

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Системы документальной электросвязи»

Ростов-на-Дону

2019

Рыбалко И.П., Гладыщук С.В. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине: «Системы документальной электросвязи» – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2019. – 69 с.

В методических указаниях даны рекомендации по выполнению шести лабораторных работ с использованием программ для ЭВМ. Для каждой лабораторной работы приведены краткие теоретические сведения, описание интерфейса программы или оконечного устройства, порядок выбора и выполнения индивидуального задания, определены требования для оформления отчёта по работе и её защите.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной и заочной форм обучения.

Рецензент: Заведующий кафедрой ИТСС, к.т.н. Юхнов В.И.

Составитель: Рыбалко И.П., доц. каф. «ИТСС», Гладыщук С.В.

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «ИТСС». Протокол № 1 от «26» августа 2019 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| 1. Лабораторная работа № 1. Эффективное кодирование на примере кода Хаффмана.....                    | 4  |
| 2. Лабораторная работа №2. Исследование свойств циклического кода.....                               | 14 |
| 3. Лабораторная работа №3 Исследование методов регистрации двоичных сигналов.....                    | 24 |
| 4. Лабораторная работа №4. Исследование линейных искажений<br>.....                                  | 33 |
| 5. Лабораторная работа №5 Исследование работы устройства синхронизации с дискретным управлением..... | 43 |
| 6. Лабораторная работа №6. Изучение последовательного асинхронного интерфейса.....                   | 52 |

# Лабораторная работа № 1

## Эффективное кодирование на примере кода Хаффмана

### Цель работы

Изучение принципов эффективного кодирования источников дискретных сообщений.

#### Домашнее задание

1. Изучить принцип эффективного кодирования алфавита источника дискретных сообщений (ИДС) по методу Хаффмана.
  2. Сформировать кодовые комбинации для передачи заданной последовательности знаков алфавита (таблица 1):
    - при кодировании алфавита ИДС равномерным кодом;
    - при кодировании алфавита ИДС кодом Хаффмана.
- Студенты заочного факультета выбирают вариант домашнего задания в соответствии с последней цифрой номера студенческого билета.
3. Определить значения  $N_{\max}$ ,  $N_{\text{реал}}$  и  $n_{\text{сред}}$  для анализируемого варианта.
  4. Оценить значение  $K_{\text{оэ}}$  и  $K_{\text{сж}}$ .

Таблица 1 - Таблица вероятностей знаков алфавита

| Вариант<br>знак<br>алфавита | I    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 0    |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Z_1$                       | 0,10 | 0,13 | 0,04 | 0,25 | 0,37 | 0,12 | 0,01 | 0,18 | 0,06 | 0,3  |
| $Z_2$                       | 0,05 | 0,17 | 0,17 | 0,34 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,06 |
| $Z_3$                       | 0,17 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,17 | 0,01 | 0,13 | 0,03 | 0,2  | 0,18 |
| $Z_4$                       | 0,24 | 0,36 | 0,26 | 0,05 | 0,07 | 0,23 | 0,37 | 0,24 | 0,09 | 0,07 |
| $Z_5$                       | 0,28 | 0,15 | 0,10 | 0,13 | 0,10 | 0,27 | 0,20 | 0,05 | 0,28 | 0,16 |
| $Z_6$                       | 0,02 | 0,07 | 0,11 | 0,07 | 0,07 | 0,23 | 0,10 | 0,36 | 0,06 | 0,23 |
| $Z_7$                       | 0,14 | -    | 0,18 | -    | 0,09 | -    | 0,03 | -    | 0,19 | -    |

## Краткая теория

Источник дискретных сообщений (ИДС) формирует на выходе счетное число сообщений о состоянии объекта. Такое сообщение в литературе часто называют "знаком", а всю совокупность передаваемых знаков - алфавитом источника [1].

Например, если в качестве источника сообщения рассматривать текст на русском языке, то в качестве знаков будут выступать буквы, а их совокупность является алфавитом. С учетом пробела алфавит русского языка содержит 33 знака. Английский алфавит содержит 27 знаков.

Для передачи каждого знака алфавита по каналу связи необходимо поставить ему в соответствие некоторый определенный сигнал. С этой целью каждому знаку алфавита присваивают определенную комбинацию двоичных символов, то есть осуществляют кодирование источника. Присвоенные комбинации называются кодовыми комбинациями или, по терминологии теории кодирования, кодовыми словами. Если кодовая комбинация состоит из  $n$  двоичных символов, то есть является  $n$ -разрядной, то  $n$  называют длиной кодовой комбинации.

В данной лабораторной работе Вы изучаете кодирование источника, задачей которого является преобразование целесообразным способом заданного набора знаков алфавита в двоичные символы. Целесообразность при этом может означать уменьшение избыточности источника и/или представление сообщений источника в форме пригодной для обработки и передачи.

В технике связи широкое распространение получил метод передачи равномерным кодом, когда количество разрядов в кодовой комбинации постоянно и не зави-

$$N \geq 2^n$$

сит от конкретного передаваемого знака. Выбор необходимой длины кодовой комбинации производится в соответствии с объемом алфавита источника. Обозначим  $N$  – объем алфавита. Тогда нетрудно заметить, что равномерный код обладает следующими особенностями:

- $N$  - разрядная кодовая комбинация может передавать информацию о  $2^n$  знаках исходного алфавита, но по условиям работы источника обычно необходимо передавать меньшее число знаков, а, поэтому, часть кодовых комбинаций оказывается вообще незадействованной;
- в зависимости от конкретной природы источника вероятность появления каждого из знаков алфавита различна, но при кодировании источника равномерным кодом статистические характеристики источника не учитываются.

Для учета статистических характеристик источника выделяют отдельный класс эффективных методов кодирования[2].

Если на выходе ИДС, обладающего алфавитом  $A$ , знаки  $a_i$  появляются независимо с вероятностями  $p_i$ , при этом:

$$i = \overline{1, K}$$

где  $K$ -объем алфавита ИДС, то количество информации, приходящееся на один знак  $a_i$ , равно:

$$I(a_i) = -\log_2 p_i \text{ (бит)}$$

Среднее количество информации в битах, приходящееся на один знак на выходе источника, называется энтропией источника и определяется следующим образом:

$$H(A) = -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i \text{ (бит)}$$

Известно, что максимальное значение энтропии  $H_{\max}$  соответствует случаю равной вероятности появления всех знаков, но в реальных условиях из-за неравновероятности появления знаков всегда выполняется соотношение  $H_{\max} > H_{\text{реал}}$ .

В теории информации вводится количественная мера избыточности источника, которая показывает, насколько эффективно используются знаки алфавита данного источника. Если избыточность источника  $D$  равна нулю, то это означает, что:

$$D = \frac{H_{\max} - H_{\text{реал}}}{H_{\max}} = 1 - \frac{H_{\text{реал}}}{H_{\max}}$$

формируемые им сообщения оптимальны с точки зрения количества переносимой ими информации.

Необходимое число знаков алфавита для передачи заданного количества информации  $I$  при отсутствии помех можно определить из соотношения.

Так как для реальных источников  $H_{\text{реал}} < H_{\max}$ , то требуемое число знаков алфавита  $K_2 > K_1$ , а поэтому избыточность сообщения характеризуется той же мерой избыточности  $D$ , что и источник.

Например, известно, что для текста на русском языке при условии равновероятного появления знаков (букв) энтропия составит  $H=5$  бит/букву.

$$K_1 = \frac{I}{H_{\max}}$$

Исследования показали, что учет всех возможных статистических связей (различная вероятность появления каждой из букв, различная вероятность появления сочетаний букв по две, по три и т.д., вплоть до связи между отдельными словами) снижают реальное значение энтропии до величины  $H_{\text{реал}}=1,5$  бит/знак. В этом случае избыточность составляет:

$$D = 1 - \frac{H_{\text{реал}}}{H_{\max}} = 1 - \frac{1,5}{5} = 0,7 \text{ бит/знак}$$

В ряде случаев сообщение формируется по заранее известным правилам. Так, текст, выполненный на русском языке, подчиняется правилам русской грамматики, а на английском – английской. Знание этих правил позволяет обнаруживать и исправлять ошибки в таких сообщениях, как "наличиее избытачнозди зпособсдваит павишениу помекоустойчевазти саабщений. В этом фрасе дапущино мнохо осипок".

Самостоятельно проанализировав текст, Вы можете обнаружить и исправить допущенные грамматические ошибки. Обнаружить ошибки при передаче цифр, используя те же правила, не удастся.

В технике связи весьма актуальной является задача согласования скорости передачи информации от источника сообщений с пропускной способностью канала связи. Скорость передачи информации определяется энтропией алфавита ИДС и количеством символов, вырабатываемых источником за единицу времени  $m$ :

$$C_{ист} = mH = \frac{H}{\tau}, (\text{бит} / \text{с})$$

где  $\tau$  - время передачи одного двоичного символа.

Пропускная способность канала характеризуется максимальной энтропией (при отсутствии помех):

$$C_{кан} = \frac{H_{\max}}{\tau}, (\text{бит} / \text{с})$$

В том случае, когда  $C_{ист} > C_{кан}$ , устранение избыточности может обеспечить возможность передачи информации по данному каналу без увеличения его полосы пропускания.

В соответствии с теоремой Шеннона для канала без помех можно увеличить скорость передачи информации посредством преобразования сообщений в статистически независимые и равновероятные символы. Такое преобразование осуществляется кодером источника за счет уменьшения числа символов, которые требуются для передачи одного знака алфавита.

Для этого необходимо наиболее вероятные сообщения передавать наименьшим числом кодовых символов и увеличивать длину кодовой комбинации соответственно с уменьшением вероятности появления кодируемого знака.

Итак, обязательным условием эффективного кодирования является использование неравномерных кодов.

Для неравномерных кодовых последовательностей вводят понятие среднего числа двоичных символов на один знак алфавита объемом  $K$ :

$$n_{ср} = \sum_{i=1}^K p_i n_i$$

где  $p_i$  - вероятность появления  $i$ -го знака алфавита,  $n_i$  - длина кодовой комбинации, соответствующая передаче  $i$ -го знака.

Максимальной эффективностью обладают те неравномерные коды, для которых выполняется равенство средней длины кодовой комбинации и энтропии, т.е.:

$$n_{ср} = H$$

Эффективность неравномерных кодов оценивается коэффициентом относительной эффективности который показывает степень использования статистической избыточности. Для оптимальных кодов  $K_{оэ}=1$ :

$$K_{оэ} = \frac{H}{n_{ср}}$$

Отношение среднего числа двоичных символов, приходящихся на один знак алфавита, при кодировании заданного источника неравномерным кодом к длине ко-

довой комбинации в случае кодирования источника равномерным кодом называется коэффициентом сжатия  $K_{сж}$ :

$$K_{сж} = \frac{n_{сред}}{n}$$

Для построения оптимального кода необходимо не только учитывать неравно вероятность появления знаков, но и статистические связи между знаками первичного алфавита более высоких порядков.

Например, для русского алфавита (с учетом пробела) неравно вероятность появления букв снижает энтропию до значения  $H_1=4,35$  бит/знак; дополнительный учет статистики двухбуквенных сочетаний доводит значение энтропии до  $H_2=3,52$  бит/знак, а трехбуквенных - до  $H_3=3,01$  бит/знак.

Рассмотрим принцип построения эффективного кода, предложенный Хаффманом. Пусть, например, известно, что передаваемый алфавит содержит пять знаков с вероятностями появления:

$$P(a)=0,22; P(б)=0,20; P(в)=0,26; P(г)=0,15; P(д)=0,17.$$

Построение кода Хаффмана начинается с упорядочивания указанных знаков по убыванию значений  $P_i$ , таблица 2.

Таблица 2 – Построение кода Хаффмана  
Номер вспомогательной операции

| Знаки | 1           | 2    | 3    | 4    | 5   |
|-------|-------------|------|------|------|-----|
|       | Вероятности |      |      |      |     |
| В     | 0,26        | 0,32 | 0,42 | 0,58 | 1,0 |
| А     | 0,22        | 0,26 | 0,32 | 0,42 |     |
| Б     | 0,20        | 0,22 | 0,26 |      |     |
| Д     | 0,17        | 0,20 |      |      |     |
| Г     | 0,15        |      |      |      |     |

Определяются два наименее вероятных знака алфавита, которые переходят в новый сжатый алфавит, как один знак с вероятностью появления равной сумме вероятностей появления этих двух знаков.

$$P(Д,Г)=P(Д)+P(Г) = 0,15 + 0,17 = 0,32$$

Вновь проводим систематизацию знаков алфавита по признаку убывания вероятностей. В данном случае первый вспомогательный знак попадает в начало списка. Повторяем процедуру объединения наименее вероятных знаков по новому сжатому алфавиту. Теперь объединению подлежат знаки А и Б. Определяем вероятность второго вспомогательного знака.

$$P(А,Б)=P(А)+P(Б)= 0,22 + 0,20 = 0,42$$



Вновь производим упорядочивание нового сжатого алфавита. Снова выбираем два знака с наименьшими вероятностями, объединяем их и определяем суммарную вероятность.

$$P(B, D, \Gamma) = 0,26 + 0,32 = 0,58$$

И опять повторяем процедуру упорядочивания полученного сжатого алфавита, определения наименее вероятных двух знаков, их объединения и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока мы не дойдем до единственного вспомогательного знака с вероятностью  $P_i = 1,0$ .

Для построения кодовой таблицы необходимо проследить путь перехода знака по строкам и столбцам таблицы. Наиболее удобный способ - это построение дерева кодовых слов (рисунок 1).

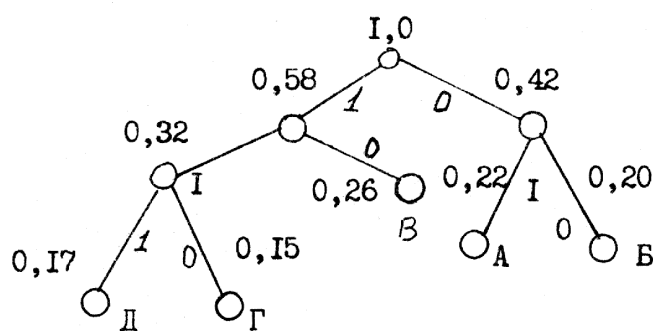


Рисунок 1 - Дерево кодовых слов

Из точки  $P_i = 1,0$  направляем две ветви, и той, у которой в соответствии с колонкой 5 таблицы 1 вероятность больше ( $P_i = 0,58$ ), присваиваем символ 1, другой - 0.

Рассматриваем ветвь с символом 0. В соответствии с колонкой 2 из этого узла так же могут быть направлены две ветви. Одной из них снова присваиваем символ 1, а другой - 0. В этой части ствола ветвление закончено.

Возвращаемся к первой ветви с символом 1 (для  $P_i = 0,58$ ) и строим из этого узла ветвление со значением  $P_i = 0,32$  ("1") и  $P_i = 0,26$  ("0"), и так далее. В результате получено кодовое дерево, двигаясь по ветвям которого легко можно записать кодовую комбинацию для каждого знака.

Составлять кодовую комбинацию начинают от исходной точки ( $P_i = 1$ ) к концу каждой ветви. Для рассматриваемого случая получим:

Б-00, А-01, В-10, Г-110, Д-111.

При таком построении выполняется обязательное требование однозначности декодирования, которое состоит в том, чтобы ни одна комбинация данного кода не совпадала с началом другой, более длинной комбинации. Коды, удовлетворяющие этому условию, называются префиксными кодами. При декодировании последовательности комбинаций префиксного кода определение кода каждого знака произво-

дится однозначно. В противном случае, т.е. для комбинаций не префиксного кода характерна неоднозначность декодирования.

Пусть, например, некоторый код удовлетворяет требованию префиксности, т.е. знакам алфавита соответствуют кодовые комбинации вида:

А-00 В-01 В-101 Г-100.

Составим произвольно комбинацию передаваемых знаков алфавита и соответствующую ей кодовую последовательность:

Б А Б В Г В Г Г А А Б  
01 00 01 101 100 101 01 100 00 00 01 (\*)

Эта последовательность декодируется однозначно:

01 00 01 101 100 101 01 100 00 00 01  
Б А Б В Г В Г Г А А Б

Рассмотрим другой случай, когда кодирование ансамбля знаков проведено по кодовой таблице вида:

А-00; В-01; В-001; Г-010.

Тогда последовательность кодовых комбинаций того же сообщения будет иметь вид:

01000100101000101010000001.

В этом случае возможны различные варианты декодирования:

01 00 01 001 01 00 01 01 010 00 00 01  
Б А Б В Б А Б Б Г А А Б

или

010 001 001 010 001 01 010 00 00 01  
Г В В Г В Б Г А А Б

или

01 00 01 001 010 001 01 010 00 00 01  
Б А Б В Г В Б Г А А Б

Возможны и другие варианты. Попробуйте самостоятельно декодировать приведенную последовательность.

Рассмотрим воздействие одиночной, ошибки в принятой кодовой последовательности символов, отмеченной (\*), удовлетворяющей условию префиксности, т.е. пусть принятая последовательность имеет вид:

0100011010001010110000001

В этом случае при декодировании получим:

01 00 01 101 00 01 01 01 100 00 00 01  
Б А Б В А Б Б Б Г А А Б

Итак, одна ошибка в кодовой комбинации, соответствующей знаку Г, привела к неправильному декодированию нескольких знаков. Такой характер ошибок называют треком ошибок.

Характерной особенностью систем, использующих методы эффективного кодирования, является обязательное наличие как в передающем, так и в приемном устройстве буферных запоминающих устройств. Эти устройства обеспечивают возможность передачи символов с постоянной скоростью в канал связи при условии их неравномерного поступления на выход кодера.

Описание лабораторной установки

Условная функциональная схема лабораторной установки приведена на рисунке 2

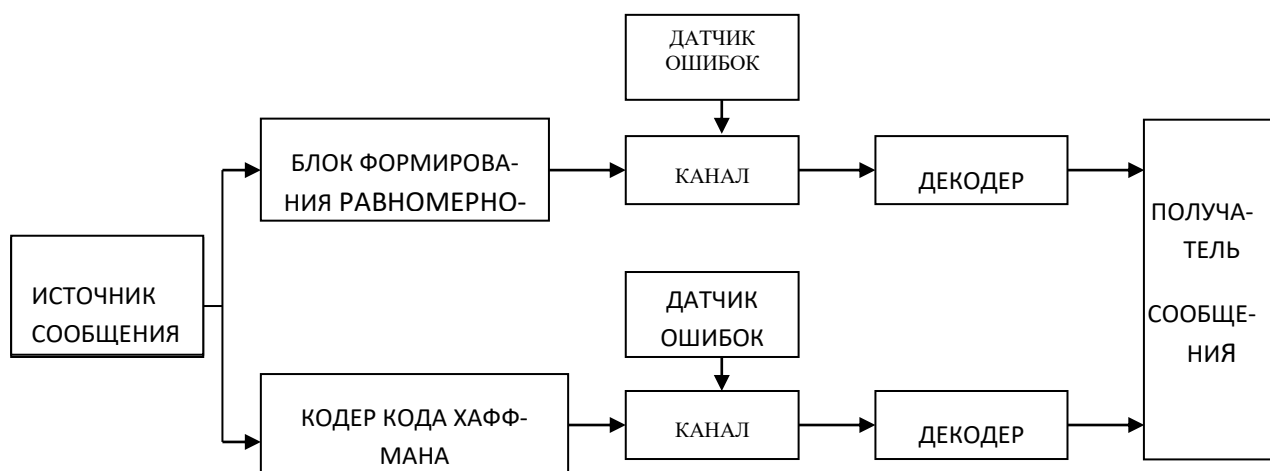


Рисунок 2 -Условная функциональная схема лабораторной установки

Источник сообщения (ИДС) формирует на выходе последовательность знаков из заданного алфавита.

Блок формирования равномерного кода позволяет присвоить каждому знаку алфавита ИДС комбинацию равномерного первичного кода.

Кодер Хаффмана осуществляет формирование кодовых комбинаций методом эффективного кодирования.

Декодеры осуществляют соответствующее декодирование принятых кодовых комбинаций.

Датчик ошибок осуществляет ввод ошибки в последовательность кодовых комбинаций при эффективном кодировании по методу Хаффмана и равномерном кодировании.

После запуска программы (файл LR 36.exe) введите на первой странице свои Ф.И.О. и номер группы. Затем перейдите на страницу 3. Статистика и кодирование - декодирование.

Внешний вид этой страницы показан на рисунке 3.

Источник  
☒ КОТ  
☐ ЕНОТ  
☐ КОШКА  
☐ МОЛОКО  
☐ МОЛОКЕ  
☐ МОЛОКОМ  
☐ МОЛОКОСОС  
☐ МОЛОКОСОСОМ  
☐ МОЛОКООТСОСОМ

Марков\_Игорь

длина сообщения L = 12      кол-во знаков N = 10

среднее число бит на один знак для кода

Хафмена = 3.333      равномерного = 4

коэф. стат. сжатия Kss = 1.200

Энтропия H = 3.252    Hmax = 3.322    избыточность D = 0.021

Коеф. относит. эффективности Koz = 0.975

Статистика для: " Марков\_Игорь"

| №  | знак | кол-во | вероятн. | равн. код | Хафмена |
|----|------|--------|----------|-----------|---------|
| 1  | о    | 2      | 0.167    | 0000      | 01      |
| 2  | р    | 2      | 0.167    | 0001      | 00      |
| 3  |      | 1      | 0.083    | 0010      | 1111    |
| 4  | И    | 1      | 0.083    | 0011      | 1110    |
| 5  | М    | 1      | 0.083    | 0100      | 1101    |
| 6  | а    | 1      | 0.083    | 0101      | 1100    |
| 7  | в    | 1      | 0.083    | 0110      | 1011    |
| 8  | г    | 1      | 0.083    | 0111      | 1010    |
| 9  | к    | 1      | 0.083    | 1000      | 1001    |
| 10 | ь    | 1      | 0.083    | 1001      | 1000    |
|    |      |        |          |           |         |
|    |      |        |          |           |         |

Кодирование - декодирование равномерным кодом      требуется: 48 бит

прд М а р к о в \_ И г о р ь  
010001010001100000000110001000110111000000011001  
\*  
Вкл 010001010001100000000110001000110111000000011001  
прм М а р к о в \_ И г о р ь

Кодирование - декодирование неравномерным кодом      требуется: 40 бит

прд М а р к о в \_ И г о р ь  
110111000010010110111111110101001001000  
\*  
Вкл 110111000010010110111111110101001001000  
прм М а р к о в \_ И г о р ь

**ПЕЧАТЬ**    Л/Р № 36    16.04.01    15:17:43    Марков Игорь Александрович    028109

Рисунок 3 - Статистика и кодирование - декодирование

Ввод сообщения производится в строке. После ввода сообщения справа в таблице выводится статистика данного сообщения и кодовые комбинации для равномерного кода и кода Хаффмана. Эта таблица имеет следующую структуру:

- 1 столбец – порядковый номер знака алфавита;
- 2 столбец – знак алфавита;
- 3 столбец – количество данных знаков в сформированном сообщении;
- 4 столбец – вероятность появления данного знака в сообщении;
- 5 столбец – кодовая комбинация для данного знака при равномерном кодировании;
- 6 столбец – кодовая комбинация для данного знака при кодировании кодом Хаффмана.

