

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Профиль подготовки «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»

(Электронный документ)

Невинномысск 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Организация практикума.....	3
Комплект оборудования типа К32.....	4
Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Практическая работа 1 Исследование работы логических элементов	6
Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Практическая работа 2 Исследование работы комбинационных логических цепей.....	11
Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Практическая работа 3 Исследование работы триггеров.....	15
Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Практическая работа 4 Исследование работы реверсивных счетчиков импульсов.....	19
Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Практическая работа 5 Исследование работы счетчиков и дешифраторов....	29
Тема 3 Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы	
Практическая работа 6 Исследование работы селектора-мультиплексора	35
Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов	
Практическая работа 7 Исследование работы цифрового сумматора в интегральном исполнении.....	45
Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов	
Практическая работа 8 Исследование работы регистров сдвига информации	52
Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов	
Практическая работа 9 Исследование работы преобразователей кодов	63

Организация практикума

Все практические работы проводятся фронтально. Подгруппа студентов распределяется преподавателем на бригады по 2 – 4 человека.

Каждое занятие состоит из четырех этапов: подготовки к практической работе; предварительной беседы преподавателя; выполнения практической работы; составления отчета и защиты выполненной работы.

В ходе предварительной беседы преподаватель раскрывает смысл и цель предстоящей работы, напоминает основные положения теории, разбирает методику сложных измерений и производит допуск к работе по результатам устного опроса.

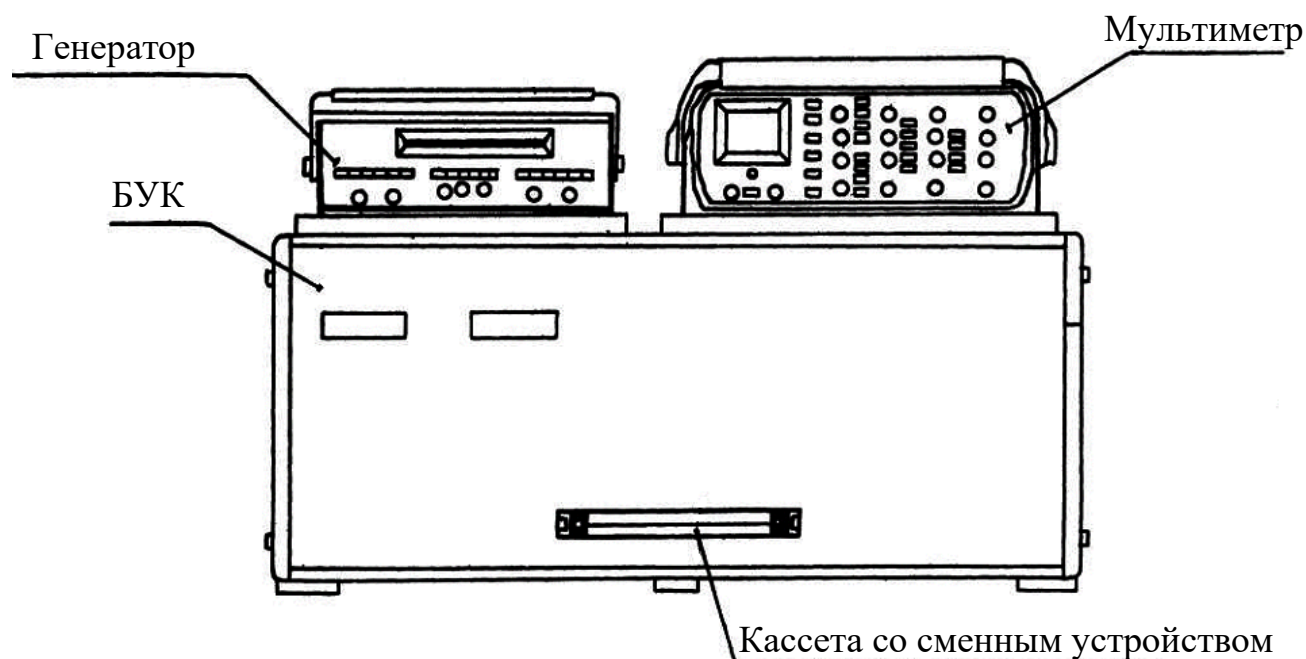
Подготовка к работе проводится студентами самостоятельно и включает повторение теоретического материала, ответы на контрольные вопросы, заготовку таблиц для отчета и выполнение предварительных расчетов.

Питание на сменные устройства (+5В, +15В, –15В) подается после проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки испытуемой схемы и получения разрешения на проведение экспериментальных работ. После окончания работы, прежде чем выключить питание, студент должен показать полученные результаты преподавателю.

В отчете должны быть приведены: исследуемая схема; таблицы результатов измерения; необходимые расчеты; ответы на контрольные вопросы. Ход выполнения работ должен сопровождаться краткими пояснениями. После выполнения работы стенд и приборы обесточиваются, съемные элементы и соединительные провода предъявляются преподавателю или лаборанту.

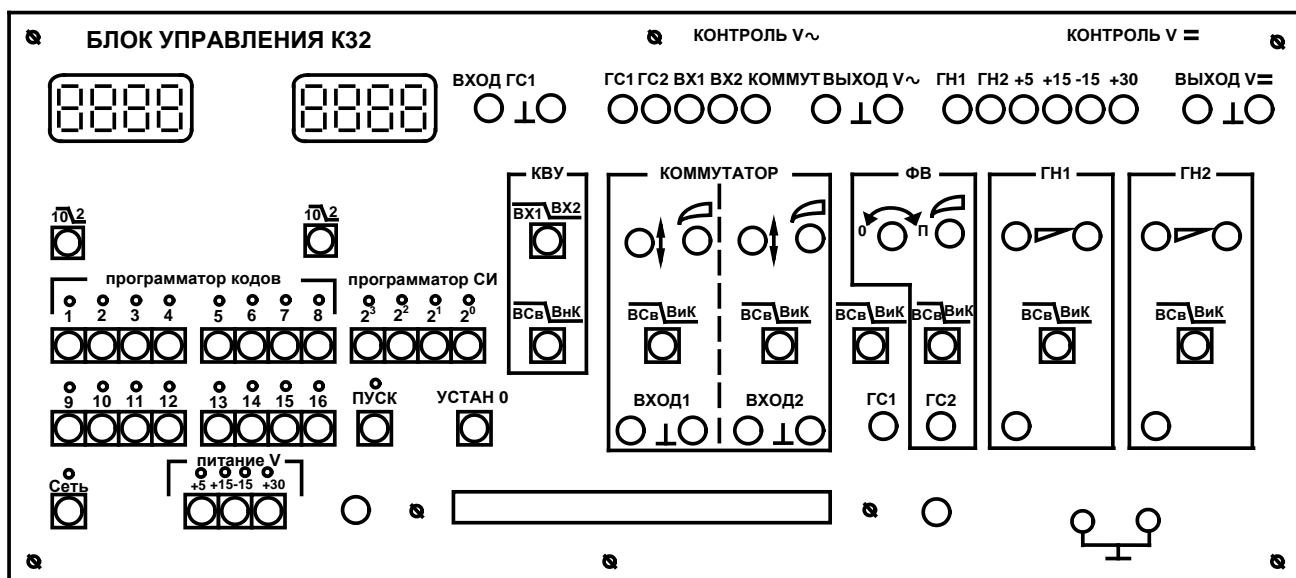
Комплект оборудования типа К32

Комплект оборудования К32 состоит из следующих составных частей (см. рис. на стр. 5): блока управления комплектом (БУК); блока мультиметра К32 (БМ К32) (далее мультиметр); устройства вспомогательного для осциллографов типа ЛЗ1 (далее генератор); кассеты устройств сменных (УС).



БУК состоит из следующих частей (см. рис. на стр. 6): передней панели (ПП); программатора серии импульсов (ПСИ); блока цифровой индикации (БЦИ); блока аналоговых сигналов (БАС); блока питания (БП).

Органы управления на ПП БУК объединены в группы согласно их функциональному назначению. Обозначение « $\overline{A} \boxed{B}$ » у кнопок означает, что если кнопка не нажата, то выполняется функция А, а если нажата, то выполняется функция В.



Светодиоды над кнопками служат для индикации срабатывания кнопок – светодиоды светятся при нажатой кнопке (кроме кнопки «ПУСК») и сигнализации об исправности электрической цепи, которую коммутируют с помощью кнопочного переключателя. Кнопки под надписью «ПРОГРАММАТОР КОДОВ» служат для генерации комбинации сигналов «логический ноль» («0») – постоянного напряжения от 0 до 0.4 В – или «логическая единица» («1») – постоянного напряжения величиной от 2.4 до 5 В, генерация «1» происходит при нажатой кнопке, а «0» – при ненажатой. Кнопки « $\overline{10} \underline{2}$ » служат для выбора режима работы БЦИ. Кнопки «20», «21», «22», «23» под надписью «ПРОГРАММАТОР СИ» предназначены для набора двоичного кода количества импульсов в серии, генерируемой ГСИ, или номера канала прохождения импульсов (КПИ). Кнопка «ПУСК» служит для включения ГСИ. Кнопка «УСТАН 0» служит для установки ГСИ в исходное состояние. ПСИ предназначен для генерации пачек импульсов от одного до пятнадцати импульсов в серии с амплитудой от 2.4 до 5 В для коммутации цифровых сигналов, поступающих с плат сменных устройств на входы коммутатора и для генерации прямоугольных импульсов с амплитудой от 2.4 до 5 В.

Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики

Практическая работа 1 Исследование работы логических элементов

Цель работы: исследовать функциональные возможности и изучить электрические свойства логических элементов.

Программа работы

1. Составить таблицы истинности исследуемых элементов.
2. Построить временные диаграммы работы.
3. Записать логические уравнения.
4. Определить типы исследуемых элементов.
5. Измерить с помощью мультиметра (осциллографа) напряжение логического нуля U_0 и логической единицы U_1 применяемых элементов.
6. Составить и защитить отчет по результатам проведенных исследований.

Краткие сведения из теории

Булева алгебра оперирует двоичными переменными – логическим нулем 0 и логической единицей 1. Эти переменные используются для построения булевой или переключательной функции $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ относительно аргументов x_1, x_2, \dots, x_N , которая может принимать только два значения – 0 или 1. Логическая функция может быть задана словесно, алгебраическим выражением, таблицей истинности или временными диаграммами.

Устройства, выполняющие в аппаратуре логические операции, называют логическими элементами. Простейших логических операций три: отрицание (инверсия) или операция НЕ (описывается логической функцией $Y = \bar{X}$); логическое умножение (конъюнкция) или операция И (описывается логической функцией $Y = X_1 X_2$); логическое сложение (дизъюнкция) или операция ИЛИ (описывается логической функцией $Y = X_1 + X_2$).

Булева алгебра базируется на нескольких аксиомах: аксиоме отрицания $0 = \bar{1}$ (ноль равен не единице, единица равна не нулю); аксиоме логического

умножения $0 \times 0 = 0$, $1 \times 0 = 0 \times 1 = 0$, $1 \times 1 = 1$; аксиоме логического сложения $0 + 0 = 0$, $1 + 0 = 0 + 1 = 1$, $1 + 1 = 1$.

На аксиомах основаны законы булевой алгебры: переместительный закон: $X_1 X_2 = X_2 X_1$, $X_1 + X_2 = X_2 + X_1$; сочетательный: $X_1(X_2 X_3) = X_2 X_1 X_3$, $X_1 + (X_2 + X_3) = X_2 + X_1 + X_3$; закон повторения: $X \times X = X$, $X + X = X$; закон обращения: если $X_1 = X_2$, то $\overline{X_1} = \overline{X_2}$; закон двойной инверсии: $\overline{\overline{X}} = X$; закон нулевого множества: $X \times 0 = 0$, $X + 0 = X$; закон универсального множества: $X + 1 = 1$, $X \times 1 = X$; закон дополнительности: $X \times \overline{X} = 0$, $X + \overline{X} = 1$; распределительный закон: $X_1(X_2 + X_3) = X_1 X_2 + X_1 X_3$, $X_1 + (X_2 X_3) = (X_1 + X_2)(X_1 + X_3)$; закон поглощения: $X_1 + X_1 X_2 = X_1$, $X_1(X_1 + X_2) = X_1$; закон склеивания: $X_1 X_2 + X_1 \overline{X_2} = X_1$, $(X_1 + X_2)(X_1 + \overline{X_2}) = X_1$; закон инверсии (Де Моргана): $X_1 X_2 = \overline{\overline{X_1} + \overline{X_2}}$, $\overline{X_1 X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$, $\overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \times \overline{X_2}$.

Применение этих законов позволяет реализовать заданную логическую функцию на различных логических элементах.

В зависимости от вида выполняемой логической функции в обозначениях интегральных микросхем используют следующие типовые сочетания букв: ЛА – элемент И-НЕ; ЛИ – элемент И; ЛЕ – элемент ИЛИ-НЕ; ЛЛ – элемент ИЛИ; ЛП – прочие логические функции.

При графическом изображении логических элементов используют прямоугольник, в верхней части которого указывают символ функции: & – для И; 1 – для ИЛИ; =1 – для исключающего ИЛИ.

Входы показывают с левой стороны прямоугольника, выходы – с правой. Инверсные выходы и входы выделяют небольшим кружком у вывода. Выводы питания и общий обычно не показывают, либо подводят их к левой или правой стороне прямоугольника и обозначают звездочкой.

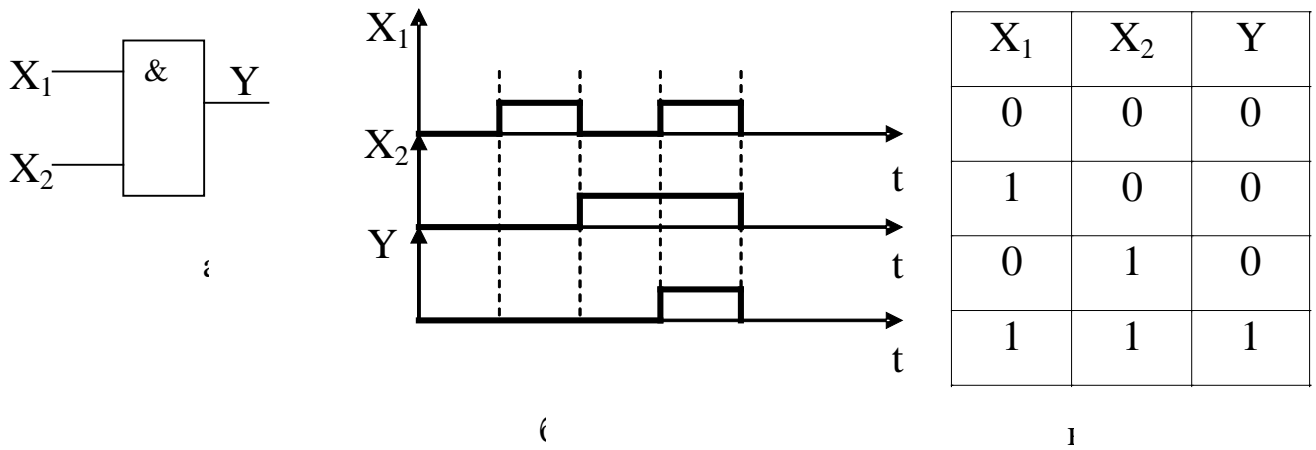


Рисунок 1.1 – Логический элемент И (а), временная диаграмма (б),
таблица истинности (в)

Описание установки

Исследуемые микросхемы К155ЛЛ1, К155ЛА4, К155ЛН1, К155ЛП5, К155ЛЕ1 расположены на печатной плате сменного устройства (УС) №12 (далее по тексту УС-12), входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК), расположенных на лицевой панели БУК. Сигналы на входы микросхем задаются кнопками «1»...«4», «7»...«12» (см. рис. 1.2). Выходные сигналы отображаются на цифровом табло в двоичном коде или исследуются с помощью мультиметра.

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-12 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ».
3. Включить питание УС-12, нажав кнопку «+5 В».
4. Переключатели 10/2 под цифровыми индикаторами установить в положение «2», при котором индицируется информация в двоичном коде.

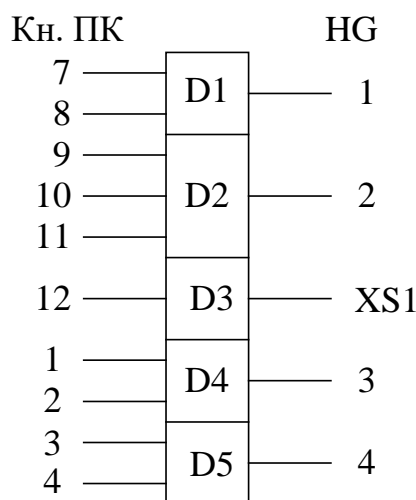


Рисунок 1.2 – Функциональная схема установки для исследования логических элементов

5. Определить логические элементы, подавая на входы элементов D1, D2, D4, D5 различные комбинации нулей и единиц программатором кодов. Результаты исследования представить в таблице истинности и на временной диаграмме (пример показан на рисунке 1.1).

6. Для определения уровней выходного сигнала (напряжения логического нуля U_0 и логической единицы U_1) элемента D3 (рисунок 1.2) необходимо:

а) подключить сигнальный вход мультиметра к гнезду XS1, расположенному на плате;

б) общий вход мультиметра подключить к любой клемме заземления на установке К32;

в) перевести мультиметр в режим измерения по постоянному току, подключить входной кабель мультиметра к входу V и измерить напряжение при нажатой и отжатой кнопке «12» программатора кодов установки.

7. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС-12 из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- программу работы;
- принципиальные схемы исследованных логических элементов;
- логические уравнения, таблицы истинности и временные диаграммы их работы.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Для каких целей применяют логические элементы?
2. Чем отличаются принципиальные схемы логических элементов, реализующих функции?
3. Как реализовать схему «тождественное ИЛИ» на элементах типа 2ИЛИ-НЕ либо 2И-НЕ?
4. Чем отличается ТТЛ от МОП-логики?

Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики

Практическая работа 2 Исследование работы комбинационных логических цепей

Цель работы: исследовать функциональные возможности и изучить электрические свойства логических цепей, собранных на элементах типа 2ИЛИ, 2И–НЕ, 2ИЛИ–НЕ при различных комбинациях входных сигналов.

Программа работы

1. Экспериментально исследовать функциональные возможности логических цепей и заполнить для различных комбинаций входных сигналов таблицы истинности.
2. Записать логическое уравнение для каждой исследуемой цепи.
3. Упростить логические уравнения.
4. Составить и защитить отчет по результатам проведенных исследований с представлением принципиальных схем, логических уравнений комбинационных схем и временных диаграмм работы схем.

Краткие сведения из теории

Комбинационные логические цепи применяют для реализации сложных переключательных функций, когда выходной сигнал зависит от конъюнкции и дизъюнкции ряда входных сигналов. При этом максимальное число последовательных включенных логических элементов определяет порядок комбинационной цепи.

Время задержки срабатывания комбинационной цепи большого порядка определяется суммарной инерционностью последовательно включенных логических элементов. Например, в четырехъярусной комбинационной цепи задержка срабатывания равна четырехкратному времени задержки одного логического элемента.

Сложность логической функции (и отсюда сложность и высокая стоимость реализующей ее схемы) пропорциональны числу операций и числу

вхождений переменных или их отрицаний. Поэтому логические функции всегда преобразуются (но не громоздкими выкладками с помощью аксиом и теорем!) специальными методами минимизации.

Для функции с небольшим числом переменных (до 5...6) наиболее употребительным методом минимизации является метод карт Карно. На рисунке 2.1 представлен пример карты Карно для функции из четырех аргументов.

Минтермы логических функций отмечаются единицами в соответствующих клетках карты. На основании закона дистрибутивности и теорем два минтерма, находящиеся в соседних клетках, могут быть заменены одним логическим произведением, содержащим на одну переменную меньше. Если соседними являются две пары минтермов, то такая группа из четырех минтермов может быть заменена конъюнкцией, которая содержит на две переменные меньше.

AB C D	00	01	11	10
00				
01				
11				
10				

Рисунок 2.1 – Карта Карно функции четырех переменных

Описание установки

Исследуемые микросхемы K155ЛЕ1 (D1), K155ЛН1 (D2), K155ЛЛ1 (D3) и K155ЛА3 (D4) расположены на печатной плате сменного устройства УС-13, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК), расположенных на

лицевой панели БУК. Информационные сигналы задаются с помощью кнопок «1»...«12», а выходные сигналы отображаются на левом цифровом табло в двоичном коде (рисунки 2.2 и 2.3).

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-13 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.

2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-13, нажав кнопку «+5 В».

3. Исследовать логические цепи (рисунки 2.2 и 2.3), заполнить таблицы истинности, записать по ним логические функции, представляющие собой логическую сумму минтермов, минимизировать их.

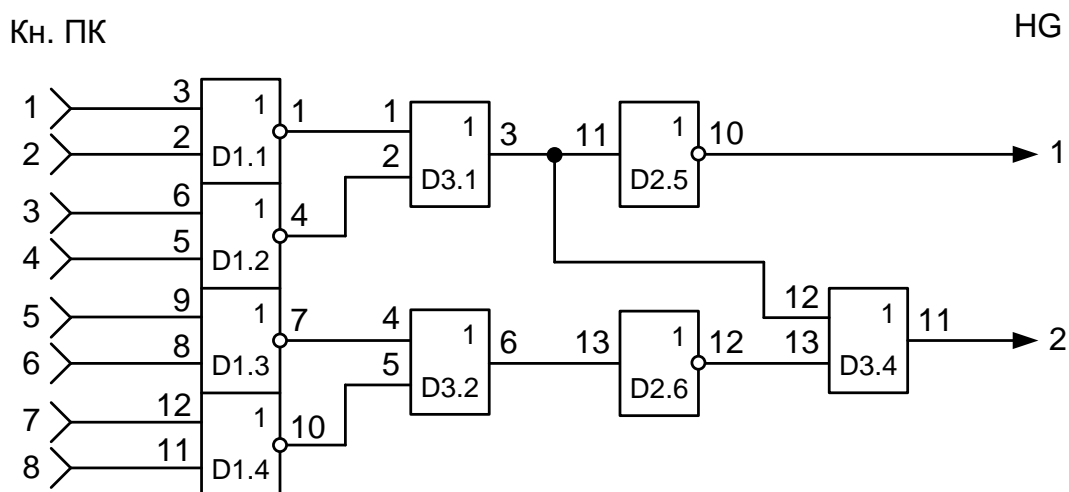


Рисунок 2.2 – Функциональная схема 1 установки для исследования комбинационных логических цепей

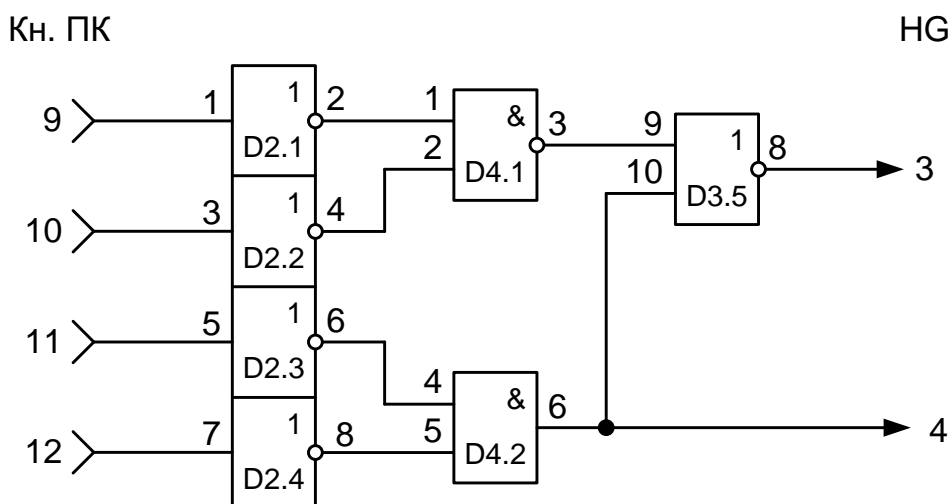


Рисунок 2.3 – Функциональная схема 2 установки для исследования комбинаций логических ИС

4. Полученные таким образом логические уравнения преобразовать к необходимому для реализации виду. Построить временные диаграммы полученных после минимизации логических схем.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- программу работы;
- принципиальные схемы исследованных логических цепей;
- логические уравнения, таблицы истинности и временные диаграммы их работы.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Для каких целей применяют комбинационные логические цепи?
2. Назовите и охарактеризуйте существующие методы минимизации логических функций.
3. Как рассчитывается время задержки комбинационной логической цепи.
4. По заданным преподавателем сигналам на входах схем (рисунок 2.2 и 2.3) проследить изменения сигналов на выходах каждого логического элемента.

Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики

Практическая работа 3 Исследование работы триггеров

Цель работы: исследовать функциональные возможности и изучить электрические свойства триггеров разных типов.

