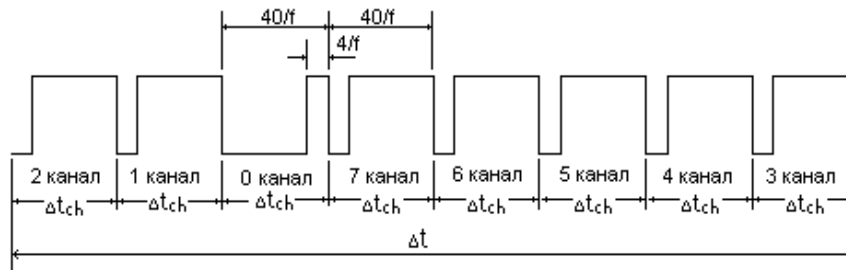


Рис 4.6. Сигнал готовности STAT

Этот сигнал несёт информацию о состоянии системы в каждый момент времени. Если сигнал STAT имеет значение «единица», это означает, что по какому-то из каналов произошло обновление данных в ОЗУ. По какому каналу именно - определяется положением данной «единицы» на временной оси после окончания обработки нулевого канала. Этот момент времени следует принять за начало отсчёта. Например, считывание данных с пятого канала, возможно только после того, как сигнал STAT, после периода обработки нулевого канала, примет три раза значение нуль, чередующиеся двумя значениями единицы. Если программным образом «поймать» и «опознать» (по временной диаграмме) период обработки нулевого канала, то отсчитывая от него необходимое количество нулей и единиц можно всегда определить момент готовности нужного канала. Однако, подобное ожидание готовности оправдано лишь при работе со всеми восемью каналами одновременно - в нашем же случае (при использовании только одного входа) можно сделать проще. Достаточно организовать цикл, который «пропустит» восемь единиц и восемь нулей, после чего

можно быть уверенным, что вся информация во встроенном ОЗУ обновилась и можно считывать с любого канала.

Итак, для того, чтобы считать код, полученный в результате преобразования, из ССД в компьютер, необходимо проделать следующие операции:

1. Установить номер канала, с которого мы будем считывать, т.е. указать ССД номер ячейки памяти в ОЗУ, данные из которой она будет направлять в буферный регистр.
2. Дождаться готовности АЦП.
3. Считать данные в переменную или массив.

Все перечисленные операции производятся посредством записи и считывания байтов из соответствующих портов. Номер канала - это целое неотрицательное число от 0 до 7. Для инициации активного канала необходимо в порт 865 записать его номер, например 1, т.е.

outport(865, 1);

Следует отметить, что при работе с одним входом установка номера канала может быть однократной, например, в начале программы, однако предпочтительнее инициировать канал всякий раз во время считывания.

Для определения готовности необходимо организовать цикл по принципу, изложенному выше. Тело цикла должно включать в себя две задержки: задержку на время, пока сигнал STAT имеет значение 1 и на время равенства сигнала нулю. Проще всего организовать подобные задержки с помощью цикла **repeat ... until**. Сигнал состояния STAT, изображённый на рис.4.6, можно считать из регистра состояния, адресуемого портом 865 (см. Табл. 4.1). Регистр состояния представляет собой восьмибитную ячейку памяти, хранящую различную служебную информацию, в том числе, в одном из битов, содержится STAT. Регистр состояния и местонахождение сигнала готовности в нём схематично представлено на рис.4.7.



Рис.4.7. Регистр состояния ИВК.

Как видно из рисунка сигнал STAT находится в третьем разряде регистра состояния. Все остальные биты несут другую, ненужную при реше-

нии данной задачи, информацию. Для выделения нужного бита используется стандартная операция-«**and**» (побитовое умножение).

Для того чтобы получить сигнал STAT из регистра состояния необходимо произвести операцию побитового умножения содержимого регистра и двоичного числа 00001000 (так называемое «наложение маски»). В десятичной записи это будет число $2^3 = 8$. Алгоритм получения сигнала STAT имеет следующий вид.

1. Содержимое регистра состояния записывается в переменную **a** с помощью процедуры **inport(865,a)**.
2. В двоичной записи переменной **a** выделяется третий разряд - (**a and 8**).
3. Проверяется условие того, что он равен единице: (**a and 8**) = 8.