В окне 3 данного экрана показан результат кодирования - декодирования равномерным кодом. Окно имеет следующую структуру:

- 1 строка – передаваемое сообщение (вход кодера);
- 2 строка – последовательность двоичных символов на выходе кодера;
- 3 строка – позиция искажаемого бита (обозначается \*);
- 4 строка – последовательность двоичных символов на выходе канала (вход декодера);
- 5 строка – принятое сообщение (выход декодера).

В окне 4 данного экрана показан результат кодирования - декодирования кодом Хаффмана. Окно имеет структуру аналогичную окну 3.

Слева от окон 3 и 4 расположены органы управления датчиками ошибок:  
Вкл/Откл – кнопка включения/отключения датчика ошибки.

← → - изменение положение искажённого бита.

Если датчик ошибки включен, то позиция, на которой находится искаженный бит, помечается звездочкою \*, а если датчик ошибки отключен, то вместо звёздочки появляется точка.

### Задание

1. Сформируйте передаваемое сообщение. Сообщение должно отвечать следующим требованиям:
  - включать Вашу фамилию;
  - содержать не более 12 различных символов (объем алфавита  $N \leq 12$ );
  - иметь длину от 8 до 15 символов;
  - коэффициент сжатия сформированного сообщения при кодировании полученного алфавита кодом Хаффмана должен получиться не менее 1,2.

Выведите на печать содержимое экрана (закладка 3) со статистикой сообщения и процессами кодирования равномерным кодом и кодом Хаффмана и декодирования на приеме в случае отсутствия ошибок, вызванных помехами в канале.

Выведите на печать содержимое экрана (закладка 4), иллюстрирующего процесс декодирования при наличии ошибок, вводимых в различные символы, передаваемой двоичной последовательности при использовании равномерного кода и кода Хаффмана.

Постройте дерево кодовых слов для обоих случаев кодирования алфавита.

### Контрольные вопросы

1. Принцип формирования кодовых комбинаций при кодировании методом Хаффмана.
2. Метод определения средней длины кодовой комбинации на знак алфавита и ее оптимальное значение.
3. Сущность требования префиксности эффективных кодов.
4. Принцип согласования источника сообщения с пропускной способностью канала связи.
5. Количественная оценка эффективности неравномерного кодирования.
6. Механизм возникновения трека ошибок при декодировании последовательности кодовых комбинаций.
7. Принцип декодирования последовательности префиксного кода.
8. Особенности декодирования последовательности для непrefixного кода.

### Содержание отчета

1. Результаты выполнения домашнего задания.
2. Распечатки результатов выполнения работы.

3. Расчетные формулы с записью исходных значений для определения величин  $N_{\max}$ ,  $N_{\text{реал}}$ ,  $n_{\text{сред}}$ ,  $K_{\text{оэ}}$  и  $K_{\text{сж}}$  для сообщения, сформированного в результате эксперимента.
4. Дерево кодовых слов для равномерного кода и кода Хаффмана, полученных в результате эксперимента.
5. Выводы.

## Лабораторная работа №2

### Исследование свойств циклического кода

#### Цель работы

1. Изучить основные принципы помехоустойчивого кодирования.
2. Изучить правила построения циклических кодов.
3. Исследовать обнаруживающие и исправляющие свойства циклических кодов.
4. Познакомиться с принципом построения кодирующих и декодирующих устройств циклических кодов.

#### Краткие сведения из теории линейных циклических кодов

Линейные коды являются кодами блочными, регулярными. Для регулярных кодов задаются правила преобразования информационного слова длины  $k$  в кодовую последовательность длины  $n$  ( $n > k$ ), а также правила декодирования. Наибольшее распространение получили линейные разделимые коды. Разделимым кодом называется код, в кодовых словах которого можно указать места информационных и проверочных символов [3, 4].

Линейным кодом называют блочный  $(n, k)$  код, символы кодовых слов которого являются линейными комбинациями информационных символов.

Если  $M=(m_{k-1}, m_{k-2}, \dots, m_0)$  обозначает последовательность  $k$  двоичных информационных символов, то правило образования кодового слова  $V$  разделимого линейного кода с длиной блока  $n > k$  из последовательности  $M$  можно записать системой линейных уравнений:

$$\begin{aligned} v_i &= m_i & 0 \leq i \leq k-1 \\ v_i &= \sum_{l=0}^{k-1} m_l * d_{l,i} & k \leq i \leq n-1 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sum$  - знак суммирования по модулю 2, коэффициенты  $d_{l,i}$  являются символами двоичного алфавита, они могут быть выбраны произвольно, но должны быть фиксированными для данного кода.

Приведем ряд свойств линейных кодов.

1. Сумма по модулю 2 двух кодовых слов также является кодовым словом (свойство замкнутости по отношению к операции сложения).

2. Кодовое расстояние  $d$ , определяемое как наименьшее расстояние Хемминга между всеми возможными парами кодовых слов, в линейном коде равно минимальному весу ненулевого кодового слова. (Весом кодового слова называется число содержащихся в нем единиц).

Расстояние Хемминга между двумя кодовыми словами равно числу единиц в сумме этих слов по модулю 2, т.е. количеству разрядов, в которых различаются эти два кодовых слова. Например:

первое кодовое слово: 1000110,  
 второе кодовое слово: 0100010,  
 сумма по модулю два: 1100100  $\rightarrow$  расстояние Хемминга равно 3.

Кодовое расстояние  $d$ , связано с кратностью  $t$  гарантированно исправляемых кодом ошибок соотношением,  $d \geq 2t + 1$  и с кратностью  $\sigma$  гарантированно обнаруживаемых кодом ошибок соотношением  $d \geq \sigma + 1$ .

Циклические коды относятся к классу линейных кодов и обладают всеми их свойствами. Дополнительным условием по отношению к циклическому линейному коду является условие замкнутости по отношению к операции циклического сдвига кодовых слов.

Циклическим кодом называется такой линейный код, у которого при любом циклическом сдвиге какого-либо кодового слова получается другое кодовое слово.

Циклическим сдвигом называется операция, превращающая вектор  $V_1 = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$  в вектор  $V_2 = (v_n, v_1, v_2, \dots, v_{n-1})$  – сдвиг вправо, или в вектор  $V_3 = (v_2, v_3, \dots, v_n, v_1)$  – сдвиг влево.

Например, дан вектор 0001011. При циклическом сдвиге вправо получится вектор 1000101.

Для описания циклических кодов используют математический аппарат, основанный на сопоставлении множества кодовых слов с множеством степенных полиномов. Этот аппарат позволяет выявить для циклического кода более простые операции кодирования и декодирования.

Установим формальное соответствие между кодовыми словами и степенными полиномами. Кодовому слову:

$$V = (v_{n-1}, v_{n-2}, v_{n-3}, \dots, v_1, v_0)$$

где  $v_{n-1}, v_{n-2}, v_{n-3}, \dots, v_1, v_0$  двоичные числа, можно поставить в соответствие полином  $(n-1)$ -й степени:

$$V(x) = v_{n-1}x^{n-1} + v_{n-2}x^{n-2} + \dots + v_1x + v_0.$$

Такая запись соответствует записи числа в виде многочлена в двоичной системе счисления, где  $x$  – основание системы счисления.

Например, кодовому слову 0001011 соответствует полином  $x^3 + x + 1$ , кодовому слову 0100110 – полином  $x^5 + x^2 + x$ .

Операцию сложения кодовых слов можно заменить сложением соответствующих полиномов. Например, сложив по модулю 2 полиномы из вышеприведенного примера, получим:

$$(x^3 + x + 1) \oplus (x^5 + x^2 + x) = (x^5 + x^3 + x^2 + 1).$$

Этому полиному соответствует слово 0101101, т.е. результат поразрядного сложения по модулю 2 слов 0001011 и 0100110.

Умножение полинома  $v(x)$  на  $x$  по модулю  $(x^n \oplus 1)$  соответствует циклическому сдвигу кодового слова влево на один разряд.

Числом  $A$  по модулю  $B$  называется остаток от деления  $A$  на  $B$  и обозначается  $A \bmod B$ .

В вашем случае все полиномы степени выше  $(n-1)$  заменяются остатком от их деления на полином  $x^n \oplus 1$ .

Среди всех полиномов, соответствующих кодовым словам циклического кода, имеется ненулевой полином  $g(x)$  наименьшей степени. Этот полином полностью определяет соответствующий код и поэтому называется образующим.

Степень образующего полинома  $g(x)$  равна  $n-k$ , свободный член всегда равен единице.

Образующий полином является делителем всех полиномов, соответствующих кодовым словам циклического кода.

Нулевая комбинация обязательно принадлежит любому линейному циклическому коду и может быть записана как  $(x^n \oplus 1) \bmod (x^n \oplus 1) = 0$ . Следовательно, образующий полином  $g(x)$  должен быть делителем бинома  $x^n \oplus 1$ .

Это даёт конструктивные возможности построения циклического кода заданной длины  $n$ : любой полином, являющийся делителем бинома  $x^n \oplus 1$ , можно использовать в качестве образующего.

При построении циклических кодов, пользуются таблицами разложения биномов  $x^n \oplus 1$  на неприводимые полиномы, т.е. полиномы, которые нельзя представить в виде произведения двух других полиномов.

Любой неприводимый полином, входящий в разложение бинома  $x^n \oplus 1$ , а также любое произведение неприводимых полиномов может быть выбрано в качестве образующего полинома, что даст соответствующий циклический код.

Для построения разделимого циклического кода используется следующее правило построения кодовых слов:

$$V(x) = m(x) * x^{n-k} \oplus r(x),$$

где  $r(x)$  - остаток от деления  $m(x) * x^{n-k}$  на  $g(x)$ .

Степень  $r(x)$ , очевидно, меньше  $(n-k)$ , а потому в кодовом слове первые  $k$  символов будут совпадать с информационными, а последние  $n - k$  символов будут проверочными.

Получить все разрешённые комбинации циклического кода можно по одной известной кодовой комбинации (не нулевой). Для этого сначала надо циклически сдвинуть известную комбинацию  $k-1$  раз. В результате получится  $n$  комбинаций. Затем сложить попарно по модулю 2 получившиеся комбинации в различных сочетаниях (по две, по три и т.д.). Нулевую комбинацию (все нули) можно получить, сложив по модулю 2 любую комбинацию саму с собой. Всего получится  $2^k$  кодовых слов.

В основу процедуры декодирования циклических кодов может быть положено свойство их делимости без остатка на образующий полином  $g(x)$ .



В режиме обнаружения ошибок, если принятая последовательность делится без остатка на  $g(x)$ , делается вывод, что ошибки нет или она не обнаруживается. В противном случае комбинация бракуется.

Слова любого линейного кода обладают свойством замкнутости по отношению к операции сложения, т.е. сумма двух и более кодовых слов тоже является кодовым словом.

Из этого свойства, видно, что векторы ошибок, совпадающие с кодовыми словами, не могут быть обнаружены декодером циклического кода.

Вектором ошибок называется двоичная последовательность длины  $n$ , в которой единицы стоят на позициях ошибочных символов. Отсюда вероятность не обнаружения ошибки заданным кодом равна вероятности появления в заданном дискретном канале векторов ошибок, совпадающих с кодовыми словами.

Относительно просто эти вероятности могут быть рассчитаны для двоичного симметричного канала (ДСК) без памяти.

В таком канале каждый двоичный символ с некоторой фиксированной вероятностью  $(1 - p_0)$  принимается правильно и с вероятностью  $p_0$  изменяется помехой на обратный. Передача - приём каждого символа полагается событием независимым (канал без памяти).

Если по такому каналу передается кодовое слово длины  $n$ , то вероятность  $P_n(0)$  того, что не произойдет ни одной ошибки, равна  $(1 - p_0)^n$ .

Вероятность  $P_n(1)$  того, что будет одна ошибка в заданном символе, равна  $p_0 \cdot (1 - p_0)^{n-1}$ .

Вероятность того, что слово на выходе канала будет отличаться от переданного слова в заданных  $t$  разрядах, т.е. вектор, ошибок содержит  $t$  единиц, равна  $P^* = p_0^t (1 - p_0)^{n-t}$ .

Вероятность того, что слово на выходе канала будет отличаться от переданного слова в любых  $t$  разрядах, равна:

$$P_n(t) = C_n p_0^t (1 - p_0)^{n-t}, \quad 2$$

где  $C_n$  – число сочетаний из  $n$  по  $t$ .

Число единиц в векторе ошибок часто называют его весом.

Положим некоторый линейный код (5,3) содержит одно нулевое слово (как всякий линейный код), два слова веса 2, четыре слова веса 3, одно слово веса 4 (всего  $2^k = 2^3 = 8$  слов).

Вероятность не обнаруживаемой ошибки этим кодом равна вероятности появления в ДСК векторов ошибок, совпадающих с кодовыми словами, т.е.:

$$P_{н.о} = 2P_5(2) + 4P_5(3) + P_5(4) = 2p_0^2(1 - p_0)^3 + 4p_0^3(1 - p_0)^2 + p_0^4(1 - p_0).$$

В режиме исправления ошибок декодер вычисляет остаток  $S(x)$  от деления принятой последовательности  $P(x)$  на  $g(x)$ . Этот остаток называют синдромом. Принятый полином  $P(x)$  представляет собой сумму по модулю два переданного слова  $V(x)$  и вектора ошибок  $E(x)$ :

$$P(x) = V(x) \oplus E(x)$$

Тогда синдром  $S(x) = P(x) \bmod g(x)$ , так как по определению циклического кода  $V(x) \bmod g(x) = 0$ .

Определенному синдрому  $S(x)$  может быть поставлен в соответствие определенный вектор ошибок  $E(x)$ . Тогда переданное слово  $V(x)$  находят, складывая  $P(x) \oplus E(x)$ .

Однако один и тот же синдром может соответствовать  $2^k$  различным векторам ошибок. Положим, синдром  $S(x)$  соответствует вектору ошибок  $E_1(x)$ . Но и все векторы ошибок, равные сумме  $E_1(x) \oplus V(x)$ , где  $V(x)$  любое кодовое слово, будут давать тот же синдром. Поэтому, поставив в соответствие синдрому  $S_1(x)$  вектор ошибок  $E_1(x)$ , мы будем осуществлять правильное декодирование в случае, когда действительно вектор ошибок равен  $E_1(x)$ , во всех остальных  $2^k - 1$  случаях декодирование будет ошибочным.

Для уменьшения вероятности ошибочного декодирования из всех возможных векторов ошибок, дающих один и тот же синдром, следует выбирать в качестве исправляемого наиболее вероятный в заданном канале.

Например, в ДСК, в котором вероятность  $p_0$  ошибочного приёма двоичного символа много меньше вероятности  $(1 - p_0)$  правильного приема, вероятность появления векторов ошибок уменьшается с увеличением их веса  $t$ . В этом случае следует исправлять в первую очередь вектор ошибок меньшего веса.

Если кодом могут быть исправлены только все векторы ошибок веса  $t$  и меньше, то любой вектор ошибки веса от  $t + 1$  до  $n$ , будет приводить к ошибочному декодированию.

Вероятность ошибочного декодирования будет равна вероятности  $P_n(>t)$  появления векторов ошибок веса  $t + 1$  и больше в заданном канале. Для ДСК эта вероятность будет равна

$$P_n(>t) = \sum_{i=t+1}^n C_n p (1-p)^{n-i}. \quad 2$$

Общее число различных векторов ошибок, которые может исправлять циклический код, равно числу ненулевых синдромов —  $2^{n-k} - 1$ .

### Индивидуальное задание

В лабораторной работе изучаются свойства циклических кодов на примере разделимого линейного циклического кода (7,4) с образующим полиномом  $g(x) = X^3 + X + 1$ . Кодовое расстояние этого кода  $d = 3$ .

Код может быть использован в режиме исправления ошибок или в режиме обнаружения ошибок.

1. Найдите все кодовые слова заданного кода.
2. Определите характеристики заданного кода в режиме исправления ошибок.
3. Определите кратность  $t$  гарантированно исправляемых кодом ошибок.
4. Найдите число различных векторов ошибок, которые код может исправить.
5. При условии, что кодом в первую очередь исправляются ошибки наименьшей кратности, приведите вектора ошибок, которые могут быть исправлены задан-

НЫМ КОДОМ.

6. Для одного из векторов ошибок, исправляемых кодом, найдите соответствующий этому вектору синдром. Найдите несколько из возможных векторов ошибок, при декодировании которых получается тот же синдром, и, следовательно, происходит ошибочное декодирование.

7. При условии, что кодом в первую очередь исправляются ошибки наименьшей кратности, рассчитайте для заданного кода вероятность РОШ ошибочного декодирования, если канал является дискретным симметричным каналом без памяти (ДСК) с вероятностью ошибки в двоичном символе  $p_0$ .

Численное значение  $p_0$  возьмите из программы лабораторной работы в разделе «Индивидуальное задание».

Определите возможности заданного кода в режиме обнаружения ошибок:

1. Определите кратность  $\sigma$  гарантированно обнаруживаемых кодом ошибок.

2. Найдите вектора ошибок, которые не могут быть обнаружены заданным кодом.

3. Рассчитайте вероятность  $P_{н.о.}$  не обнаружения ошибок заданным кодом в ДСК с вероятностью ошибки в символе  $p_0$ .

### Описание программы

Программа содержит несколько страниц:

- «Начало» – содержит общие сведения: название работы и т.п.

Содержит кнопки:

- «О программе» - можно посмотреть номер версии программы, адрес сайта МТУ-СИ и кафедры;

- «Переписать» - активизирует диалоговое окно, используемое для перезаписи программы, образца отчёта и т.п. на гибкий диск;

- «Выход» - используется для выхода из программы;

- «Установки» - содержит различные установки и панель формирования индивидуального задания.

\*!!!\* На распечатках, помещаемых в отчёт должны быть Фамилия И.О. и номер группы исполнителя. Для этого необходимо в начале выполнения работы ввести их в требуемые строки на панели «Формирование индивидуального задания».

«Читайте» - содержит разделы: цель работы, задание, содержание отчёта и контрольные вопросы. Раздел «задание» содержит лабораторное задание и методику выполнения каждого пункта.

«Схема» - содержит схему, иллюстрирующую процесс кодирования и декодирования. На этой странице имеется возможность вводить различные кодовые комбинации, вектора ошибок и наблюдать процесс кодирования и декодирования. Также эта страница содержит таблицу соответствия векторов ошибок и соответствующим им синдромам.

«Таблица» – содержит таблицу разрешённых кодовых комбинаций используемого кода, таблицу расстояний Хемминга для всех пар кодовых комбинаций и таблицу весов кодовых комбинаций.

Имеется возможность изменять образующий полином, используемый для ко-

дирования. Обратите внимание, что только полиномы 1011 и 1101 обеспечивают коду (7,4) требуемые помехоустойчивые свойства ( $d_{\min}=3$ ).

Выполнять работу рекомендуется при полиноме 1011 (установлен по умолчанию). Это связано с тем, что тестовые вопросы для защиты этой лабораторной работы составлены для полинома 1011.

«Формулы» – содержит некоторые формулы, используемые в лабораторий работе.

«Статистика» – демонстрирует использование различных способов помехоустойчивого кодирования для обнаружения и исправления ошибок.

Для распечатки требуемой страницы необходимо нажать клавишу «Печать» расположенную в левом нижнем углу.

Если распечатка не произойдёт (замечен такой дефект на некоторых типах принтеров), то можно распечатать файл PRINT\_13\_XX.BMP, который создаётся при каждом нажатии на кнопку «Печать».

Распечатку этого файла можно произвести, например, при помощи редактора Word.

### Описание функциональной схемы

Информационное слово длиной четыре разряда ( $k=4$ ) задается нажатием кнопок на панели «Источник». На рисунке 1 представлена функциональная схема лабораторной установки.

Кодер формирует кодовую комбинацию делимого циклического кода (7,4) путём добавления к четырём информационным разрядам трёх проверочных разрядов. Проверочные разряды образуются в результате умножения на  $X^3$ , и деления получившейся комбинации на образующий полином 1011 ( $g(x)=X^3+X+1$ ).

Остаток от деления будет представлять проверочные разряды, которые приписываются справа от информационных.

Кодер выдает кодовое слово  $V$  длиной  $n = 7$ , соответствующее информационному слову  $M$  длиной  $k = 4$ , поданному на вход кодера.

Семиразрядная кодовая комбинация (вектор  $V$ ) с выхода кодера подаётся на вход канала. В канале передаваемая кодовая комбинация складывается с семиразрядным вектором ошибки  $E$ . Сложение производится поразрядно по модулю 2 ( $0 \oplus 0 = 0, 0 \oplus 1 = 1, 1 \oplus 0 = 1, 1 \oplus 1 = 0$ ).

Например, если комбинация на входе канала равна 1011000  
а вектор ошибки равен 0010001  
то комбинация на выходе канала будет равна 1001001

Таким образом, единица в  $i$ -том разряде в векторе ошибки приводит к ошибке (инверсии)  $i$ -того разряда в кодовой комбинации на выходе канала.

Вектор ошибки задаётся на панели «Источник ошибок». Там же имеются кнопки для циклического сдвига вектора ошибки и для его инверсии.

С выхода канала принятая кодовая комбинация подаются на входы декодеров.

Декодер 1 работает в режиме исправления ошибок. Если ошибок нет или вектор ошибок принадлежит к векторам ошибок, исправляемых кодом, то сигнал на выходе декодера 1, совпадает с сигналом на входе кодера (выходе источника).

Если сигнал на выходе декодера 1 не совпадает с входным сигналом, поступающим на вход кодера, значит, произошло ошибочное декодирование.

Это соответствует появлению вектора ошибок, который код, используемый в системе, исправить не может. Код (7,4) исправляет все одиночные ошибки.