Программа работы

1. Изучить принципы действия исследуемых триггеров.
2. Согласно результатам эксперимента составить таблицу истинности, построить временные диаграммы работы и записать логические уравнения для каждого триггера.
3. Определить логические уровни и фронты срабатывания исследуемых триггеров по разным входам.

Краткие сведения из теории

На основании двух или нескольких логических элементов, охваченных положительной обратной связью, строят триггеры, которые используют либо для запоминания информации, либо для счета количества импульсов. В зависимости от режима работы триггеры разделяют на асинхронные и синхронные (тактируемые).

Простейший асинхронный триггер содержит два входа: S, R и два выхода: прямой Q и инверсный \bar{Q} . Вход S (от английского set – установка) служит для установки триггера в единичное состояние ($Q = 1, \bar{Q} = 0$), а вход R (от английского reset – возврат) триггер устанавливается в состояние 0. Комбинация нулевых сигналов на входах не изменяет состояния триггера. При одновременной подаче сигналов логической единицы на R- и S- входы на обоих выходах будут наблюдаться одинаковые сигналы, т. е. устройство утрачивает функцию триггера, поэтому такое состояние называют неопределенным или запрещенным.

Для исключения неопределенного состояния в триггер вводят дополнительный вход синхронизации C и усложняют структуру построения, т. е. де-

лают триггер двухступенчатым, обеспечивая срабатывание одной ступени по переднему, а второй ступени – по заднему фронту входного сигнала. К устройствам такого типа относятся D- и JK-триггеры.

D-триггер в отличие от RS-триггера имеет для установки только один D-вход. При этом после подачи сигнала на С-вход в такте (n+1) на выходе Q устанавливается сигнал, аналогичный сигналу на D-входе в предыдущем такте n. Таким образом, D-триггер (от английского delay – задержка) на один такт синхронизации задерживает информацию, существующую на входе D. Его работа описывается уравнением $Q_{n+1} = D_n$.

Описание установки

Исследуемые схемные соединения расположены на печатной плате сменного устройства УС-12, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК), расположенных на лицевой панели БУК. Входные сигналы для схемы № 1 подаются кнопками «1» и «2», а для схемы № 2 – кнопки «3» и «4» (рисунок 3.1). Выходные сигналы отображаются на правом цифровом табло в двоичном коде.

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-12 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-12, нажав кнопку «+5 В».
3. Переключатели 10/2 под цифрами индикаторами установить в положение «2», при котором индицируется информация в двоичном коде.

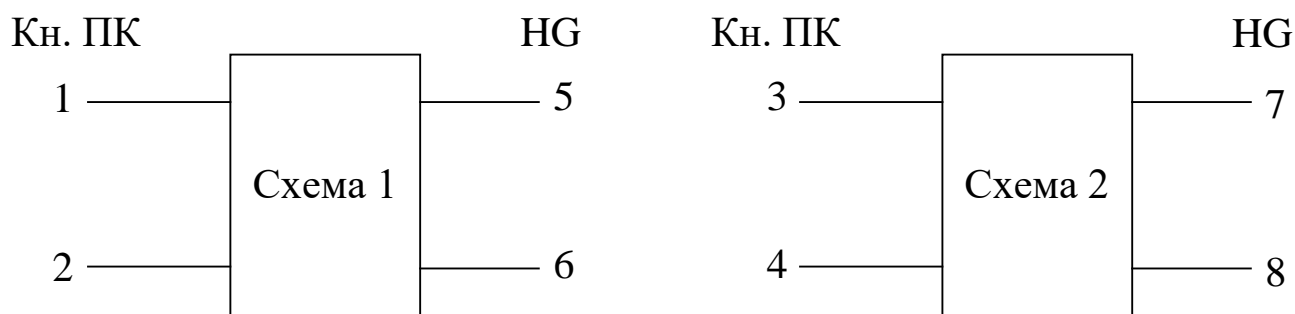


Рисунок 3.1 – Функциональная схема установки для исследования триггеров

Таблица 3.1

Вход схемы 1		Выход схемы 1	
1	2	HG5	HG6
1	0		
1	1		
0	1		
1	1		
1	0		
0	0		
1	1		
0	0		
1	1		

Таблица 3.2

Вход схемы 2		Выход схемы 2	
3	4	HG5	HG6
1	1		
1	0		
0	0		
0	1		
0	0		
1	0		

4. Заполнить таблицы 3.1 и 3.2 для схем №1 и №2 соответственно и по результатам работы схем определить тип триггера. Изобразить в отчете каждый исследованный триггер.

5. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- программу работы;
- принципиальные схемы исследованных триггеров с указанием вхо-

дов;

– таблицы истинности и временные диаграммы их работы.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Какое состояние является неопределённым для RS-триггера?
2. Чем синхронные триггеры отличаются от асинхронных?
3. По какому фронту срабатывает триггер?
4. Где расположены цепи положительной обратной связи в исследованных триггерах?
5. Назначение и виды триггеров.

Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики
Практическая работа 4 Исследование работы реверсивных счетчиков
импульсов

Цель работы: исследовать функциональные возможности двоично-десятичных счетчиков импульсов.

Программа работы

1. Исследовать функциональные возможности двоично-десятичного счетчика импульсов в режиме установки нуля и в счетном режиме.
2. Составить временные диаграммы работы двоично-десятичного счетчика импульсов.
3. Исследовать функциональные возможности двоично-десятичного счетчика импульсов типа К555ИЕ6 в режимах установки нуля, предварительной записи информации, прямого и обратного счета импульсов.
4. Исследовать функциональные возможности двоичного счетчика импульсов типа К555ИЕ7 в режимах установки нуля, предварительной записи информации, прямого и обратного счета импульсов.
5. Построить временные диаграммы работы исследованных счетчиков в режимах суммирования и вычитания количества входных импульсов.
6. Пояснить принцип действия исследованных счетчиков при различных комбинациях входных сигналов.
7. Составить и защитить отчет по работе.

Краткие сведения из теории

Последовательностное цифровое устройство, обеспечивающее хранение слова информации и выполнение над ним микрооперации счета, называется счетчиком.

По способу кодирования внутренних состояний счетчики делятся на двоичные, двоично-десятичные, счетчики Джонсона и др.

Цифровые счетчики, работающие в двоично-десятичном коде, предна-

значены для суммирования количества входных импульсов в течение фиксированного интервала времени с последующим выводом результата через дешифратор на индикаторные устройства.

В ТТЛ-микросхемах двоично-десятичных счетчиков используют обычно 4 триггера, первый из которых делит частоту входного сигнала на 2, а на трех других триггерах выполняется деление частоты в 5 раз. При соединении выхода первого триггера с входом второго на выходах счетчика формируется 4 разряда двоично-десятичного кода 1-2-4-8. При последовательном подключении двух микросхем двоично-десятичных счетчиков формируются 8 разрядов двоично-десятичного кода (1-2-4-8-10-20-40-80) и т. д.

Реверсивные счетчики предназначены для суммирования либо вычитания количества импульсов, подаваемых на счетный вход. По принципу действия реверсивные счетчики разделяют на синхронные и асинхронные. В синхронных счетчиках входной импульс поступает одновременно на входы синхронизации всех триггеров, входящих в структуру счетчика, поэтому срабатывание этих триггеров происходит одновременно либо по переднему, либо по заднему фронту входного импульса. В асинхронных счетчиках срабатывание каждого последующего триггера, входящего в структуру счетчика, происходит только после переключения предыдущего. Вследствие этого происходит накопление времени задержки срабатывания, и в N-разрядном счетчике задержка срабатывания N-го разряда в $(N - 1)$ раз больше задержки срабатывания первого разряда счетчика.

Для расширения функциональных возможностей кроме счетного входа в микросхемах реверсивных счетчиков используют входы установки (сброса), предварительной записи и вход переключения направления счета (суммирования либо вычитания). При подаче управляющего сигнала на вход реверсивного счетчика устанавливаются уровни логического нуля независимо от комбинации сигналов на других входах. При подаче управляющего сигнала на вход предварительной записи (вход предустановки или V-вход) на вы-

ходах счетчика появляется информация, аналогичная той, которая была подана на D-входы (информационные входы) счетчика.

Особенностью временных диаграмм работы реверсивного счетчика является срабатывание триггера старшего разряда по заднему фронту выходного импульса триггера младшего разряда в режиме суммирования и наоборот (срабатывание триггера старшего разряда по переднему фронту выходного импульса триггера младшего разряда в режиме вычитания).

Выпускаемые микросхемы реверсивных счетчиков имеют, как правило, 4 разряда (двоичных либо двоично-десятичных). Увеличение разрядности счетчиков выполняют за счет последовательного соединения микросхем. При этом счетные входы последующей микросхемы подключают к выходам переполнения предыдущей микросхемы счетчика.

Микросхемы К155ИЕ6 и К155ИЕ7 – четырехразрядные реверсивные счетчики, аналогичные по структуре. Счетчик ИЕ6 (рисунок 4.1, а) – двоично-десятичный, а счетчик ИЕ7 (рисунок 4.2, б) – двоичный. Импульсные тактовые входы для счета на увеличение C_u (вывод 5) и на уменьшение C_d (вывод 4) в этих микросхемах отдельные. Состояние счетчика меняется по положительным перепадам тактовых импульсов от низкого уровня к высокому на каждом из этих тактовых входов.

Для упрощения построения счетчиков с числом разрядов, превышающим четыре, обе микросхемы имеют выводы окончания счета на увеличение (T_{cu} , вывод 12) и на уменьшение (T_{cd} , вывод 13). От этих выводов берутся тактовые сигналы переноса и заема для последующего и от предыдущего четырехразрядного счетчика. Дополнительной логики при последовательном соединении этих счетчиков не требуется: выводы T_{cu} и T_{cd} предыдущей микросхемы присоединяются к выводам C_u и C_d последующей. По входам разрешения параллельной загрузки PE и сброса R запрещается действие тактовой последовательности и даются команды загрузки четырехразрядного кода в счетчик или его сброса.

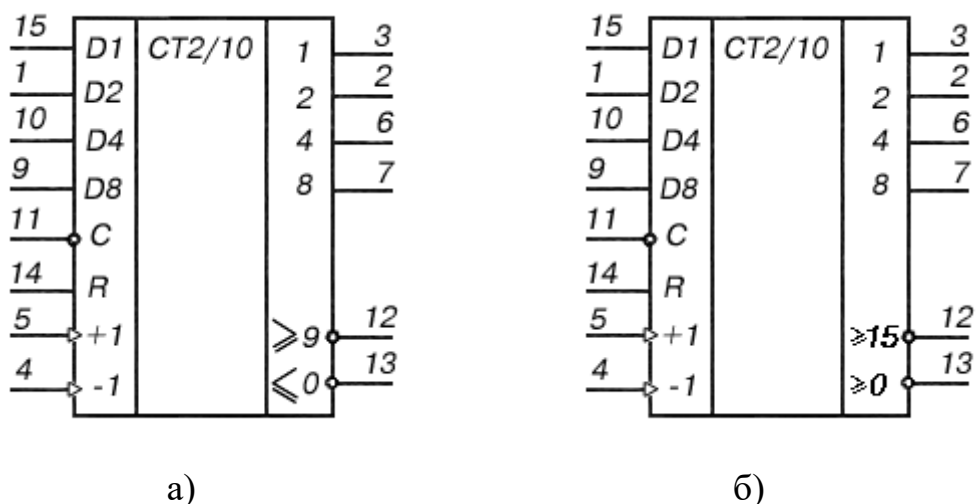


Рисунок 4.1 – Счетчики К155ИЕ (а) и К155ИЕ7 (б)

В микросхемах ИЕ6 и ИЕ7 счетчики основаны на четырех двухступенчатых триггерах «мастер-помощник». Десятичный счетчик отличается от двоичного внутренней логикой, управляющей триггерами. Счетчики можно переводить в режимы сброса, параллельной загрузки, а также синхронного счета на увеличение и уменьшение.

Если на вход Сd подается импульсный перепад от низкого уровня к высокому (дается команда на уменьшение – down), от содержимого счетчика вычитается 1. Аналогичный перепад, поданный на входе Си, увеличивает (up) счет на 1. Если для счета используется один из этих входов, на другом тактовом входе следует зафиксировать напряжение высокого логического уровня. Первый триггер счетчика не может переключиться, если на его тактовом входе зафиксировано напряжение низкого уровня. Во избежание ошибок менять направление счета следует в моменты, когда запускающий тактовый импульс перешел на высокий уровень, т. е. во время плоской вершины импульса.

На выходах Тси (окончание счета на увеличение, вывод 12) и ТCd (окончание счета на уменьшение, вывод 13) нормальный уровень высокий. Если счет достиг максимума (цифра 9 для ИЕ6 и 15 для ИЕ7), с приходом

следующего тактового перепада на вход C_i от высокого уровня к низкому (более 9 или более 15) на выходе T_{ci} появится низкое напряжение. После возврата напряжения на тактовом входе C_i к высокому уровню напряжение на выходе T_{cd} останется низким еще на время, соответствующее двойной задержке переключения логического элемента ТТЛ.

Аналогично на выходе T_{cd} появляется напряжение низкого уровня, если на вход C_i пришел счетный перепад низкого уровня. Импульсные перепады от выходов T_{ci} и T_{cd} служат, таким образом, как тактовые для последующих входов C_i и C_d при конструировании счетчиков более высокого порядка. Такие многокаскадные соединения счетчиков ИЕ6 и ИЕ7 не полностью синхронные, поскольку на последующую микросхему тактовый импульс передается с двойной задержкой переключения.

Если на вход разрешения параллельной загрузки S (вывод 11) подать напряжение низкого уровня, то код, зафиксированный ранее на параллельных входах $D_1 \dots D_8$ (выводы 15, 1, 10 и 9), загружается в счетчик и появляется на его выходах 1, 2, 4, 8 (выводы 3, 2, 6 и 7) независимо от сигналов на тактовых входах. Следовательно, операция параллельной загрузки – асинхронная.

Параллельный запуск триггеров запрещается, если на вход сброса R (вывод 14) подано напряжение высокого уровня. На всех выходах Q установится низкий уровень. Если во время (и после) операций сброса и загрузки придет тактовый перепад (от H к V), микросхема примет его как счетный.

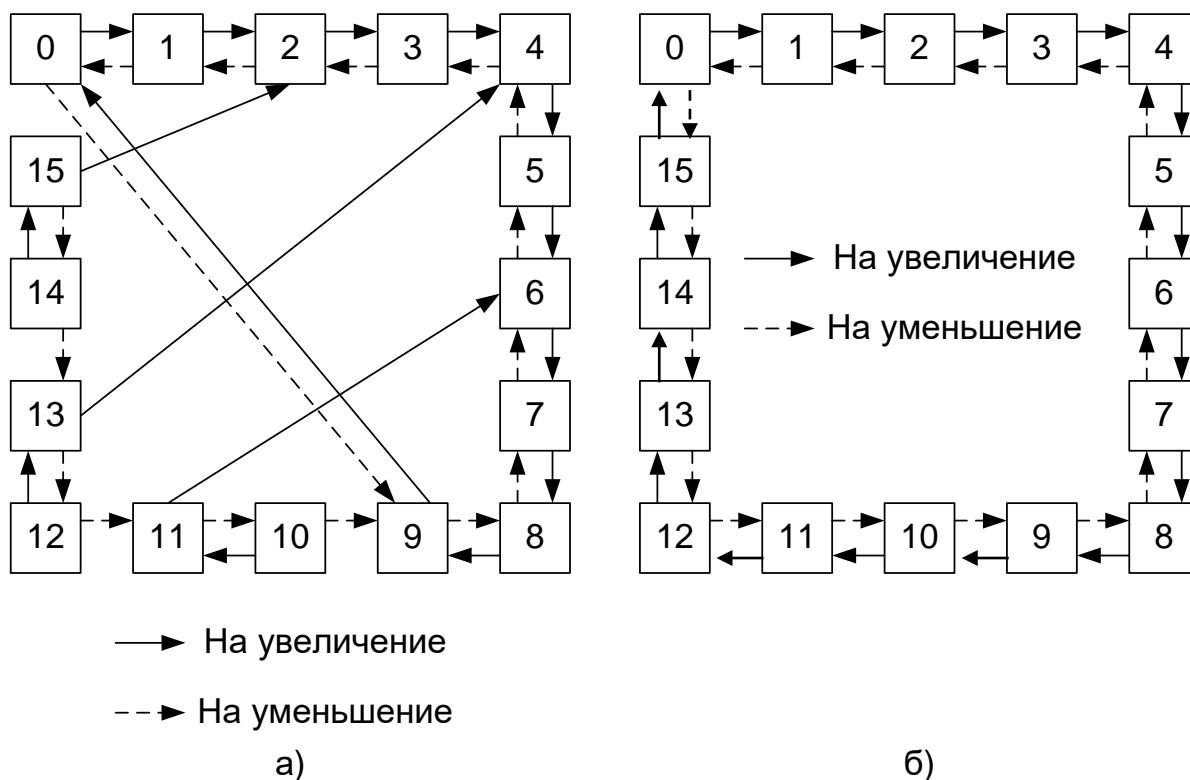
Счетчики K155ИЕ6 (74192) и K155ИЕ7 (74193) потребляют ток 102 мА. Маломощные варианты этих микросхем с переходами Шотки имеют ток потребления 34 мА. Максимальная тактовая частота 25 МГц, время задержки распространения сигнала от входа C_i до выхода T_{ci} 26 нс, аналогичные задержки от входа S до выхода 8 составляют 40 нс. Время действия сигнала сброса (от входа R до выходов) 35 нс.

На рисунке 4.2,а показана диаграмма работы десятичного счетчика ИЕ6, где

обозначены логические переходы сигналов при счете на увеличение и уменьшение. Кольцевой счет возможен в пределах 0...9, остальные шесть состояний триггерам запрещены. Кольцо счета для двоичного счетчика ИЕ7 внутренних запретов не имеет (смотрите рисунок 4.2,б).

Описание установки

Исследуемые микросхемы К155ИЕ6 (D2) и К155ИЕ7 (D3) расположены на печатной плате сменного устройства УС-16, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК) и программатора серии импульсов (ПСИ), расположенных на лицевой панели БУК. Выбор микросхемы D2 или D3 осуществляется кнопками «14» и «16» (рисунок 4.3). Сигналы на информационные входы микросхем для параллельной загрузки данных задаются кнопками «1» ÷ «4», а запись информации для обеих микросхем кнопкой «9». Сброс содержимого счетчика D2 осуществляется кнопкой «10», а счетчика D3 – кнопкой «11». Выходные сигналы индицируются на левом табло в двоичном коде.



Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-16 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К-32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-16, нажав кнопку «+5 В».
3. При исследовании реверсивных счетчиков D2, D3 (см. рис. 4.2) управляющие сигналы подавать нажатием кнопок «1»...«4», «9», «10», «11», «14» и «16» программатора кодов. Нажатое состояние кнопок соответствует сигналам логической 1. Информация с выходов счетчиков D2, D3 через элемент D4 выводится в двоичном коде на 4, 3 и 2 разряды левого индикатора установки К32 и одновременно в десятичном коде – на 8 и 7 разряды правого индикатора.

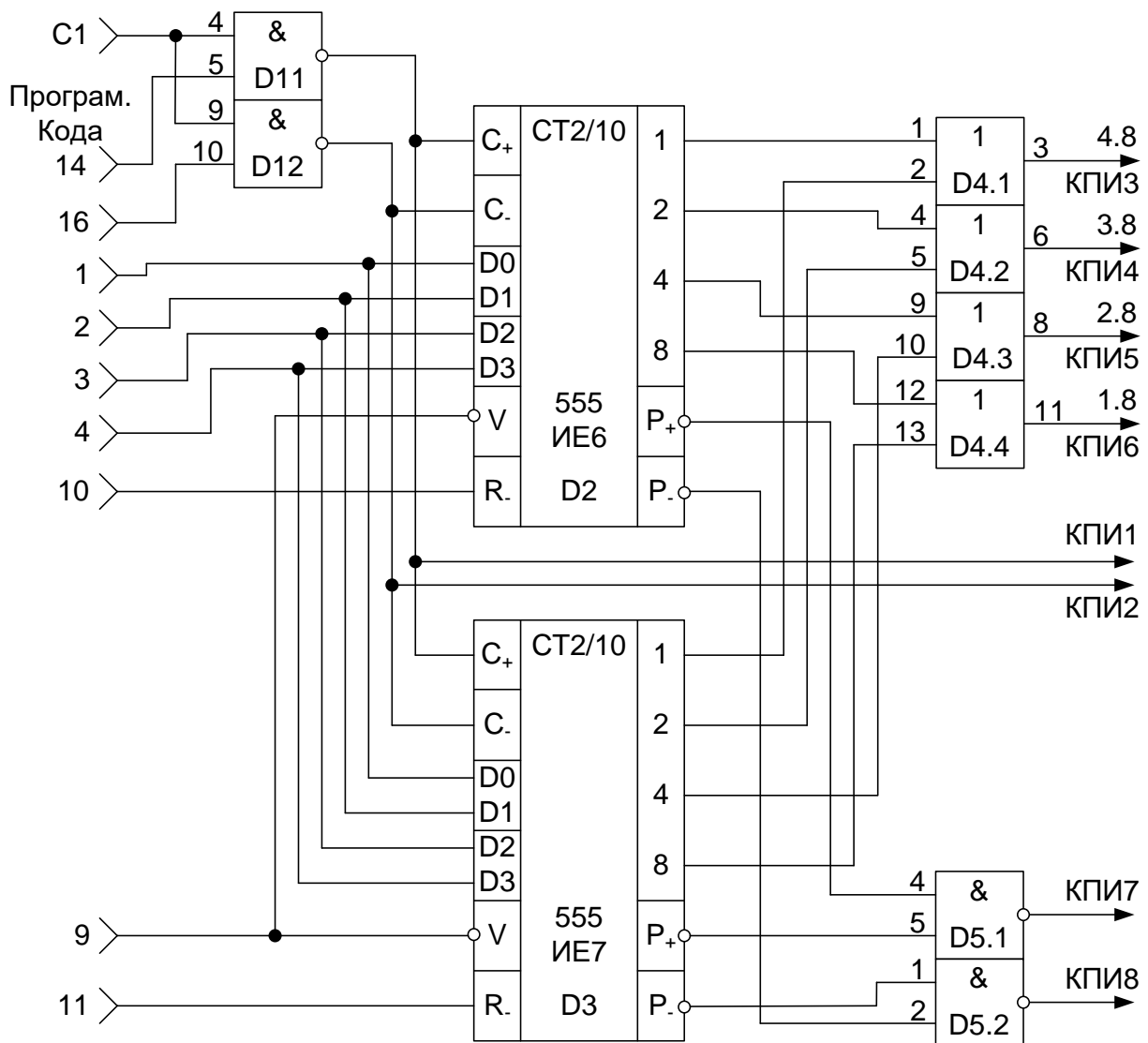


Рисунок 4.3 – Функциональная схема установки для исследования реверсивных счетчиков импульсов

4. Для обеспечения работы счетчика в счетном режиме необходимо подавать логическую 1 на V-входы счетчиков и серию импульсов от ПСИ на вход С1.

5. Суммирование или вычитание входных импульсов выполняется в микросхемах К555ИЕ6, К555ИЕ7 при их подаче на отдельные входы (на «С+» – при суммировании и на «С-» – при вычитании). В процессе исследований необходимо исключать одновременное прохождение счетных импульсов через элементы 2И-НЕ D1.1, D1.2, так как в этом случае не обеспе-

чивается работа элементов D2, D3 в счетном режиме.

6. Исследовать работу микросхем во всех четырех режимах. Числа задает преподаватель. Построить временные диаграммы работы микросхем.

7. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС-16 из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- программу работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров задействованных кнопок программатора кодов и ПСИ;
- временные диаграммы работы счетчиков;
- выводы с пояснениями принципа действия счетчиков.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Для каких целей используют двоично-десятичные, а для каких реверсивные счетчики импульсов?

2. Сколько микросхем двоично-десятичных счетчиков необходимо для счета 9765 импульсов?

3. По какому фронту срабатывает исследованный двоичный счетчик в режиме суммирования?

4. По какому фронту срабатывает исследованный двоично-десятичный счетчик в режиме вычитания?

5. При каком логическом уровне сигнала на V-входе элемента D3 происходит запись информации в счетчик?

6. В каком режиме (суммирования или вычитания) будет работать элемент D2 при одновременной подаче логической единицы на вход 5 элемента D1.1 и вход 10 элемента D1.2 (рисунка 4.2)?

7. Нарисуйте схему последовательностного соединения элементов D2, D3 для увеличения количества разрядов счетчика.

8. Чем модулируется яркость свечения светодиодных индикаторов?