Ожидание единицы организуется следующим образом:

```
repeat  
  inport(865,a)  
until ( ( a and 8) = 8 );
```

т.е. цикл будет выполняться до тех пор, пока выражение в скобках ложно. Аналогично формируется задержка перед ожиданием нуля в третьем разряде регистра состояния:

```
repeat  
  inport(865,a)  
until ( ( a and 8) <> 8 );
```

Для того, чтобы быть уверенными в готовности ССД, нам необходимо последовательно «пропустить» 8 единиц и 8 нулей, т.е. создать цикл следующего вида:

```
for i:=1 to 8 do  
  begin  
    repeat  
      inport(865,a)  
      until ( ( a and 8) = 8 );  
    repeat  
      inport(865,a)  
      until ( ( a and 8) <> 8 );  
  end;
```

После отработки данного цикла можно считывать данные из АЦП. Для этого необходимо считать в некоторую переменную **data** типа **byte** значение порта 864, т.е. вызвать процедуру:

```
inport(864,data);
```

Полученное число будет находиться в пределах от 0 до 255. Однако так как старший бит соответствующего двоичного числа отводится под знак, необходимо полученное число преобразовать для получения реального значения выходного сигнала. Для этого достаточно вычесть из него число 128.

Итак, фрагмент программы получения кода из ССД выглядит следующим образом:

```
{...  
i:integer;  
a: byte;}  
outport(865, 1);  
for i:=1 to 8 do  
begin  
  repeat  
    inport(865,a)  
    until ( ( a and 8) = 8 );  
  repeat  
    inport(865,a)  
    until ( ( a and 8) <> 8 );  
end;  
inport(864,a)  
data:=a -128;
```

Управление шаговым двигателем

Используемый ШД имеет минимальный угол поворота $1,8^\circ$ и делает 200 шагов при полном обороте на 360° . Для управления ШД, УМИ требуется только два однобитных сигнала - направление (0/1) и инициация (переход с 0 на 1). В ИВС встроен преобразователь базисных параметров в управляющие напряжения для обмоток. ШД обслуживается младшими двумя разрядами порта 866. Обозначим через **dir** (0/1) направление вращения. Инициация шага идёт по положительному перепаду логического сигнала, т.е. при изменении последнего с 0 на 1. Конкретная реализация алгоритма управления ШД приведена ниже:

```

outport(866, dir*2 + 0);
outport(866, dir*2 + 1);
{ установка задержки 250 миллисекунд }
t:=GetTickCount;
repeat until (GetTickCount -t)>250;

```

dir умножается на 2 потому что направление задаётся первым, а не нулевым, двоичным разрядом порта 866. Две строки записи в порт нужны для формирования сигнала поворота шагового двигателя и обеспечивают перепад значения нулевого разряда с 0 на 1. Необходимая для работы механической системы ШГ 250- миллисекундная задержка устанавливается с помощью функции Windows **GetTickCount**, которая возвращает число миллисекунд прошедших с начала текущего сеанса Windows.

Считывание сигнала фотодатчика

Сигнал обычно содержит значительную шумовую компоненту, причем уровень шума растёт с увеличением чувствительности. При проведении измерений с малыми сигналами шум недопустимо искажает сигнал, поэтому борьба с ним имеет принципиальное значение. Она ведётся как аппаратными, так и программными средствами. На аппаратном уровне устанавливаются фильтры в цепях питания, а также во входных цепях усилителей УМИ. Кроме этого, экранируются отдельные узлы прибора (обычно, входные усилители), а также разделяются их цепи питания. Шумовая составляющая сигнала имеет случайный характер, поэтому для ее уменьшения программными средствами необходимо провести предварительную обработку сигнала путем усреднения набора отсчётов, полученного при фиксированном положении ШД.

Процедура измерений, следовательно, имеет вид: шаг ШД, временная задержка τ_1 для установления системы; N считываний из АЦП через интервалы времени τ_2 и усреднение полученных значений сигнала; новый шаг ШД и т.д. Последовательность подачи управляющих импульсов на УМИ для реализации алгоритма измерения представлена на рис.4.8.