Исправление одиночной ошибки производится следующим образом:

- принятая 7-ми разрядная комбинация делится на образующий полином;
- если остаток от деления (синдром ошибки) не равен нулю, то по таблице соответствия «вектор ошибки – синдром» определяется вектор ошибки, которому соответствует данный синдром;
- принятая 7-ми разрядная комбинация складывается по модулю 2 с найденным вектором ошибки.

Декодер 2 работает в режиме обнаружения ошибок.

Если декодером 2 обнаружена ошибка, то декодер формирует сигнал «обнаружена ошибка» кодовая комбинация при этом не выдаётся (высвечивается). Если вектор ошибок принадлежит к не обнаруживаемым заданным кодом векторам ошибок, сигнал на выходе декодера 2 будет отличным от сигнала, поданного на вход кодера.

Декодер 2 не может обнаружить вектора ошибок, которые совпадают с разрешенными кодовыми комбинациями. Это следует из свойства линейного кода: «сумма двух кодовых слов является тоже кодовым словом».

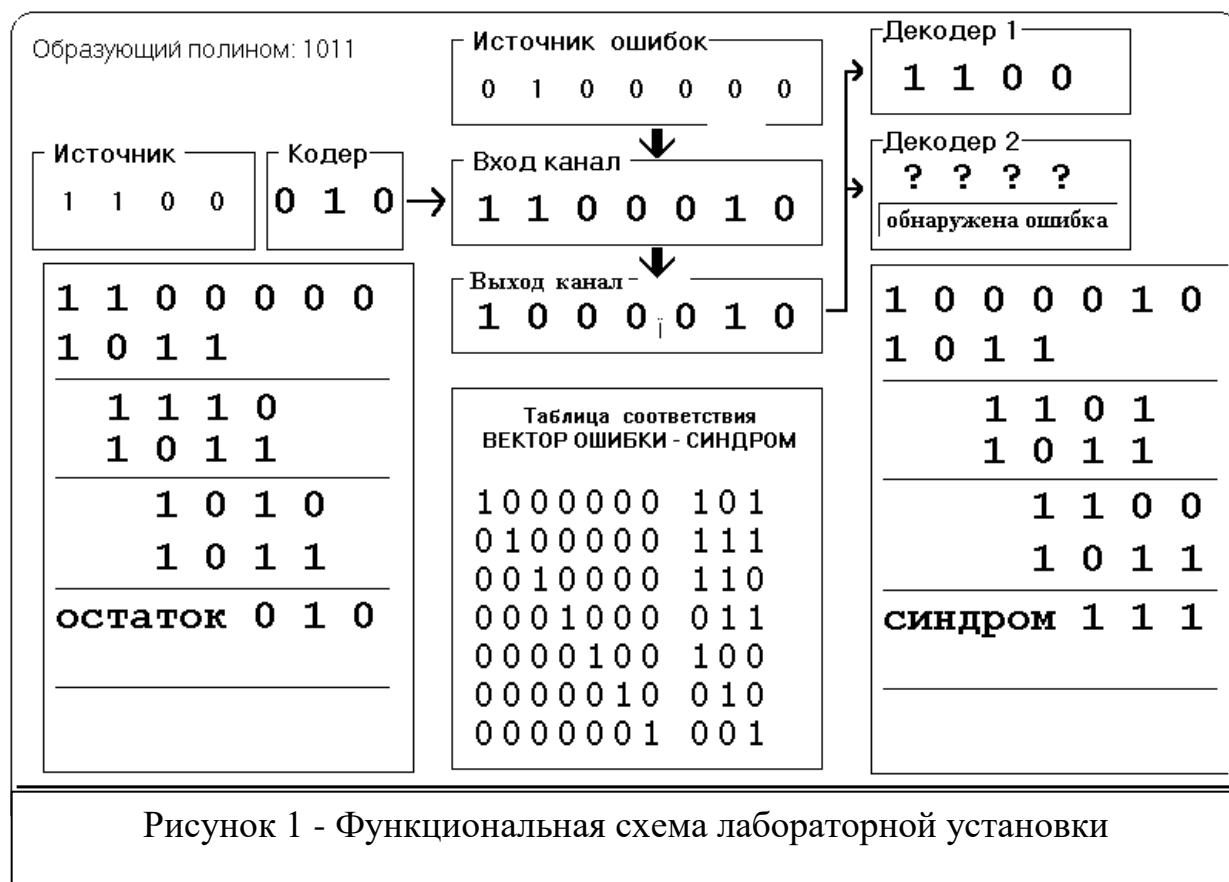
### Лабораторное задание

1. Проверьте работу кодера.
2. Проверьте правильность декодирования при отсутствии ошибок.
3. Исследуйте способность кода исправлять ошибки.
4. Проверьте факт ошибочного декодирования в режиме исправления ошибок.
5. Исследуйте способность кода обнаруживать ошибки.
6. Проверьте факт не обнаружения ошибок кодом.
7. Распечатайте таблицу с разрешенными кодовыми комбинациями и таблицу с расстояниями Хемминга для разрешенных комбинаций.

Проверка работы кодера:

- задайте в «источнике» различные информационные последовательности;
- наблюдайте последовательности, полученные на выходе кодера;
- сравните полученные кодовые слова с результатом индивидуального задания;
- проверка правильности декодирования при отсутствии ошибок;
- становите в «датчике ошибок» все разряды в ноль, т.е. нет ошибок;
- задайте в источнике различные информационные последовательности;
- наблюдайте последовательности, полученные на выходе декодеров (Декодер 1, Декодер 2);
- убедитесь, что при отсутствии ошибок, последовательности на выходах декодеров

совпадают с последовательностью на входе кодера.



При выполнении этого пункта обратите внимание, что при отсутствии ошибок синдром равен нулю.

По результатам этого пункта сделайте распечатку (Распечатка №1).

Методика исследования способности кода исправлять ошибки:

- задайте в «источнике ошибок» однократную ошибку (например 1000000);
- убедитесь, что на выходе «Декодера 1» будет та же последовательность, что и в «Источнике»;
- сместите циклически 6 раз вектор ошибки и убедитесь, что при любой однократной ошибке «Декодер 1» правильно её исправит;

При выполнении этого пункта обратите внимание, что синдром ошибки зависит от вектора ошибки и не зависит от передаваемой комбинации.

По результатам этого пункта сделайте распечатку (Распечатка №2).

Методика проверки ошибочного декодирования в режиме исправления ошибок:

- задайте в «Источнике ошибок» несколько векторов ошибок с кратностью от 2 до 7. Убедитесь, что при таких ошибках последовательность на выходе «Декодера 1» не будет совпадать с последовательностью, которую Вы задали в «Источнике».

По результатам этого пункта сделайте распечатку (Распечатка №3).

Методика исследования способности кода обнаруживать ошибки:

- задайте в «Источнике ошибок» различные ошибки кратностью от 1 до 7.

Убедитесь, что подавляющее большинство векторов ошибок будет обнаружено (на панели «Декодер 2» будет гореть индикатор «Обнаружена ошибка»).

По результатам этого пункта сделайте распечатку (Распечатка №4).

Методика проверки факта не обнаружения ошибки кодом:

- задайте в «Источнике ошибок» различные ошибки кратностью от 3 до 7.

Убедитесь, что имеются вектора ошибок, которые кодом не обнаруживаются (при наличии ошибки на панели «Декодер 2» не будет гореть индикатор «Обнаружена ошибка»). По результатам этого пункта сделайте распечатку (Распечатка №5).

Распечатка таблицы с разрешенными кодовыми комбинациями.

Перейдите на закладку «таблицы» и нажмите клавишу «Печать»

### Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- страница 1. Титульный лист;
- страница 2. Цель работы и функциональную схему лабораторного макета;  
!!! Функциональную схему нарисуйте используя карандаш и линейку.
- страница 3. Индивидуальное задание;
- страница 4. Распечатку №1, показывающую работу кодера и правильности декодирования при отсутствии ошибок. Распечатку №2, показывающую способности кода исправлять однократную ошибку;
- страница 5. Распечатку №3, показывающую факт ошибочного декодирования в режиме исправления ошибок. Распечатку №4, показывающую способности кода обнаруживать ошибки;
- страница 6. Распечатку №5, показывающую факт не обнаружения ошибки кодом. Распечатку №6, показывающую разрешенные кодовые комбинации и расстояния Хемминга;
- страница 7. Краткий ответ на 5 контрольных вопросов (номера вопросов выберите самостоятельно) и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Поясните понятия: блочные, непрерывные, делимые, неразделимые, итеративные, линейные, циклические коды?
2. Что такое расстояние Хемминга и кодовое расстояние?
3. Определение и основные свойства циклического кода.
4. Какое правило кодирования циклическим кодом принято в лабораторной работе?
5. Какое правило декодирования принято в декодере в режиме исправления ошибок?
6. Какое правило декодирования принято в декодере в режима обнаружения

ошибок?

7. Как связаны кратности гарантированно исправляемых кодом ошибок  $t$  и гарантированно обнаруживаемых кодом ошибок  $\sigma$  с кодовым расстоянием  $d$ ?

8. Какие векторы ошибок не могут быть обнаружены линейным циклическим кодом?

9. Сколько различных векторов ошибок может быть исправлено, не исправлено, обнаружено, не обнаружено кодом (7,4)?

10. Как рассчитать вероятность не обнаружения ошибки при заданном канале?

11. Как рассчитать вероятность ошибочного декодирования при заданном канале?

12. Как по одной известной разрешённой комбинации циклического кода определить все остальные кодовые комбинации этого кода?

13. Известна комбинация на входе кодера  $v_1$  и выходе декодера  $v_2$ .

Как определить вектор ошибки  $E$ ? ( $v_1 \neq v_2$ )

14. Дана длина кодовой комбинации  $n$ , вероятность ошибки в канале РОШ.

Как определить вероятность появления в кодовой комбинации ошибки кратностью  $t$ ?

15. Как производится кодирование - декодирование при использовании кода с проверкой на чётность (на нечётность)?

### Лабораторная работа № 3

#### Исследование методов регистрации двоичных сигналов

##### Цель работы

1. Изучение методов регистрации двоичных сигналов.
2. Изучение принципов работы устройств регистрации.
3. Экспериментальное определение зависимости вероятности ошибки от характеристик устройств регистрации при действии краевых искажений и дроблений.

##### Индивидуальное задание

Изучите теорию вопроса, программу лабораторной работы, методику проведения эксперимента.

Постройте реализацию сигнала, состоящую из 7 единичных элементов сигнала на входе дискретного канала на его выходе и в контрольных точках приёмников.

Вариант задания формируется на основе Ваших Ф.И.О, номера группы на странице «Установки».

Дробление в 6 ЕЭ (Единичном Элементе) расположите так, чтобы оно вызвало ошибку у стробирующего приёмника.



## Краткие сведения по методам регистрации

Передача дискретных сообщений от передатчика к приёмнику осуществляется по дискретным каналам (ДК), которые нормируются либо номинальной скоростью передачи  $V_{\text{ном}} = 1/T_0$  и искажениями двоичных сигналов либо скоростью передачи  $V_{\text{ном}}$  и вероятностью ошибки по битам  $P_{\text{ош}}$  ( $T_0$  – длительность единичного элемента)[5].

Каналы первого типа называют дискретными каналами непрерывного времени (ДКНВ), второго – дискретными каналами дискретного времени (ДКДВ) или цифровыми каналами. Структурная схема передачи - приёма показана на рисунке 1.

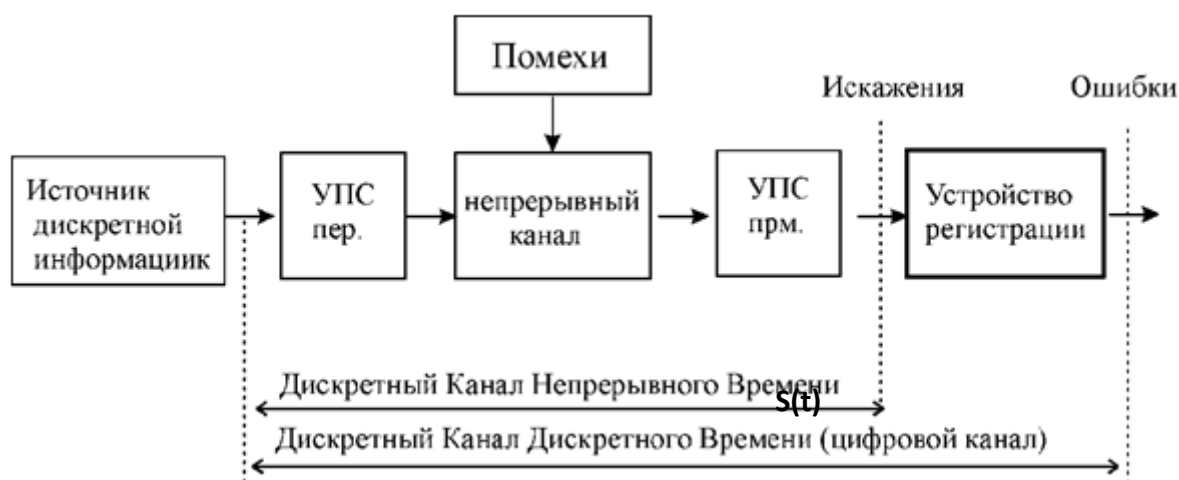


Рисунок 1 – структурная схема передачи - приема

Дискретный сигнал поступает на вход дискретного канала. Моменты времени, в которых происходит смена сигнала (переход от нуля к единице или наоборот) называются значащими моментами (ЗМ).

Под действием помех и других факторов на выходе канала имеется дискретный сигнал  $S(t)$  непрерывного времени, который может иметь краевые искажения и дробления.

Краевым искажением называется смещение ЗМ от его идеального положения. Дроблением называется искажение, состоящее в появлении элементов обратной полярности во время передачи одного или нескольких подряд идущих единичных элементов одного знака.

Смещение ЗМ относительно идеального значения вправо принято считать положительным, а в лево – отрицательным.

Сигнал  $S(t)$  поступает на вход устройства регистрации, которое на основе принятого искажённого сигнала принимает решение о знаке передаваемого сигнала (0 или 1).

Для решения поставленной задачи используются различные методы регистрации двоичных сигналов, основными показателями которых являются исправляющая способность по краевым искажениям и дроблениям.

Исправляющая способность характеризует свойство устройства правильно регистрировать единичные элементы двоичных сигналов при наличии искажений.

Численно исправляющая способность равна максимальной величине искажений, не способных привести к ошибочной регистрации знака единичного элемента.

Различают исправляющую способность по краевым искажениям и дроблениям.

Устройство регистрации сигналов, обеспечивающее минимальную вероятность неправильного приёма называют оптимальным.

Реализация оптимального устройства регистрации вызывает определённые трудности, и поэтому на практике применяют упрощённые методы регистрации, которые хотя и проигрывают в помехоустойчивости оптимальному методу, однако проще в реализации. К числу наиболее распространённых методов регистрации относятся метод стробирования и метод интегрирования.

### Метод стробирования

Метод регистрации единичного элемента по значению его средней части нашёл широкое применение благодаря простоте реализации, а также большой эффективности при действии краевых искажений.

Структурная схема стробирующего устройства, показана на рисунке 2.

Устройство состоит из D-триггера, на D вход (информационный вход) которого поступает принимаемый сигнал, а на C вход (тактовый вход) регистрирующие импульсы (стробы) от устройства синхронизации, которые своим передним фронтом (переход от 0->1) устанавливают триггер в состояние, действующее к этому моменту на входе D.

На выходе триггера Q формируются единичные элементы, длительность которых определяется частотой следования регистрирующих импульсов и составляет  $T_0$ .

Другими словами, на выходе регистрирующего устройства формируется восстановленные по длительности единичные элементы (без краевых искажений и дроблений). Стробирующий приёмник ошибается, когда исказится середина посыл

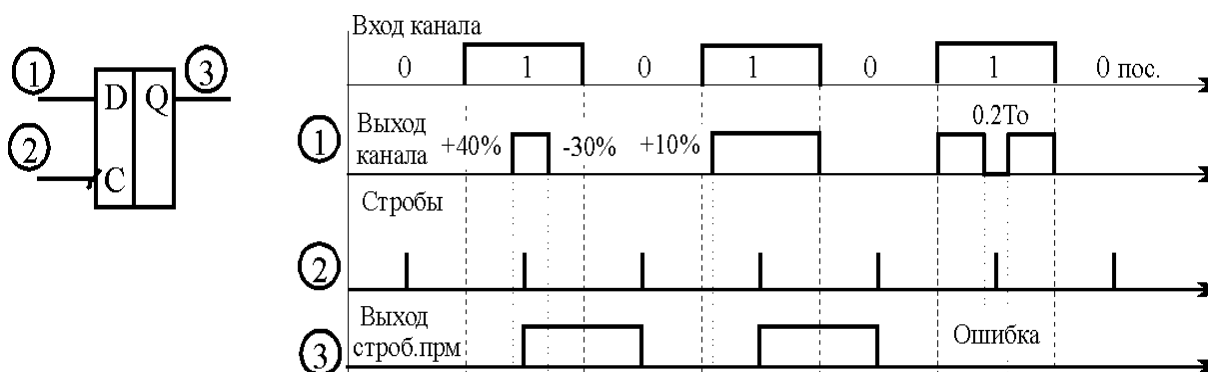


Рисунок 2 - Структурная схема стробирующего приёмника и диаграммы его работы

ки. Исправляющая способность стробирующего метода по краевым искажениям равна 50% , а по дроблениям нулю (даже очень короткое дробление попавшее на середину единичного элемента вызывает ошибку).

### Метод интегрирования

Схема регистрации двоичных сигналов интегральным методом приведена на рисунке 3. Устройство состоит из двух интеграторов, инвертора, схемы сравнения и D-триггера.

Работает интегральный приёмник следующим образом.

Принимаемый сигнал поступает на входы двух интеграторов, причём на интегратор\_1 непосредственно, а на интегратор\_0 через инвертор.

На выходе интеграторов напряжение линейно возрастает когда на входе интегратора логическая 1. Если на входе интегратора логический ноль, то напряжение на выходе интегратора не изменяется.

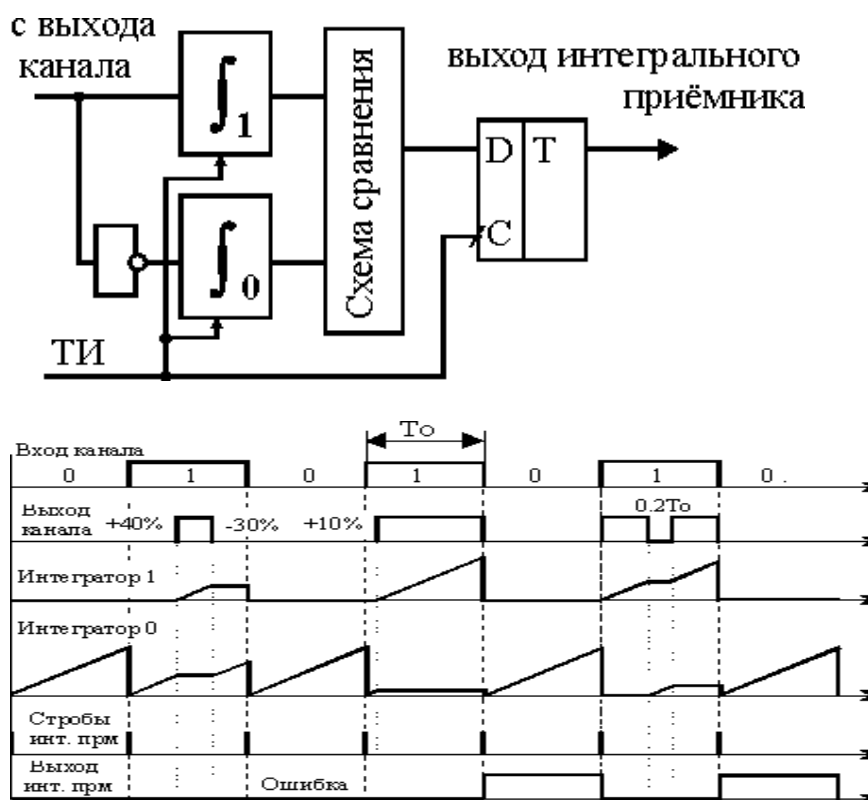


Рисунок 3 - Интегральный приёмник и диаграммы, поясняющие его работу.

Напряжения с выходов интеграторов поступают на схему сравнения.

Сигнал с выхода схемы сравнения (0 или 1) поступает на информационный вход D-триггера.

Тактовая последовательность вырабатываемая устройством синхронизации и соответствующая границам единичных элементов исходного сигнала подается на тактовый вход D-триггера.

В момент действия тактового импульса в триггер записывается результат сравнения напряжений на выходе интеграторов.

Если за время  $T_0$  сигнал на выходе канала принимал значение 1 большую часть времени чем значение 0, то напряжение на выходе интегратора\_1 будет больше чем напряжение на выходе интегратора\_0 и в триггер будет записана 1.

А если за это время сигнал на выходе канала принимал значение 1 меньшую часть времени чем значение 0, то напряжение на выходе интегратора\_1 будет меньше чем напряжение на выходе интегратора\_0 и в триггер будет записан 0.

Также под воздействием тактового импульса происходит обнуление интеграторов (интеграторы подготавливаются к новому циклу интегрирования).

Результат регистрации будет верным, если сумма краевых искажений и дроблений не превысит 50% от длительности единичного элемента  $T_0$ .

Таким образом, исправляющая способность интегрального метода по односторонним краевым искажениям равна 50%, по двухсторонним 25%, а по дроблениям  $0.5T_0$ .

Поскольку метод стробирования имеет большую помехоустойчивость при краевых искажениях, а интегральный метод устойчивее к действию дроблений, то иногда применяют комбинированные способы регистрации двоичных сигналов, сочетая преимущества обоих методов.

### Комбинированный метод

Структурная схема устройства регистрации показана на рисунке 4.

Сущность комбинированного способа регистрации состоит в том, что входящий элемент дискретного сигнала стробируется (анализируется) в нескольких точках, например в трёх.

Устройство регистрации включает в себя схему совпадения (логический элемент И), на один вход которой поступает принимаемый сигнал (с краевыми искажениями и дроблениями), а на второй – тактовые импульсы ТИ1 с устройства синхронизации, соответствующие точкам стробирования.

С выхода схемы совпадения тактовые импульсы, соответствующие элементам сигнала положительной полярности, поступают на тактовый вход счетчика. С выхода Q1 сигнал поступает на информационный вход D-триггера.

Работает схема следующим способом. После прихода третьего стробирующего импульса ТИ1 тактовый ТИ2 установит триггер в состояние старшего разряда двоичной комбинации на выходе счётчика.