Тема 2 Цифровые преобразователи и основы цифровой логики

Практическая работа 5 Исследование работы счетчиков и дешифраторов

Цель работы: исследовать функциональные возможности дешифраторов и светодиодных семисегментных индикаторов при различных режимах работы.

Программа работы

1. Составить уравнение преобразования дешифратора для одного из его выходов (а – f).
2. Исследовать работу семисегментного светодиодного индикатора. По результатам исследований составить принципиальную схему индикатора на основе семи светодиодов.
3. Составить и защитить отчет по работе.

Краткие сведения из теории

Для преобразования выходного двоично-десятичного кода счетчиков в сигналы управления семисегментным индикатором используют специальные преобразователи кодов – дешифраторы.

Таблица истинности дешифратора двоично-десятичного кода в семеричный код представлена таблицей 5.1.

К особенности дешифраторов, согласованных по выходу с семисегментными светодиодными индикаторами, относится наличие дополнительного S-входа, применяемого для импульсного управления яркостью индикатора (при $S = 0$ индикатор погашен). Обычно в светодиодном индикаторе используют 8 арсенид-галлиевых светодиодов, один из которых индицирует символ запятой. А остальные 7 служат для формирования цифр от 0 до 9 из сегментов «а»...«g», обозначения которых представлено на рисунке 5.1.

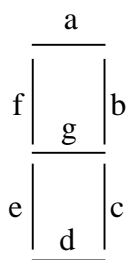


Рисунок 5.1 – Семисегментный светодиодный индикатор

Таблица 5.1 – Таблица истинности дешифратора

Входной код 8×4×2×1 (D C B A)	Код на выходах дешифратора							Символ на индикаторе
	a	b	c	d	e	f	g	
0000	1	1	1	1	1	1	0	0
0001	0	1	1	0	0	0	0	1
0010	1	1	0	1	1	0	1	2
0011	1	1	1	1	0	0	1	3
0100	0	1	1	0	0	1	1	4
0101	1	0	1	1	0	1	1	5
0110	1	0	1	1	1	1	1	6
0111	1	1	1	0	0	0	0	7
1000	1	1	1	1	1	1	1	8
1001	1	1	1	1	0	1	1	9

Для зажигания отдельного сегмента через данный светодиод необходимо пропустить ток порядка 10 мА, при протекании которого на светодиоде формируется падение напряжения около 1,5 В. Для ограничения тока питания от источника +5 В последовательно с каждым светодиодом семисегментного индикатора включают резистор с сопротивлением 300 Ом.

При использовании различных микросхем дешифраторов и светодиодных индикаторов схемы подключения индикаторов также отличаются друг от друга. В частности, если в индикаторе применить светодиоды с объединенными анодами и отдельными выводами катодов, то общую анодную цепь подключают к цепи питания +5 В, а для зажигания сегментов на выхо-

дах дешифратора формируют нулевой логический сигнал. В случае применения индикаторов с объединенными катодами светодиодов и отдельными анодными цепями на выходах дешифратора для зажигания сегментов формируют сигнал логической единицы, а катодную цепь светодиодов соединяют с нулевой цепью.

Дешифрацию сигналов по каждому выходу «а»...«g» выполняют в соответствии с логическим уравнением в зависимости от комбинации входных сигналов. Для составления логического уравнения используют таблицу истинности. Например, для сегмента «g» логическое уравнение имеет вид:
$$\bar{g} = \overline{ABCD} + A\overline{BCD} + ABC\bar{D}.$$

Описание установки

Исследуемые микросхемы K155IE2 (D7, D8) и KP514ИД2 (D9, D10), полупроводниковые цифровые индикаторы АЛС324Б (HG1, HG2) расположены на печатной плате сменного устройства УС-16, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок «1»...«7», «10», «15», «16» программатора кодов (ПК). Тактовые импульсы подаются с помощью программатора серии импульсов (ПСИ). Вывод информации с выходов дешифратора D9 на индикатор HG1 производится через элементы D11, D12, применение которых позволяет реализовать выключение отдельных сегментов светодиодного индикатора HG1. Выходные сигналы индицируются на третьем и четвертом индикаторах левого цифрового табло в десятичном коде и на правом цифровом табло в двоичном коде.

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-16 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-16, нажав кнопку «+5 В».

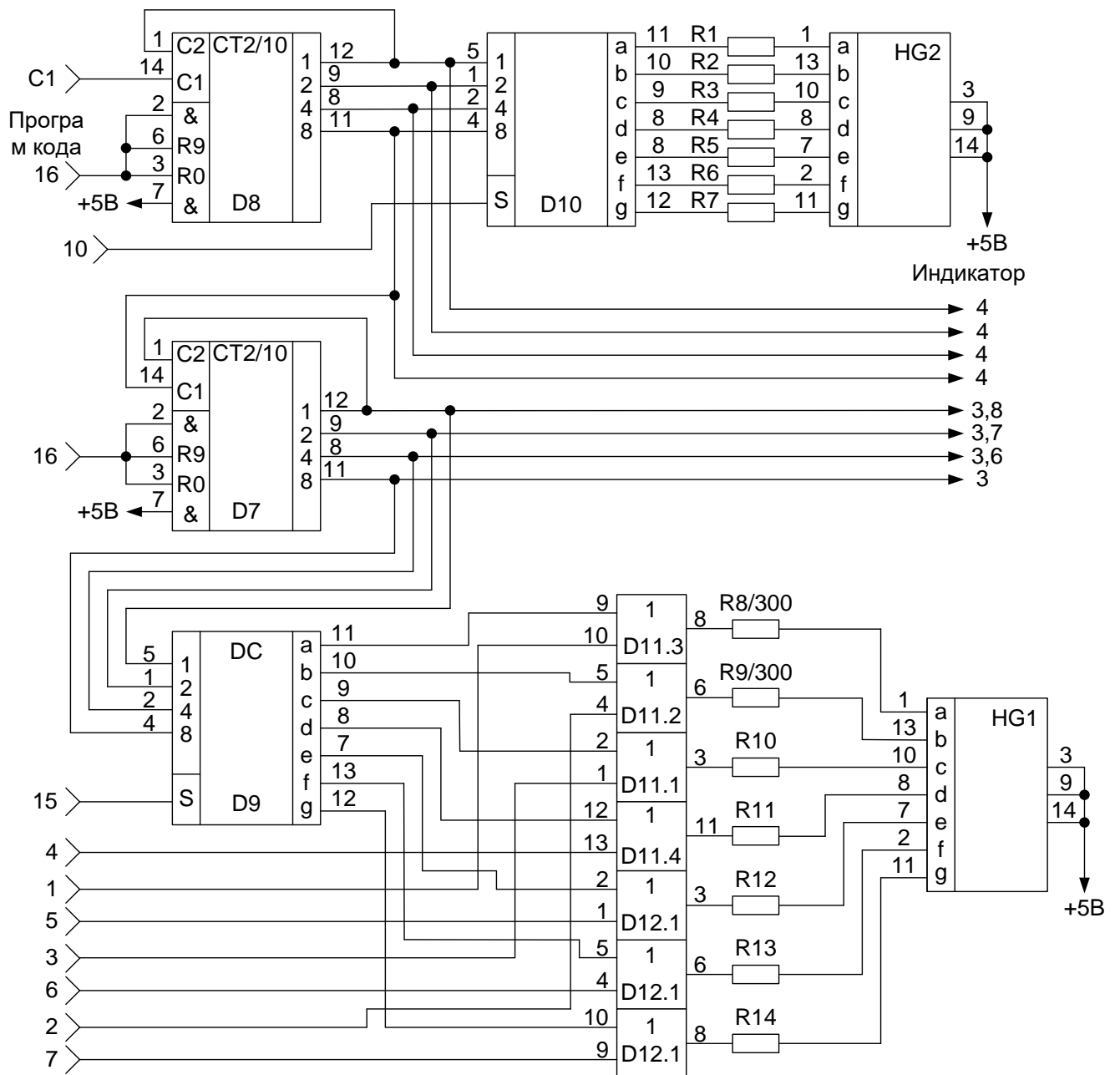


Рисунок 5.2 – Функциональная схема установки для исследования счетчиков импульсов и дешифраторов

3. Переключатель 10/2, расположенный под первым (левым) индикаторным табло, установить в положение «10», при котором индицируется информация в двоичном коде; второй переключатель установить в положение «2», при котором индицируется информация в десятичном коде.

4. Подать последовательно серии импульсов и заполнить таблицу 5.2. Последовательность серий импульсов задает преподаватель.

5. Используя конечный результат предыдущего пункта, получить на индикаторе HG1 буквы шестнадцатеричной системы счисления (A...F). Заполнить таблицу 5.3.

6. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- программу работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров задействованных кнопок программатора кодов и ПСИ;
- выводы с пояснениями принципа действия счетчиков и дешифраторов при различных комбинациях входных сигналов;
- уравнение преобразования для одного из семи выходов дешифратора.

Таблица 5.2 – Таблица результатов исследования дешифраторов

Серии импульсов	HG1							HG2						
	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g

Таблица 5.3 – Таблица результатов исследования цифровых индикаторов

Значение	HG1							Кнопки ПК						
	a	b	c	d	e	f	g	1	2	3	4	5	6	7
A														
B														
C														
D														
E														
F														
G														

Контрольные вопросы к защите работы

1. Чем модулируется яркость свечения светодиодных индикаторов?
2. Для чего выходы 12 микросхем D8, D7 соединены с входами 1 (рисунок 5.2)?
3. Какую функцию выполняют резисторы R1...R14 (рисунок 5.2)?
4. Какие выводы светодиодов (аноды или катоды) объединены в светодиодных индикаторах HG1, HG2?
5. Какой сигнал управления (логические 0 или 1) используется для зажигания сегмента светодиодного индикатора HG1?
6. Можно ли использовать выходы «1»...«7» программатора кода для модуляции свечения индикатора HG1?

Тема 3 Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы

Практическая работа 6 Исследование работы селектора-мультиплексора

Цель работы

Цель работы: Исследовать работу мультиплексоров со стробированием и без стробирования.

Программа работы

1. Исследовать функциональные возможности селектора-мультиплексора данных на 8 каналов К155КП5.
2. Реализовать на мультиплексоре функцию алгебры логики трех переменных. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.
3. Исследовать функциональные возможности селектора-мультиплексора данных на 8 каналов со стробированием К155КП7. Построить временные диаграммы работы установки.
4. Составить и защитить отчет по результатам исследований, в котором должны быть приведены принципиальные схемы, временные диаграммы, таблицы с результатами выполнения работы и выводы с пояснением принципа действия микросхем.

Краткие сведения из теории

Мультиплексор – это комбинационное логическое устройство, предназначенное для управляемой передачи данных, которые поступают по нескольким входам, на один выход. Выбор того или иного входа осуществляется в соответствии с поступающим кодом адреса (рисунок 6.1). Согласно определению мультиплексор имеет две группы входов (информационные и адресные) и один выход. Код, подаваемый на адресные входы, определяет, какой из информационных входов в данный момент подключен к выходному выводу. Если число адресных входов равно n , то число информационных входов может быть равно 2^n . Если на входы данных $a_0, a_1, \dots, a_{2^n-1}$ подать

двоичный вектор, соответствующий столбцу значений заданной функции f в таблице истинности, а на адресные входы – значения переменных, то мультиплексор реализует функцию $f(x_0, x_1, \dots, x_n)$. Пример реализации функции трех переменных по таблице истинности представлен на рисунке 6.2.

Мультиплексор КП7 имеет восемь информационных входов D0 – D7, три адресных входа 1, 2, 4 и вход стробирования S (рисунок 6.3,а). У микросхемы два выхода – прямой и инверсный. Если на входе стробирования лог. 1, на прямом выходе 0 независимо от сигналов на других входах. Если на входе стробирования лог. 0, сигнал на прямом выходе повторяет сигнал на том входе, номер которого совпадает с десятичным эквивалентом кода на входах 1, 2, 4 мультиплексора. На инверсном выходе сигнал всегда противофазен сигналу на прямом выходе.

Стробирование (англ. strobing, от strobe – посылать избирательные импульсы, от греч. strobos – кружение, беспорядочное движение) – метод выделения некоторого интервала на временной оси, шкале частот и т.п. для увеличения вероятности обнаружения полезных сигналов на фоне помех. Стробирование находит применение главным образом в радиолокации – в системах поиска, сопровождения по дальности или по угловым координатам, при определении скорости цели. Так, если при определении дальности до цели с помощью импульсной радиолокационной станции известен интервал времени прихода импульса, отражённого от цели, t_n (т.е. с точностью t_n известно положение цели), то достаточно принимать отражённые импульсы (сигналы) лишь в течение этого времени, открывая вход приёмника стробирующим импульсом (стробом) длительностью t_n , а остальное время держать приёмник «закрытым». В результате значительно снизится общий эффект действия помех и повысится помехозащищённость системы.

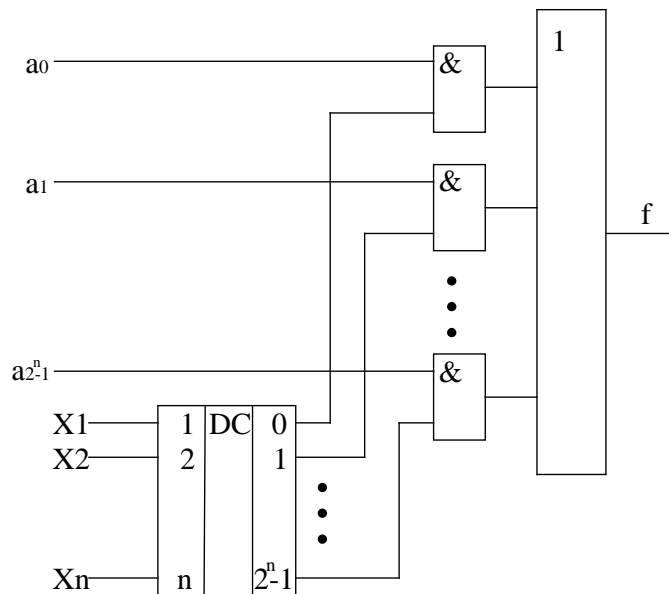


Рисунок 6.1 – Структура мультиплексора

Стробирование применяют также в телевидении, вычислительной технике и т.д. – в системах, где необходимы выделение сигнала на фоне естественных или искусственных помех и корректировка отдельных характеристик сигналов. Наличие входа стробирования позволяет простыми средствами строить мультиплексоры на большее число входов. На рисунке 6.4 приведена схема мультиплексора на 16 входов, а на рисунке 6.5 – на 6.4.

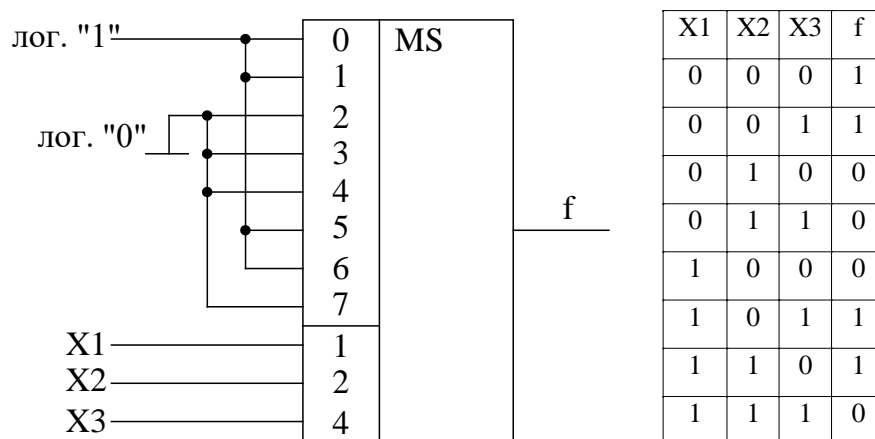
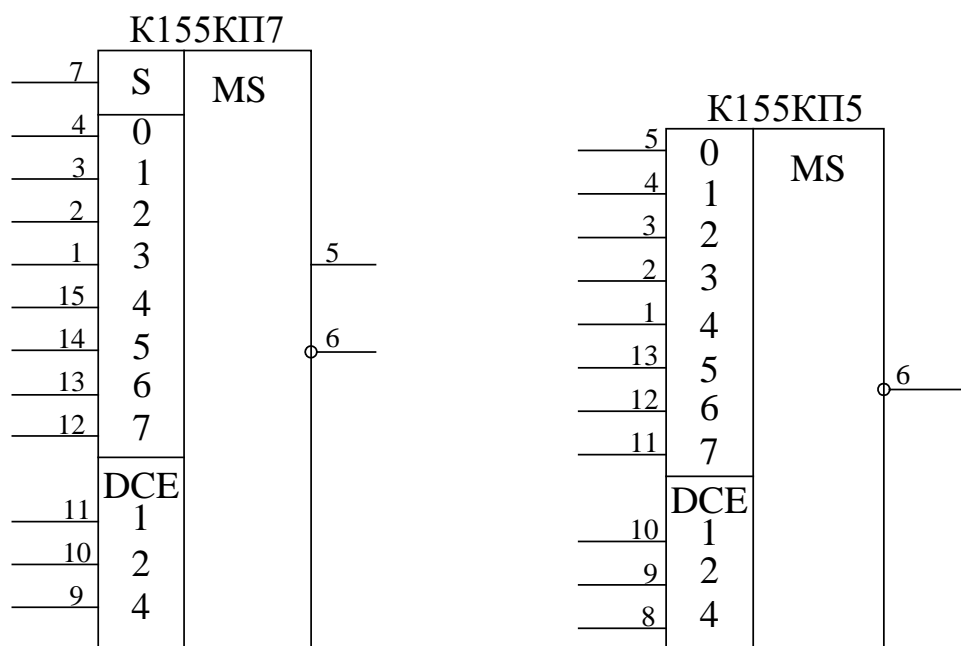


Рисунок 6.2 – Реализация булевой функции трех переменных на мультиплексоре с тремя адресными входами



а) микросхема К155КП7

б) микросхема К155КП5

Рисунок 6.3 – Схемы мультиплексов серии К155

Мультиплексор К155КП5 (рисунок 6.3, б) в отличие от КП7 имеет лишь инверсный выход и не имеет входа стробирования.

Мультиплексоры могут применяться для опроса различных датчиков цифровых и аналоговых сигналов, передачи этой информации на вход одного приемника (для усиления, преобразования, индикации).

Индикация бывает двух типов: статическая и динамическая (мультиплексное отображение информации). При статической индикации на каждый элемент требуется отдельный порт (рисунок 6.6).

При динамической индикации число подключаемых элементов возрастает до 8. Это достигается за счет параллельного подключения выводов всех 8-ми индикаторов к порту А. Еще один вывод подключается к порту В, как показано на рисунке 6.7. При таком подключении через порт А будет осуществляться управление выводимой информацией, а через порт В – выбор светового индикатора, на который будет выводиться информация. Если подавать питание с большой частотой, то можно добиться одновременной индикации всех элементов. Устойчивое изображение на дисплее получается при условии регенерации с частотой, большей 40 Гц.

Описание установки

Исследуемые микросхемы К155КП5 (D10) и К155КП7 (D13) расположены на печатной плате сменного устройства (УС) №13, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК) и программатора серии импульсов (ПСИ), расположенных на лицевой панели БУК. Причем на информационные входы микросхемы К155КП5 сигналы задаются кнопками «1»...«8», а адресация осуществляется кнопками «9»...«11» (СЗР...МЗР).

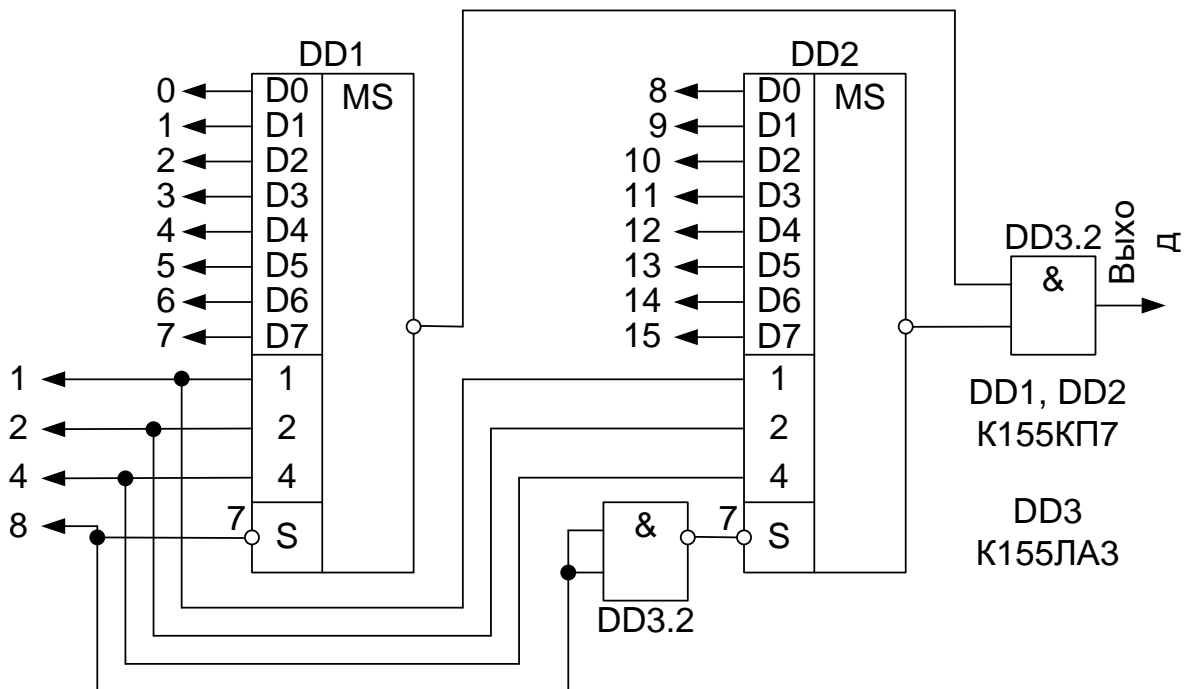


Рисунок 6.4 – Схема мультиплексора на 16 входов, построенная на базе К155КП7

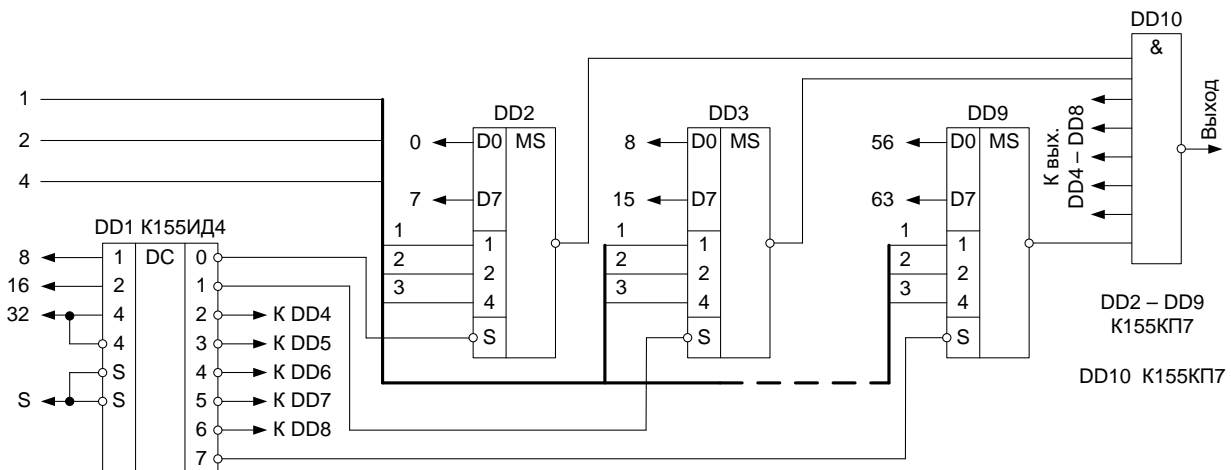


Рисунок 6.5 – Схема мультиплексора на 64 входа, построенная

на базе K155КП7

Генерация «логической единицы» («1») происходит при нажатой кнопке, а «логического нуля» («0») – при не нажатой. Данные на информационные входы микросхемы K155КП7 задаются с помощью ГСИ посредством счетчика K155ИЕ2 (D11) и дешифратора K155ИД1 (D12) (рисунок 6.8). Сброс состояния счетчика D11 осуществляется кнопкой «16», подача сигнала стробирования – кнопкой «12». Задание адреса для микросхемы K155КП7 производится кнопками «13»...«15» (СЗР...МЗР). Выходные сигналы индуцируются на правом цифровом табло в двоичном коде и четвертом индикаторе левого цифрового табло в десятичном коде (смотрите рисунок 6.8).