На рисунке обозначены моменты времени: $t_{ин}$ - момент подачи импульса для поворота ШД; $t_1...t_N$ - моменты подачи последовательности импульсов, инициализирующих считывание из АЦП. Интервал t_1 -необходим для затухания механических вибраций и ограничивает максимальную скорость вращения ШД: $\tau_1 > 10$ мс; t_2 - интервал между отсчётами при фиксированном положении оси шагового двигателя ($\tau_2 > t_{np}$, где t_{np} - время преобразования АЦП).

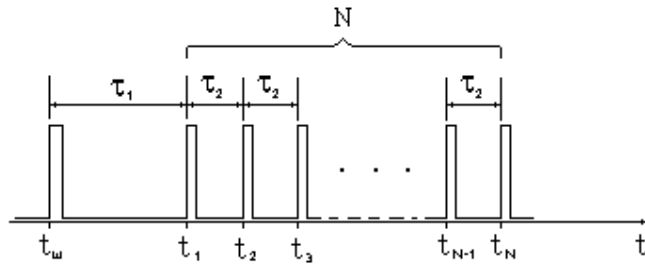


Рис.4.8. Временная диаграмма процесса измерения

4.3. Задания

1. С помощью описанных выше процедур напишите программу, обеспечивающую запись в файл и воспроизведение изображения дифракционной картины на экране дисплея. Программа должна обеспечивать регулировку коэффициента усиления канала регистрации и процедуру усреднения сигнала.
2. Увеличивая чувствительность входного усилителя получите заметную шумовую составляющую сигнала. Варьируя время t_2 и число отсчётов N (задайте 3-4 значения каждого параметра) попытайтесь увеличить соотношение сигнал / шум.
3. Прокалибруйте ИВС, т.е. установите связь длины интервала между соседними отсчетами и физическим параметром: расстоянием между соответствующими точками реальной картины. Для этого воспользуйтесь известной (калибровочной) картиной дифракции на проволочке диаметра D . Как следует из приведенных выше формул, для дифракционной картины Фраунгофера ширина главного максимума, т.е. расстояние между соседними минимумами

$$d \equiv x_{-1} - x_1 = 2l / D. \quad (4.4)$$

Для калибровки необходимо собрать схему (Рис.4.3), установив максимальное расстояние ВС, исключив для простоты линзу 2 и заменив щель 3 держателем с проволочкой заданного диаметра D . Измерив полное рас-

стояние от проволоочки до детектора $l(=BC+CD)$ для известной длины волны излучения лазера $\lambda = 670\text{ нм}$ по формуле (4.4) найдите величину d . Определите число отсчетов между соответствующими точками дифракционной картины, полученной с помощью ИВС, и рассчитайте интервал между соседними отсчетами в миллиметрах. Найдите для данной схемы число Френеля N_F и проверьте точность выполнения приближения Фраунгофера, т.е. неравенства (4.2).

4. Изучите влияние размера апертуры входного зрачка на коэффициент контрастности приёмника излучения. При различной ширине апертурной щели b (рис. 4.8), получите несколько дифракционных картин, для которых вычислите коэффициент контрастности. Используя полученные данные, постройте график зависимости коэффициента контрастности K от ширины апертурной щели b .

5. Обработка результатов физических измерений

В этом разделе изложены основные сведения, необходимые для обработки результатов эксперимента. Получение надежных числовых значений физических величин является непростой задачей из-за многочисленных погрешностей, неизбежно возникающих при измерениях. Ниже рассмотрены эти погрешности, а также простейшие методы, применяемые для получения физически значимых результатов из экспериментальных данных. Для практического применения этих методов используются стандартные программные пакеты, например MS Excel.

5.1. Погрешности измерений

Все измерения разделяются на *прямые* и *косвенные*. В прямых измерениях определяемую величину x сравнивают с единицей измерения. Например, измерение длины линейкой, времени секундомером. В косвенных измерениях определяемую величину w вычисляют по результатам прямых измерений других величин x , y и z , которые связаны с ней известной функциональной зависимостью: $w = F(x, y, z)$.

Целью эксперимента является получение *истинного* значения измеряемой величины. Однако, в результате измерений получаются результаты несколько отличающиеся друг от друга, так как измерения проводятся со случайными погрешностями. Только в результате бесконечного числа измерений можно определить истинное значение измеряемой величины.