Старший разряд счётчика есть не что иное, как наиболее вероятная полярность принятого сигнала, определяемого мажоритарным способом, т.е. по большинству.

Если в двух или трёх точках регистрации зафиксирована 1, то принимается решение что передавалась 1.

Если в двух или трёх точках регистрации зафиксирован 0, то принимается решение что передавался 0.

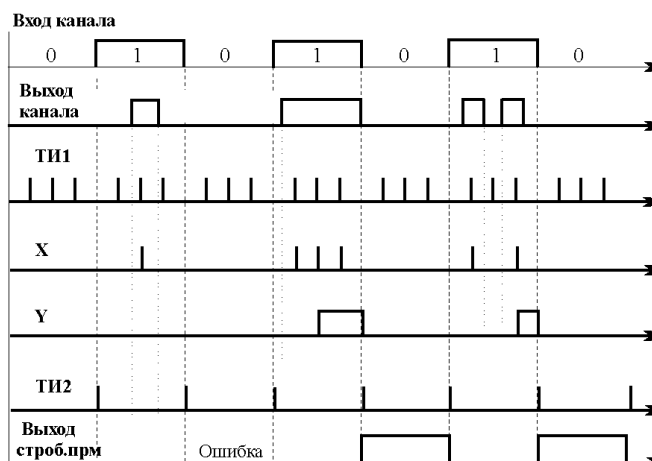
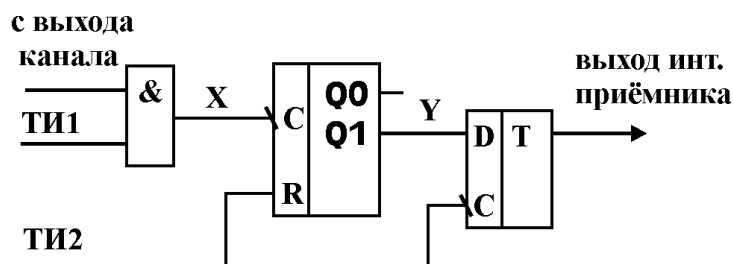


Рисунок 4 - Комбинированный приёмник и диаграммы, поясняющие работу

### Описание программы

Программа содержит несколько страниц.

Страница “Начало” - содержит название лабораторной работы. На этой странице имеются кнопки:

- «о программе» - можно посмотреть номер версии программы, адрес сайта МТУСИ и кафедры;
- «переписать» - активизирует диалоговое окно, используемое для перезаписи программы, образца отчёта и.т.п. на гибкий диск;
- «выход» - используется для выхода из программы.

Страница “Установки” - содержит различные установки и панель формирования индивидуального задания.

На распечатках, помещаемых в отчёт должны быть Фамилия И.О. и номер группы исполнителя. Для этого необходимо в начале выполнения работы ввести их в требуемые строки на панели «Формирование индивидуального задания».

«Отрисовка графики» – позволяет включить/отключить отрисовку графики.

Страница “Читайте” - содержит разделы: цель работы, задание и.т.п.

Раздел «задание» содержит лабораторное задание и методику выполнения каждого пункта.

Страница “Диаграммы” - содержит диаграммы, показывающие работу устройств регистрации.

Страница “Схема” - содержит схему устройств регистрации.

Страница “Формулы” содержит различные формулы.

### Описание страницы “Диаграммы”

На этой странице можно наблюдать следующие сигналы: вход канала, выход канала, стробы стробирующего приёмника, стробы интегрального приёмника, выход стробирующего приёмника, напряжение на выходе интеграторов нуля и единицы, выход интегрального приёмника. В левой части страницы имеются счетчик переданных единичных элементов и счётчики количества ошибок стробирующего и интегрального приёмников. При возникновении ошибки фон панели счетчика становится красным.

Также страница содержит следующие панели с переключателями.

«Ручной ввод искажений» – включает панель при помощи которой можно вводит искажения в шестую посылку. Под диаграммами расположен движок, при помощи которого можно перемещать положение дробления в режиме «Ручной ввод искажений».

Панель “Краевые искажения” содержит кнопки:

«Вкл» - включить краевые искажения;

«откл» - отключить краевые искажения;

Также на этой панели имеется переключатель при помощи которого можно изменять величину дисперсии краевых искажений.

Панель “Дробления” содержит кнопки:

«Вкл» - включить дробления;

«откл» - отключить дробления.

Также на этой панели имеется переключатели, при помощи которых можно изменять длительность и частоту дроблений.

Панель “развёртка” содержит кнопки:

Непрерывная - включается непрерывный режим моделирования;

Однократная - производится отрисовка приёма 8 посылок;

Откл - отключение процесса моделирования.

Панель “Длительность сеанса” содержит кнопку «Сброс» – обнуление счётчика времени измерения, счётчика переданных единичных элементов и счётчиков ошибок стробирующего и интегрального приёмников. Также на этой панели имеется индикатор времени измерения и переключатель для задания длительности сеанса.

Для распечатки требуемой страницы необходимо нажать клавишу «Печать» расположенную в левом нижнем углу. Если распечатка не произойдёт (замечен такой дефект на некоторых типах принтеров), то можно распечатать файл PRINT\_07\_xx.BMP, который создаётся при каждом нажатии на кнопку «Печать». Распечатку этого файла можно произвести например при помощи редактора Word.

### Лабораторное задание

1. Пользуясь методическим описанием, рекомендуемой литературой и программой лабораторной работы изучите методы регистрации двоичных сигналов.
2. Определите исправляющую способность приёмников по краевым искажениям.

3. Сделайте распечатку, показывающую работу приёмников при действии краевых искажений.

4. Определите исправляющую способность приёмников по дроблениям.

5. Сделайте распечатку, показывающую работу приёмников при действии дроблений.

6. Измерьте зависимость количества ошибок на выходе приёмников от длительности дроблений.

### Методические указания по выполнению работы

1. Методика определения исправляющей способности приёмников по краевым искажениям:

- запустите программу лабораторной работы, на странице «Установки» введите свои Ф.И.О и номер группы. Перейдите на страницу «Диаграммы»;

- отключите датчик краевых искажений. Для этого на панели «Краевые искажения» нажмите кнопку «откл»;

- отключите датчик дроблений. Для этого на панели «Дробления» нажмите кнопку «откл»;

- включите режим ручного ввода искажений. Для этого включите переключатель «Ручной ввод искажений»;

- перемещая движок «одностороннее искажение» вправо от среднего положения, определите при какой величине краевого искажения начнут возникать ошибки на выходе стробирующего приёмника и интегрального приёмника. Максимальное значение искажения, при котором нет ошибок, и будет исправляющей способностью приёмников по односторонним краевым искажениям;

Для определения исправляющей способности по двусторонним краевым искажениям используйте аналогичную методику, только вносите краевые искажения при помощи движка «двусторонние краевые искажения». Движок смещайте влево от среднего положения.

Результаты измерения исправляющей способности занесите в табл. 1. (смотрите образец отчета).

2. Для получения распечатки, показывающей работу приёмников при действии краевых искажений сделайте следующее:

- выключите переключатель «Ручной ввод искажений»;

- включите краевые искажения. Для этого на панели «Краевые искажения» нажмите кнопку «Вкл»;

- установите переключателем «диспер» (дисперсия) величину краевых искажений, при которой начнут появляться ошибки у обоих приёмников;

- нажимая кнопку «ОДНОКРАТНАЯ» на панели «РАЗВЁРТКА» и получите реализацию, на которой ошибки произойдут сразу в двух приёмниках.

Для получения распечатки нажмите кнопку «ПЕЧАТЬ».

3. Методика определения исправляющей способности приёмников по дроблениям.

1. Включите непрерывную развёртку.

2. Выключите датчик краевых искажений.

3. Включите режим «Ручной ввод искажений».

4. Установите движком «Положение маркера и дробления» маркер точно в середину второго единичного элемента.

5. Изменяя величину длительности дробления, определите значение, при котором начнут ошибаться приёмники.

Максимальное значение дробления, при котором ещё нет ошибок, и будет исправляющей способностью приёмников по дроблениям.

Результаты измерения исправляющей способности занесите в табл. 2.

4. Для получения распечатки, показывающей работу приёмников при действии дроблений сделайте следующее:

1. Отключите ручной ввод искажений;

2. Включите датчик дроблений;

3. Подберите длительность дроблений, при которой начнутся ошибки в обоих приёмниках;

4. Нажимая кнопку «ОДНОКРАТНАЯ» на панели «РАЗВЁРТКА» получите реализацию, на которой ошибки произойдут сразу в двух приёмниках.

Для получения распечатки нажмите кнопку «ПЕЧАТЬ».

5. Методика измерения количества ошибок на выходе приёмников при действии дроблений.

1. Сделайте установки как в пункте 4.

2. Установите длительность сеанса равную 100 сек.

3. Установите длительность дробления равную нулю.

4. Установите частоту дроблений в соответствии с Вашим индивидуальным заданием (смотрите на странице «Установки»).

5. Нажмите кнопку «Непрерывная» на панели развёртки. При этом начнётся сеанс измерения. После окончания сеанса измерения кнопка «Непрерывная» отожмётся.

6. Изменяя длительность дробления в диапазоне от 0 до 1.2То с шагом 10% определите число ошибок на выходе приёмников. Результаты занесите в таблицу №3 (смотрите образец отчёта в файле ЛР\_07\_Образец\_отчёта.doc).

\*\*\* примечание Для ускорения процесса измерения выключите переключатель «Отрисовка графики». При этом процесс моделирования значительно ускорится.

## Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- страница 1. титульный лист;
- страница 2. цель работы и схему лабораторного макета;
- страница 3. результаты измерения исправляющей способности приёмников по краевым искажениям:

а. распечатку, показывающую работу приёмников при действии краевых искажений;

б. результаты измерения исправляющей способности по дроблениям;

в. распечатку, показывающую работу приёмников, при действии дроблений;



- страница 4. результаты измерения и график зависимости вероятности ошибки от длительности дроблений;
- страница 5. индивидуальное задание;
- страница 6. краткий ответ на пять контрольных вопроса и выводы по работе.

## Лабораторная работа №4 Исследование линейных искажений

### Цель работы

Изучение методов измерения и оценки характеристик линейных искажений в каналах передачи сетей документальной электросвязи.

### Домашнее задание

Для интегрирующей RC цепи постройте переходную характеристику  $h(t)$  и реакцию на прямоугольный импульс  $G(t)$ . Длительность импульса возьмите равной  $\tau$  ( $\tau = RC$  - постоянная времени RC- цепи).

R в кОм возьмите равным количеству букв в Вашем имени,

C в нано фарадах - равным количеству букв в Вашей фамилии.

### Краткие сведения из теории линейных искажений

Классификация помех и искажений.

При передаче сигналов по каналам связи они подвергаются действию помех и искажений, что препятствует правильному приёму сигналов [6,7].

Под помехами, как правило, понимают дестабилизирующие факторы, имеющие внешнюю природу по отношению к каналу, а под искажением факторы имеющие внутреннюю природу. Наиболее типичные помехи и искажения можно представить в виде рисунка 1.

Рассмотрим различные виды помех на примере прослушивания информации записанной на магнитофонную кассету в виде групп цифр (кодограмм). В качестве источника будет выступать запись на кассете, а в качестве канала магнитофон и акустический канал от динамика магнитофона до уха слушателя (приёмника).

Если помеха складывается с сигналом, то её называют аддитивной (*addition* - сложение). Например, во время прослушивания записи кто-то начал стучать молотком по стене – это импульсная помеха, если во дворе монотонно (с одной частотой) завывала сирена – это гармоническая помеха, а если включили пылесос или над домом пролетел реактивный самолёт - то это типичная флуктуационная (шумовая) помеха.

Если помеха перемножается с сигналом, то её называют мультипликативной (*multiplication* - перемножение). Например, в магнитофоне плохо работает регуля-

тор громкости, что приводит к случайным изменениям громкости сигнала. Если громкость сигнала изменяется в небольших пределах, это называют колебаниями уровня.

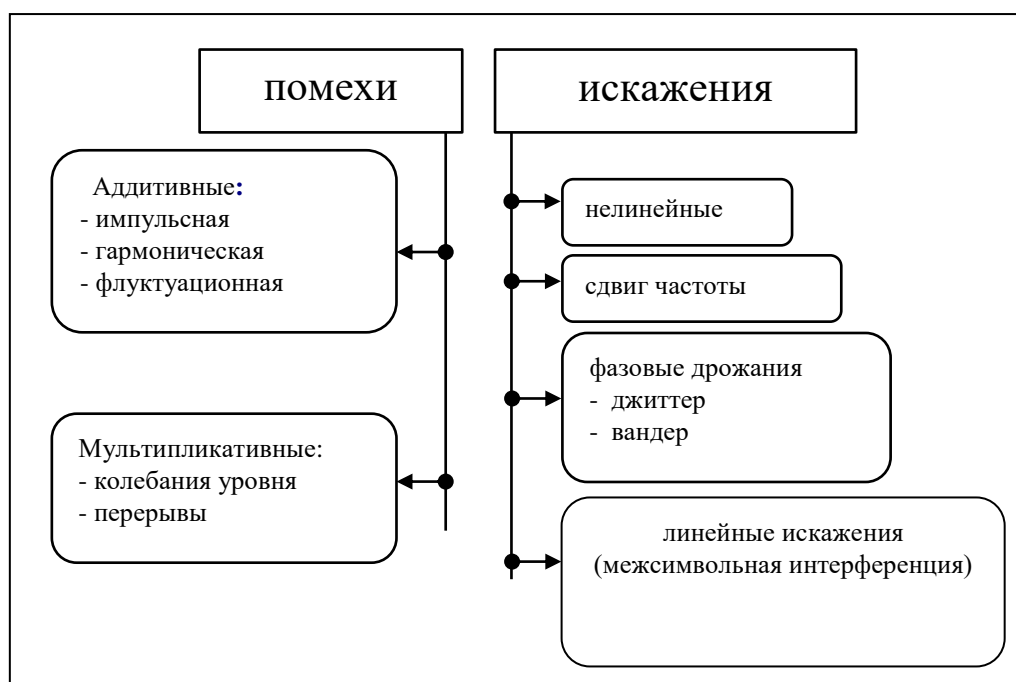


Рисунок 1 – Типичные помехи

Если сигнал исчезает полностью, это перерыв связи.

Если в динамике вместо естественного голоса слышен хрипящий (дребезжащий) голос – значит имеют место сильные нелинейные искажения.

Если скорость протяжки ленты отличается от скорости при записи, такие искажения являются сдвигом частоты. При сдвиге частоты вверх женский голос будет восприниматься как голос ребёнка, а при сдвиге вниз - как мужской.

Если скорость протяжки ленты отклоняется от номинального значения в обе стороны, оставаясь в среднем равной номинальному значению, то имеют место фазовые дрожания.

Если фазовые дрожания происходят быстро, то их называют фазовым джиттером (*jitter*- дрожание), а если медленно - вандером (*wander*- блуждать, бродить).

При джиттере голос человека будет похож на голос Буратино, а при вандере женский голос периодически будет переходить, то в голос ребёнка, то в мужской голос.

При помощи ручек регулировки тембра можно изменить АЧХ (Амплитудно Частотную Характеристику - соотношение уровней различных частот), то есть вносить линейные искажения или уменьшать (компенсировать) их.

Линейные искажения, которые вызывает процесс записи и воспроизведения на магнитофоне слишком малы, чтобы вызвать ошибки при приёме (прослушивании) кодограмм.

Разместим магнитофон на лестничной клетке многоэтажного дома, а слушать будем несколькими этажами выше (ниже). При таком размещении источника

(магнитофона) и приёмника (слушателя) за счёт сильных переотражений звука от стен и различных полостей (бетонных стен и лестничных клеток) возникнет очень сильное искажение АЧХ.

«На слух» это проявится в том, что слоги речи начнут «наползать» друг на друга, что затруднит безошибочное восприятие кодограмм.

Если скорость чтения кодограмм повысить или увеличить количество этажей между источником и приёмником, то вероятность ошибки при приёме увеличится, а начиная с некоторого значения правильный приём станет невозможным.

Вместо отдельных цифр слушатель будет слышать сплошное бубнение, из которого невозможно выделить отдельные цифры.

Явление, при котором соседние слоги, цифры, сигналы и.т.п. накладываются, друг на друга получило название межсимвольной интерференции (МСИ).

Межсимвольная интерференция, как правило, затрудняет правильный приём сигнала.

Линейные искажения в непрерывных каналах связи.

Под линейными искажениями в непрерывных каналах связи (НКС) понимают искажение формы сигнала, вызванное изменением соотношения амплитуд и фаз спектральных составляющих при передаче сигнала через канал связи.

$$S(j\omega) = X(j\omega) K(j\omega) \quad (1)$$

Связь сигнала на выходе канала  $s(t)$  с сигналом на его входе  $x(t)$  может быть представлена операцией свёртки:

$$s(t) = x(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) g(\tau) d\tau \quad (2)$$

где  $g(t)$  – импульсная характеристика канала – отклик канала на дельта-функцию  $\delta(t)$ :

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0; \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (3)$$

Спектр сигнала на выходе канала  $S(j\omega)$  может быть получен умножением спектра входного сигнала  $X(j\omega)$  на коэффициент передачи канала  $K(j\omega)$ :

$$S(j\omega) = X(j\omega) K(j\omega) \quad (4)$$

Коэффициент передачи канала  $K(j\omega)$  однозначно связан с импульсной характеристикой  $g(t)$  преобразованием Фурье:

если представить комплексную функцию  $K(j\omega)$  в показательной форме:

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

$$K(j\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

то  $K(\omega)$  будет амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) канала, а  $\varphi(\omega)$  – фазочастотной характеристикой (ФЧХ) канала.

Таким образом, линейные искажения в НКС могут быть полностью описаны и заданы его АЧХ и ФЧХ или импульсной характеристикой.

На практике линейные искажения в НКС чаще всего нормируются требованиями к их частотным характеристикам, что обусловлено сравнительной простотой их описания и измерения.

Однако в зависимости от конкретной решаемой задачи могут существовать и другие методы представления и оценки линейных искажений.

Например, при передаче по каналам сигналов в виде прямоугольных импульсов полезным оказывается понятие переходной характеристики канала  $h(t)$ , которая является откликом канала на ступенчатую функцию  $\sigma(t)$  (сигма-функция):

Прямоугольный импульс  $p(t)$  длительностью  $t_{\text{и}}$  можно представить в виде

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > 0; \\ 0 & \text{при } t \leq 0; \end{cases} \quad (6)$$

разности двух ступенчатых функций, отстоящие на время  $t_{\text{и}}$ :

$$p(t) = \sigma(t) - \sigma(t - t_{\text{и}}) \quad (7)$$

В соответствии с правилом суперпозиции для линейных цепей отклик канала на такой импульс будет равен разности переходных характеристик:

$$G(t) = h(t) - h(t - t_{\text{и}}) \quad (8)$$

На рисунке 2 иллюстрируется связь между  $h(t)$  и  $G(t)$

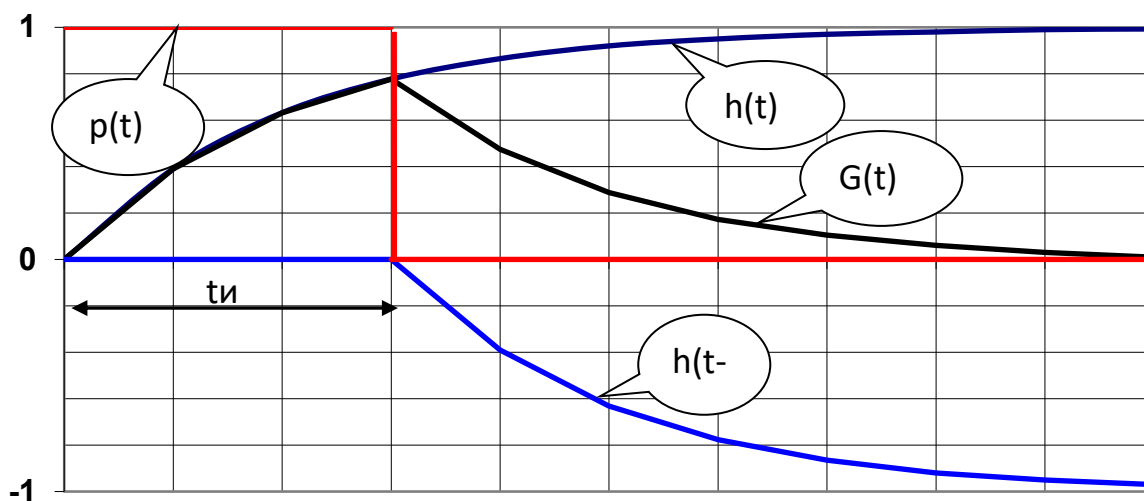


Рисунок 2 - Связь между  $h(t)$  и  $G(t)$ .

Из рисунка можно сделать три вывода:

- за время действия импульса на входе канала переходной процесс не успевает достичь максимального значения;
- чем меньше длительность импульса на входе канала, тем до меньшего значения успевает дорасти напряжение на выходе канала;
- теоретически переходной процесс длится бесконечно долго, следовательно, будет влиять на форму отклика канала на последующие импульсы.

Для количественной оценки линейных искажений сигналов в системах документальной электросвязи вводится понятие “межсимвольная помеха” (МСП).

Если длительность отклика превышает период следования импульсов, то соседние отклики накладываются друг на друга – возникает межсимвольная интерференция (МСИ).

Поэлементный приёмник по результатам наблюдения реализации сигнала на выходе канала на каждом единичном интервале выносит решение о переданном единичном элементе сигнала (ЕЭС). Очевидно, что в условиях МСИ реализация отклика, по которому принимается решение, будет суммой переходных процессов нескольких интерферирующих сигналов. При принятии решения об  $i$ -м элементе сигнала переходные процессы от всех других ЕЭС будут выступать как помеха, искажающая отклик. Такая помеха называется межсимвольной помехой (МСП).

МСП – это случайный процесс, действующий на  $i$ -м интервале обработки сигнала в приёмнике и образованный суммой переходных процессов от тех ЕЭС, решение по которым принимается в другие интервалы времени.

### Условие Найквиста

При использовании для передачи в каналах с межсимвольной интерференцией сигналов с определёнными свойствами можно реализовать простой метод поэлементного приёма с однократным отсчётом.