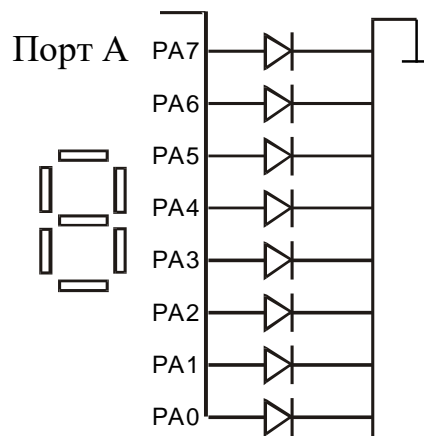


Рисунок 6.6 – Статическая индикация

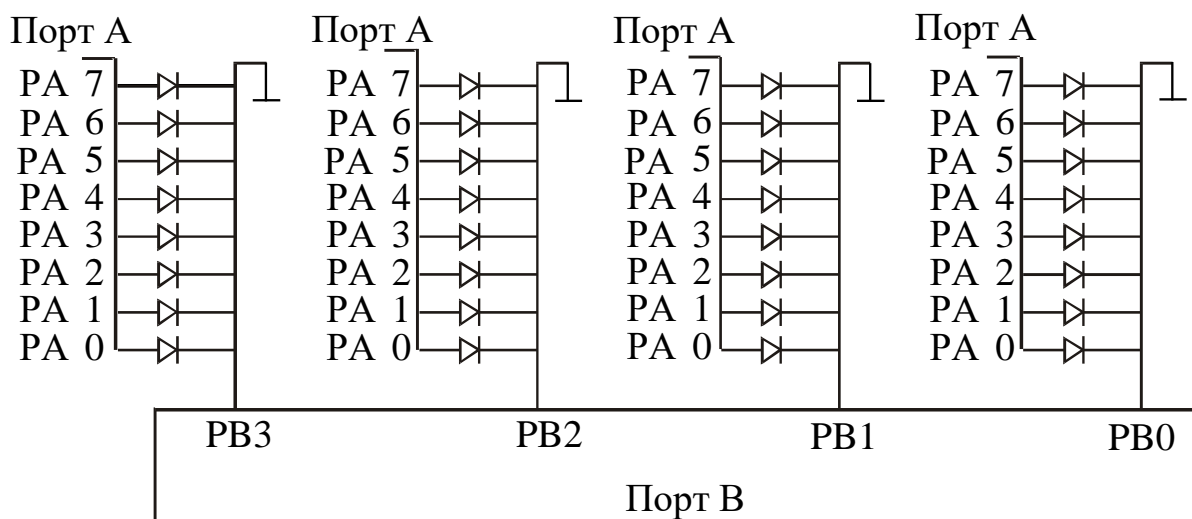


Рисунок 6.7 – Динамическая индикация

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-13 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-13, нажав кнопку «+5 В».
3. Реализовать на ИМС К155КП5 булеву функцию трех переменных в соответствии с вариантом задания (таблица 6.1). Изобразить в отчете схему подключения мультиплексора, позволяющую реализовать заданную функцию.
4. Исследование мультиплексора со стробирующим сигналом осуществить в следующей последовательности. Привести мультиплексор в состояние с отключенным выходом от его входа подачей соответствующего сигнала на вход S микросхемы К155КП7.

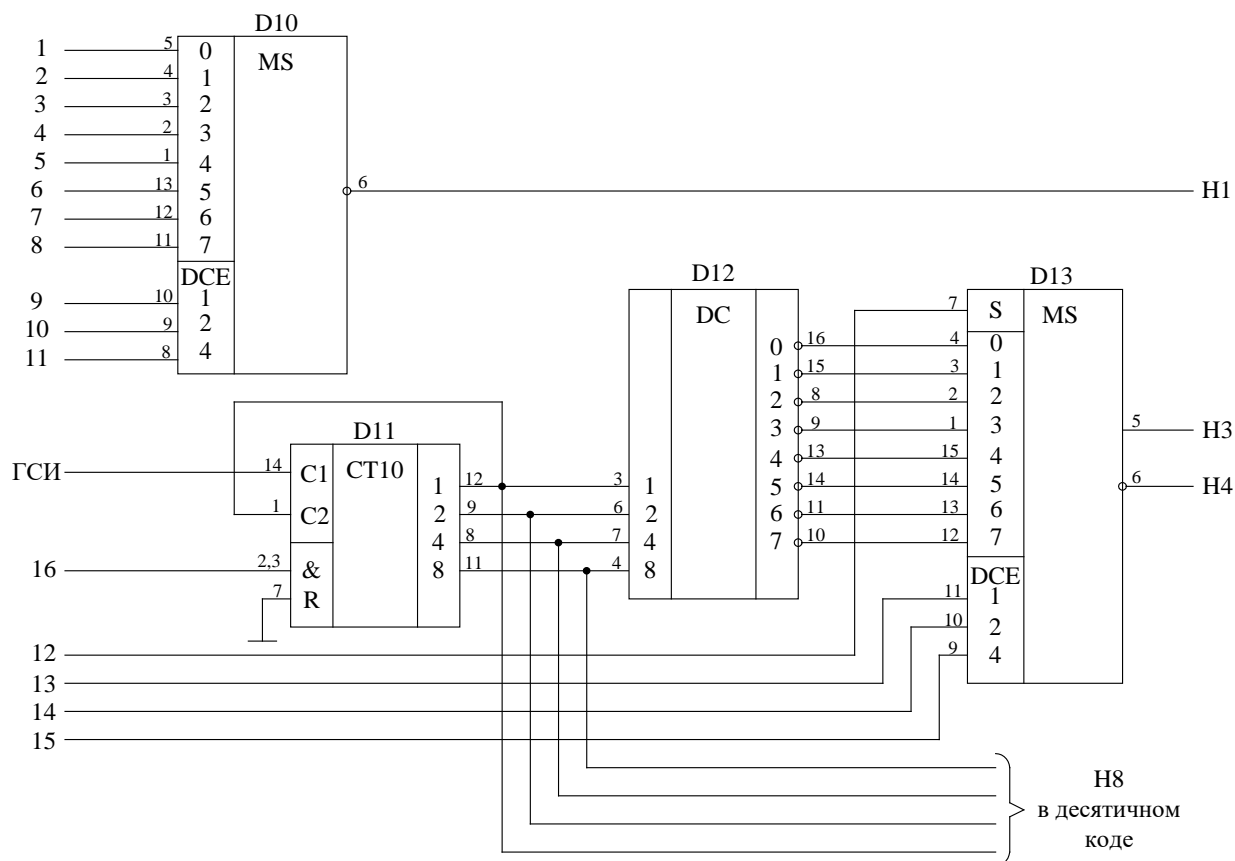


Рисунок 6.8 – Функциональная схема установки для исследования селекторов-мультиплексов

5. С помощью ПСИ подать на вход счетчика К155ИЕ2 серии импульсов

длиной $(N \bmod 8 + [N]^{(i)}) \bmod 8$ со сбрасыванием состояния счетчика после

каждого запуска, где N – номер зачетной книжки студента, $[N]^{(i)}$ – оператор взятия i -ого разряда десятичного представления числа N ,

$i = 0, 1, 2, \dots, [\log_{10} N]$. После каждой серии последовательно подавать на адресные входы ИМС К155КП7 коды для определения активного информационного входа микросхемы посредством изменения состояния сигнала на стробирующем входе ИМС. Построить временные диаграммы работы исследованного каскада. Диаграмма должна содержать состояние счетчика, состояние на входе мультиплексора и на его выходе.

6. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров задействованных кнопок программатора кодов, ГСИ и индикаторов;
- временные диаграммы работы микросхем, таблицы истинности и таблицы результатов, выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Можно ли реализовать на мультиплексоре с тремя адресными входами булеву функцию четырех переменных?
2. Для чего используется стробирование в цифровой технике?
3. Пояснить принцип работы схем, представленных на рисунках 6.4 и 6.5.
4. Для чего нужна обратная связь с выхода 12 микросхемы D10 на вход 1?
5. Какого типа используется счетчик в схеме на рисунке 6.8 и в чем заключается его функция?
6. Нарисуйте схему реализации сложения по модулю на базе четырехканального мультиплексора.
7. Как можно использовать соединение микросхем D11, D12, D13 на рисунке 6.8 для динамической индикации?
8. Нарисуйте схему реализации функции И-НЕ на базе четырехканального мультиплексора.
9. Нарисуйте схему двухкаскадного мультиплексирования.

Таблица 6.1 – Варианты заданий для исследования работы K155КП5

X1	0	1	0	1	0	1	0	1
----	---	---	---	---	---	---	---	---

X2	0	0	1	1	0	0	1	1
X3	0	0	0	0	1	1	1	1
Значение функции f	1	0	1	1	0	0	1	1
	2	1	1	0	1	1	0	0
	3	1	1	1	1	0	1	1
	4	1	1	1	0	1	0	0
	5	0	1	0	0	1	1	1
	6	1	1	1	0	0	1	1
	7	0	1	0	1	1	0	1
	8	1	0	1	1	0	0	1
	9	1	1	1	1	1	0	1
	10	0	1	1	0	1	1	0
	11	1	1	0	1	1	0	1

X1	0	1	0	1	0	1	0	1
X2	0	0	1	1	0	0	1	1
X3	0	0	0	0	1	1	1	1
Значение функции f	12	1	1	0	1	1	0	1
	13	0	0	0	1	1	1	0
	14	0	1	0	1	1	0	1
	15	1	1	1	1	0	1	1
	16	1	0	1	1	0	1	1
	17	0	1	0	1	0	0	0
	18	0	1	1	0	1	1	0
	19	1	1	0	1	1	1	0
	20	1	0	1	1	0	0	1
	21	1	1	0	1	1	1	1
	22	1	1	1	1	1	0	0

Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов
Практическая работа 7 Исследование работы цифрового сумматора в
интегральном исполнении

Цель работы: исследовать работу четырехразрядного полного сумматора двух операндов.

Программа работы

1. Исследовать функциональные возможности двоичного сумматора двух четырехразрядных операндов ИС типа К155ИМ3.
2. Построить временные диаграммы работы сумматора.
3. Составить и защитить отчет по результатам исследований, в котором должны быть приведены принципиальные схемы, временные диаграммы, таблицы с результатами выполнения работы и выводы с пояснением принципа действия микросхем.

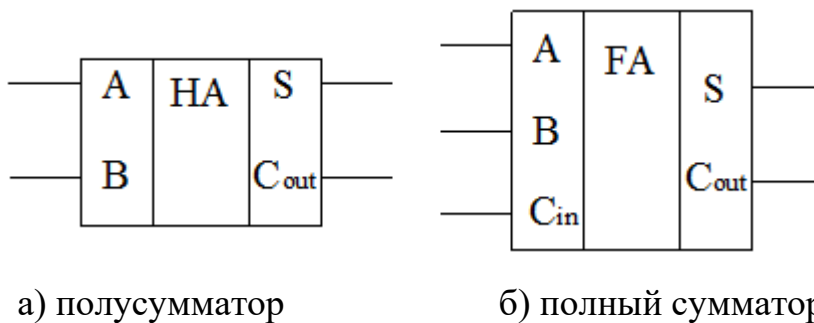
Краткие сведения из теории

Простейшим суммирующим элементом является полусумматор. Он имеет два входа – А и В и два выхода – S (сумма) и C (перенос) (рисунок 7.1, а).

Обозначением полусумматора служат буквы НА (Half-Adder). Его работа описывается уравнениями:

$$S = A \oplus B, \quad (\text{sum}),$$

$$C_{\text{out}} = AB, \quad (\text{carry-out}).$$



Процедуру сложения двух n -разрядных двоичных чисел можно представить следующим образом. Сложение цифр A_1 и B_1 младшего разряда дает бит суммы S_1 и бит переноса P_2 . В следующем разряде производится сложение цифр A_2 , B_2 , и P_2 , которое формирует бит суммы S_2 и перенос P_3 .

Полный одноразрядный сумматор имеет три входа (рисунок 7.1, б): два для слагаемых A и B и один для сигнала переноса с предыдущего разряда. Его работа описывается уравнениями:

$$g = AB \quad (\text{generate}),$$

$$p = A \oplus B \quad (\text{propagate}),$$

$$S = A \oplus B \oplus C_m = p \oplus C_m,$$

$$C_{out} = AB + (A \oplus B)C_{in}.$$

На рисунке 7.2 показана схема, поясняющая принцип действия n -разрядного сумматора с последовательным переносом. Число сумматоров здесь равно числу разрядов. Выход переноса P каждого сумматора соединен со входом переноса следующего, более старшего разряда. На входе переноса сумматора младших разрядов установлен «0», так как сигнал переноса сюда не поступает.

Слагаемые A_i и B_i складываются во всех разрядах одновременно, а перенос P поступает с окончанием операции сложения в предыдущем разряде.

Быстродействие многоразрядных сумматоров подобного вида ограничено задержкой переноса, так как формирование сигнала переноса на выходе старшего разряда не может произойти до тех пор, пока сигнал переноса младшего разряда не распространится последовательно по всей схеме.

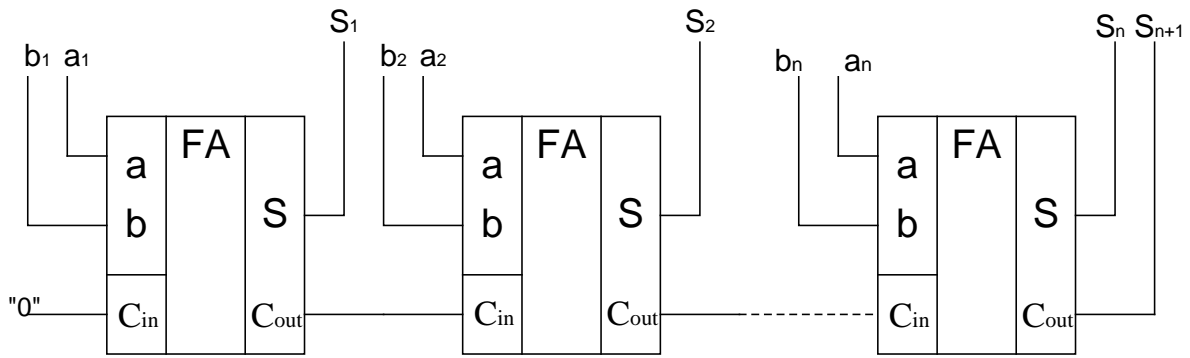


Рисунок 7.2 – Сумматор с последовательным переносом

Время переноса можно уменьшить, вводя параллельный перенос, для чего применяют специальные узлы – блоки ускоренного переноса. Они имеют достаточно сложную схему даже для $n = 5$.

В виде отдельных микросхем выпускаются одноразрядные, двухразрядные и четырехразрядные сумматоры. В семействе ТТЛ это микросхемы соответственно К155ИМ1, ИМ2 и ИМ3. В данной работе исследуется микросхема К155ИМ3 (рисунок 7.3).

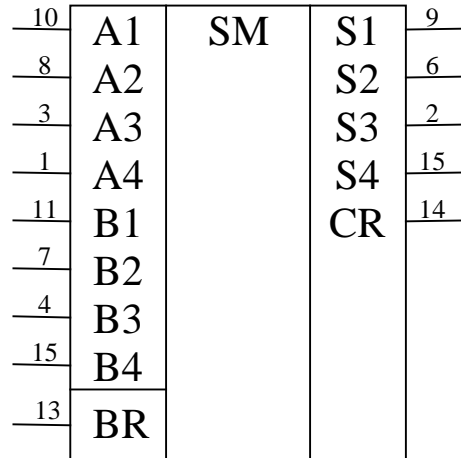


Рисунок 7.3 – Четырехразрядный сумматор К155ИМ3

Микросхема К155ИМ3 представляет собой быстродействующий полный сумматор. Он принимает два четырехразрядных слова по входам данных A_i и B_i , а по входу BR сигнал переноса. Сумматор работает как с положительной (высокий уровень – единица), так и с отрицательной логикой (низкий уровень – единица).

Суммирование происходит согласно уравнению:

$$BR + 2^0(A1 + B1) + 2^1(A2 + B2) + 2^2(A3 + B3) + 2^3(A4 + B4) = \\ = 2^0 S1 + 2^1 S2 + 2^2 S3 + 2^3 S4 + 2^4 CR .$$

Если выбрана положительная логика, то вход BR нельзя оставлять свободным, если он не используется необходимо соединить его с низким уровнем.

При сложении отрицательных чисел используют обратный или дополнительный по модулю коды. Сложение в дополнительном коде операндов A и $-B$ по модулю P осуществляется в соответствии с выражением:

$$|A - B|_p^+ = |A + (p - B)|_p^+,$$

где $|\bullet|_p^+$ – операция вычисления остатка целочисленного деления по модулю p ; $A, B \in GF(p)$.

Вычисление суммы двух операндов в обратном коде осуществляется в соответствии с выражением:

$$|A - B|_p^+ = |A + (p - 1 - B) + 1|_p^+,$$

где $(p - 1 - B)$ – обратный код числа $-B$.

Описание установки

Исследуемая микросхема K155ИМ3 (D7) расположена на печатной плате сменного устройства УС-15, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК), расположенного на лицевой панели БУК. Значение первого операнда (А) задается кнопками «9»...«12» (СЗР...МЗР), значение второго операнда (В) – кнопками «13»...«16» (СЗР...МЗР). Перенос с предыдущего сумматора задается кнопкой «8» (рисунок 7.4). Генерация «логической единицы» («1») происходит при нажатой кнопке, а «логического нуля» («0») – при не нажа-

той. Выходные сигналы отображаются на правом и левом цифровом табло в двоичном коде и на первом и втором индикаторах левого цифрового табло в десятичном коде.

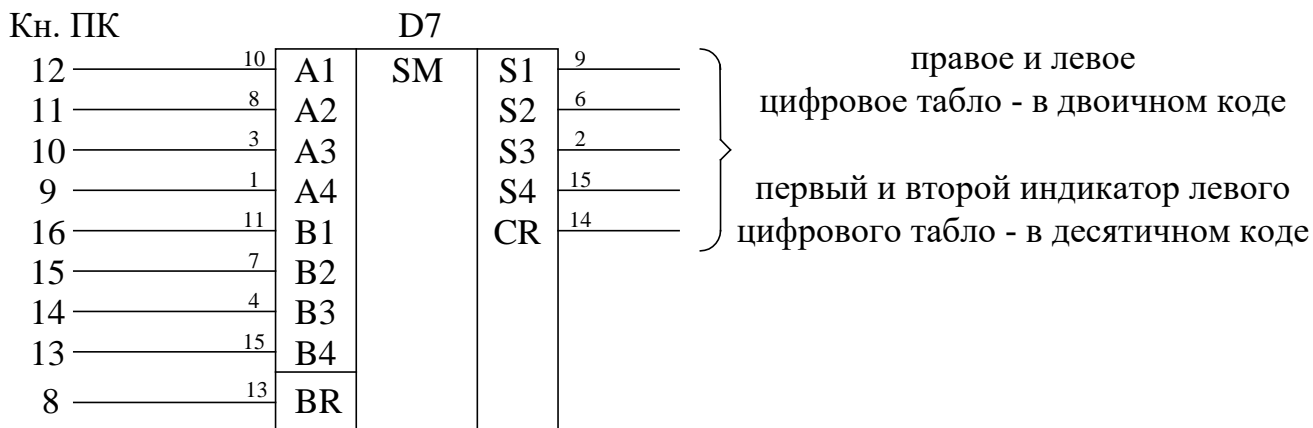


Рисунок 7.4 – Функциональная схема установки для исследования цифрового сумматора

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-15 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.

4.2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-15, нажав кнопку «+5 В».

3. Сложить на сумматоре операнды, представленные в соответствии с вариантом задания (таблица 7.1). Сложение отрицательных чисел произвести в обратном и дополнительном кодах. Результаты сложения представить в таблице, содержащей столбцы с заданными значениями операндов в десятичном коде, дополнительном и обратном кодах (в двоичной записи), результатами сложения в десятичном и двоичном представлениях (последовательность записи CRS4S3S2S1).

Таблица 7.1 – Варианты заданий для исследования работы сумматора

№ №	A	B	BR	№ №	A	B	BR	№ №	A	B	BR	№ №	A	B	BR
1	7	3	0	6	2	14	1	11	10	5	0	16	6	6	1
	-5	9	1		-2	-5	0		15	-11	1		-5	-12	0
2	9	15	1	7	8	13	1	12	7	7	1	17	14	6	1
	-8	14	0		6	-9	1		-7	8	0		-5	6	1
3	6	4	1	8	4	6	0	13	8	7	1	18	3	8	0
	-2	5	0		-6	-2	1		6	-13	0		-3	9	1
4	12	1	1	9	11	10	1	14	13	3	1	19	9	5	0
	-12	5	0		12	-13	1		-13	6	0		-2	-9	0
5	1	6	1	10	13	7	0	15	9	10	1	20	4	5	1
	6	-1	1		-9	15	1		-1	9	0		-4	15	0

4. Изобразить временные диаграммы последовательного сложения операндов из задания. Диаграмма должна содержать значения на входах и выходах сумматора.

5. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров, задействованных кнопок программатора кодов и индикаторов;
- временные диаграммы работы микросхем и таблицы результатов, выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Какие типы сумматоров вам известны?
2. Изобразите внутреннюю структуру полусумматора и полного сумматора (с использованием элементов ИЛИ-НЕ, И-НЕ, исключающее ИЛИ, ИЛИ, И, НЕ).
3. По модулю какого числа осуществляет сложение сумматор

К155ИМ3 если не учитывать CR, или CR и S4, или CR и S4 и S3, или CR и S4 и S3 и S2?

4. Как осуществляется сложение чисел в обратном и дополнительном кодах? В чем их преимущества и недостатки?

5. Чем объясняется использованием различных кодов в ЭВМ? Какие коды вы знаете?

6. Как осуществить сложение трех операндов на одном сумматоре? Изобразите внутреннюю структуру двухразрядного сумматора на три операнда.

Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов

Практическая работа 8 Исследование работы регистров сдвига информации

Цель работы: исследовать работу универсального и реверсивного сдвиговых регистров.

Программа работы

1. Исследовать функциональные возможности четырехразрядного универсального сдвигового регистра ИС К155ИР1. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.

2. Исследовать функциональные возможности схем соединения ИС К155ИР1 (реверсивный сдвиговый регистр, восьмиразрядный регистр).

3. Исследовать функциональные возможности восьмиразрядного реверсивного сдвигового регистра ИС К155ИР13. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.

4. Составить и защитить отчет по результатам исследований, в котором должны быть приведены принципиальные схемы, временные диаграммы и выводы с пояснением принципа действия микросхем.

Краткие сведения из теории

Параллельные регистры – это устройства, предназначенные для записи, хранения и выдачи информации, представленной в виде двоичных кодов. Для хранения каждого двоичного разряда в регистре используется одна триггерная ячейка.

Для запоминания многоразрядных слов необходимое число триггеров объединяют вместе и рассматривают как единый функциональный узел-регистр. Если регистр построен на триггерах-защелках, то его называют регистр-защелка. Типовыми внешними связями регистра являются информационные входы D; вход сигнала записи (или загрузки) С, вход гашения R, выходы триггеров Q. В упрощенном варианте регистр может не иметь входа

гашения и инверсных выходов.

На рисунке 8.1 показана схема четырехразрядного регистра, выполненного на базе ИМС К155ТМ5 и К155ЛИ1.

При подаче управляющего сигнала $Y1 = 1$ информация по входам $D0...D3$ записывается одновременно в соответствующие разряды четырех D-триггеров. При $Y1 = Y2 = 0$ информация хранится в регистре памяти, а при $Y2=1$ происходит параллельное считывание информации.

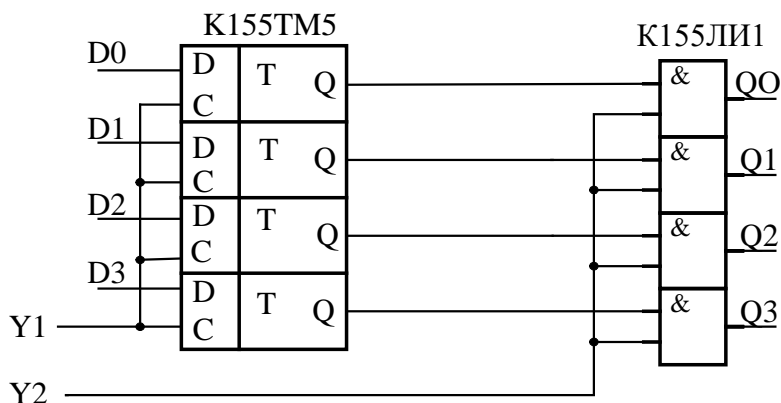


Рисунок 8.1 – Четырехразрядный параллельный регистр

Выпускаемые промышленностью регистры иногда объединяют на кристалле микросхемы с другими узлами, в паре с которыми регистры часто используются в схемах цифровой аппаратуры. Пример такого комплексного узла – микросхема многорежимного буферного регистра (МБР) К589ИР12, основу которой составляет 8-разрядный регистр-защелка с входами $D0...D7$, C , R и восемью выходами $Q0...Q7$, снабженными усилителями мощности (буферами) с тремя состояниями выхода. Кроме того, в состав микросхемы входят несколько элементов управления. Усилители с тремя состояниями выхода имеет и 4-разрядный регистр К155ИР15, построенный на непрозрачных триггерах без свойств захвата или проницаемости, т. е. управляемых строго фронтом.

Сдвигающий или сдвиговый регистр (shift register) это регистр, содержимое которого при подаче управляющего сигнала СДВИГ может сдвигаться

в сторону старших или младших разрядов. Схема сдвигающего регистра из цепочки непрозрачных триггеров показана на рисунке 8.2.

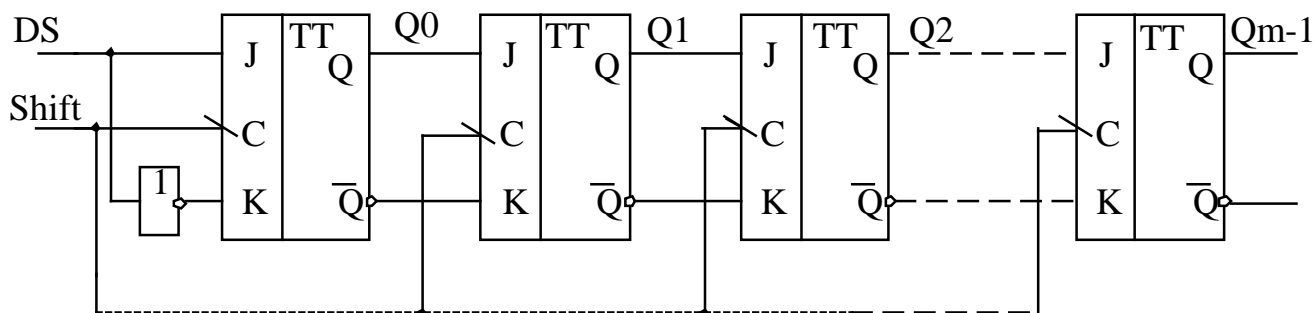


Рисунок 8.2 – Сдвигающий регистр

Пусть на рисунке триггер Q_0 – младший, Q_{m-1} – старший; вход каждого триггера (кроме Q_0) подключен к выходу соседнего младшего триггера. Когда на все C входы триггеров поступает активный спад сигнала $Shift$, выход каждого триггера принимает состояние своего младшего соседа и, таким образом, информация, содержащаяся в регистре, сдвигается на один разряд в сторону старших разрядов, влево. Триггер Q_0 принимает при этом состояние последовательного входа DS (data serial). Информация, поступившая на вход DS во время какого-либо такта, появится на выходе Q_{m-1} через m тактов.

Существенно, что в схеме использованы именно непрозрачные триггеры. Если поставить прозрачные защелки, то при активном уровне сигнала $Shift$ все триггеры становятся прозрачными, и сигнал DS успеет пройти столько триггеров, сколько позволит длительность сигнала $Shift$.

Часто требуются более сложные регистры: с параллельной синхронной записью информации, реверсивные, с параллельно-последовательной записью. Такие регистры называются универсальными. Примером такого регистра служит ИМС К155ИР11. Регистр может работать в четырех режимах: параллельное занесение данных, сдвиг влево, сдвиг вправо, хранение данных.

В арифметике сдвиг числа на один разряд влево соответствует умножению его на 2, сдвиг вправо – делению пополам.

В аппаратуре передачи данных универсальные регистры преобразуют параллельный код в последовательный и обратно. Передача данных последовательным кодом по сравнению с передачей параллельным существенно экономит число линий связи. Это покупается ценой увеличения времени обмена.

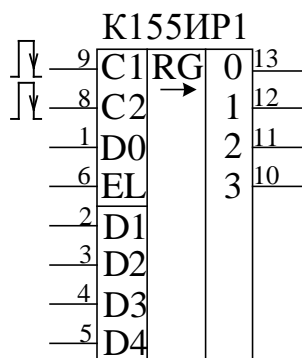


Рисунок 8.3 – Микросхема сдвигового регистра К155ИР1

Микросхема К155ИР1 – четырехразрядный сдвигающий регистр позволяет производить последовательную и параллельную запись информации в триггеры регистра, последовательное и параллельное считывание информации, сдвиг информации (рисунок 8.3).

Функциональное назначение выводов микросхемы:

C1 – служит для подачи положительных тактовых импульсов, сдвигающих информацию, причем сдвиг происходит по спадам импульсов.

C2 – запись в триггеры регистра информации, имеющейся на входах D1 – D4.

EL – управляющий вход. При лог. 1 на входе EL возможна запись со входов D1 – D4. При лог. 0 – сдвиг.

DO – для последовательной записи информации. Запись происходит в режиме сдвига.

Наличие управляющего входа EL расширяет возможности использования микросхемы. Если соединить между собой входы C1 и C2, можно сдвигом и записью, лишь изменяя логический уровень на входе EL.

Если соединить между собой входы C2 и EL, специального управляю-

щего сигнала в этом случае не потребуется – сдвиг будет происходить при подаче импульсов на вход C1, запись – при подаче импульсов на C2.

Если вход D1 подключить к выходу 2, D2 – к выходу 3, D3 – к выходу 4, а D4 использовать в качестве входа последовательной записи, то получится реверсивный сдвигающий регистр. При подаче импульсов на вход C1 будет происходить последовательная запись информации со входа D0 и сдвиг в сторону возрастания номеров выходов (сдвиг вправо). При подаче импульсов на вход C2 запись будет происходить с входа D4, сдвиг – в сторону уменьшения номеров выходов (сдвиг влево). В полученный таким образом реверсивный сдвигающий регистр параллельная запись информации невозможна.

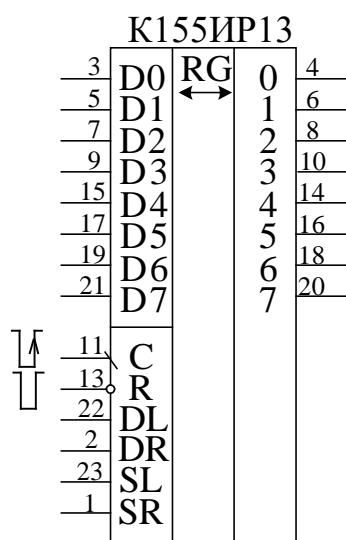


Рисунок 8.4 – Микросхема сдвигающего регистра К155ИР13

Микросхема К155ИР13 (рисунок 8.4) – восьмиразрядный реверсивный сдвигающий регистр, имеет 8 выходов параллельного кода и следующие входы: D1...D8 – для подачи информации при параллельной записи, DR и DL – для подачи информации при последовательной записи и сдвиге вправо и влево соответственно, C – для подачи тактовых импульсов, SR и SL – для управления режимом и R – для сброса триггеров регистра. При подаче на вход R лог. 0 происходит сброс всех триггеров счетчика независимо от состояния других входов. Любые другие изменения состояния регистра происходят

лишь по спаду импульса отрицательной полярности на входе С. При лог. 1 на входе SR и лог. 0 на входе SL по спаду импульса на входе С происходит сдвиг информации вправо (в сторону возрастания номеров выходов). В первый разряд сдвигающего регистра последовательный прием информации осуществляется с входа DR. При лог. 1 на входе SL и лог. 0 на входе SR сдвиг осуществляется влево, прием информации в восьмой разряд регистра – с входа DL. Если лог. 1 подать сразу на оба входа SR и SL, по спаду импульса отрицательной полярности на входе С произойдет параллельная запись в регистр информации со входов D1 – D8. Подача лог. 0 на оба входа SR и SL блокирует тактовые импульсы, подаваемые на вход С, и по ним информация в регистре уже не будет меняться. Однако, если при лог. 0 на входе С вначале хотя бы на одном из входов SR или SL имелась лог. 1, затем на обоих входах – лог. 0, это изменение будет воспринято микросхемой как спад тактового импульса, по которому произойдет сдвиг или параллельная запись, в зависимости от состояния входов SR и SL перед появлением лог. 0 на обоих входах. Указанное свойство микросхемы позволяет, подав постоянно лог. 0 на вход С, использовать вход SR для подачи импульсов сдвига вправо, вход SL – для подачи импульсов сдвига влево. Сдвиг будет происходить по спадам импульсов положительной полярности. Если изменение сигнала с лог. 1 на лог. 0 произойдет одновременно на обоих входах SR и SL, осуществится параллельная запись информации с входов D1...D8.

Описание установки

Исследуемые микросхемы K155IP1 (D2, D3) и K155IP13 (D4) расположены на печатной плате сменного устройства УС-17, входящего в комплект оборудования К32. Управляющие сигналы подаются с помощью кнопок программатора кодов (ПК) и программатора серии импульсов (ПСИ), расположенных на лицевой панели БУК. Кнопкой «13» осуществляется переключение подачи серии импульсов от ГСИ между входами С1 и С2 микросхемы K155IP1 (рисунок 8.5). Информационные и управляющие сигналы для D2 задаются кнопками «3»...«8»,

а для D3 – кнопками «1», «2», «11». Кнопкой 14 осуществляется переключение входов семисегментных индикаторов между выходами микросхем D2, D3 и микросхемы D4. На информационные входы микросхемы K155ИР13 сигналы задаются кнопками «1»...«8», а управляющие – кнопками «9»...«11», «13», «16» и ПСИ. Выходные сигналы индуцируются на цифровом табло в двоичном коде (рисунок 8.5). Микросхема D1 типа K155ЛА3, D5...D8 типа K155ЛИ1, D9 и D10 – K155ЛЛ1.

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-17 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.

2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-17, нажав кнопку «+5 В».

3. Произвести параллельную загрузку в регистр D2 числа, соответствующего вашему варианту (см. таблица 8.1), и произвести сдвиг информации на заданное количество разрядов. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.

4. Произвести последовательную загрузку числа из таблицы 8.1 в D2. Произвести сдвиг записанной информации. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.

5. Соединить XS3 с XS4 и записать в регистр D3 число из таблицы 7.2, используя сначала вход D0 (сдвиг вправо), а затем D4 (сдвиг влево). Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы. После опыта разъединить XS3 с XS4.

6. Произвести соединение XS1 с XS2 и исследовать каскад из двух регистров D2 и D3 на восемь разрядов. Осуществить запись в регистры числа из таблицы 8.3. Построить временные диаграммы работы исследованного схемного соединения.

7. Исследовать функциональные возможности регистра K155ИР13. Произвести параллельную загрузку числа из таблицы 8.3, осуществить сдвиг

вправо на количество разрядов N , указанных в данной таблице, и сдвиг влево на число разрядов $(8 - N)$. Построить временные диаграммы исследованного режима работы микросхемы. Произвести сброс записанной ранее информации. Осуществить последовательную загрузку данных со сдвигом четырех разрядов вправо и четырех разрядов влево таким образом, чтобы содержимое регистра было равно инверсии записанного ранее числа. Построить временные диаграммы исследованного режима работы микросхемы.

8. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров задействованных кнопок программатора кодов, ГСИ и индикаторов;
- временные диаграммы работы микросхем, таблицы истинности и таблицы результатов, выводы по проделанной работе.

Таблица 8.1 – Варианты заданий для исследования работы K155IP1

№№ варианта		Загружаемое число	Количество сдвигаемых разрядов
1	17	0101	2
2	18	1001	3
3	19	0110	3
4	20	0011	2
5	21	0100	2
6	22	0101	3
7	23	0110	2
8	24	0111	2
9	25	1000	3
10	26	1001	2
11	27	1010	3
12	28	1011	2
13	29	1100	3

14	30	1101	3
15	31	1110	2
16	32	1111	2

Контрольные вопросы к защите работы

1. Функциональное назначение регистров.
2. Можно ли построить сдвиговый регистр на одноступенчатых триггерах?
3. Как реализовать регистровую память, используя исследованные микросхемы и дешифратор?
4. Как использовать исследованные микросхемы для реализации логических и арифметических операций?
5. Для чего на функциональной схеме установки (рисунок 7.5) используются микросхемы D5 – D10.

Таблица 8.2 – Варианты заданий для исследования работы K155ИР1 в реверсивной схеме включения

№№ варианта		Загружаемое число	
		D0	D4
1	17	0101	1100
2	18	1001	1101
3	19	0110	1110
4	20	0011	1111
5	21	0100	0101
6	22	0101	0110
7	23	0110	0111
8	24	0111	1000
9	25	1000	1001
10	26	1001	0101
11	27	1010	0101
12	28	1011	1001
13	29	1100	0110
14	30	1101	0011
15	31	1110	0100
16	32	1111	0101

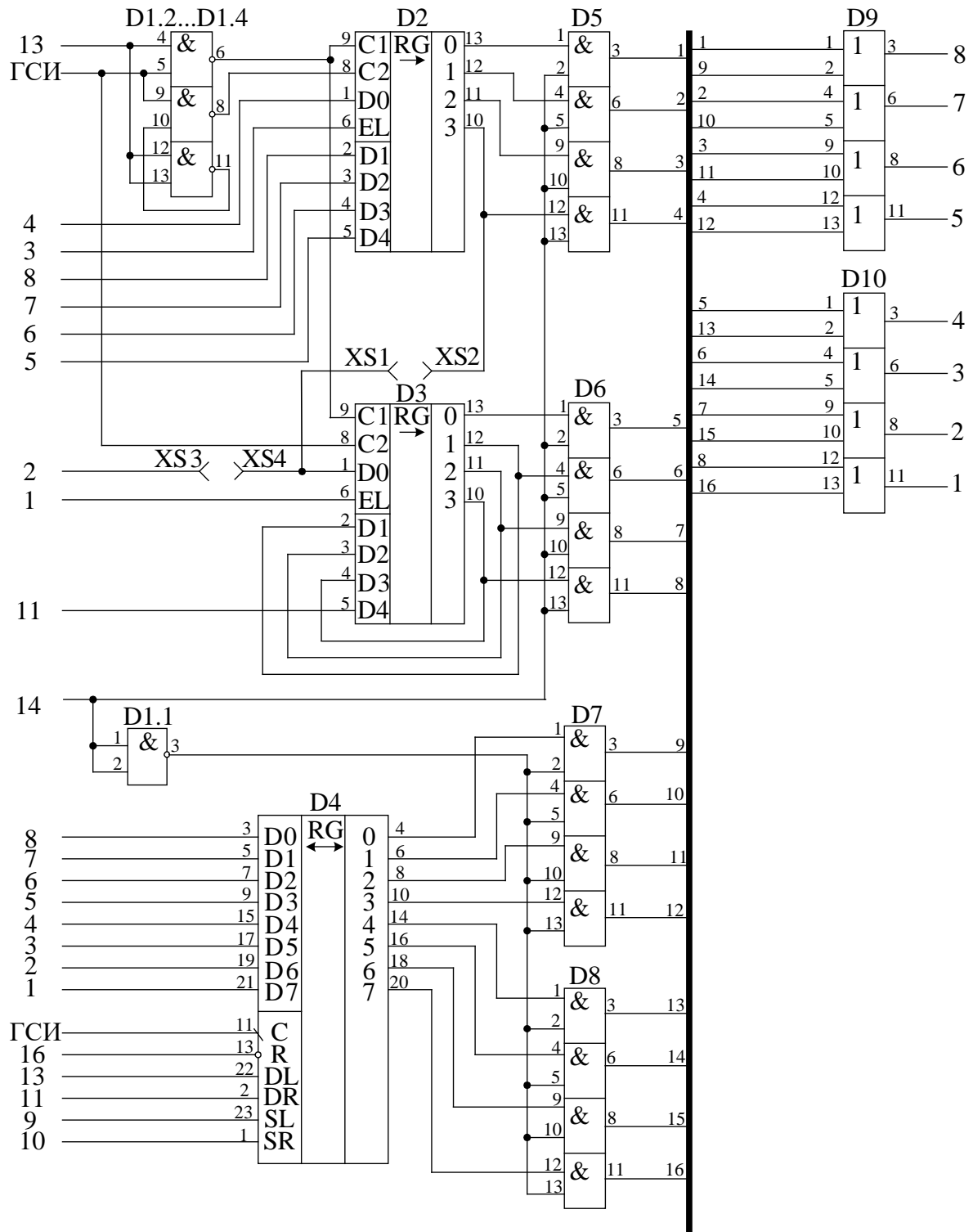


Рисунок 8.5 – Функциональная схема установки для исследования регистров сдвига информации

Таблица 8.3 – Варианты заданий для исследования работы соединения микросхем D2 и D3 и работы микросхемы K155ИР13

№ №	Загружаемое число	Количество сдвигаемых разрядов	№ №	Загружаемое число	Количество сдвигаемых разрядов
1	01010001	5	1	11000001	5
2	10011010	4	2	01110010	4
3	01100011	2	3	10010011	2
4	01010100	3	4	11000100	3
5	00100101	5	5	11110101	5
6	10101110	2	6	11010110	2
7	11000111	4	7	01100111	4
8	00101000	3	8	01101000	3
9	01001001	2	9	11001001	2
10	11001010	3	10	00011010	3
11	00101011	5	11	00111011	5
12	10001100	4	12	11001101	4
13	10001101	6	13	01001101	6
14	10101110	3	14	00101110	3
15	00101111	4	15	01101111	4
16	01010001	5	16	10010001	5
17	10010010	6	17	00110010	6
18	01010011	4	18	01110011	4

Тема 4 Сложные цифровые устройства и преобразователи кодов

Практическая работа 9 Исследование работы преобразователей кодов

Цель работы: исследовать принцип действия преобразователей двоично-десятичного кода в двоичный и двоичного кода в двоично-десятичный.

Программа работы

1. Исследовать функциональные возможности преобразователя двоично-десятичного кода в двоичный ИМС типа К155ПР6.
2. Исследовать функциональные возможности преобразователя двоичного кода в двоично-десятичный ИМС типа К155ПР7.
3. Составить и защитить отчет по результатам исследований, в котором должны быть приведены принципиальные схемы, временные диаграммы, таблицы с результатами выполнения работы и выводы с пояснением принципа действия микросхем.

Краткие сведения из теории

Микросхемы К155ПР6 и К155ПР7 служат для преобразования двоично-десятичного кода в двоичный и двоичного кода в двоично-десятичный соответственно. Микросхемы являются постоянными запоминающими устройствами, программирование которых произведено на заводе-изготовителе. Управление выбором нужной микросхемы осуществляется подачей лог. 0 на вход Е микросхемы. Для микросхем, на входы Е которых подана лог. 1, на всех выходах также лог. 1.

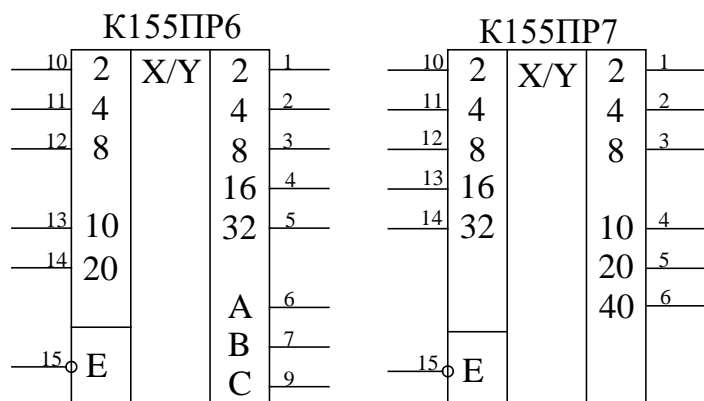


Рисунок 9.1 – Микросхемы К155ПР6 и К155ПР7

Включение микросхем К155ПР6 и К155ПР7 в простейшем варианте проиллюстрировано на рисунке 9.2. Одна микросхема К155ПР6 позволяет преобразовать двоично-десятичный код чисел 0...39 в двоичный. Младший разряд (разряд единиц) передается мимо микросхем, так как он совпадает в двоично-десятичном и двоичном кодах. Аналогично одну микросхему К155ПР7 можно использовать для преобразования двоичного кода чисел 0...63 в двоично-десятичный.

Микросхема К155ПР6 позволяет также преобразовать двоично-десятичный код чисел 0...9 в код дополнения до 9 (рисунок 9.3, а) и до 10 (рисунок 9.3, б). Сумма десятичных чисел, соответствующих входному и выходному кодам схемы рисунка 9.3 (а), равна 9, а схемы рисунка 9.3 (б) – 10. В схеме рисунка 9.3 (б) при входном коде, соответствующем числу 0, выходной код также соответствует 0.

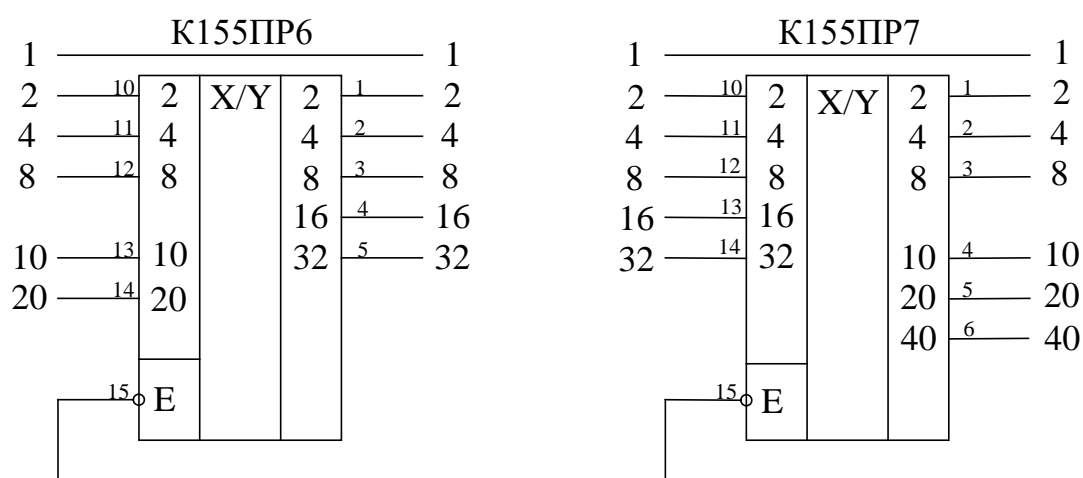


Рисунок 9.2 – Простейшее включение микросхемы К155ПР6 и К155ПР7

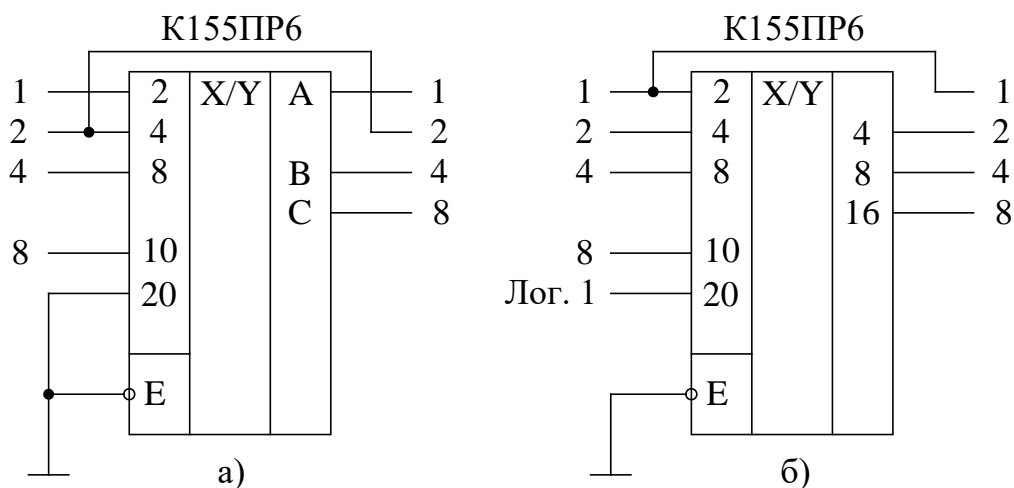


Рисунок 9.3 – Преобразователь кода в дополнение до 9 (а)
и в дополнение до 10 (б)

Микросхему K155PP6 можно применять для преобразования данных, вводимых в двоично-десятичном коде, в двоичный, например для ввода двоично-десятичного кода в цифроаналоговый преобразователь, работающий, как правило, в двоичном коде.

Микросхема K155PP7 может быть использована для преобразования в десятичный вид данных, полученных в двоичном коде, например с выхода аналого-цифрового преобразователя для индикации в десятичном виде.

Разрядности одиночных микросхем недостаточно для решения большинства задач преобразования кодов, в этих случаях применяют каскадное соединение микросхем. На рисунке 9.4 показано соединение двух микросхем K155PP6 для преобразования двоично-десятичных кодов чисел $0...99$ в двоичный, на рисунке 9.5 – шести микросхем для преобразования кодов чисел $0...999$. На рисунках 9.6 и 9.7 представлены схемы для преобразования двоичных кодов чисел $0...255$ и $0...511$ в десятичный. Для преобразования кодов десятичных чисел $0...9999$ в двоичный требуется 19 микросхем K155PP6, а для преобразования кодов двоичных чисел $0...4095$ и $0...65535$ в двоично-десятичный – соответственно 8 и 16 микросхем K155PP7.