Форма отклика таких сигналов должна отвечать условию Найквиста во временной области:

$$\begin{aligned} S_0 & \text{ при } k = 0; \\ S(k\tau_0) &= 0 \text{ при } k \neq 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} K \left[ j \left( \omega - \frac{2\pi m}{\tau_0} \right) \right] = \tau_0. \quad (10)$$

Условие требует, чтобы все отклики обращались в ноль во всех точках, отстоящих от момента взятия отсчёта на интервалы времени кратные единичному интервалу  $\tau_0$ . Возможная форма отклика, отвечающая условию Найквиста показана на рисунке 3.

Следует иметь в виду, что условие отсутствия межсимвольной интерференции в частотной области жёстко связано со скоростью модуляции  $B$  и шириной полосы пропускания низкочастотного канала  $\Delta F_{нк} = F_{гр}$ . Здесь  $F_{гр}$  – граничная частота полосы пропускания канала (частота среза). Эта связь определяется соотношением:

$$B \leq 2\Delta F_{нк}. \quad (11)$$

Другими словами равенство (10) может быть удовлетворено, если скорость модуляции  $B$  численно не превышает удвоенной граничной частоты пропускания низкочастотного канала.

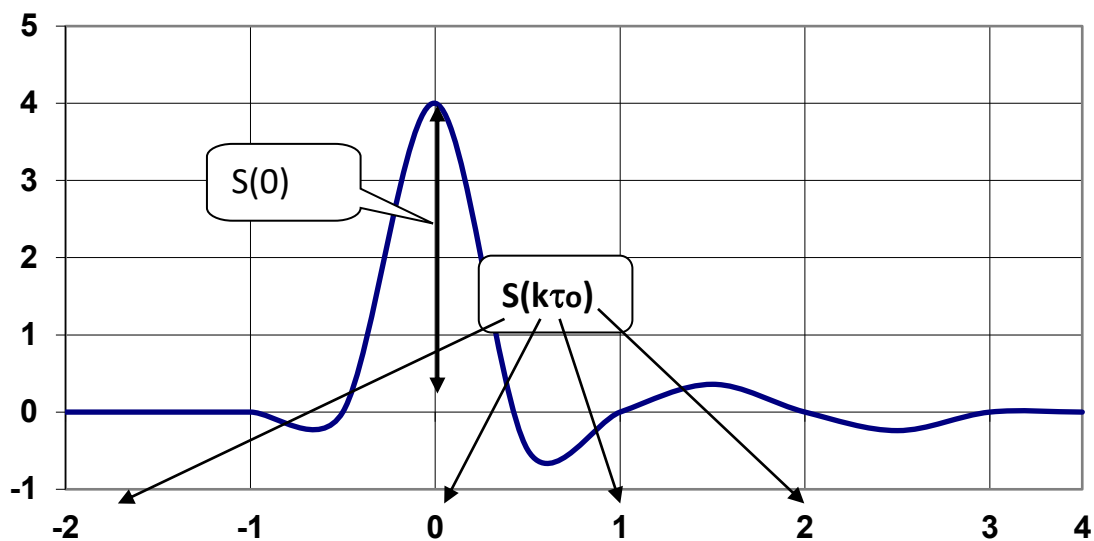


Рисунок 3 - Отклик канала, удовлетворяющий условию Найквиста

#### Глазковая диаграмма

Глазковую диаграмму наблюдают при передаче по каналу случайной последовательности импульсов. Если совместить изображение всех возможных реализаций (траекторий) откликов на одном и том же графике, то получим глазковую диаграмму (ГД).

Изображение ГД можно получить с помощью осциллографа, если установить развёртку длительностью примерно равной двум единичным элементам и наблюдать сигнал на выходе канала. Развёртку осциллографа надо засинхронизировать от тактовой частоты передачи. В этом случае на экране будет высвечиваться сразу несколько траекторий сигнала, которые образуют глазковую диаграмму. По глазковой диаграмме можно судить об искажениях сигнала из-за воздействия МСП.

Для оценки величины МСП по глазковой диаграмме определяют  $d_{\max}$  и  $d_{\min}$  и вычисляют D-критерий ( $d_{\max}$  – максимальный раскрыв глаза,  $d_{\min}$  – минимальный раскрыв глаза, смотрите рисунок 4)

$$D = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (12)$$

Минимальный раскрыв «глаза определяет границу», внутри которой не может существовать траекторий сигнала при любой входной последовательности.

Если  $d_{\min} > 0$ , то траектории, которые соответствуют передаче единицы, в момент времени  $t_0$  ( момент принятия решения ) будут проходить выше траекторий, которые соответствуют передаче нуля и на приёме можно производить безошибочный приём.

Если  $d_{\min} = 0$  (глаз будет закрыт), то приём некоторых элементов сигнала (ЕЭС) будет происходить с ошибками.

Глазковая диаграмма получила своё название из-за того, что при измене-

нии скорости передачи или параметров канала  $d_{min}$  начинает изменять своё значение и это напоминает открывание-закрывание глаза.

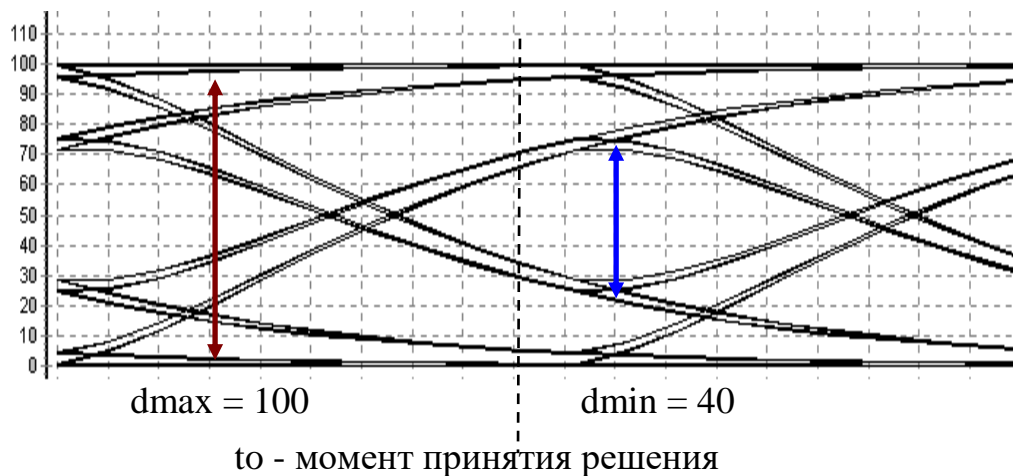


Рисунок 4 - Возможная реализация глазковой диаграммы

При изображении глазковой диаграммы показывают лишь внешние и внутренние траектории. Желательно показать два глаза, чтобы можно было оценить запас сигнала по фазе.

По глазковой диаграмме измеряют значение  $d_{max}$ ,  $d_{min}$  и вычисляют величину D-критерия. На глазковой диаграмме надо указать скорость модуляции, на которой она была зарисована.

Проведя аналогичные измерения на других скоростях модуляции можно построить график зависимости D-критерия от скорости модуляции

$$D = f(B). \quad B = 10 \text{ кБод}$$

Различие между линейными и нелинейными искажениями. На рисунке 5 представлен пример изображения глазковой диаграммы.

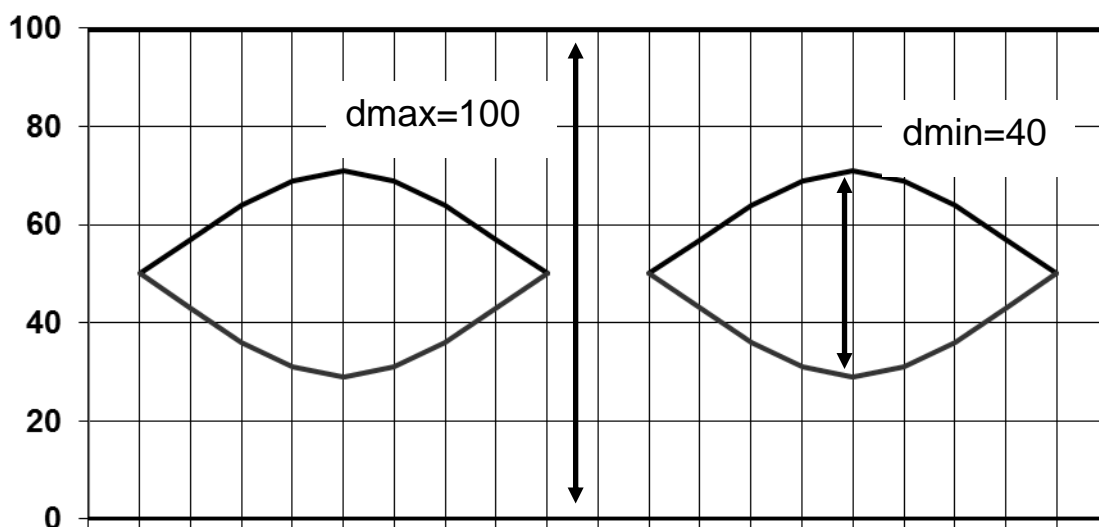


Рисунок 5 - Пример изображения глазковой диаграммы

Линейные искажения возникают в линейных цепях. Линейными называют такие цепи, у которых реакция пропорциональна воздействию. К числу линейных электрических цепей относятся цепи составленные из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей.

Для линейных цепей справедлив принцип наложения (суперпозиции).

Он формулируется так: «реакция линейной цепи на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности».

В нелинейных цепях принцип наложения не действует. Отличить линейную цепь (схему) от нелинейной можно следующим образом. Надо подать на вход цепи синусоидальное напряжение. Если цепь линейная, то на выходе будет действовать тоже синусоидальное напряжение, но с другой фазой и амплитудой. Если цепь нелинейная (в ней возникают нелинейные искажения), то форма сигнала на выходе будет отлична от синусоидальной (в спектре сигнала появятся гармоники с частотами кратными исходной частоте).

### Используемые сокращения

НКС - непрерывный канал связи;  
МСИ - межсимвольная интерференция;  
МСП - межсимвольная помеха;  
 $g(t)$  - импульсная характеристика;  
 $\delta(t)$  - дельта-функция;  
 $h(t)$  - переходная характеристика;  
 $p(t)$  - прямоугольный импульс;  
 $G(t)$  - реакция цепи на прямоугольный импульс;  
 $K(j\omega)$  - комплексный коэффициент передачи канала;  
 $K(\omega)$  - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);  
 $\varphi(\omega)$  - фазочастотная характеристика (ФЧХ) канала;  
 $B$  - скорость модуляции;  
 $D$  - D-критерий;  
ЕЭС - единичный элемент сигнала;  
ГД - глазковая диаграмма;  
 $d_{\min}$  - минимальный раскрыт глаза;  
 $d_{\max}$  - максимальный раскрыт глаза.

### Описание программы

Интерфейс программы содержит несколько страниц:

“Начало” – содержит общие сведения: название работы и т.п.

Содержит кнопки:

«о программе» - можно посмотреть номер версии программы, адрес сайта МТУСИ и кафедры;

«переписать» - активизирует диалоговое окно, используемое для перезаписи программы, образца отчёта и т.п. на гибкий диск;

«выход» - используется для выхода из программы;



“Установки” - содержит различные установки и панель формирования индивидуального задания;

“Читайте” - содержит разделы: цель работы, задание, содержание отчёта и контрольные вопросы.

Раздел «задание» содержит лабораторное задание и методику выполнения каждого пункта.

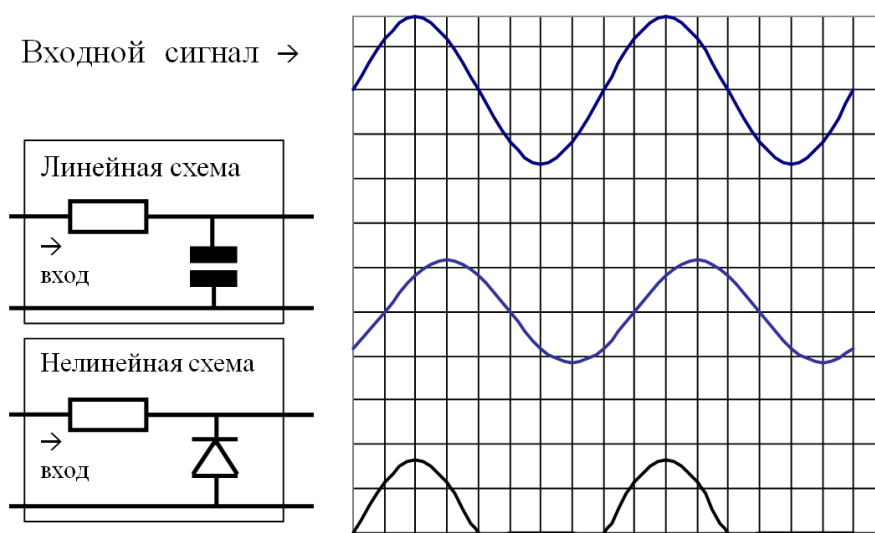


Рис. 6. Пример реакции линейной и нелинейной цепи на воздействие синусоидального напряжения

“ $h(t)$  и  $G(t)$ ” - содержит схему для наблюдения переходной характеристики и реакции цепи на прямоугольный импульс рисунок 7.

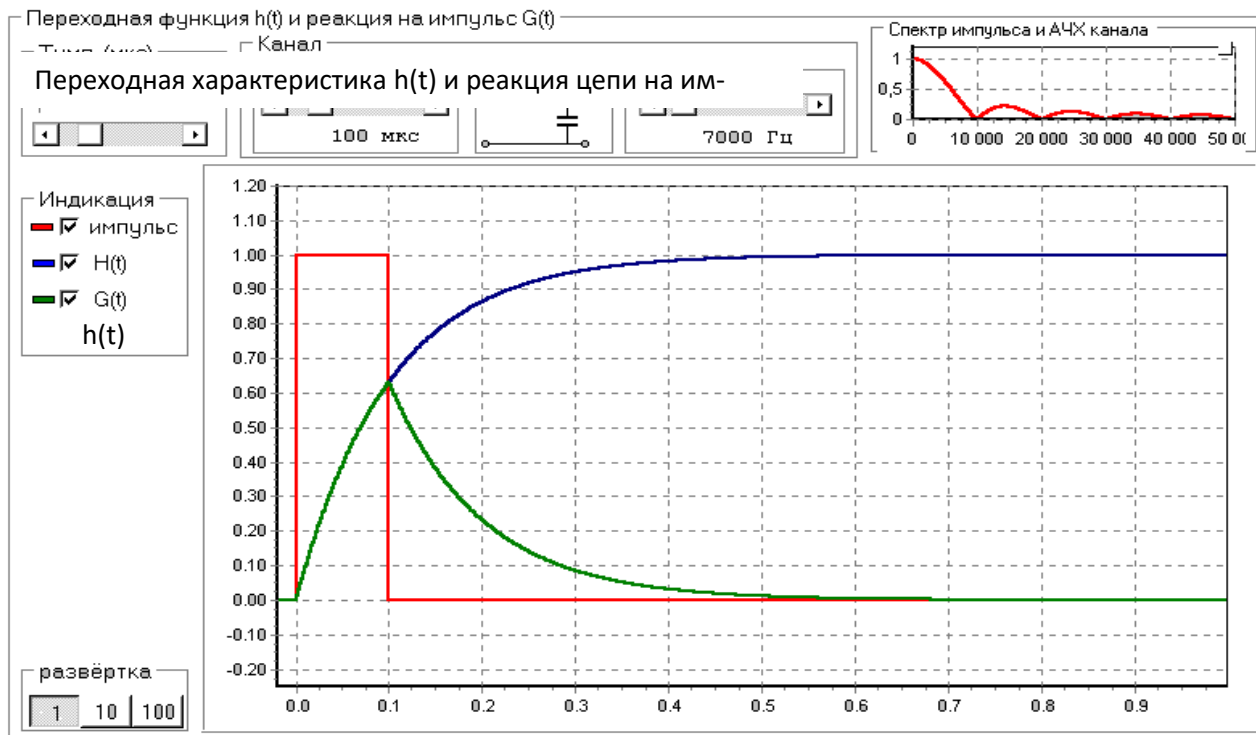


Рисунок 7 - Вид страницы “ $h(t)$  и  $G(t)$ ”

В качестве канала 1 и 2 используются интегрирующие RC цепи.

В качестве канала 3 используется фильтр нижних частот (ФНЧ).

У каналов 1 и 2 можно менять постоянную RC цепи, а у ФНЧ частоту среза.

Переходная характеристика для интегрирующей RC цепи рассчитывается по формуле:

$$h(t) = 1 - e^{-t/\tau}; \quad \tau = RC \quad (1)$$

“Глазковая диаграмма” – содержит схему для наблюдения глазковой диаграммы.

### Лабораторное задание

1. Пронаблюдайте и зарисуйте переходную характеристику  $h(t)$  и реакцию на импульс  $G(t)$  для двух каналов.
2. Исследуйте изменение длительности импульса и постоянной RC цепи на переходную характеристику  $h(t)$  и реакцию на импульс  $G(t)$ .
3. Пронаблюдайте изменение глазковой диаграммы в зависимости от скорости передачи и параметров канала.
4. Оцените межсимвольную интерференцию по глазковой диаграмме.

### Методические указания по выполнению работы

Подробную методику по выполнению каждого пункта смотрите в программе на странице: «Читайте» -> «Задания» -> «Методика выполнения». В таблице 1 представлено содержание отчёта.

Таблица 1 - Содержание отчета

| Страницы | Содержание  |
|----------|---|
| 1        | Титульный лист.   |
| 2        | Цель работы и функциональную схему лабораторного макета.  |
| 3        | Домашнее задание.   |
| 4        | Переходную характеристику, реакцию цепи на импульс и глазковые диаграммы для первого канала                                       |
| 5        | Переходную характеристику, реакцию цепи на импульс и глазковые диаграммы для составного канала (включены первый и второй каналы). |
| 6        | Зависимость D-критерия от скорости передачи для двух каналов. Выводы по работе.   |
| 7        | Краткий ответ на 5 контрольных вопросов (номера вопросов выберите самостоятельно).  |

## Контрольные вопросы

1. Какие виды помех и искажений действуют в каналах связи?
2. Что понимают под линейными искажениями?
3. Что такое ФНЧ, ФВЧ, полосовой и режекторный фильтры?
4. Как для простейших РС цепей построить АЧХ (качественно)?
5. Что означают понятия постоянной цепи и частоты среза для РС- цепи.
6. Как по известному отклику канала на одиночный импульс определить мощность межсимвольной помехи?
7. Что понимают под условием Найквиста во временной области?
8. Что понимают под импульсной и переходной характеристиками канала?
9. Как по известной переходной характеристике получить реакцию на прямоугольный импульс?
10. Как получается глазковая диаграмма?
11. Что такое D-критерий?
12. Из-за чего возникают линейные искажения (межсимвольная интерференция)?
13. Как по известной схеме РС цепи построить её переходную характеристику?
14. Поясните разницу между линейными и нелинейными искажениями?
15. Поясните смысл условия отсутствия межсимвольной интерференции в частотной области.
16. Какой эксперимент надо провести чтобы отличить линейную схему от нелинейной?
17. К какому значению стремиться D-критерий при  $B \rightarrow \infty$ ?
18. Что такое годограф?
19. Раскройте понятия: НСНВ, НСДВ, ДСНВ, ДСДВ?
20. Приведите примеры схем в которых отсутствуют линейные искажения?

## Лабораторная работа №5

Исследование работы устройства синхронизации с дискретным управлением

### Цель работы

- 1.1. Ознакомиться с принципом действия системы синхронизации с дискретным управлением.
- 1.2. Научиться производить расчет основных параметров устройств синхронизации.
- 1.3. Получить практические навыки по моделированию системы синхронизации с дискретным управлением.

## Краткие теоретические сведения

Для правильной работы конечных устройств в синхронных системах необходимо, чтобы распределители передающего и приёмного устройств работали синхронно и синфазно. Две последовательности событий называются синхронными, если соответствующие события в них происходят одновременно. В системах связи одна последовательность событий происходит в передатчике, а другая в приёмнике. Хотя эти последовательности и сдвинуты относительно друг друга на некоторое время (время прохождения сигнала), их принято считать синхронными [8,9].

Для систем передачи данных проблема синхронизации состоит в образовании во всех элементах сети единой шкалы времени с равными интервалами и легко определяемыми границами между ними. Условие синхронизма является необходимым при взаимодействии двух конечных установок через сеть связи для правильного приема, как отдельных бит принимаемого сигнала, так и комбинации этих бит, отображающие символы передаваемых данных. Типовая система передачи данных представлена на рисунке 1.



Рисунок 1- Типовая система передачи данных

При взаимодействии различных цифровых станций сохраняется задача синхронизации по битам, называемая обычно тактовой синхронизацией. Необходимость точной идентификации границ между группами бит выдвигает задачу так называемой цикловой синхронизации элементов сети. Среди возможных способов синхронизации наиболее широко распространён способ подстройки скорости работы приёмника под скорость работы передатчика. Для электронных устройств это означает подстройка частоты колебаний генератора приёмной оконечной аппаратуры под частоту поступающих из канала связи сигналов

В лабораторной работе исследуется устройство синхронизации без непосредственного воздействия на генератор (рисунок 2).

Местный генератор вырабатывает сигналы с частотой  $F_{зг}$  в  $K_d$  раз большей требуемой тактовой частоты  $F_t$ . Делитель частоты делит частоту  $F_{зг}$  в  $K_d$  раз. На выходе делителя действует сигнал с частотой  $F_t$ . Этот сигнал направляется в устройство регистрации приёмника и одновременно на один из входов фазового детектора. На другой вход фазового детектора поступает сигнал  $U_{прм}$  из канала связи

(от передатчика). Задачей фазового детектора является сравнение фазы поступающего сигнала  $U_{\text{прм}}$  (моментов смены знака посылки) с фазой тактового сигнала  $F_t$ .

При расхождении фаз этих сигналов фазовый детектор вырабатывает сигнал, соответствующий величине и знаку расхождения фаз анализируемых сигналов. Сигнал с выхода фазового детектора воздействует на управляющее устройство (УУ). На выходе УУ появляется сигнал, который изменяет коэффициент деления делителя, регулируя тем самым фазу частоты  $F_t$  так, чтобы фаза частоты  $F_t$  совпала (с некоторой погрешностью) с фазой принимаемого сигнала.