Микросхемы K155PP6 и K155PP7 выполнены с «открытым» коллектор-

ным выходом, поэтому для обеспечения помехоустойчивой работы микросхем между их выходами и плюсом питания следует устанавливать нагрузочные резисторы 1...5.1 кОм, эти резисторы на приведенных схемах условно не показаны. Вход разрешения работы микросхем E должен быть подключен к общему проводу, при подаче на него лог. 1 все выходы переходят в выключенное состояние.

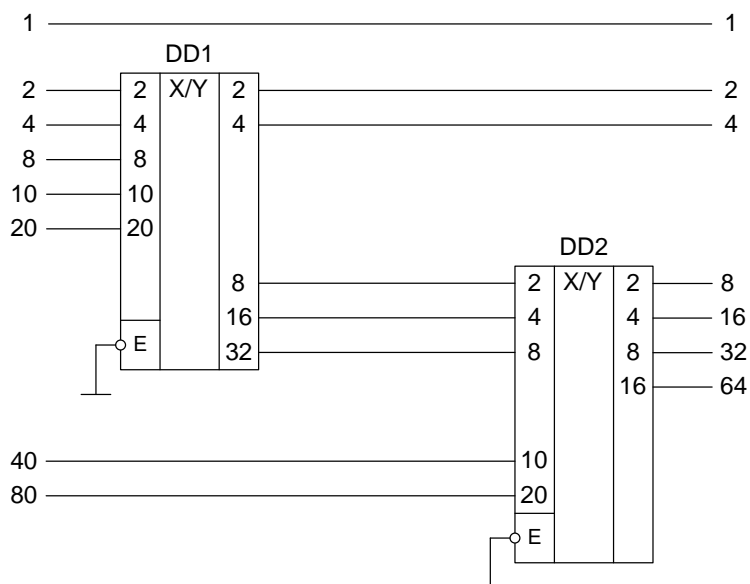


Рисунок 9.4 – Преобразователь двоично-десятичного кода чисел до 99 в двоичный

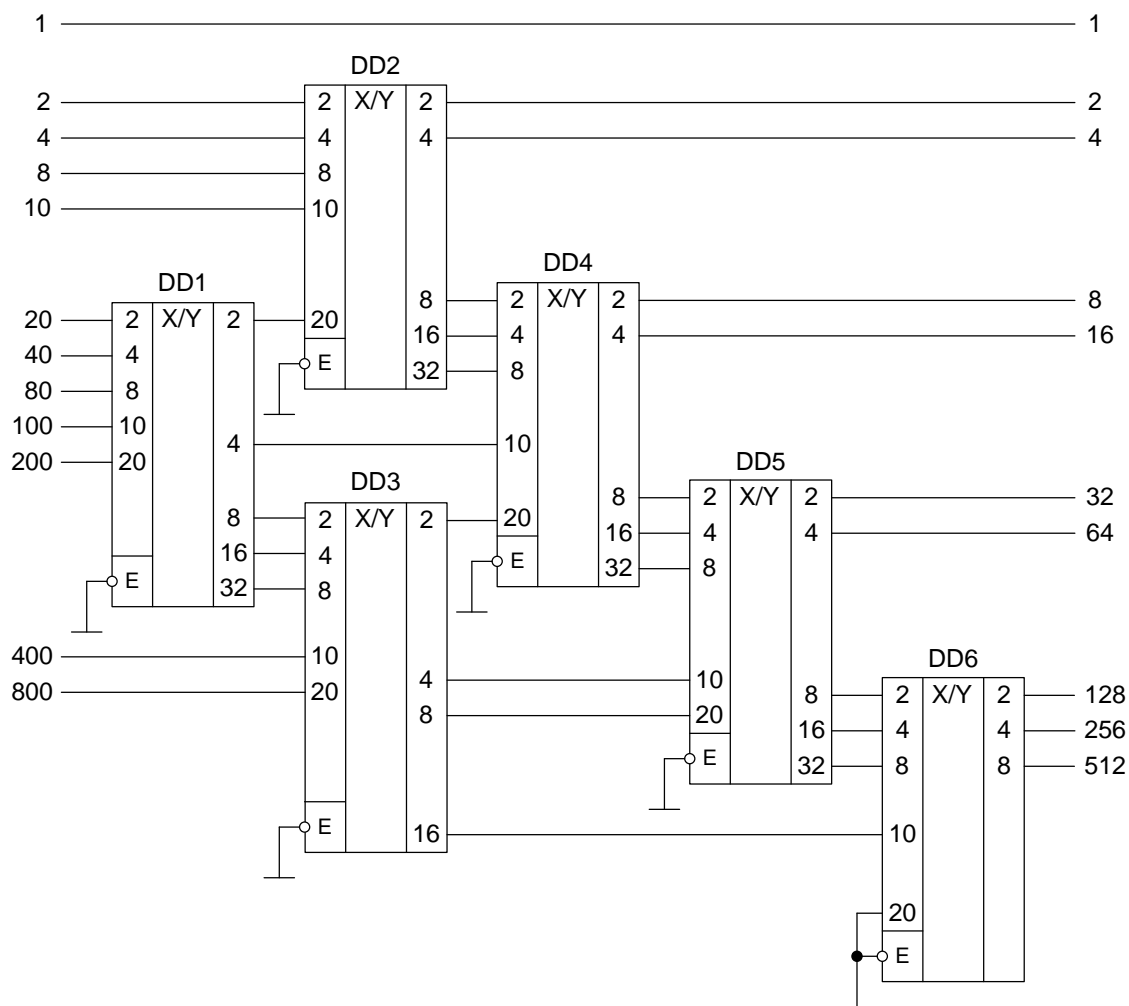


Рисунок 9.5 – Преобразователь двоично-десятичного кода чисел до 999 в двоичный

Описание установки

Исследуемые микросхемы К155ПР6 (DD2) и К155ПР7 (DD3) расположены на печатной плате сменного устройства УС-18, входящего в комплект оборудования К32. Переключение между микросхемами осуществляется кнопкой «1», а задание кода – кнопками «3»...«8» программатора кодов (см. рисунок 9.8). Выходные сигналы индицируются на цифровых табло в двоичном коде. Микросхема DD1 типа К155ЛН1, DD4 и DD5 – К155ЛИ1.

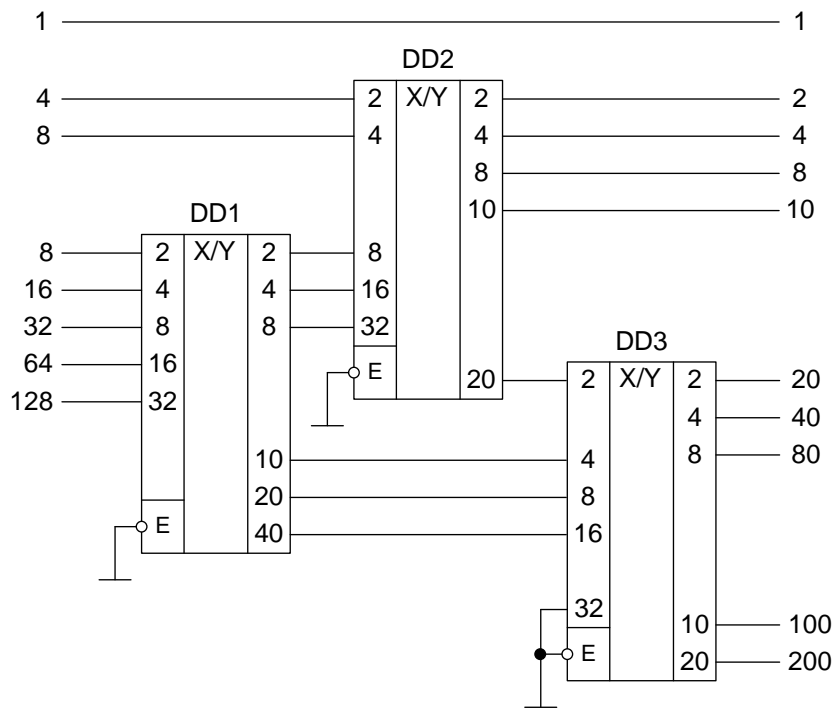


Рисунок 9.6 – Преобразователь двоичного кода чисел до 255
в двоично-десятичный

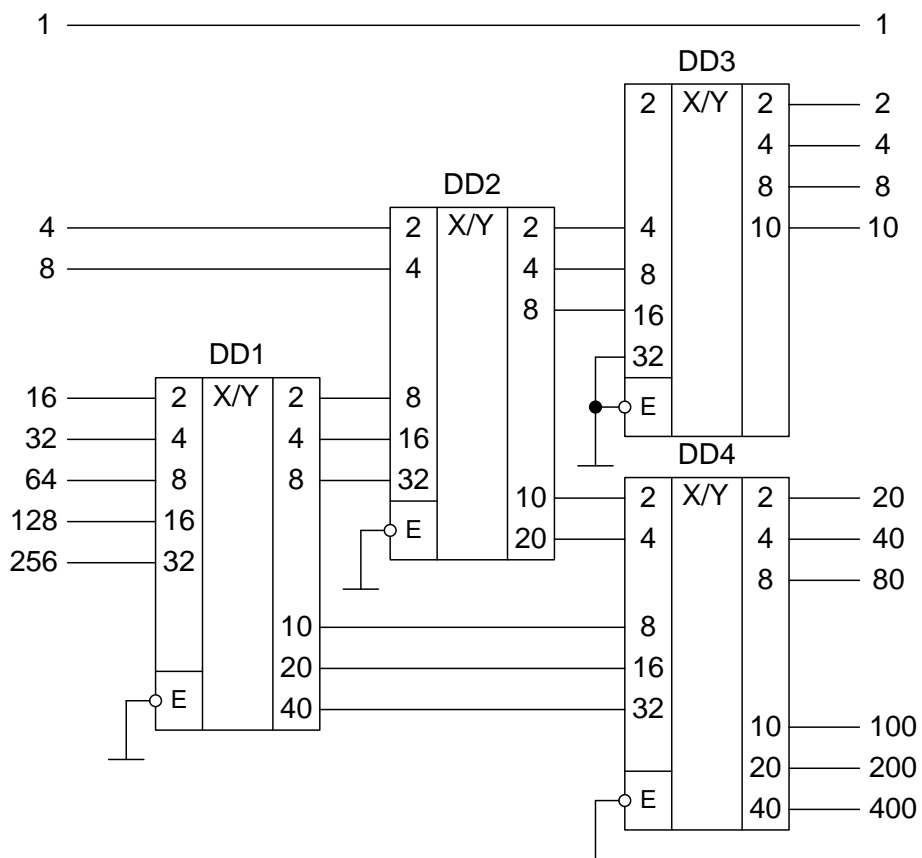


Рисунок 9.7 – Преобразователь двоичного кода чисел до 511
в двоично-десятичный

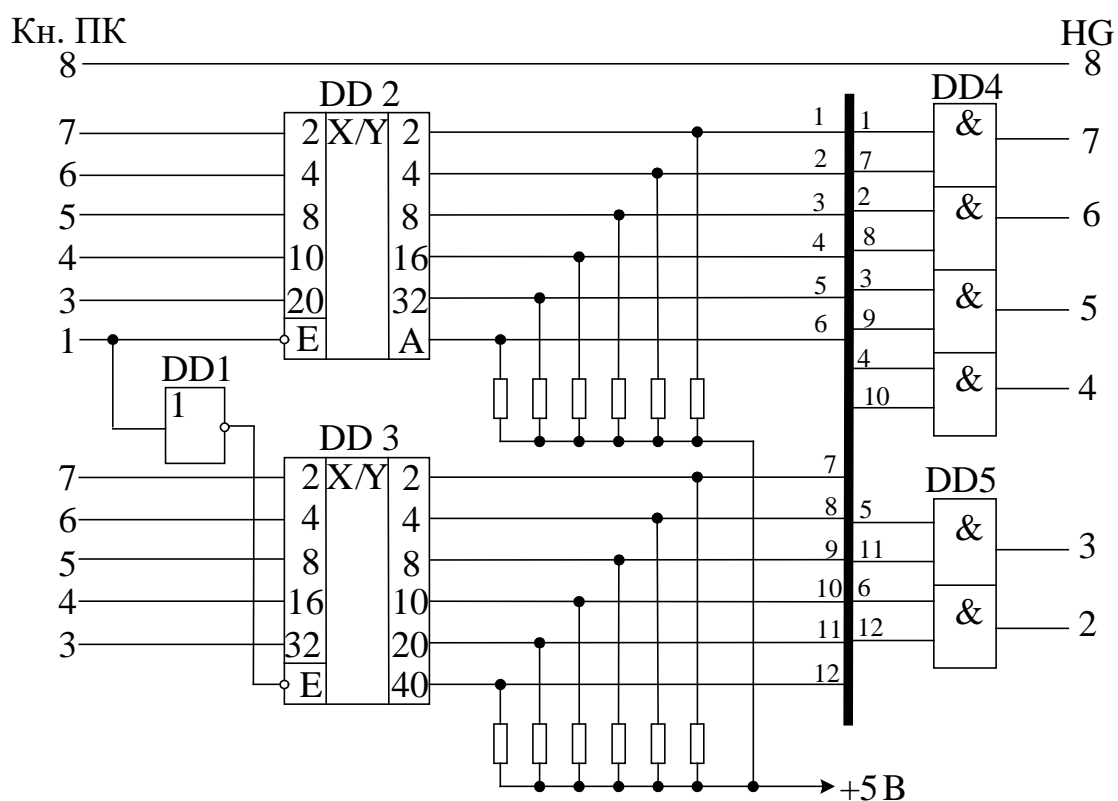


Рисунок 9.8 – Функциональная схема установки для исследования преобразователей кода

Последовательность выполнения работы

1. Закрепить на кронштейне устройство сменное УС-18 и установить его в разъем Х4 универсальной установки К32.
2. Включить питание установки нажатием кнопки «СЕТЬ» и питание УС-18, нажав кнопку «+5 В».
3. Произвести перевод чисел из двоичного в двоично-десятичное представление на DD3. Числа задает преподаватель. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.
4. Произвести перевод чисел двоично-десятичного представления в двоичное на DD2. Числа задает преподаватель. Построить временные диаграммы работы исследованной микросхемы.
5. По завершении работы отжать кнопки «Сеть» и «+5В», вынуть УС из разъема БУК.

Содержание отчета

В соответствии с общими требованиями отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- принципиальные схемы с указанием на них номеров задействованных кнопок программатора кодов и индикаторов;
- временные диаграммы работы микросхем и таблицы результатов, выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Для чего используется двоично-десятичное кодирование в микропроцессорных системах?
2. Избыточен ли двоично-десятичный код по сравнению с двоичным представлением чисел?
3. Сколько микросхем К155ПР6 потребуется для преобразователя кодов двоично-десятичных чисел 0 – 99999 в двоичный?
4. Сколько микросхем К155ПР6 потребуется для преобразователя кодов двоичных чисел 0 – 2047 в двоично-десятичный?

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»

Невинномысск 2025

Содержание

Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства	
Лабораторная работа №1 «Исследование свойств емкостных измерительных преобразователей, построение их математической модели»	3
Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства	
Лабораторная работа №2 «Исследование свойств фотоэлектрических измерительных преобразователей»	13
Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства	
Лабораторная работа №3 «Исследование свойств тепловых измерительных преобразователей, и численный расчет их характеристик»	29
Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства	
Лабораторная работа № 4. Исследование резисторного усилительного каскада	44
Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства	
Лабораторная работа № 5. Исследование преобразователей аналоговых сигналов на операционных усилителях	64
Тема 2. Цифровые преобразователи и основы цифровой логики	
Лабораторная работа № 6. Исследование логических элементов.....	86
Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы	
Лабораторная работа № 7. Исследование характеристик полупроводниковых приборов.....	96
Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы	
Лабораторная работа № 8. Исследование последовательностных логических устройств.....	113
Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы	
Лабораторная работа № 9 «Исследование работы цифро-аналогового преобразователя в интегральном исполнении, численный расчет отклонения экспериментальных данных, и определения точности»	124
Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы	
Лабораторная работа №10 «Исследование аналого-цифрового преобразователя и численный расчет его погрешности»	149

Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства

Лабораторная работа №1 «Исследование свойств емкостных измерительных преобразователей, построение их математической модели»

Цель работы: исследовать отдельные виды емкостных измерительных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристики, точности и возможности применения, а так же сравнение с их математической моделью.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 1) Исследование емкостного преобразователя уровня жидкости.
- 2) Исследование одинарного емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.
- 3) Исследование дифференциального емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.
- 4) Исследование емкостного преобразователя углового перемещения.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Принцип действия емкостных преобразователей основан на взаимодействии двух заряженных тел (электродов), образующих конденсатор, значение емкости которого изменяется под действием входной неэлектрической величины.

В общем случае емкость конденсатора C есть произведение диэлектрической проницаемости ε на геометрическую проводимость зазора G между электродами.

$$C = \varepsilon \cdot G, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$;

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Проводимость G определяется геометрией электродов и их взаимным расположением. В простейшем случае для плоскопараллельного конденсатора

$$G = S/\delta, \quad (2)$$

где S - площадь перекрытия электродов;

δ - расстояние между электродами.

Таким образом, емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \cdot S / \delta \quad (3)$$

Входная физическая величина может изменять δ , S или ε . Функциональные связи между этими параметрами и входными величинами позволяют создавать различные варианты датчиков для измерения разнообразных входных величин.

На рисунке 1 приведены некоторые варианты емкостных измерительных преобразователей в зависимости от области их применения:

– преобразователь с переменной длиной воздушного зазора одинарного (рисунок 1а) и дифференциального (рисунок 1б) типов. Применяется для измерения малых перемещений (от единиц микрометров до долей миллиметров), а также для измерения малых сил, давлений, размеров и т.д.;

– преобразователи с переменной площадью перекрытия электродов одинарного (рисунок 1в) и дифференциального (рисунок 1г) типов;

– преобразователи с изменяющейся величиной диэлектрической проницаемости (рисунок 1ж) и с изменяющимся соотношением размеров двух различных диэлектриков в зазоре между электродами (рисунки 1з и 1е).

Из этой группы в качестве примера приведены: преобразователь уровня жидких или сыпучих сред с цилиндрическими электродами (рисунок 1д), преобразователь толщины диэлектрической ленты (рисунок 1з).

В дифференциальных конструкциях емкостных ИП (рисунки. 1б и 1г) емкости между электродами 1-3 и 1-2 изменяются при перемещении подвижного электрода 1 на одну и ту же величину, но с разными знаками.

При включении электродов в разностную измерительную схему, например, мостовую, можно получить существенное улучшение метрологических характеристик. Увеличивается чувствительность, точность, улучшается линейность характеристик.

Погрешности емкостного преобразователя возникают в результате изменения температуры, влажности окружающей среды, напряжения и частоты питания, а также вследствие наводок и помех. Последнее в большей степени проявляется на повышенных частотах и требует тщательной экранировки измерительных схем.

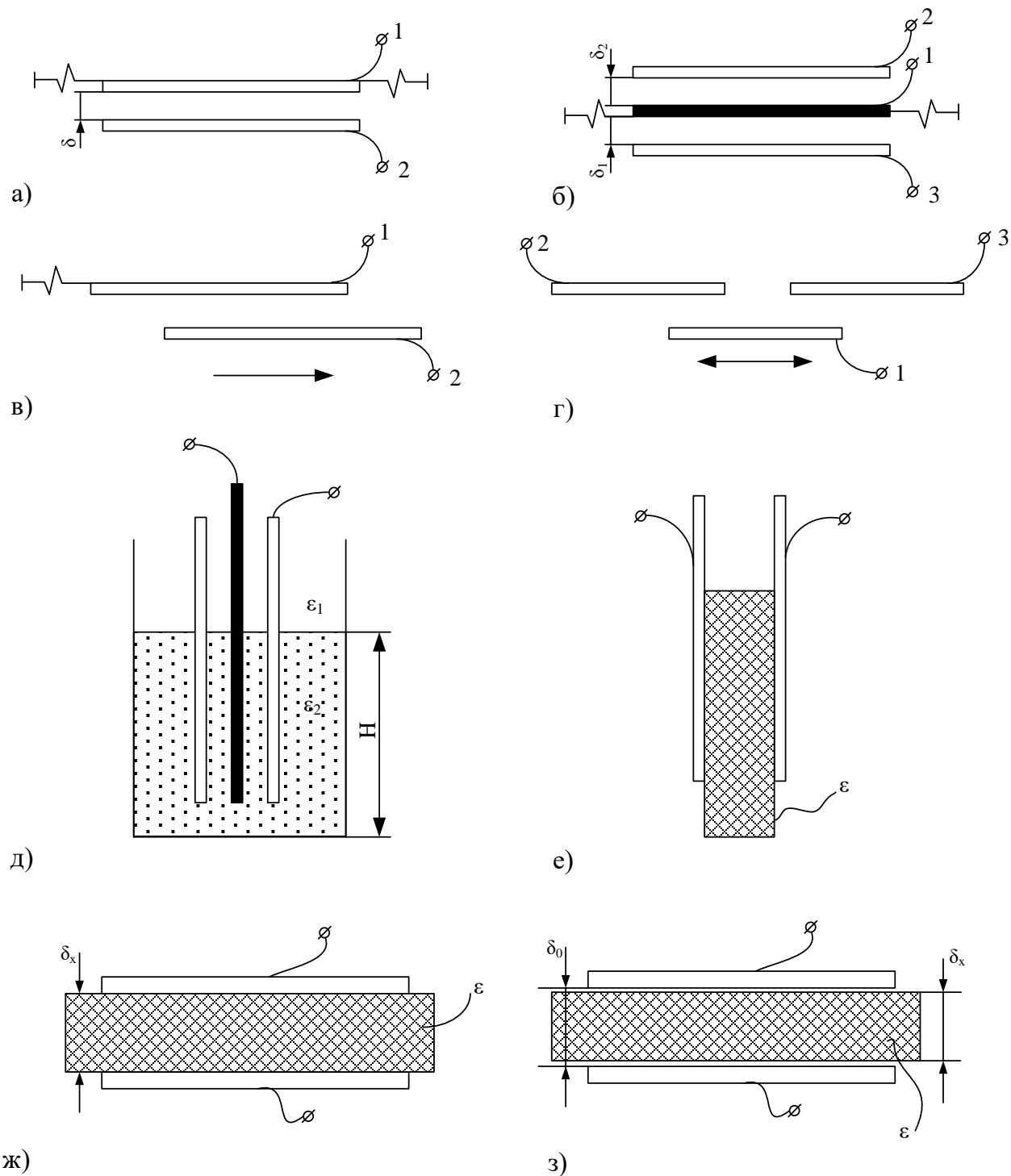


Рисунок 1 – Типы емкостных преобразователей

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Лабораторный макет включает в себя:

- 1) Плоский конденсатор с диэлектриком из стеклотекстолита, имеющий следующие геометрические размеры:

$h=410$ мм - высота пластин,

$d=70$ мм - ширина пластин,

$\delta=1.9$ мм - расстояние между пластинами.

2) Плоскопараллельный конденсатор с воздушным диэлектриком, помещенный в колбу для измерения уровня трансформаторного масла.

Размеры конденсатора:

$h=467.5$ мм.;

$d=70$ мм.;

$\delta = 1.5$ мм.

На рисунке 2 показано устройство емкостного измерительного преобразователя для измерения уровня жидкого диэлектрика.

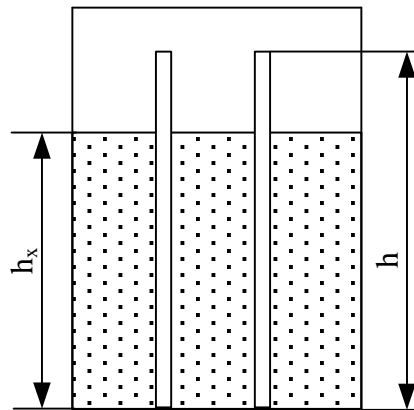


Рисунок 2 – Преобразователь уровня

Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор C_1 образован частью электродов и диэлектриком жидкостью, уровень которой измеряется, конденсатор C_0 остальной частью электродов и диэлектриком воздухом.