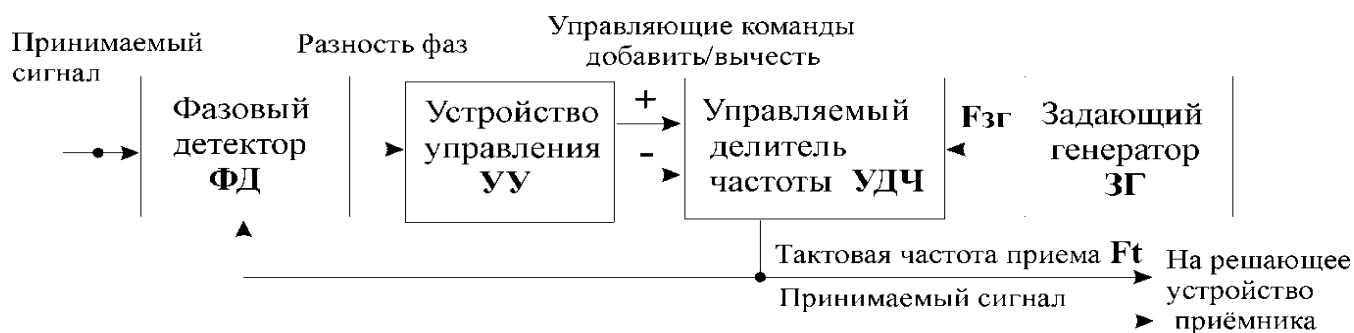


Рисунок 2 – Структурная схема системы с дискретной фазовой автоподстройкой частоты

Можно коэффициент деления делителя сделать постоянным, а изменять количество импульсов поступающих на вход делителя от местного генератора. Принцип регулирования частоты на выходе делителя частоты путём добавления/вычитания тактового импульса на входе делителя показан на рисунке 3.

Если сигнал  $F_t$  будет отставать по фазе, то в последовательность импульсов поступающих на вход счетчика будут добавляться дополнительные импульсы. В результате этого частота на выходе счетчика несколько повысится и фаза сигнала  $F_t$  начнет «догонять» фазу принимаемого сигнала.

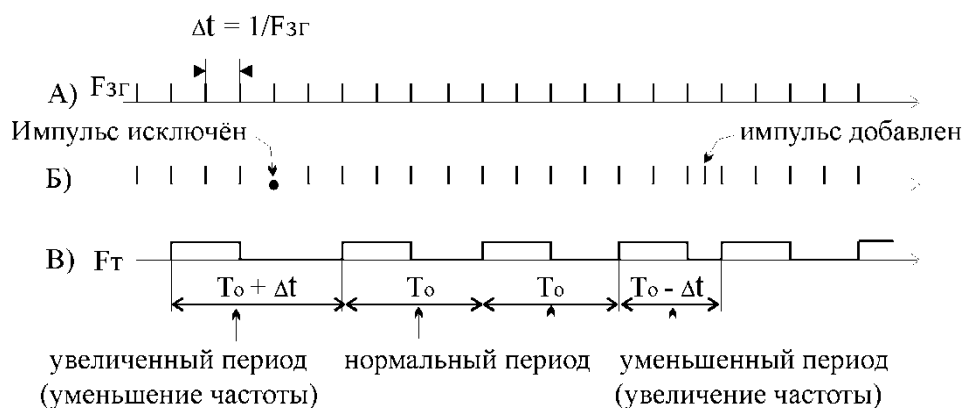


Рисунок 3 – Принцип регулирования частоты

Если сигнал  $F_t$  будет опережать по фазе принимаемый сигнал, то из последовательности импульсов поступающих на вход счетчика будут удаляться (исключаться) импульсы. В результате этого частота на выходе счетчика несколько понизится и разность фаз между  $F_t$  и принимаемым сигналом уменьшится.

и передачи.

Достоинством устройств синхронизации без непосредственного воздействия на генератор является то, что частота  $F_t$ , остаётся неизменной, что позволяет использовать в качестве местного генератора высокостабильные генераторы, например, генераторы стабилизированные кварцем и делать этот генератор общим для всей аппаратуры (для всех принимаемых потоков).

Фазирование по элементам (синхронизация) передатчика и приёмника не может постоянно поддерживаться только за счёт стабильности генераторов приёма стабильности генератора  $k = \Delta f / f_n$ , где:

$f_n$  – номинальная частота генератора,  $\Delta f$  – отклонение реальной частоты от номинального значения. Колебания такого генератора сместятся на один период по отношению к колебаниям с номинальной частотой за время  $t_1 = 1 / \Delta f = 1 / (k * f_n)$ .

Время за которое поток на выходе передатчик сместиться на 1 посылку (по сравнению с номинальной скоростью работы) будет равно:

$$t_1 = 1 / (k * B), \quad 1$$

где  $B$  – номинальная скорость работы.

В самом неблагоприятном случае частоты генераторов передатчика и приёмника могут отклониться от номинала в противоположенные разные стороны, тогда время за которое распределители передачи и приёма разойдутся на 1 посылку равно  $t_2 = 1 / (|2 * k| * B)$ .

Расхождение фазы (на сколько фронт посылки на выходе реального генератора сместится от фронта посылки на выходе идеального генератора) за длительность одной посылки будет равно  $k$ .

Время за которое уход по фазе передатчика превысит допустимое значение  $\epsilon_{\text{доп}}$  равно:

$$t_{\epsilon_{\text{доп}}} = \epsilon_{\text{доп}} / (k * B) \quad 2$$

Нестабильность обычных RC или LC генераторов превышает  $10^{-3}$ .

Простые кварцевые генераторы дают нестабильность порядка  $10^{-4}$ . Если использовать специальные схемные решения и поместить кварцевый резонатор и схему генератора в термостат, то можно получить нестабильность  $10^{-9}$ . Кварцевым генераторам свойственно самопроизвольное изменение частоты колебаний с течением времени из-за «старения кварца».

Стремление обеспечить взаимодействие синхронной сети с другими сетями, диктует необходимость руководствоваться рекомендациями ITU-T, касающимися вопросов синхронизации. В частности, рекомендация G.811 гласит, что относительная нестабильность задающих генераторов в узлах связи цифровых сетей должна быть не хуже  $1 * 10^{-11}$  за сутки. Современные генераторы обеспечивают суточную относительную нестабильность частоты  $1 * 10^{-11}$ , например у рубидиевого атомного стандарта Ч1-50.

## Домашнее задание

1. Пользуясь настоящим описанием, рекомендуемой литературой и приложением изучите методы и устройства синхронизации в системах передачи дискретных сообщений (ПДС).

2. Для заданной скорости передачи и коэффициента деления (Кд) управляемого делителя частоты (УДЧ) определите номинальную частоту задающего генератора приёма.

3. Рассчитайте расхождение фазы за длительность 1 посылки при заданной нестабильности скорости передачи (при отключенной системе синхронизации).

4. Рассчитайте время поддержания синфазности (для  $\epsilon_{\text{доп}}=0.5$ ).

Вариант задания возьмите из таблицы 1.

Номинальная скорость передачи задается первой буквой, Кд УДЧ второй буквой, а отклонение реальной скорости передачи от номинальной скорости передачи третьей буквой Вашей фамилии.

Например, для фамилии МАРКОВ задание будет таким:

- номинальная скорость передачи (буква М): 1600 Бод;
- Кд УДЧ (буква А): 8;
- отклонение скорости передачи (буква Р): + 30 Бод;

Таблица 1- Варианты заданий

|      | 1,2,3 буквы Вашей фамилии |   |    |    |    | отклонение скорости передачи |
|------|---------------------------|---|----|----|----|------------------------------|
| 1000 | А                         | Ж | Н  | Ф  | Ы  | +60                          |
| 1100 | Б                         | З | О  | Х  | Ь  | +50                          |
| 1200 | В                         | И | П  | Ц  | Э  | +40                          |
| 1300 | Г                         | Й | Р  | Ч  | Ю  | +30                          |
| 1400 | Д                         | К | С  | Ш  | Я  | -40                          |
| 1500 | Е                         | Л | Т  | Щ  |    | -50                          |
| 1600 | Ё                         | М | У  | Ъ  |    | -60                          |
| Кд   | 8                         | 9 | 10 | 12 | 14 |                              |

## Описание лабораторной установки

После запуска программы на экране (смотрите рисунке 2) появится структурная схема компьютерной модели лабораторной установки. Она представляет собой систему передачи дискретных сообщений. Для получения на приёме тактовой частоты используется система синхронизации с дискретным управлением.

Назначение системы синхронизации– сформировать на приёме тактовую последовательность, которая будет отмечать границы принимаемых посылок. Это необходимо, чтобы приёмник мог определить, где находятся границы посылок для принятия решения о знаке принимаемой посылки (ноль или единица).

В блоке 1 (задающий генератор передачи) формируется тактовая последовательность, которая определяет скорость передачи.

В блоке 2 (датчик) на основе тактовой частоты и датчика формируется передаваемый сигнал.

В блоке 3 (канал) можно внести различные искажения в передаваемый сигнал.

В блоке 4 (фазовый детектор) происходит сравнение временного положения фронтов сигнала на выходе канала (моментов смены полярности) с состоянием управляемого делителя частоты (УДЧ).

В блоке 5 (устройство управления) происходит формирование управляющего сигнала для коррекции фазы УДЧ приёма.

В блоке 6 (управляемый делитель частоты) происходит деление частоты задающего генератора приёма и формирование частоты приёма.

В блоке 7 (задающий генератор приёмника) происходит формирование задающей частоты приёмника.

Опишем эти блоки подробнее.

В блоке задающего генератора передачи (блок 1) задаётся номинальная скорость передачи и отклонение реальной скорости от номинальной скорости. При помощи клавиш «+» и «-» можно задать знак отклонения. Если обе клавиши отжаты, то реальная скорость передачи равна номинальной скорости передачи. Если обе клавиши отжаты, то реальная скорость передачи равна номинальной скорости передачи.

Под этим блоком расположена панель, на которой имеются кнопки управления процессом моделирования:

|      |  |
|------|--|
| Стоп | - остановить процесс моделирования;  |
| →    | - продолжить процесс моделирования;  |
| ↔    | - уменьшить/увеличить скорость моделирования;  |
| Макс | - сделать скорость моделирования максимальной (при этом отключается отображение графиков на экране). |

В датчике сигнала (блок 2) имеется возможность установить вид передаваемого сигнала:

0 – постоянно передаётся нулевое значение;

1 – постоянно передаётся единичное значение;

1:1 – передаётся сигнал «ТОЧКИ», постоянно чередование нуля и единицы (01010101 ...);

1:3 – периодический сигнал состоящий из одной единицы и трёх нулей (10001000100...);

1:7 – периодический сигнал состоящий из одной единицы и семи нулей (10000000100...);

511 – псевдослучайный сигнал с периодом повторения 511 бит.

Имеется возможность задать собственную структуру сигнала.

Также имеется возможность получения случайного сигнала и задать вероятность появления смены знака посылки в этом сигнале.

В нижней части датчика расположены индикаторы количества переданных посылок и времени сеанса. Если щёлкнуть по ним мышью, то они примут исходные (нулевые) значения.



В канале (блок 3) можно вносить краевые искажения (отклонения реальных моментов смены полярности от номинальных) и дробления (появление дополнительных фронтов в пределах одной посылки) в передаваемый сигнал. С выхода канала сигнал поступает на вход фазового детектора. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.

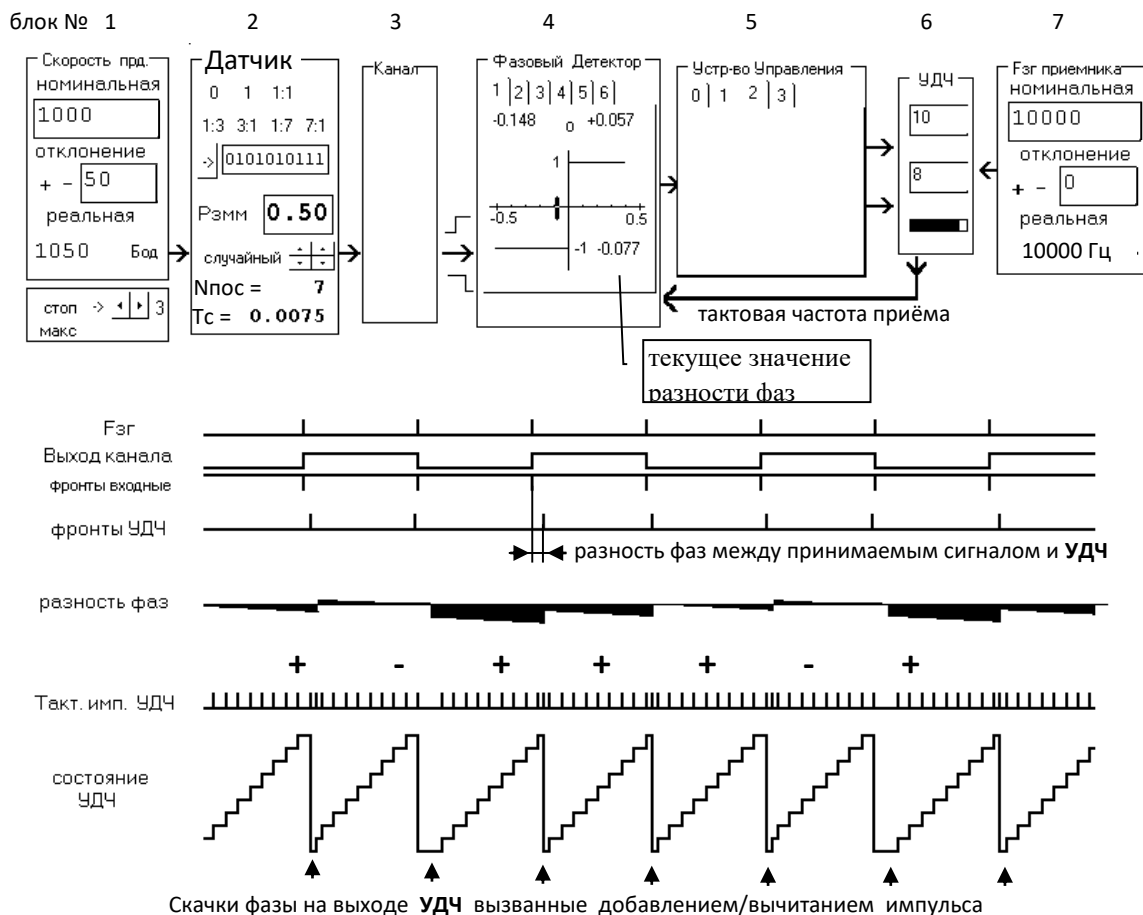


Рисунок 4 – Интерфейс программы

В фазовом детекторе (блок 4) происходит выделение сигнала рассогласования, указывающего величину и знак фазового сдвига между сигналами синхронизации, поступающими из канала (фронты входного сигнала), и сигнала на выходе управляемого делителя частоты.

Имеется возможность выбирать тип фазового детектора и его параметры. В верхней части фазового детектора имеются индикаторы пиковых значений расхождения фазы. Их значения можно сбросить кнопкой, расположенной между индикаторами. В нижнем правом углу расположен индикатор текущего значения расхождения фазы. Сигнал с выхода фазового детектора поступает на устройство управления.

В устройстве управления (УУ) (блок 5) производится анализ сигнала расхождения фазы и формируются управляющие сигналы, которые поступают на управляемый делитель частоты и корректируют его фазу.

Имеется возможность менять алгоритм работы устройства управления.

Первое УУ формирует импульс сброса управляемого делителя частоты, если в принимаемом сигнале произойдёт смена полярности.

Второе УУ в зависимости от сигнала на выходе фазового детектора формирует дополнительный импульс на вход счетчика или запрещает прохождение одного тактового импульса на вход счетчика от задающего генератора приёма.

Если в момент сравнения фаз (в момент появления фронта на выходе канала) окажется, что фаза УДЧ отстаёт от фазы сигнала на выходе канала (приёмник «отстаёт»), то на вход счётчика поступит дополнительный импульс. В результате тактовый сигнал на выходе делителя сдвинется на величину  $\Delta t$  ( $\Delta t$  - период следования импульсов задающего генератора приёма).

Если фаза счётчика опережает фазу сигнала на выходе канала (приёмник «спешит»), то УУ сформирует сигнал на запрет прохождения одного импульса от задающего генератора приёмника, в результате чего тактовая частота на выходе делителя частоты сдвинется в сторону отставания на  $\Delta t$ .

Третье УУ работает аналогично второму, только содержит усредняющее устройство (интегратор).

Если в момент сравнения фаз фаза УДЧ отстает от фазы принимаемого сигнала, то счетчик интегратора увеличивает своё значение на единицу. Если в момент сравнения фаз фаза делителя опережает фазу принимаемого сигнала, то счетчик интегратора уменьшает своё значение на единицу.

Тем самым коррекция фазы управляемого делителя частоты (добавление/вычитание импульса) происходит не после каждого момента сравнения фаз, а после того как интегратор достигнет некоторого порогового значения (его можно изменять). После коррекции фазы УДЧ счетчик интегратора сбрасывается в ноль.

Интегратор позволяет исключить мгновенные рассогласования фазы, вызванные действием помех.

В управляемом делителе частоты (УДЧ) происходит деление частоты задающего генератора приёма на коэффициент Кд. В результате этого на выходе УДЧ появляется сигнал с частотой, численно «почти» равной номинальной скорости передачи (если не производить коррекцию частоты УДЧ).

Эта разность частот передачи и приёма определяется выражением:

$$\Delta f = F_{\text{зг.пер}} - F_{\text{зг.прм}} / K_d, \quad 3$$

где  $F_{\text{зг.пер}}$  – реальная частота задающего генератора передатчика,

$F_{\text{зг.прм}}$  – реальная частота задающего генератора приёмника,

$K_d$  – коэффициент деления управляемого делителя частоты.

Под воздействием управляющих сигналов (добавить/вычесть импульс или обнулить УДЧ) поступающих из устройства управления можно не только свести  $\Delta f$  к нулю, но и минимизировать разность фаз между тактовой частотой приёма формируемой на выходе УДЧ и тактовой частотой передачи.

В блоке УДЧ имеется возможность менять коэффициент деления. Также имеется индикатор текущего значения счетчика УДЧ.

В блоке задающего генератора приёма (блок 7) задаётся номинальная частота тактового генератора приёмника и отклонение реальной частоты приёмника от но-

минальной частоты. При помощи клавиш «+» и «-» можно задать знак отклонения. Если обе клавиши отжаты, то реальная частота приёмника равна номинальной частоте.

### Лабораторное задание

1. Запустите программу лабораторной работы на выполнение.
2. Установите требуемые (как в домашнем задании) значения номинальной скорости передачи, нестабильность скорости передачи, коэффициент деления (Кд) управляемого делителя частоты (УДЧ), номинальную частоту задающего генератора приёма.
3. Проверьте правильность сделанных Вами расчетов.
4. Для установленных параметров определите полосу удержания системы синхронизации для различных видов сигналов 1:1, 1:3, 1:7, 511, 3:1,7:1.
5. Определите полосу удержания, если Кд УДЧ будет в 2 раза больше чем в предыдущем пункте (домашнем задании).
6. Определите погрешность синхронизации в зависимости от отклонения реальной скорости передачи от номинальной для двух видов сигналов 1:1 и 1:3. Номинальную скорость передачи и Кд УДЧ возьмите из домашнего задания.
7. В процессе выполнения пунктов 4,5,6 сделайте 4 распечатки показывающие работу системы с дискретной ФАПЧ.

### Содержание отчёта

1. Страница (титульная): Сокращённое названия университета, название кафедры, номер и название лабораторной работы, Ф.И.О выполняющего работу, Ф.И.О преподавателя, дату выполнения лабораторной работы.
  2. Страница: Цель работы, структурную схему устройства синхронизации с дискретным управлением (рисунок 2). Выполненное домашнее задание (смотрите пункт 2.1-2.3).
  3. Страница результаты работы по пунктам 5.4, 5.5 и 5.6.
  4. 4,5,6 листы. Выводы по работе и письменные ответы на контрольные вопросы. Минимально надо ответить на 5 вопросов, рекомендуется – 8. Для отличников – 10. Ответы снабдите соответствующими рисунками.
- Также вклейте в отчёт результаты полученные в пункте 7 лабораторного задания.

### Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы устройства синхронизации с непосредственным воздействием на задающий генератор?
2. Поясните принцип работы устройства синхронизации без непосредственного воздействия на задающий генератор?

3. Раскройте следующие понятия: абсолютная и относительная нестабильность частоты, погрешность синхронизации, время синхронизации, время поддержания синхронизма, вероятность срыва синхронизма, шаг коррекции.

4. Почему с увеличением шага коррекции (уменьшении Кд УДЧ) время вхождения в синхронизм уменьшается?

5. Как влияет точность синхронизации на верность передачи сообщений?

6. За сутки часы уходят вперёд на 5 секунд. Чему равна абсолютная и относительная нестабильность генератора в часах? За какое время часы уйдут вперёд на один час? (задающая частота кварцевого генератора в часах  $F_{зг} = 32768 \text{ кГц}$ )

7. Почему на сигнале 1:1 время вхождения в синхронизм будет меньше, чем на сигнале 1:7?

8. Поясните следующие понятия : полоса захвата, полоса удержания ?

9. Почему на сигнале 1:1 полоса удержания системы ФАПЧ будет шире, чем на сигнале 1:7?

10. На какую величину (в долях от длительности посылки) сместится стробирующий импульс за время перерыва в канале  $t=1 \text{ мин}$ , если взаимная относительная нестабильность генераторов передачи и приёма равна  $10^{-5}$ ?

11. Какой алгоритм подстройки фазы Вы используете при коррекции времени на своих часах

12. Вы решили на своих часах попробовать алгоритм подстройки частоты (времени) с непосредственным воздействием на генератор. Как это будет выглядеть?

### Лабораторная работа №6.

#### Изучение последовательного асинхронного интерфейса.

#### Цель работы

1.1. Изучить назначение, построение и программирование асинхронного последовательного интерфейса компьютера (IBM PC совместимого).

1.2. Получить практические навыки по программированию интерфейса, наблюдению и измерению сигналов на входе/выходе интерфейса.

1.3. Познакомиться с построением таблицы альтернативной кодировки.

1.4. Научиться производить синхронизацию осциллографа для наблюдения периодических сигналов со сложной структурой.

#### Домашнее задание

1. Постройте реализацию сигнала на выходе последовательного асинхронного интерфейса при передаче по нему Вашей фамилии (можете ограничиться первыми шестью буквами).

Покажите стартовые, информационные, проверочные и стоповые посылки.

Рассчитайте длительность элементарной посылки, время передачи одной буквы (знака) и всей фамилии (сообщения).

2. Определите, какие команды надо записать в регистры UART, чтобы настроить его на требуемый режим работы.

Варианты заданий представлены в таблице 1.

Скорость передачи задается первой буквой, вид проверки - второй буквой, а количество стоповых бит третьей буквой Вашей фамилии.