Емкость измерительного преобразователя

$$C_{\text{ип}} = C_1 + C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \epsilon_1}{\delta} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_0 s_0}{\delta} = \frac{h_x d \epsilon_0 \epsilon_M}{\delta} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_B d (h - h_x)}{\delta} \quad (4)$$

3) Дифференциальный измерительный преобразователь для измерения линейного перемещения, состоящий из трех одинаковых пластин с размерами:

$L=140$ мм - длина пластин,
 $d=90$ мм - ширина пластин,
 $\delta=1.9$ мм -толщина диэлектрика 1

Устройство дифференциального измерительного преобразователя показано на рисунок 3. Из рисунка видно, что емкость одинарного преобразователя

$$C_{\text{ИП}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r L_x d}{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r d}{\delta} L_x \quad (5)$$

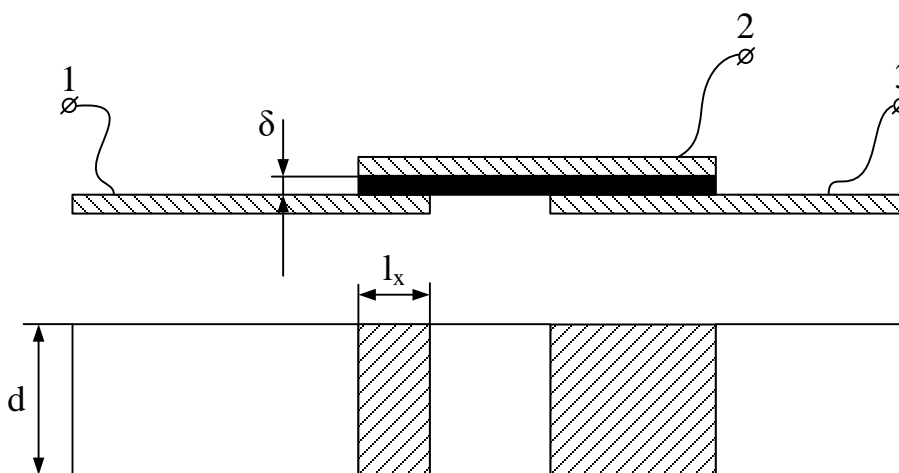


Рисунок 3 – Дифференциальный измерительный преобразователь линейного перемещения

4) Измерительный преобразователь угла поворота, представляющий собой многосекционный воздушный конденсатор с переменной площадью перекрытия пластин.

Кроме того, макет укомплектован следующими измерительными приборами:

- универсальный мост переменного тока типа Е7-4;
- электронный милливольтметр типа ВЗ-38;
- генератор синусоидальных колебаний типа ГЗ-34.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В лабораторной работе используются приборы, питающиеся от сети переменного тока 220В. Корпуса этих приборов должны заземляться. При сборке схемы все проводники должны быть тщательно закреплены. Соединительные проводники не должны иметь оголенные участки. После сборки схема должна быть проверена преподавателем и только после проверки питающие напряжения могут быть включены. При всех переключениях в собранной схеме необходимо отключить ее от питающей сети.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1) Исследование емкостного преобразователя уровня жидкости.

1.1) Подключить емкостной ИП уровня масла к входу универсального моста переменного тока Е7-4. Снять экспериментальную зависимость $C_{\text{ип}} = f(h_x)$ постепенно заполняя колбу маслом через заливную воронку.

Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Исследование емкостного ИП уровня

h_x , см.							
$C_{\text{ип.эксп}}$							
$C_{\text{ип.расч}}$							

1.2) По известной емкости преобразователя при $h_x=h$ (полностью заполненная колба) и известным геометрическим размерам преобразователя рассчитать диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла.

1.3) Используя выражение (4) и геометрические размеры преобразователя, рассчитать теоретическую зависимость $C_{\text{ип}} = f(h_x)$. Данные свести в таблицу 1.

1.4) По результатам п.п. 1.1 и 1.3 на совмещенном графике построить обе зависимости. Сравнить их между собой и сделать выводы. Определить погрешность

$$\gamma_{max} = \frac{\Delta C_{max}}{\Delta C_{теор}} \cdot 100\%$$

2) Исследование одинарного емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.

2.1) Подключить к мосту плоский конденсатор и измерить его емкость. По известной величине емкости и известным геометрическим размерам рассчитать диэлектрическую проницаемость стеклотекстолита.

2.2) Снять статическую характеристику одинарного преобразователя $C_{ип} = f(L_x)$ где L_x , - перемещение подвижного электрода (пластины).

Для снятия характеристики вывести указатель перемещения на нулевую отметку шкалы перемещений и затем, устанавливая подвижный электрод в разные положения (увеличивая L_x), измерять емкость преобразователя универсальным мостом. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование одинарного ИП линейного перемещения

L_x , см.							
$C_{ип}$, пФ							
$C_{ип.теор}$, пФ							

2.3) Используя формулу (5) и геометрические параметры преобразователя, найти теоретическую зависимость $C_{ип.теор} = f(L_x)$

2.4) По результатам п.п. 2.2 и 2.3 построить графики экспериментальной и теоретической характеристики, сравнить их, определить максимальное значение абсолютной и относительной погрешностей, а также коэффициент нелинейности экспериментальной характеристики K_H :

$$K_H = \frac{tg\alpha_{max} - tg\alpha_{min}}{tg\alpha_{cp}} \quad (6)$$

где $\alpha_{max}, \alpha_{min}, \alpha_{cp}$ - максимальный, минимальный и средний углы наклона касательной к статической экспериментальной характеристике.

3) Исследование дифференциального емкостного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.

3.1) Собрать мостовую измерительную схему в соответствии с рисунком 4.

В соседние плечи моста включить дифференциальный емкостной преобразователь: C_{12} и C_{23} . Два других плеча - полуобмотки выходного симметричного трансформатора генератора синусоидальных сигналов.

К измерительной диагонали моста подключить милливольтметр ВЗ-3 8.

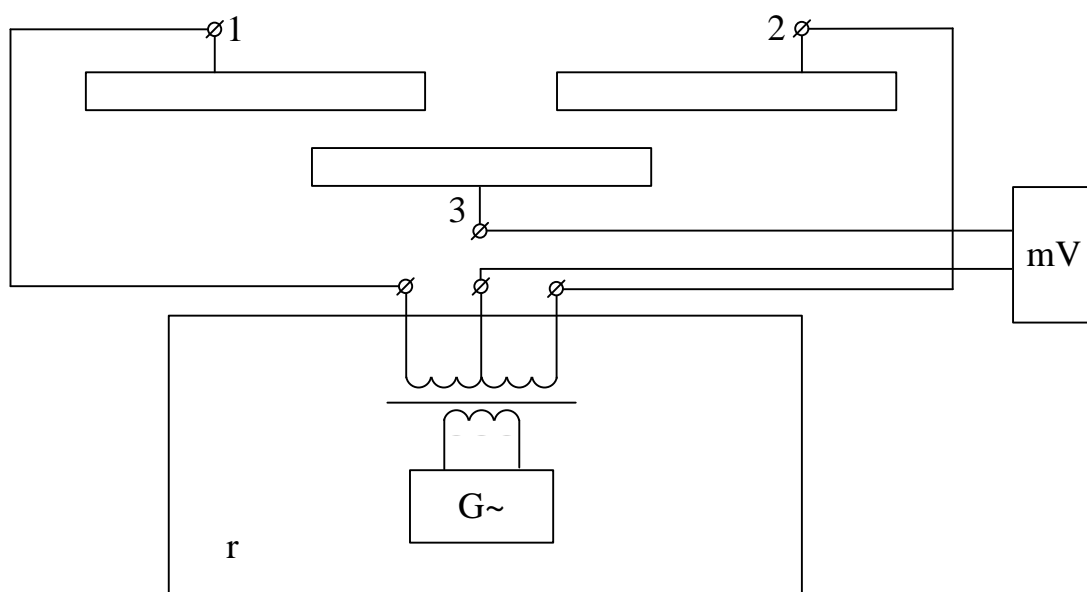


Рисунок 4 – Дифференциальный ИП в схеме моста

3.2) На частоте 1 кГц снять зависимость $U_{\text{ВЫХ}}=f(L_x)$. Перемещение пластины L_x , задавать через 1 см из крайнего левого положения в крайнее правое или наоборот. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Исследование дифференциальные ИП линейного перемещения

L_x , см							
$U_{\text{ВЫХ}}$, В							

По данным таблицы 3 построить график и оценить коэффициент нелинейности по формуле (6). Сравнить с нелинейностью одинарного преобразователя и сделать вывод.

4) Исследование емкостного преобразователя угла поворота.

4.1) Подключить емкостной ИП угла поворота (клеммы 4-5) к универсальному мосту. Снять зависимость $C_{ип} = f(\alpha)$. Данные свести в таблицу 4.

Таблица 4 - Исследование емкостного ИП углового перемещения

α							
$C_{ип}, \text{пФ}$							

По полученным экспериментальным данным построить график $C_{ип} = f(\alpha)$, после чего объяснить причину его нелинейного характера.

Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства

Лабораторная работа №2 «Исследование свойств фотоэлектрических измерительных преобразователей»

Цель работы: исследовать отдельные виды фотоэлектрических измерительных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристики и точности. Провести анализ и обработку результатов измерений.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 1) Исследовать вакуумный фотопреобразователь типа СЦВ-3.
- 2) Исследовать газонаполненный фотоэлемент СЦГ-3.
- 3) Исследовать фотосопротивление типа ФС-К1
- 4) Исследовать фотодиод ФД.
- 5) Исследовать фотоэлектрический тахометр.
- 6) Исследовать кодирующий фотоэлектрический преобразователь углового перемещения.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Фотоэлектрическими измерительными преобразователями называются преобразователи, осуществляющие преобразование светового потока, функционально связанного с измеряемой неэлектрической величиной в электрический сигнал.

По принципу действия фотопреобразователи разделяют на преобразователи с внешним фотоэффектом и преобразователи с внутренним фотоэффектом. К первой группе относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, а ко второй - фоторезисторы и фотодиоды.

В преобразователях первой группы эмиссия электронов с катода возникает при воздействии на него квантов светового излучения - фотонов (фотоэлектронная эмиссия). При этом электроны покидают фотокатод, выходя

в вакуум или разреженный газ. В соответствии с этим фотоэлементы разделяют на вакуумные и газонаполненные.

Работа фотоэлектрических измерительных преобразователей основана на преобразовании этих сигналов по оптическому каналу связи с последующим преобразованием оптического сигнала в электрический. Оптическая (фотонная) связь позволяет успешно решать одну из наиболее трудных задач микроэлектроники – передачу сигналов между отдельными конструктивными устройствами. Устранение паяных соединений и замена их оптическими значительно повышают надежность устройства. Основные элементы фотоэлектрических устройств: излучатель световой энергии (источник света), световод, фотоприемник.

Фотоэлектрическими измерительными преобразователями называются преобразователи, осуществляющие преобразование светового потока, функционально связанного с измеряемой неэлектрической величиной в электрический сигнал, Рабочим элементом в полупроводниковых генераторах (светоизлучающих диодах) обычно является монокристалл из арсенида галлия. Такой кристалл прозрачен, и его можно рассматривать как оптический резонатор. Генератор возбуждается импульсами электрического поля (ударной ионизацией). При этом наблюдается высвечивание его в инфракрасной области спектра.

В качестве приемника лучистой энергии применяют фотодиоды, фоторезисторы, и фототранзисторы. По принципу действия фотопреобразователи разделяют на преобразователи с внешним фотоэффектом и преобразователи с внутренним фотоэффектом. К первой группе относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, а ко второй группе - фоторезисторы и фотодиоды. Рассмотрим их принцип действия. Фотодиод представляет собой пластину полупроводника, в котором образован рп - переход и имеются выводы для включения в схему. Действие света приводит к возникновению электрических зарядов и образованию разности потенциалов на выводах фотодиода. Характеристики фотодиодов в

значительной мере зависят от технологических режимов изготовления и режимов работы в схеме. Фоторезистор представляет собой тонкий слой или пластинку из однородного полупроводникового материала с большой фотоэлектронной чувствительностью. Контакты получают вплавлением золота с примесью свинца. При освещении фоторезистора сопротивление его снижается и увеличивается ток проводимости. Наряду с кремнием для изготовления фоторезисторов применяют индий, который имеет очень малую ширину запрещенной зоны. Такие фоторезисторы обычно имеют сопротивление от 5 до 200 Ом при толщине от 0,01 до 0,2 мм, ширине 1 мм и длине от 1 до 10 мм, они отличаются высокой стабильностью.

Фоторезистор совмещает функции фотодиода и усилителя фототока. Конструктивно он имеет много общего с обычным транзистором и состоит из трех областей с чередующимися областями проводимости (npn или pnp).

При освещении области в ней образуются электронно-дырочные пары, которые диффундируют к эмиттеру и коллектору, увеличивая ток последнего. Оптическая связь в схемах осуществляется посредством волоконных световодов. Они имеют малые размеры и допускают возможность значительного изгиба световода. Свет распространяется путем многократного отражения от стенок световода. Волоконный световод представляет собой отдельное волокно или ряд определенным образом уложенных волокон, торцы которых хорошо отполированы. Отдельное волокно состоит из внутренней жилы, выполненной из оптически прозрачного стекла с показателем преломления $n_{ж}$. Обязательно должно выполняться соотношение $n_{об} < n_{ж}$, т. к. при этом будет обеспечено полное отражение света. Наличие оболочки у каждого волокна препятствует взаимному просачиванию света из волокна в волокно. Угол падения светового луча на входной торец волокна составляет α , а угол между образующей цилиндра волокна и направлением светового луча α_1 . Трудности изготовления стеклянных волокон заключаются в том, что спектральные характеристики массивных стекол и волокон, изготовленных из них сильно отличаются. Кроме того, материалы жилы и оболочки должны

соответствовать друг другу по вязкости, температуре плавления, коэффициенту термического расширения и быть химически совместимыми.

Если источник и приемник света расположены близко друг к другу, то дополнительных световодов не требуется. Простейшим оптико-электронным прибором является оптрон плоской конструкции. Такой прибор состоит из арсенида галлия – галлиевого источника света и оптически связанного с ним кремниевого фотодиода. Связующей средой служит стекло на основе селена с показателем преломления 2,4 -2,6. Применение такой связи увеличивает входное излучение благодаря уменьшению отражения на поверхности раздела и увеличению предельного угла.

Устройство фотоэлемента показано на рисунке 1. Фотокатодом служит, как правило, слой щелочноземельного металла, нанесенного на серебряную подложку. Анод выполняется в виде проволочного кольца, помещенного в колбе перед катодом.

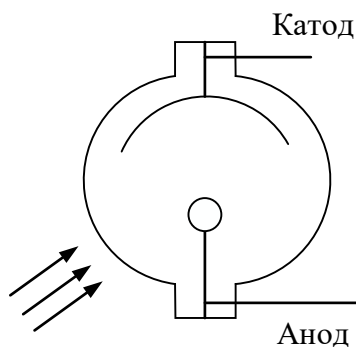


Рисунок 1 – Устройство фотоэлемента

Для практики важно, что число электронов, выходящих с фотокатода, строго пропорционально числу падающих на активный слой фотонов, следовательно, фотоэлектронная эмиссия пропорциональна световому потоку, освещающему фотокатод (закон Столетова). Для создания электронного тока необходим источник анодного напряжения.

Вольтамперная характеристика (рисунок 2) напоминает ВАХ лампового диода. При малых U_a фототок растет, но когда при данной освещенности Φ

фотокатода все электроны достигают анода, наступает насыщение и дальнейшее увеличение U_a не влияет на величину фототока.

Этот ток зависит лишь от освещенности.

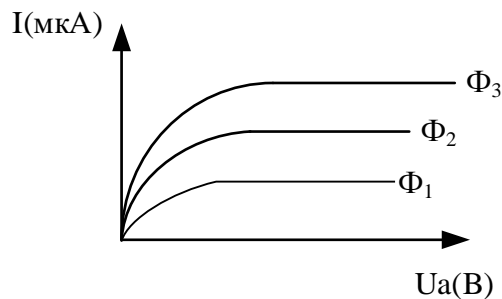


Рисунок 2 –Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента

Световая характеристика $I_a=f(\Phi)$ при $U_a=Const$ вакуумного фотоэлемента линейка (рисунок 3).

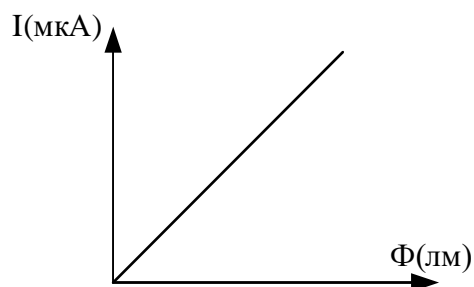


Рисунок 3 – световая характеристика вакуумного фотоэлемента

Чувствительность фотоэлемента определяется отношением изменения фототока к изменению светового потока.

$$S_i = \frac{\Delta i}{\Delta \varphi}$$

Она относительно мала и составляет 20-80 мкА/лм.

В газонаполненных фотоэлементах эмиссия электронов происходит в среде разреженного газа. Хотя принцип действия вакуумных и

газонаполненных фотоэлементов один и тот же, характеристики их существенно различаются.

Полупроводниковые фотопреобразователи.

Полупроводниковые фотопреобразователи используют внутренний фотоэффект и, в зависимости от принципа действия, разделяются на две группы:

1) Фоторезисторы (фотосопротивления) являются фотоэлементами с внутренним фотоэффектом, т.к. воздействие лучистой энергии увеличивает число носителей электрических зарядов внутри самого фотоэлемента.

2) Фотоэлементы с запирающим слоем, в которых воздействие светового потока создает разность потенциалов на границе электронно-дырочного перехода в полупроводнике.

Фоторезистор по своему устройству является простейшим фотоэлементом. В нем лучистая энергия, поглощаемая слоем полупроводника, вызывает значительное увеличение числа носителей, а, следовательно, уменьшение сопротивления резистора. Фоторезистор обычно включается последовательно с управляемым им устройством и источником электроэнергии (рисунок 4).

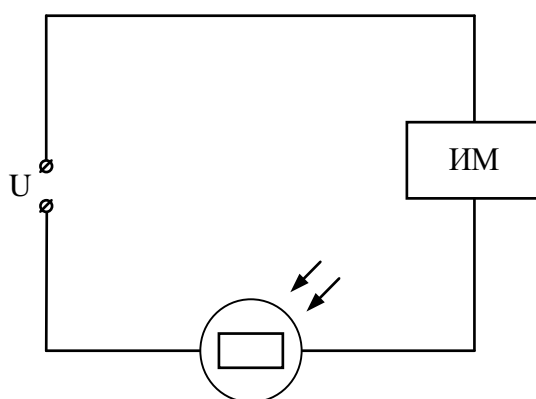


Рисунок 4 – Схема включения фоторезистора

Сопротивление резистора в неосвещенном состоянии называют темновым $R_{\text{тем}}$. Под действием источника через фоторезистор в этих условиях протекает небольшой темновой ток.

$$I_{\text{тем}} = \frac{U}{R_{\text{тем}}}$$

Фотоэлементы с запирающим слоем – это фотодиоды и фототранзисторы. Поглощение лучистой энергии фотодиодом приводит к появлению новых пар носителей зарядов - дырок и электронов. Но у р-п перехода существует электрическое поле, созданное разделением основных носителей. Под действием этого поля не основные носители заряда электроны из дырочной области и дырки из электронной области полупроводника удаляются через р-п переход: электроны в п-область, дырки - в р-область.

Вследствие увеличения концентрации зарядов областей, потенциал дырочной области повышается, а электронной - понижается. Чем больше освещенность фотодиода, тем больше разность потенциалов между областями р и п. Таким образом, под действием света одному электроду сообщается заряд одного знака, а другому - заряд другого знака.

Такой фотоэлемент может служить источником тока и не требует каких-либо дополнительных источников. В нем лучистая энергия непосредственно преобразуется в электрическую. Особенно широко фотодиоды используются в солнечных батареях. Их к.п.д. составляет 11%.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Макет лабораторной работы смонтирован в унифицированном корпусе, в нижней части которого в специальных отсеках размещены различные фотоэлементы с источниками света. Под каждой из камер установлены тумблеры управления источниками света.

Схемы для исследования различных фотоэлементов собраны внутри корпуса. Все коммутации элементов схем осуществляются при помощи тумблеров, установленных на передней панели корпуса. В верхней части передней панели установлены измерительные приборы.

Кроме того, в состав лабораторного макета входит стенд для демонстрации практического применения фотоэлектрических ИП на примере тахометра. В стенде использован двигатель постоянного тока типа ДПМ с укрепленным на валу дискретным диском. Питание двигателя осуществляется от регулируемого источника постоянного тока, смонтированного внутри стенда. Источник позволяет изменять выходное напряжение в диапазоне 1,2 - 28В.

В стенд встроены четырехразрядный десятичный счетчик, который позволяет измерять скорость якоря двигателя об/мин. Тахометр производит измерения за 5 секунд, поэтому для наглядности снабжен индикаторной шкалой времени измерения.

Общий вид лицевой панели стенда приведен на рисунке 5.

Элементы управления стендом:

- 1) Клеммы для подключения внешнего вольтметра.
- 2) Дискретный диск на валу якоря двигателя.
- 3) Оптопара тахометра.
- 4) Шкала степени выполнения измерений (5 позиций).
- 5) Регулятор напряжения подаваемого на якорь двигателя.
- 6) Вакуумные индикаторы показывают обороты вала ДПТ в об/мин.
- 7) Выключатель питания стенда со встроенным индикатором подключения к сети.
- 8) Индикатор режима работы тахометра.

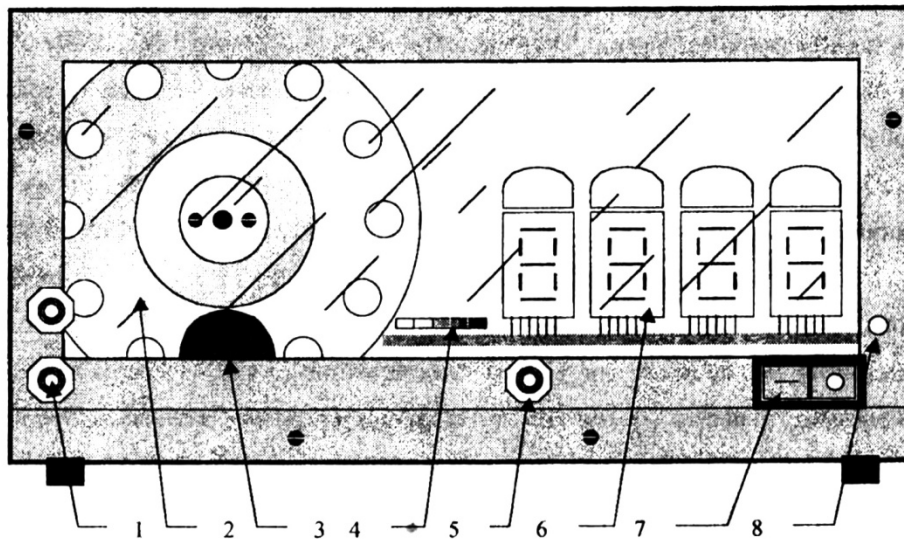


Рисунок 5 – Лицевая панель тахометра

После включения стенда в сеть, начинает светиться индикатор, встроенный в выключатель питания, сигнализируя о подключении. Для включения стенда необходимо перевести выключатель 7 в положение I. После прохождения одного цикла измерения стенд будет готов к работе.

Управление двигателем производится с помощью регулятора 5, подачей напряжения на обмотку якоря в пределах 1,2...28В постоянного напряжения от встроенного в стенд источника. Величина напряжения определяется с помощью внешнего вольтметра, подключаемого к клеммам 1.

Определение частоты вращения вала происходит в полностью автоматическом режиме. Тахометр (ТМ) может находиться в одном из состояний - «измерение» или «индикация». Текущее состояние показывает индикатор 8.

В каждом состоянии ТМ находится 5 секунд. Время до перехода в следующее состояние отображается индикатором 4, одна позиция - 1 секунда.

Сразу после перехода в режим «индикации» на индикаторах 6 устанавливается измеренное значение и остаётся в течение 4 секунд. Одновременно с загоранием пятого элемента шкалы 4 (красный) значения на индикаторах 6 обнуляются и через 1 с. начнётся новое измерение. Для получения достоверных значений измерений необходимым условием является

завершение электромеханических переходных процессов ДПТ, что составляет не более секунды.

Поэтому достоверными считаются показания, начиная со второго измерения после включения стенда. Причём регулировка напряжения якоря должна быть завершена до того, как загорится красный индикатор шкалы прогресса в режиме индикации, иначе измерение не считается достоверным. Измерения производятся с точностью до одного оборота в минуту.

На отдельной приставке смонтирован измерительный преобразователь угла поворота вала сельсина - датчика в двоичный код, представляющий собой кодирующий преобразователь пространственного кодирования. В этих преобразователях непрерывная измеряемая величина предварительно преобразуется в пространственное перемещение (угловое или линейное), а затем пространственное перемещение преобразуется в код.