Например, для фамилии МАРКОВ задание будет таким:

- скорость передачи (буква М) - 9600 бод;
- вид проверки (буква А) - проверка на четность;
- количество стоповых бит (буква Р) - 2 бита;
- количество информационных бит возьмите равным 8.

Таблица 1- Варианты заданий

| скорость                | Кол-во стоп-бит: |          |      |   |
|-------------------------|------------------|----------|------|---|
| 1200                    | <b>А</b>         | И        | С    | 1 |
| 2400                    |                  | К        | Т    | 1 |
| 4800                    |                  | Л        | У    | 1 |
| 9600                    | <b>Г</b>         | <b>М</b> | Ф    | 1 |
| 19200                   | Д                |          | Х, Ц | 2 |
| 38400                   | Е, Ё             |          | Ч, Щ | 2 |
| 57600                   | Ж                | П        | Ш, Э | 2 |
| 115200                  | З                | <b>Р</b> | Ю, Я | 2 |
| проверка: ЧЕТ НЕЧЕТ НЕТ |                  |          |      |   |

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из компьютера, оснащенного последовательным асинхронным адаптером (в дальнейшем СОМ портом), индикатора состояния линий СОМ порта, модема, осциллографа и программного обеспечения, необходимого для выполнения работы.

### Описание программного обеспечения.

Программное обеспечение лабораторной работы состоит из программы с именем lg71.exe. Вид экрана при её запуске показан на рисунке 1.

При помощи этой программы можно:

- прочитать регистры последовательного порта (СОМ1 или СОМ2) и модифицировать их значения;
- постоянно выдавать в регистр данных требуемый символ, что позволяет наблюдать его реализацию на экране осциллографа;
- наблюдать состояние выходных и входных цепей СОМ порта.

При работе программы используются следующие клавиши:

- F2 - выбор требуемого порта (СОМ1 или СОМ2);
- F5 - установка режима задания скорости;

F6 - установка режима передачи одиночного знака;  
 F7 - установка режима непрерывной передачи;  
 F8 - установка режима непрерывной передачи с длинным стопом;  
 F10 - выход из программы;  
 ↑ ↓ - выбора требуемого регистра;  
 ← → - выбора требуемого разряда;  
 PageUp/PageDown - установка требуемого значения регистра.

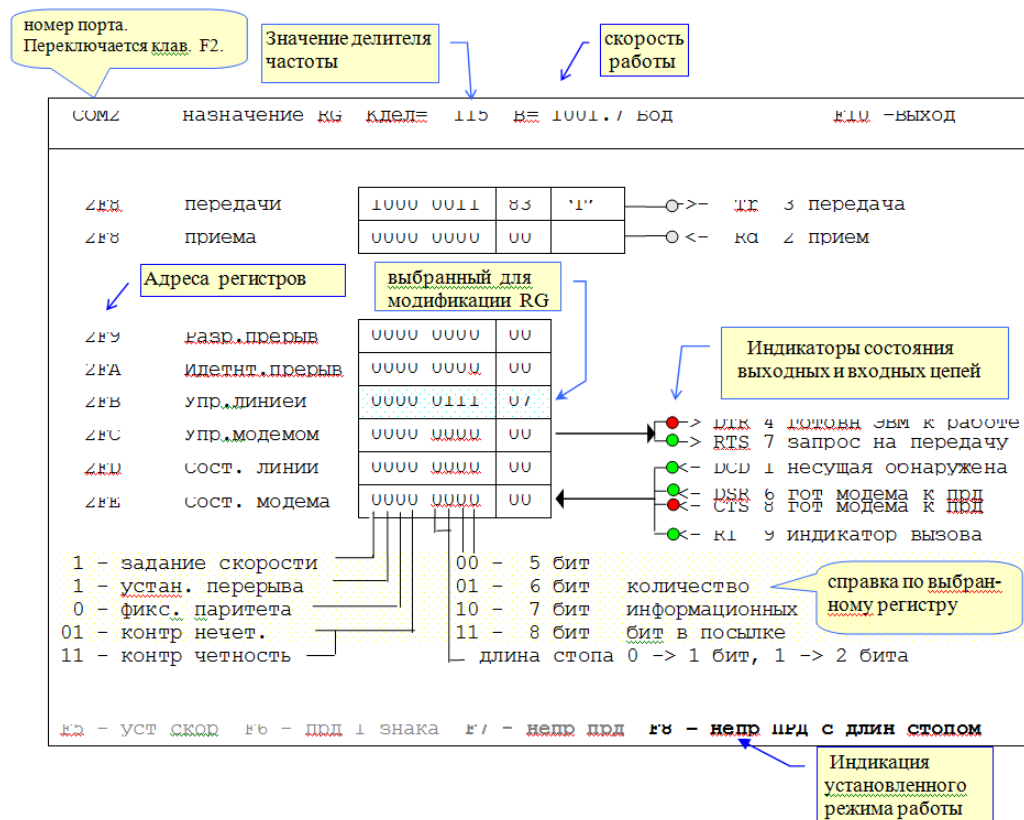


Рисунок 1 - Внешний вид окна экрана при работе программы

В верхней строке отображается выбранный порт, установленный коэффициент деления и скорость работы.

В нижней строке выводится, установленный в данный момент режим работы.

Режим задания скорости используется для задания коэффициента деления делителя скорости. В этот режим COM порт входит, если в регистре управления линией разряд D7 установить в 1.

Режим передачи одиночного символа используется для демонстрации стартстопного принципа при передачи одиночных символов. В этом режиме код, введенный с клавиатуры, записывается в регистр передачи и выдается в канал.

Режим непрерывной передачи используется для демонстрации применения стартстопного кода при номинальной длине стоповой посылки

Режим непрерывной передачи с длинным стопом используется для наблюдения реализаций стартстопного сигнала на экране осциллографа. При использовании других режимов трудно (порой невозможно) получить стабильное (не дрожащее) изображение на экране обычного осциллографа.

## Лабораторное задание

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой, руководствуясь описанием.
  2. Включите компьютер и осциллограф. Пользуясь системным меню (нажмите клавишу F2), запустите программу (выберите ЛР\_71 и нажмите Enter).
  3. Введите в управляющие регистры требуемые значения (должны быть определены в домашнем задании).
  4. Проверьте экспериментально правильность выполнения Вами своего домашнего задания.
  5. Пронаблюдайте для одной буквы изменение реализации сигнала, если:
    - увеличить / уменьшить скорость сигнала в 2 раза;
    - изменить количество информационных бит;
    - изменить вид контроля.
- Запишите, какие изменения для этого надо внести в управляющие регистры.
6. Пронаблюдайте управление модемом с помощью регистра управления модемом.
  7. Пронаблюдайте возможность контроля состояния модема при помощи регистра состояния модема.
  8. Измерьте выходные уровни сигналов СОМ порта на холостом ходу и при нагрузке  $R=1\text{кОм}$ . Рассчитайте выходные сопротивления передатчика порта.
  9. Определите пороги переключения входных компараторов.
  10. (отл) Исследуйте прохождение сигнала при включённом шлейфе.

### Методические указания по выполнению работы

1. Для ввода требуемого значения в регистры, необходимо клавишами PageUp/PageDown установить требуемое значение.
- Чтобы СОМ порт начал работать с нужной скоростью и в требуемом формате надо произвести следующее:
- выбрать требуемый порт клавишей F2 (к макету подключен порт СОМ2);
  - бит D7, регистра управления линией, установить в 1 (т.е войти в режим задания скорости);
  - записать младший и старший байт делителя скорости передачи;
  - в регистр управления линией записать нужное значение (которое определяет требуемый формат передачи);
  - убедиться, что выключен шлейф (бит D4 регистра управления модемом установлен в 0);
  - установить в 0 бит D7 регистра управления линией (т.е выйти из режим задания скорости);
  - записать в регистр передачи символ, который требуется передавать;
  - включить режим непрерывной передачи с длинным стопом (нажать F8).
- После этого СОМ порт начнет непрерывно передавать заданный символ, и если Вы подключите вход осциллографа к контакту передачи (3 ножка разъема), то сможете увидеть реализацию этого сигнала.

2. Выходные уровни и пороги переключения входных компараторов определите при помощи осциллографа.

Для определения порога переключения подайте на вход (например несущая обнаружена - 1 ножка разъема) напряжение от регулируемого источника напряжения (имеется на макете) и вращая регулятор напряжения определите по состоянию соответствующего бита в регистре состояния модема порог переключения. Входные пороги могут иметь гистерезис (т.е. переход из состояния 0 в состояние 1 происходит при напряжении  $U_0 \rightarrow 1$ , а переход из состояния 1 в состояние 0 происходит при напряжении  $U_1 \rightarrow 0$ ).

3. Для определения выходных сопротивлений необходимо измерить напряжение на выходах сначала на холостом ходе (выход не нагружен), а затем на нагруженном выходе. Для нагрузки выхода на макете имеется резистор  $R_{нагр}=1$  ком (ручку источника напряжения при этом измерении поверните до упора против часовой стрелки). Напряжения измерьте при помощи осциллографа. Расчетную формулу выведите самостоятельно. Схему проведения измерений смотрите в приложении 2.

4. Для получения стабильного изображения на экране осциллографа при наблюдении стартстопного сигнала надо:

- выбрать в качестве источника синхронизации 1 луч (нажать кнопку Y2)
- выбрать синхронизацию по уровню (нажать  $\curvearrowright$ );
- включить режим передачи с длинным стопом (нажать F8);
- выбрать ждущий режим работы развертки (нажать кнопку ждущ);
- вращая ручку «УРОВЕНЬ» добиться запуска развертки по положительно-му фронту (от начала стартовой посылки);

Реализация стартстопного сигнала с длинным стопом и процесс синхронизации показаны на рисунке 2.

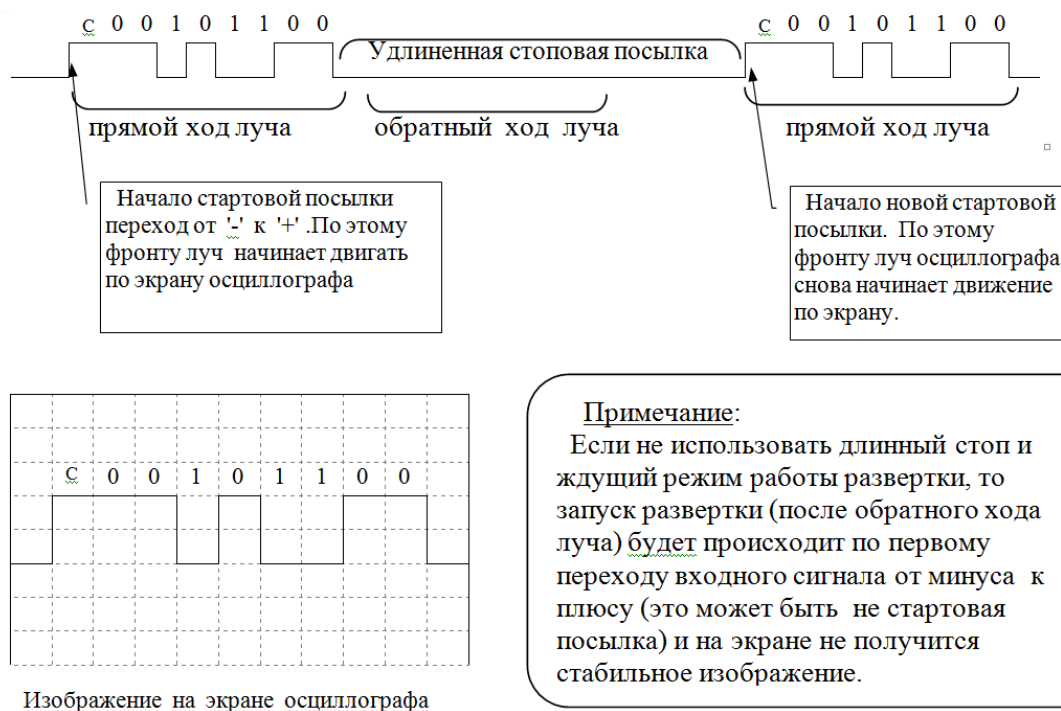


Рисунок 2 - Стартстопный сигнал с длинным стопом и процесс синхронизации



## Содержание отчета

1. Краткую формулировку цели работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Результаты измерения выходных уровней и порогов переключения входных компараторов.
4. Результаты измерения и расчета выходных и входных сопротивлений.
5. (отл) Анализ работы в режиме шлейфных испытаний ?.
6. Выводы по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы с рисунками и краткими пояснениями.  
(для удачно успевающих - 5, для хорошо - 10, для отличников -15, для особо одаренных - на все).

## Контрольные вопросы

1. Какое назначение последовательного порта в IBM PC?
2. Сравните последовательный и параллельный способ передачи?
3. Как происходит настройка на требуемую скорость работы?
4. Какие выходные уровни и пороги переключения должен иметь (имеет) COM порт?
5. Как задается требуемый формат передачи (приема)?
6. Поясните методику определения выходных сопротивлений?
7. Для чего и как используется проверочный бит?
8. Как надо настроить порт, чтобы на его выходе появился меандр с частотой 500 Гц?
9. Поясните методику получения стабильного изображения на экране осциллографа при наблюдении стартстопного сигнала?
10. Как зная скорость и формат передачи рассчитать длительность элементарной посылки, кодовой комбинации и всего сообщения?
11. Почему «сгорают» COM порты?
12. Какие скорости обмена приняты для последовательной передачи?
13. Какую структуру имеет таблица альтернативной кодировки?
14. Как расшифровать сокращение RS-232C ?
15. Ограничения (недостатки) интерфейса RS-232C?
16. Стандарты RS-422, RS-423 и RS-449?
17. Что такое симметричное и несимметричное включение?
18. Какие имеются преимущества и недостатки при использовании двухполюсных посылок по сравнению с однополюсными?
19. По каким параметрам используемый в лабораторной работе порт не совпадает с требованием стандарта RS-232C?
20. Поясните смысл следующих понятий (снабдив ответ соотв. рисунками):  
старт бит, биты данных, бит паритета, стоп бит, делитель опорной частоты, середина битовых интервалов, внутренние стробы, фазовые искажения, ложное фазирование, RS232C, RS422A, RS423A, RS485, физический уровень передачи, несимметричные линии, симметричные линии, синфазная помеха, парифазная поме-

ха, коэффициент подавления синфазной помехи, дифференциальный выход, дифференциальный вход, витая пара, токовая петля, асинхронный режим обмена, синхронный режим обмена, местный шлейф, удаленный шлейф, тестовая заглушка, гальваническая развязка, логическая единица, логический ноль, SPACE, MARK, ON, OFF гистерезис приемника, сигнальная земля, защитное заземление, DB9, DB25, UART, нуль модемный кабель (Zero-modem или Z-modem), базовый адрес, IRQ, ASCII, кодировка IBM, знакогенератор, альтернативная кодировка, псевдографика, таблица 866.

### Пояснения по выполнению домашнего задания

1. Построим реализацию сигнала на выходе асинхронного последовательного интерфейса при передаче по нему слова **МАРКОВ**.

Для этого:

- по таблице альтернативной кодировки определим коды для каждой буквы фамилии в шестнадцатеричном виде;
- переведем шестнадцатеричные числа в двоичные;
- определим проверочные разряды. Если идет проверка на четность, то суммарное количество единиц в кодовой комбинации (8 информационных и 1 проверочный разряд) должно быть четным. При проверке на нечетность суммарное количество единиц должно быть нечетным.
- результаты вычислений запишем в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений

| БУКВА | ШЕСТНАДЦАТЕРИЧНОЕ | ДВОИЧНОЕ  | ПРОВЕРОЧНЫЙ |
|-------|-------------------|-----------|-------------|
| М     | 8С                | 1000 1100 | 1           |
| А     | 80                | 1000 0000 | 1           |
| Р     | 90                | 1001 0000 | 0           |
| К     | 8А                | 1000 1010 | 1           |
| О     | 8Е                | 1000 1110 | 0           |
| В     | 82                | 1000 0010 | 0           |

При построение реализации сигнала, рисунок 3, надо учесть следующее:

- нулю соответствует положительная, а единице отрицательная посылки;
- каждая кодовая комбинация начинается стартовой посылкой, которая имеет уровень логического нуля;
- после стартовой посылки следуют 8 информационных посылок, причем начиная с D0 и кончая D7;
- если установлен режим контроля (проверка на четность или проверка на нечетность), то за последним информационным битом (D7) следует проверочный бит, далее следует стоповая посылка;

Длительность одной элементарной посылки  $T_0 = 1/V$ , где  $V$  - скорость передачи (количество передаваемых посылок в одну секунду).

Если  $V = 9600$  бод, то  $T_0 = 1/9600 = 0.0001041$  сек = 0.1041 мс.

Длительность передачи одной комбинации (буквы) равна:

$T_{комб} = T_0 * K$ , где  $K$  - количество посылок в одной кодовой комбинации.

Для рассматриваемого примера:  $K = 1(\text{Старт}) + 8(\text{информ}) + 1(\text{проб}) + 2(\text{стоп}) = 12$ .

$T_{комб} = T_0 * K = 0.1042 * 12 = 1.25$  мс.

Время необходимое для передачи всего сообщения равно:

$T_{сообщ} = T_{комб} * N$ , где  $N$  - количество букв в сообщении.

Для рассматриваемого примера  $N = 6$  (МАРКОВ).

$T_{сообщ} = 1.25 * 6 = 7.5$  мс.

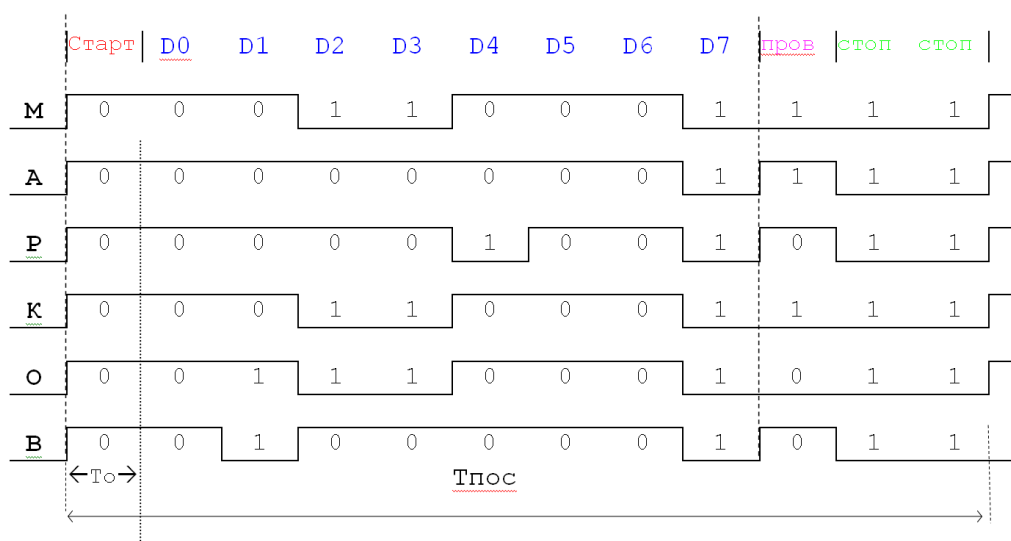


Рисунок 3 – Реализация сигналов

2. Определим, какие управляющие команды надо записать в регистры UART, чтобы настроить порт на требуемый режим работы ( $V = 9600$  бод, 8 информационных, проверка на четность, 2 стоповых бита).

Рассчитаем коэффициент деления делителя, необходимый для получения требуемой скорости работы.

Скорость работы порта определяется по формуле  $V = 115200 / K_{дел}$ ,

$K_{дел}$  - коэффициент деления делителя.

$K_{дел} = 115200 / V = 115200 / 9600 = 120 = 7 * 16 + 8 = 0078h$ .

Значения регистра управления линией представлены на рисунке 4.

Таким образом чтобы настроить UART на требуемый режим работы надо:

- установить режим задания скорости. Для этого в регистр управления линией (смещение +3) надо записать число 80h (D7 равен 1, остальные разряды равны 0);
- записать по адресу регистра данных (смещение +0) младший байт коэффициента деления (число 78h);
- записать по адресу регистра управления прерываниями (смещение +1) старший байт коэффициента деления (число 00h);

- записать в регистр управления линией число 1Fh.
- записать в регистр управления модемом число 00h (чтобы выкл. шлейф).



Рисунок 4 - Значения регистра управления линией

### Асинхронный адаптер

1. Телекоммуникационные устройства имеют последовательный порт (интерфейс). Он может быть собран на отдельной плате или располагаться непосредственно на системной плате. Наиболее широкое распространение получил асинхронный интерфейс (порт) RS-232C.

Этот интерфейс на соединение оборудования был разработан в 1969 г. рядом крупных производителей электронного оборудования (Recommended Standard номер 232 ). МККТТ использует аналогичные рекомендации V.24, V.28.

Стандарт RS-232 описывает 4 интерфейсные функции:

- определение управляющих сигналов через интерфейс;
- определение формата данных передаваемых через интерфейс;
- передачу тактовых сигналов;
- электрические характеристики интерфейса.

Последняя редакция этого стандарта имеет на конце индекс C (RS232C).

Асинхронный интерфейс часто называют COM портом (от слова COMmunication – коммуникационный, т.е. используемый для организации связи).

Через COM порт, подключают внешние устройства: модем, манипулятор, мышь, принтер, сканер, плоттер, измерительные приборы, другой компьютер и т.д.

Модем, подключенный к компьютеру через последовательный порт, позволяет обмениваться данными с другим компьютером по обычной телефонной линии. Если компьютеры расположены близко друг от друга, то их можно связать с помощью специального кабеля, называемого нуль - модемом. Этот кабель подключается к COM портам обоих компьютеров и позволяет производить обмен данными со скоростью до 115200 бит/с.

Блок схема асинхронного адаптера показана на рисунке 5.

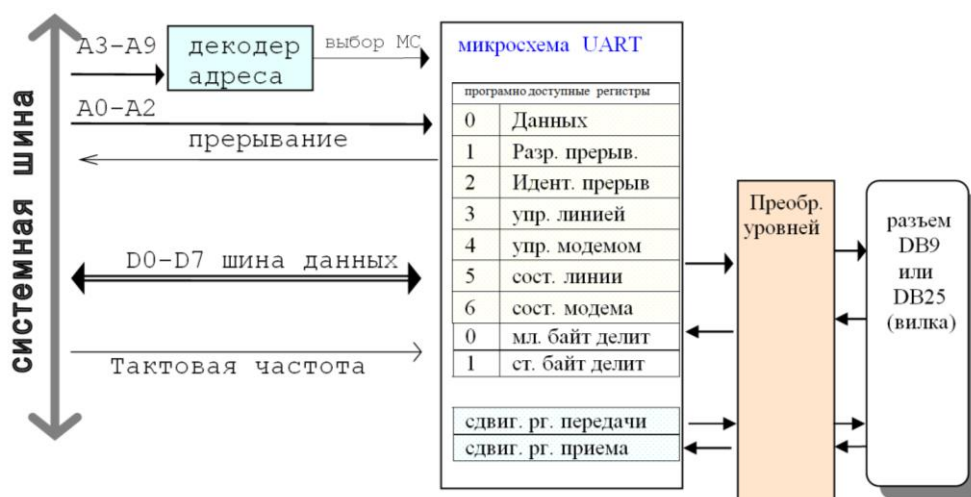


Рисунок 5 - Блок схема асинхронного адаптера

Каждому COM порту соответствует несколько регистров, через которые программа получает к нему доступ и определенная линия IRQ (запрос на прерывание), которая используется для информирования процессора об изменениях в состоянии порта.

Последовательная передача данных может осуществляться в асинхронном или синхронном режимах. При асинхронном режиме каждому информационному блоку предшествует стартовая посылка, сигнализирующая приемнику о начале передачи очередной кодовой комбинации. За ней следуют информационные посылки (как правило 5, 7 или 8), проверочная посылка (если требуется) и стоповая (она всегда обратной полярности по отношению к стартовой).

Все посылки, кроме стоповой, имеют одинаковую длительность  $T_0$ . Стоповая посылка может иметь любую длительность, но не менее  $T_0$ .

Так как начало передачи очередной кодовой комбинации жестко не связано с передачей предшествующей, то такой способ называют асинхронным (не связанным во времени). Обычный COM порт поддерживает только асинхронный режим работы.

### Аппаратная реализация

Основой COM порта служит микросхема универсального асинхронного приемопередатчика, в дальнейшем UART (UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Есть несколько разновидностей этой микросхемы Intel 8250, 1655, 1655A. Также функции этой микросхемы могут быть реализованы на одной специализированной СБИС вместе с другими контроллерами (игровой порт, параллельный порт, контроллер гибких и жестких дисков). Для каждого COM порта микросхема UART содержит буферные регистры передатчика и приемника данных, а также управляющие регистры. Все эти регистры доступны через команды ввода/вывода.

При передаче байта он записывается в буферный регистр передатчика, откуда переписывается в сдвиговый регистр. Затем этот байт выдвигается из сдвигового ре-

гистра по битам (младшим битом вперед). Аналогично работают сдвиговый и буферный регистры приемника.

Программа имеет доступ только к буферным регистрам. Копирование информации в сдвиговый регистр передачи, из сдвигового регистра приема и сдвиг данных в этих регистрах выполняются микросхемой UART автоматически. Также автоматически происходит добавление (изъятие) стартового, стопового, проверочного бита. Внешне каждый COM порт представлен разъемом. (который, как правило, располагаются на задней стенке системного блока). Наиболее часто используются 2 типа разъемов: DB9 и DB25 (9 и 25 контактов соответственно). Несмотря на разное количество контактов, они передают одинаковые сигналы. При необходимости можно использовать переходник между разъемами DB9 и DB25. В таблице 3 представлена разводка разъемов со стороны COM-порта.

| НАЗНАЧЕНИЕ КОНТАКТА                                  |     | ВЫХ. | ВХОД | DB9 | DB25              |
|--|-----|------|------|-----|-------------------|
| Детектор прин.с линии сигнала<br>Data Carrier Detect | DCD |      | +    | 1   | 8                 |
| Принимаемые данные<br>Received Data                  | RD  |      | +    | 2   | 3                 |
| Передаваемые данные<br>Transmitted Data              | TD  | +    |      | 3   | 2                 |
| Готовность выходных данных<br>Data Terminal Ready    | DTR | +    |      | 4   | 20                |
| Сигнальное заземление<br>Signal Ground               | SG  |      | +    | 5   | 7                 |
| Готовность данных<br>Data Set Ready                  | DSR |      | +    | 6   | 6                 |
| Запрос для передачи<br>Request To Send               | RTS | +    |      | 7   | 4                 |
| Сброс для передачи<br>Clear to Send                  | CTS |      | +    | 8   | 5                 |
| Индикатор вызова<br>Ring Indicator                   | RI  |      | +    | 9   | 8                 |
| Защитное заземление<br>Frame Ground                  | FG  |      |      | нет | 1                 |
| не используются                                      |     |      |      | нет | 9-19, 21<br>23-25 |

Таблица 3 - Разводка разъемов со стороны COM-порта

### Электрические требования

Используемые в интерфейсе уровни сигналов отличаются от уровней сигналов, действующих в компьютере. Для согласования используются специальные микросхемы преобразователей уровней.

Для передатчика приняты следующие уровни:

Уровень напряжений в пределах от +5В до +15В считается высоким и представляет логический «0».

Уровень напряжений в пределах от -5В до -15В считается низким и представляет логической «1».

Приемник воспринимает (должен воспринимать) уровни от +3В до +25В как логический «0», а уровни от -3В до -25В, как лог. «1». Диапазон -3 до +3В зона нечувствительности (гистерезис приемника).

Подключение и отключение интерфейсных кабелей должно производиться при отключённом питании компьютера. Все уровни сигналов измеряются относительно цепи сигнального заземления. Уровни сигналов интерфейса RS-232 представлены на рисунке 6.

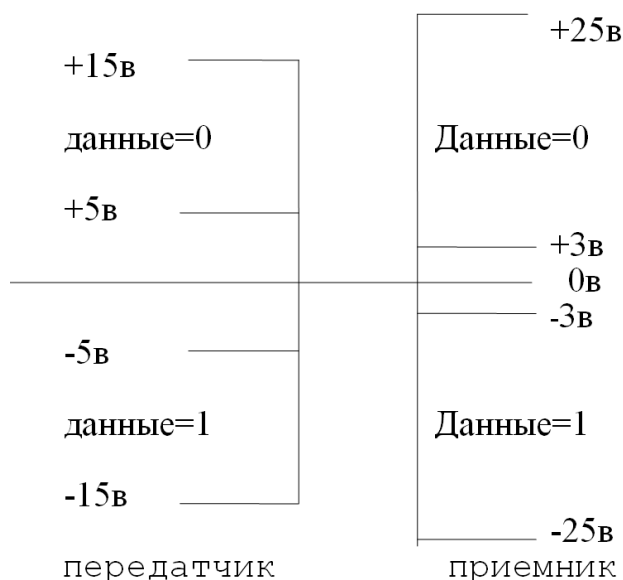


Рисунок 6 - Уровни сигналов интерфейса RS-232

### Регистры UART

UART имеет несколько программно доступных регистров, которые представлены в таблице 4. Эти регистры используются при управлении работой UART и для приема и передачи данных. В таблице дано описание этих регистров.

Таблица 4 - Программно доступные регистры UART

| Регистр                  | Адрес для<br>COM1 COM2 |     | Смещение | Дополнительная<br>функция |
|--------------------------|------------------------|-----|----------|---------------------------|
| Разрешения прерываниями  | 3F9                    | 2F9 | +1       | старший байт делителя     |
| Идентификации прерывания | 3FA                    | 2FA | +2       |                           |
| Управления линией        | 3FB                    | 2FB | +3       |                           |
| Управления модемом       | 3FC                    | 2FC | +4       |                           |
| Состояния линии          | 3FD                    | 2FD | +5       |                           |
| Состояния модема         | 3FE                    | 2FE | +6       |                           |

Далее (на примере микросхемы Intel 8250) идет описание этих регистров. Справа от регистра указан адрес регистра (COM1/COM2), смещение регистра относительно базового адреса (регистра данных) и операции которые производятся с регистром: **wr** - чтение; **rd** - запись; **rd** - при чтении считывается то, что было записано.

#### Регистр данных (3F8/2F8 +0 wr/rd)

Этот регистр расположен по базовому (начальному) адресу COM порта. Он используется для обмена данными и для задания скорости обмена. При передаче данных в этот регистр надо записать передаваемый байт данных. При приеме данных от внешнего устройства принятый байт можно прочитать по этому же адресу.

Если установлен режим задания скорости (в регистре управления линией разряд D7 установлен в 1), то в этот регистр записывается младший байт коэффициента деления делителя скорости.

#### Регистр разрешения прерываний (3F9/2F9 +1 wr / rd)

Этот регистр используется для управления прерываниями, или для ввода значения старшего байта делителя частоты.

В режиме разрешения прерываний регистр имеет формат:

- D0 - разрешение прерывания при приеме очередного слова;
- D1 - разрешение прерывания при готовности передатчика;
- D2 - разр. прерыв. при обнаружении состояния BREAK или при ошибке;
- D3 - разр. прерыв. по изменению сост. входных линий: CTS, DSR, DCD, RI.;
- D4-D7 не используются.

#### Регистр идентификации прерываний (3FA/2FA +2 rd)

После того как произошло прерывание от COM порта, программа может прочитать значение этого регистра, чтобы определить причину его возникновения.

- D0 - Если этот бит равен 1, значит есть прерывание.
- D1-D2 - Эти два бита определяют источник прерывания.
  - 0 0 - произошло изменение состояния входных линий
  - 0 1 - буфер передатчика пуст.
  - 1 0 - в буфере приемника имеются данные.
  - 1 1 - ошибка по приему: переполнение приемника, ошибка четности, ошибка формата (нет стопа).
- D3-D7 - считываются нулями.

#### Регистр управления линией (3FB/2FB +3 wr/rd)

Этот регистр доступен для записи и чтения (считывается то, что было записано) и используется для задания различных параметров, рисунок 7.

- D0 - D1 - задают количество информационных бит в стартстопной посылке.
  - 00 - 5 бит, 01 - 6 бит, 10 - 7 бит, 11 - 8 бит.
- D2 - определяет количество стоповых бит.
  - 0 - 1 бит, 1 - 2 бита (если используется 5 инф. бит, то 1,5 бита).
- D3 - D4 - управляют проверкой на четность (нечетность).
  - 00, 01 - контроль не выполнять.
  - 10 - делать проверку на нечетность.
  - 11 - делать проверку на четность.



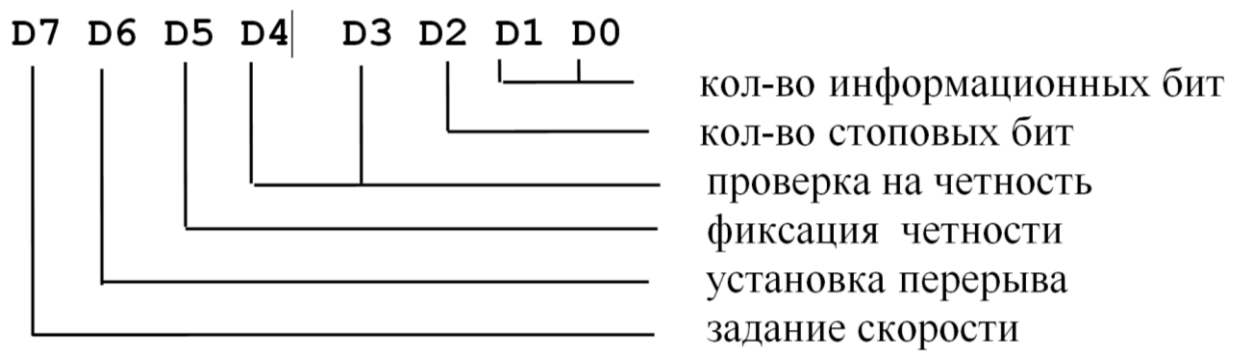


Рисунок 7 - Регистр управления линией

D5 - фиксация четности. При установке этого бита, бит четности всегда принимает значение 0, если биты D3, D4 равны 1, или 1, если биты D3, D4 равны 01.

D6 - Установка перерыва. Установка в 1 этого бита вызывает постоянный вывод стартовой посылки.

D7 - Этот бит используется для доступа к регистру установки скорости. Если этот бит равен 1, то регистр данных и регистр управления прерываниями используется для загрузки делителя частоты. Если этот бит равен нулю, то регистр данных и регистр управления прерываниями используются по прямому назначению.

#### Регистр управления модемом (3FC/2FC +4 wr /rd)

Этот регистр управляет состоянием выходных линий DTR, RTS, OUT1, OUT2 и включением шлейфа.

D0 - управление линией DTR.

D1 - управление линией RTS.

D2 - управление линией OUT1.

D3 - управление линией OUT2 (если установлен, то UART может вырабатывать прерывания).

D4 - управление шлейфом (если установлен в 1, то выход передатчика подключается к входу приемника).

#### Регистр состояния линии (3FD/2FD +5 wr/rd)

Этот регистр позволяет программе определить состояние блоков приема/передачи, а также наличие ошибок, которые могут произойти при обмене данными.

D0 - Данные получены. Когда из канала связи посылка полностью поступит на вход приемника этот бит устанавливается в 1. При чтении данных этот бит сбрасывается.

D1 - Ошибка переполнения. Если принят новый байт данных, а предыдущий еще не был считан программой, то этот бит устанавливается в 1. Этот бит сбрасывается когда процессор считывает содержимое регистра состояния линии.

D2 - Ошибка четности. Если этот бит установлен, то принятая посылка содержит неверный бит проверки на четность (нечетность).

D3 - Ошибка формата. Устанавливается при отсутствии стопового бита (т.е. если на позиции стоп бита обнаружена посылка с нулевым логическим уровнем).

D4 - Обнаружена длинная стартовая посылка. Этот бит устанавливается, когда на вход приемника поступает логический ноль дольше, чем время передачи полного символа (полное время = стартовая посылка + биты данных + бит четности + стоп биты ).

D5 - Регистр хранения передатчика пуст. Если этот бит установлен в 1, то можно записывать очередной байт для передачи.

D6 - Регистр сдвига передатчика пуст. Если этот бит установлен в 1, то значит UART передал в канал последний, записанный в него, байт данных.

D7 - не используется.

#### Регистр состояния модема (3FE/2FE +6 rd)

Этот регистр позволяет программе определить состояние управляющих сигналов передаваемых модемом к COM порту.

D0 - Если равен 1, то линия CTS изменила состояние.

D1 - Если равен 1, то линия DSR изменила состояние.

D2 - Если равен 1, то линия RI изменила состояние.

D3 - Если равен 1, то линия DSD изменила состояние.

D4 - Текущее состояние линии CTS.

D5 - Текущее состояние линии DSR.

D6 - Текущее состояние линии RI .

D7 - Текущее состояние линии DCD.

Биты D0 - D3 сбрасываются после чтения регистра состояния модема.

Примечание.

В режиме шлейфа (установлен в 1 бит D4 регистра управления модемом) внутри UART организуется внутренний шлейф (выходы соединяются со входами):

- выход передатчика переводится в состояние логической 1;
- вход приемника отключается от цепи идущей от преобразователя уровня и подключается к выходу сдвигающего регистра передатчика;
- входы DSR,CTS,RI и DCD отключаются от входных линий и внутренне управляются битами DTR,RTS,OUT1 и OUT2;
- выходы управления модемом переводятся в выкл. состояние (лог 0).

Переданные данные в последовательном виде сразу поступают на вход приемника. Такой режим позволяет проверить работу микросхемы и обработку прерываний.

Наличие COM портов их количество и адреса, по которым они расположены, можно увидеть в таблице, которая выводится на экран компьютера в самом начале загрузки системы.

В последней разработке микросхемы UART (Intel 16550A) назначение управляющих бит аналогично микросхеме Intel8250, но с некоторыми дополнениями, которые в данной работе не рассматриваются. Схемы измерения выходных сопротивлений представлены на рисунке 8.

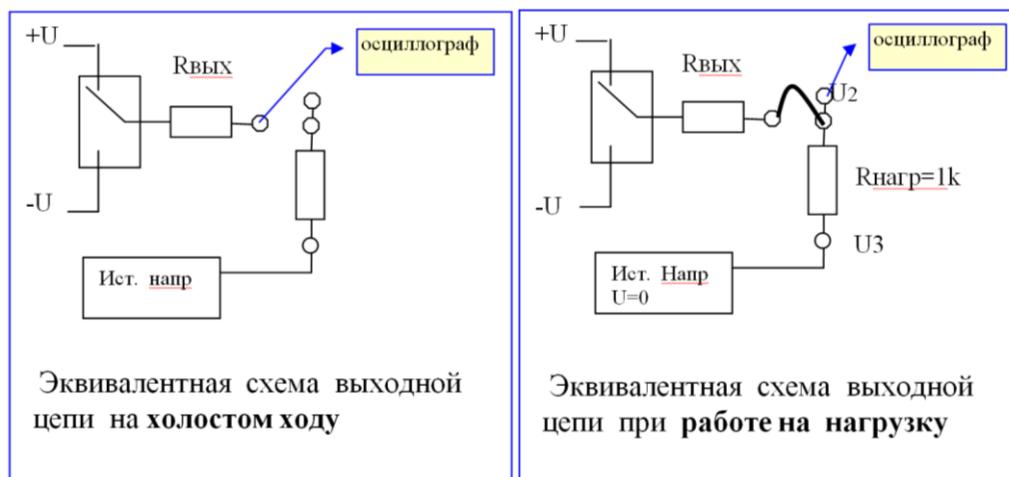


Рисунок – 8 Схемы измерения выходных сопротивлений

### Таблица альтернативной кодировки

В таблице приводится альтернативный вариант кодировки, получивший наибольшее распространение в России [10]. Под кодировкой здесь понимается однозначное соответствие чисел (0-255) и графических, управляющих символов. Эта кодировка является однорегистровой. Каждому символу соответствует восьмиразрядное двоичное число. Кодовую таблицу можно представить состоящей из двух половин. Первая половина с кодами от 0-127 регламентирована стандартом на коды ASCII.

В нулевом и первом столбцах расположены управляющие символы (перевод строки, возврат каретки, звуковой сигнал и т.д.), а в 2-7 столбцах расположены цифры от 0-9, буквы латинского алфавита и специальные знаки (точки, запятые и т.д.). На позиции 20h (второй столбец, нулевая строка) расположен символ вызывающий пробел.

Вторая половина символов с кодами от 128 до 255 используется для размещения символов псевдографики и национального алфавита.

Этот вариант сохраняет расположение символов псевдографики на том же месте (столбцы B,C,D), что и знакогенератор фирмы IBM, однако символы кириллицы (русские буквы) не образуют непрерывный массив.

Тот факт, что символы псевдографики при альтернативной кодировке кодируются так же, как и в стандартном знакогенераторе фирмы IBM имеет большое значение. Это позволяет без искажений наблюдать на экране РС (или при распечатке на бумаге) тексты (программы) в которых используются символы псевдографики независимо от того используется ли стандартная IBM или альтернативная кодировка (при этом не должны использоваться символы расположенные 8,9,A,E,F столбцах). В нашей стране раньше использовались различные варианты кодировки столбцов 8-F (гостовский, минский и т. д.).

Во всех этих кодировках столбцы с псевдогафикой располагались иначе чем в кодировке IBM. Такое несоответствие практически затрудняет эксплуатацию разнообразного программного обеспечения (и чтение текстов) зарубежного производства, использующего псевдографику. В 1989 году альтернативная таблица была принята фирмой IBM в качестве стандарта для Советского Союза ( а теперь и для России).

Чтобы по таблице было легко определить код символа, сверху и слева к таблице подрисованы столбики с шестнадцатеричными числами от 0 до F , которые определяют номер столбца и номер строки.

Так например буква Ф расположена в 9 столбце и 4 строке (счет идет с нуля). Значит её код будет 94h. Буква h указывает, что число записано в шестнадцатеричной системе. Код буквы N будет 4Eh. Код управляющего символа при приеме которого РС издаст короткий звуковой сигнал равен 07h.

Таблица соответствия десятичных, шестнадцатеричных и двоичных чисел представлена в таблице 4.

| Десят. | шестн. | двоичное |
|--------|--------|----------|
| 0      | 0      | 0000     |
| 1      | 1      | 0001     |
| 2      | 2      | 0010     |
| 3      | 3      | 0011     |
| 4      | 4      | 0100     |
| 5      | 5      | 0101     |
| 6      | 6      | 0110     |
| 7      | 7      | 0111     |
| 8      | 8      | 1000     |
| 9      | 9      | 1001     |
| 10     | A      | 1010     |
| 11     | B      | 1011     |
| 12     | C      | 1100     |
| 13     | D      | 1101     |
| 14     | E      | 1110     |
| 15     | F      | 1111     |

Для перевода двухразрядного шестнадцатеричного числа в двоичное, надо каждый разряд представить в виде двоичного числа.

Например число E3h = 11100011b

E
3

число C5h = 11000101b

C
5

Буква **h** в конце числа указывает, что число шестнадцатеричное(hexadecimal), а буква **b**, что число двоичное (binary). Если в конце числа не стоит никакой буквы, то это десятичное число. Если хотят подчеркнуть что число десятичное, то ставят букву **d** (decimal). Используются и другие способы указания типа числа.

Таблица 4 - Таблица соответствия десятичных, шестнадцатеричных и двоичных чисел

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марченко, М. В. Системы документальной электросвязи: учебное пособие по дисциплине. — Ульяновск: УлГТУ, 2007. — 90 с. ISBN 978-5-9795-0085-0.
3. Авдеев В.А. Периферийные устройства: интерфейсы, схемотехника, программирование. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 848 с.: ил.
4. Шувалов В.П. Передача дискретных сообщений М Радио и связь 1990.
5. Емельянов Г.А. Шварцман В.О. Передача дискретной информации М Радио и связь 1990.
6. Прикладная теория информации. Дмитриев В. И. - М.: Высшая школа, 1984.
7. Основы передачи дискретных сообщений: Учебник для вузов/ Ю.П.Куликов, В.М.Пушкин, Г.И.Скворцов и др.: Под редакцией В.М.Пушкина.-М.: Радио и связь, 1992.
8. Передача дискретных сообщений. Под редакцией В.П.Шувалова. [с. 49 - 54; с. 245 - 297] —М.:Радио и связь,-1990-464 с.:ил.-
9. Теория передачи дискретной информации: Учебник для вузов связи. Шварцман В.О., Емельянов Г.А. - М.:Связь, 1979.-424 с., ил. с 150 - 172.
10. Синхронные сети передачи данных./ В.О. Шварцман, Н.Н.Етрухин, М.А.Карпинский и др.: Под ред В.О. Шварцмана.-М.:Радио и связь, 1988.-256с.: ил. ISBN 5-256-00109-4.