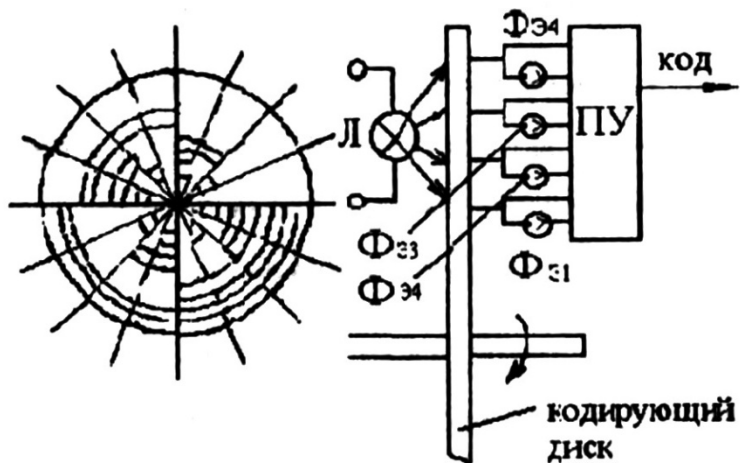


Рисунок 6 – Устройство кодирующего диска

На рисунке 6 изображено кодирующее устройство с диском для преобразования углового перемещения в двоичный код.

Диск, показанный на рисунке, служит для образования четырехразрядного двоичного кода. Поэтому на нем имеются четыре группы концентрически расположенных отверстий. Каждая группа, находящаяся на

одинаковом расстоянии от центра, соответствует определенному разряду. По одну сторону диска расположена осветительная лампа, а по другую - фотоэлектрические преобразователи (фоторезисторы), один фоторезистор на каждое кольцо (группу отверстий).

Луч света от лампы через отверстия в диске достигает фоторезисторов. Таким образом, при различных углах поворота диска засвечиваются различные фоторезисторы и на выходе электронного блока формируются уровни напряжений, соответствующие в двоичном коде «0» или «1».

Индикаторами уровней служат светодиоды. Уровню «1» соответствует включенное (светящееся) состояние светодиода.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В лабораторной работе используются приборы, питающиеся от сети переменного тока 220В. Корпуса этих приборов должны заземляться. При сборке схемы все проводники должны быть тщательно закреплены. Соединительные проводники не должны иметь оголенные участки. После сборки схема должна быть проверена преподавателем и только после проверки питающие напряжения могут быть включены. При всех переключениях в собранной схеме необходимо отключить ее от питающей сети.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Исследование вакуумного фотоэлемента.

1.1) Снять вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента, для чего установить тумблер B_7 в положение «вакуумный». Тумблером B_8 устанавливается световой поток Φ_1 , при этом тумблеры B_9 , B_{10} и B_{11} должны быть выключены. Регулируя напряжение питания U_a резистором и R_{12} , устанавливаются требуемые напряжения от 0 до 100 В, на аноде фотоэлемента при этом фиксируются соответствующие значения тока через фотоэлемент по прибору ИП, тумблером B_8 устанавливается световой поток Φ_2 и снимается новая вольт-амперная характеристика для потока Φ_2 , после чего тумблер B_8 устанавливается в среднее положение.

Данные эксперимента заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Вольт -амперная характеристика вакуумного фотопреобразователя

Φ=Φ1	U_a (В)						
	I_a (мкА)						
Φ=Φ2	U_a (В)						
	I_a (мкА)						

1.2) По результатам п. 1.1 построить вольтамперные характеристики и определить статическую чувствительность фотоэлемента

$$S_{\phi} = \frac{dI_a}{d\phi} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В}$$

2) Исследование газонаполненного фотоэлемента.

2.1) Снять вольт -амперную характеристику газонаполненного фотоэлемента, для чего тумблер B_7 устанавливаются в положение «газонаполненный». Тумблер B_9 устанавливается в положение Φ_1 . Снятие вольтамперной характеристики производится так же, как и для вакуумного фотоэлемента.

Полученные данные свести в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование газонаполненной фотопреобразователя

Φ=Φ1	U_a (В)						
	I_a (мкА)						
Φ=Φ2	U_a (В)						
	I_a (мкА)						

2.2) По данным таблицы 2 построить вольтамперные характеристики газонаполненного фотоэлемента, из которых определить статическую чувствительность

$$S_{\phi} = \frac{dI_a}{d\phi} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В}$$

и чувствительность по напряжению

$$g = \frac{dI_a}{dU_a} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{В}} \right] \text{ при } \varphi = \text{Const}$$

3) Исследование полупроводникового фотосопротивления ФС-К1.

3.1) Снять вольт-амперные характеристик фотосопротивления, для чего необходимо тумблеры B_8 и B_9 , поставить в среднее положение, а тумблер B_{10} установить для $\Phi=0$ в среднее положение, для $\Phi=\Phi_1$ - в правое, а для $\Phi=\Phi_2$ - в левое положение.

Включить тумблер B_2 и регулировкой напряжения U_a резистором R_{12} установить различные значения напряжения, которые измеряются вольтметром ИП₂. Ток через фоторезистор измеряется прибором ИП₃.

Затем необходимо установить световой поток $\Phi=\Phi_1$ и снять новую ВАХ.

Повторить эксперимент при $\Phi=\Phi_2$, после чего тумблер B_{10} поставить в среднее положение. Результат измерений свести в таблицу 3.

Таблица 3 – Вольт -амперные характеристики фоторезистора

Φ=0	U_a (В)						
	I_a (мкА)						
Φ=Φ1	U_a (В)						
	I_a (мкА)						
Φ=Φ2	U_a (В)						
	I_a (мкА)						

3.2) По полученным данным определить статическую чувствительность

$$S_{\Phi} = \frac{dI_a}{d\varphi} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В}$$

и чувствительности по напряжению

$$g = \frac{dI_a}{dU_a} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{В}} \right] \text{ при } \varphi = \text{Const}$$

3.3) По полученным данным опыта рассчитать темновое и световое сопротивления.

4) Исследование фотодиода.

4.1) Снять нагрузочные характеристики фотодиода ФД-1, для чего тумблер В₃, установить в положение «фотогенератор». Тумблером В₁₁ установить световой поток $\Phi = \Phi_1$. Переключателем В₁. установить различные значения сопротивления нагрузки. Ток фотодиода измеряется прибором ИП₂.

Далее переключить В₁₁ в положение Φ_2 и снять те же характеристики для нового значения светового потока. Данные свести в таблицу 4.

Таблица 4 - Нагрузочные характеристики фотодиода

Φ=Φ1	R _a (Ом)						
	I _a (мкА)						
Φ=Φ2	R _a (Ом)						
	I _a (мкА)						

4.2) По полученным данным определить вентильную ЭДС при R_н=500 Ом, Φ=Φ₁ и Φ=Φ₂ и чувствительность

$$S_{\Phi} = \frac{dI_H}{d\Phi} \text{ при } R_H = 500 \text{ Ом}$$

4.3) Снять вольт-амперные характеристики фотодиода ФД1 в режиме фото преобразователя, для чего В₃ установить в положение «фото преобразователь», при этом фотодиод оказывается подключенным к регулируемому источнику напряжения 0-12 В. Регулировка напряжения U_a осуществляется резистором R₁₀, а измерение - прибором ИП₂. Нагрузочное сопротивление указывается преподавателем. Данные свести в таблицу 5.

Таблица 5 – Вольт -амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

Φ=Φ1	U _a (В)						
------	--------------------	--	--	--	--	--	--

	I_a (мкА)						
Ф=Ф2	U_a (В)						
	I_a (мкА)						

4.4) По данным таблицы 5 построить ВАХ фотодиода.

4.5) Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя, для чего установить определенное напряжение и поддерживать его неизменным при помощи резистора R_{10} . Изменяя нагрузочные сопротивления переключателем B_1 , измерить ток. Данные опыта свести в таблицу 6.

Таблица 6 – Нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

R_a (Ом)							
I_a (мкА)							

4.6) По данным таблицы 6 построить нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя.

5) Исследование фотоэлектрического тахометра.

5.1) Включить стенд тахометра в сеть 220В, 50Гц.

5.2) К клеммам 1 (рисунок 5) подключить внешний вольтметр. Включить стенд выключателем 7 (на выключателе загорается световой индикатор) и, регулируя напряжение на обмотке двигателя регулятором 5 в пределах 2-25 В, снять регулировочную характеристику

$$n=f(\Phi),$$

где n - скорость вращения двигателя (об/мин);

U - управляющее напряжение (В).

5.3) Построить регулировочную характеристику двигателя постоянного тока и сделать выводы.

б) Исследование кодирующего измерительного преобразователя углового перемещения.

6.1) Установить кодирующий диск в положение 0 и считать код.

6.2) Поворачивая диск по часовой стрелке, снять зависимость код = $f(\varphi)$

где φ - угол поворота диска. Данные опыта занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Исследование кодирующего диска

α							
Двоичный код							

Примечание: Каждое деление шкалы отсчетного устройства диска соответствует 22.5

Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства

Лабораторная работа №3 «Исследование свойств тепловых измерительных преобразователей, и численный расчет их характеристик»

Цель работы: исследовать тепловые измерительные преобразователи для измерения температуры. Изучить численные методы линеаризации характеристик тепловых ИП и измерительные схемы включения. Получить практические навыки измерения температуры различными ИП, научиться проводить анализ и обработку результатов измерения.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Для измерения температуры применяются разнообразные измерительные преобразователи. Одной из наиболее обширных и распространенных групп являются терморезисторы.

Тепловые измерительные преобразователи неэлектрических величин называются преобразователи, основанные на тепловых процессах: нагрева, охлаждения, теплообмена и др. Практически используются два принципа преобразования параметров тепловых процессов в электрические величины, а именно термоэлектрический и изменение электрического сопротивления проводников или полупроводников при изменении их температуры. Преобразователи первого вида получили название термоэлектрических, вторые – терморезисторов.

С точки зрения динамических свойств все тепловые преобразователи отличаются довольно большой инерционностью и плавностью переходных процессов, так как в них отсутствуют резонансные явления. В первом приближении поведение этих преобразователей в динамическом режиме может быть описано линейными дифференциальными уравнениями первого порядка. Характерной особенностью тепловых преобразователей является

зависимость коэффициентов (постоянных времени) дифференциальных уравнений, описывающих тепловой обмен, от условий теплообмена. Например, переходные характеристики терморезистора при внезапном погружении его в нагретую среду будут разными - в зависимости не только от температуры среды, но и от ее теплопроводности. В общем случае динамические свойства тепловых преобразователей описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами.

Во всех случаях для уменьшения как динамических, так и статистических погрешностей преобразователей необходимо стремиться к улучшению теплового контакта со средой, с которой происходит теплообмен. Кроме того, в измерительных целях тепловых преобразователей с этой же целью применяют дифференцирующие корректирующие звенья, исправляющие в определенной мере спад частотной характеристики преобразователя на повышенных частотах изменения входной величины. Применение активной коррекции позволяет уменьшить постоянную времени тепловых преобразователей в 10-20 раз.

Терморезистор представляет собой проводник или полупроводник, включенный в электрическую цепь и находящийся в теплообмене с окружающей средой.

Требования, предъявляемые к материалу терморезистора: возможно более высокие значения температурного коэффициента сопротивления, химическая стойкость к воздействиям окружающей среды; достаточная тугоплавкость и прочность; большее удельное электрическое сопротивление, что важно при изготовлении малогабаритных преобразователей.

Во всех случаях для уменьшения потерь тепла через теплопроводность токоподводящих проводников стремятся увеличить отношение длины провода терморезистора к его диаметру. Это отношение, как правило, имеет значение не менее 200.

Проводниковые терморезисторы.

В большинстве случаев в качестве материала проводниковых терморезисторов применяют чистые металлы, так как сплавы имеют более низкий температурный коэффициент электрического сопротивления, чем чистые металлы, входящие в состав сплава. Кроме того, зависимость сопротивления от температуры для чистых металлов хорошо известна, в связи с чем часто приборы с их использованием допускают стандартную градуировку.

Из металлов практическое применение нашли, главным образом, медь, платина и никель.

Медные терморезисторы.

Электрическая медь допускает, нагрев не более чем до 180 °С (во избежание окисления).

Уравнение преобразования медных терморезисторов в диапазоне температур от -50 до +180 °С практически линейное.

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

где α – температурный коэффициент электрического сопротивления, равный $4,3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ в интервале температуры от нуля до 1000 °С;

t – температура;

R_0 - сопротивление при $t^\circ\text{C}$.

Когда сопротивление R_0 неизвестно, применяют соотношение

$$R_2 = \frac{R_1(\tau + t_2)}{(\tau + t_1)}$$

где R_1 и R_2 – сопротивление при температурах t_1 и t_2 соответственно;

$\tau = \frac{1}{\alpha}$ - постоянная, зависящая от рода материала и равная, например, для меди 234 °С.

Для расчета сопротивления R_2 при любой температуре t_2 по этой формуле требуется знать лишь сопротивление R_1 при любой другой температуре.

Платиновые терморезисторы.

Платина допускает, нагрев до 1200 °С без опасности окисления или расплавления.

Уравнение преобразования – нелинейное и имеет вид:

в интервале температуры от нуля до +660 °С

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

в интервале температуры от нуля до - 180 °С

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3)$$

где R_0 - сопротивление при 0°С, А, В, С – постоянные. Для температуры выше 660°С и ниже 180°С зависимость $R_t = f(t)$ стандартизирована и дается в виде таблицы.

Нелинейность уравнения преобразования является основным недостатком платиновых терморезисторов. Однако высокая воспроизводимость зависимости $R_t = f(t)$, химическая стойкость и пластичность платины, позволяющая изолировать очень тонкие нити (до 1,25 мкм), делает ее в ряде случаев незаменимой. Платину нельзя применять в восстанавливающей среде (углерод, пары кремния, калия, натрия и др.).

Никелевые терморезисторы.

Никель применяется до температур (250 - 300) °С. При более высоких температурах зависимость $R_t = f(t)$ – неоднозначная. В интервале температур от нуля до +100°С справедлива зависимость

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \text{ при } \alpha \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Электрические свойства никеля в сильной степени зависят от примесей и термической обработки.

Основные преимущества никеля: высокое удельное электрическое сопротивление (в пять раз больше, чем у меди) и большой температурный коэффициент сопротивления, что позволяет использовать его в тех случаях, когда терморезистор должен иметь малые размеры.

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы).

Зависимость сопротивления полупроводников (смеси оксидов некоторых материалов, спрессованных и спеченных при высоких температурах) от абсолютной температуры T достаточно точно описывается соотношением :

$$R_T \approx R_0 e^{\beta \left[\left(\frac{1}{T} \right) - \left(\frac{1}{T_0} \right) \right]}$$

где R_0 - сопротивление при абсолютной температуре T_0 ;

β - коэффициент, зависящий от рода полупроводника.

На приведенном графике (Рисунок 1) приведена кривая $R_t = f(t)$ и для сравнения показана зависимость R_t сопротивления проводника.

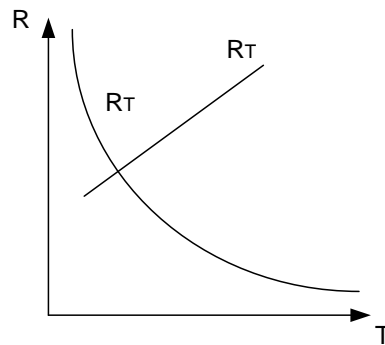


Рисунок 1 – зависимость сопротивления проводника

Значение температурного коэффициента полупроводника резко зависит от температуры (в противоположность проводнику) и определяется формулой

$$\alpha = -\beta \frac{T}{T_0}$$

Откуда следует, что α отрицателен и возрастает с увеличением температуры.

Полупроводниковые терморезисторы имеют большой температурный коэффициент (в 8-10 раз больше, чем у металлов) и значительно большую величину удельного электрического сопротивления, в связи с чем они могут иметь малые размеры (объем порядка 1 мм^3) и, следовательно, небольшую инерционность. Недостатком полупроводниковых терморезисторов является

плохая воспроизводимость зависимости $R_t = f(t)$ для одних и тех же типов, что затрудняет их стандартную градуировку.

В целях частичного исправления нелинейности уравнения преобразования полупроводниковые терморезисторы включаются в электрические цепи в сочетании с манганиновыми резисторами параллельно, последовательно или последовательно параллельно.

Промышленные терморезисторы (термометры сопротивления) выпускаются двух типов: ТСП – термосопротивления платиновые и ТСМ – термосопротивления медные.

Металлические термометры сопротивлений являются одним из наиболее точных преобразователей температуры. Так, например, платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка 0.001 °С.

Конструктивно промышленные термометры сопротивления выпускаются в виде чувствительных элементов, помещенных в защитный корпус. Чувствительный элемент изготавливается в виде спирали из платиновой или медной проволоки, закрепленной на слюдяном или керамическом каркасе.

На рисунке 2 представлены пассивные четырехполюсники, применяемые для коррекции нелинейности характеристик термисторов. Число термонеzависимых резисторов (R_1, R_2, R_3, \dots) в четырехполюснике может быть разным и определяется в зависимости от того, в скольких точках характеристики нужно совместить характеристику с линейной.

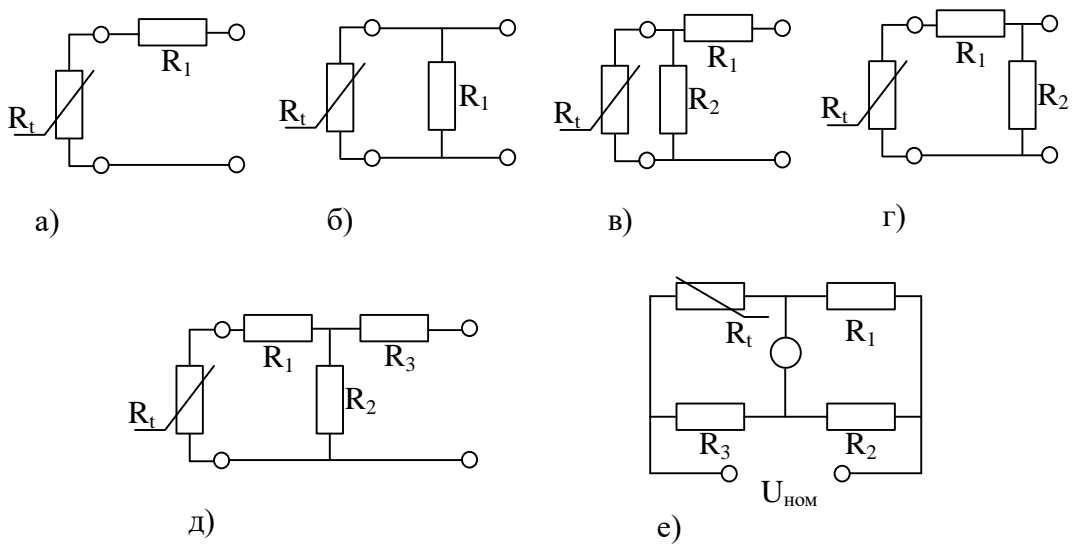


Рисунок 2 – Пассивные четырехполюсники

На рисунке 2 (а, б, в) представлены соответственно последовательная, параллельная и последовательно-параллельная схемы коррекции. На рисунках 1 г и д - комбинированные схемы и на рисунке 2 е – мостовая схема, получившая наибольшее распространение при включении терморезисторов.

Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Термопара представляет собой два проводника или полупроводника, два конца, которых соединены между собой (рабочий спай), а два других свободные концы) могут быть включены в цепь измерительного прибора (рисунок 3).

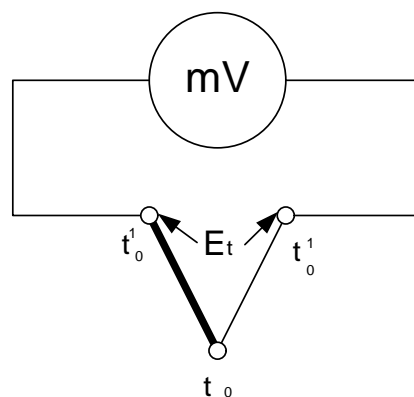


Рисунок 3 – Устройство термопары

Рабочий спай нагревается до измеряемой температуры t° , а свободные концы имеют постоянную температуру t_0^0 .

В цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила E_t , которая является функцией разности температур

$$E_t = f(t^\circ - t_0^0), \quad (6)$$

Зависимость $E, = f(t^\circ)$ в широком диапазоне температур обычно не линейна.

Промышленностью выпускаются разные виды термопар, некоторые из которых приведены в таблице 1.

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов равной нулю. Если при практическом использовании термоэлектрического преобразователя температура свободных концов отлична от нуля, то термо-ЭДС будет меньше и необходимо ввести соответствующую поправку в показания.

Зависимость $E = f(t^\circ)$ в широком диапазоне температур обычно нелинейная.

К материалам термопар предъявляются следующие требования: однозначность зависимости термо-ЭДС от температуры; постоянство термоэлектрических свойств; химическая и механическая стойкость при высоких температурах; хорошая электропроводность. Желательно, кроме того, чтобы сочетание термоэлектродов термопары давало возможно большее значение термо-ЭДС.

В таблице 1 приводятся данные для некоторых типов термопар.

Таблица 1 – некоторые типы промышленных термопар.

Материал термоэлектродов	Обозначение типа термопары	Предел измерения при длительном применении	Максимальная t° кратковременного режима
Медь-копель	ТМК	-200 °С...+100 °С	800 °С

Хромель-копель	ТХК	-50 °С...+600 °С	1300 °С
Хромель-алюмель	ТХА	-200 °С...+1000 °С	

Значения термо-ЭДС. являются средним, т.к термо-ЭДС. в сильной степени зависят от примесей и обработки термоэлектродов. В промышленных условиях этот разброс характеристик учитывается путем градуирования партий провода.

Термоэлектроды термопары соединяют друг с другом путем пайки или сварки и помещают в защитную арматуру, предохраняющую термопару от действия химически агрессивных газов. Эта арматура изготавливается газонепроницаемо, механически прочной и жароупорной, хорошо проводящей тепло. Материал арматуры, кроме того, не должен выделять при нагревании газов или паров вредных для термоэлектродов.

В качестве защитной арматуры применяют трубы из специальных сталей, а для термопар из благородных металлов – кварцевые и керамические трубы. Для электрической изоляции используют асбест (до 300°С), кварцевые трубки и бусы (до 1000°С) и керамические трубки и бусы (до 1400°С).

При монтаже и эксплуатации термоэлектрических преобразователей необходимо иметь в виду, что точность измерения зависят от теплообмена между преобразователем и средой, конструкции преобразователя, способа и места его установки.

Существенным недостатком рассмотренных преобразователей при измерении изменяющихся температур является их достаточно большая инерционность (от десятков секунд до 10 мин.)

Для измерения Температур ниже 1000°С применяются, как правило, термопары из неблагородных металлов и их сплавов.

Применяя термопары для измерения температуры выше 1000°С, следует иметь в виду, что с ростом температуры увеличивается подвижность и активность атомов материалов термопары, что ведет к увеличению нестабильности и не воспроизводимости ее характеристик. В связи с этим для температур от 1000 до 1750 °С применяются термопары из благородных

металлов. В силу своих высоких метрологических свойств находят применение преимущественно в качестве образцовых термопар. Для кратковременных измерений высоких температур (до 1000 °С) применяют дешевые вольфрамо – молибденовые термопары, характеризующиеся низкой чувствительностью ($10 \frac{mV}{^{\circ}C}$) и малой стабильностью.

Для измерения температуры применяются также другие виды полупроводниковых преобразователей. В частности, термодиоды, термотранзисторы, стабилитроны, работающие в диапазоне -80+150°С на основе открытых и запертых р-п переходов. Например, при заданном токе, напряжение на открытом р-п переходе или стабилитроне линейно изменяется с температурой, причем ТКС для открытого р-п перехода отрицателен и составляет 2-3 мВ/К, а для стабилитрона - положителен и достигает 8 мВ/К

Точность преобразования термопар ниже, чем у терморезисторов. Напоказания влияет нестабильность температуры свободных концов, изменение сопротивления термоэлектродов и соединительных проводов. Однако, они широко используются на практике, т. к. имеют широкий диапазон измеряемых величин, надежны в работе, не требуют специальных измерительных схем включения.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА.

Лабораторный макет состоит из двух частей: одной камеры для создания требуемой температуры и терморегулятора. Камера представляет собой тепловой шкаф, в котором размещены шесть термопреобразователей: КМТ-1, КМТ-8, ММТ -4, ТСП -0879, ТСМ -5071, термопара ТХК -2088. На передней панели камеры расположен тумблер включения, сигнальная лампа включения, регулятор интенсивности нагрева камеры. Температура внутри камеры контролируется ртутным термометром. Термопреобразователи с помощью разъема соединены с пультом, на котором расположены четыре клеммы, переключатель термопреобразователей и тумблер включения источника питания моста. Схема термокамеры и пульта приведены на рисунке 4.

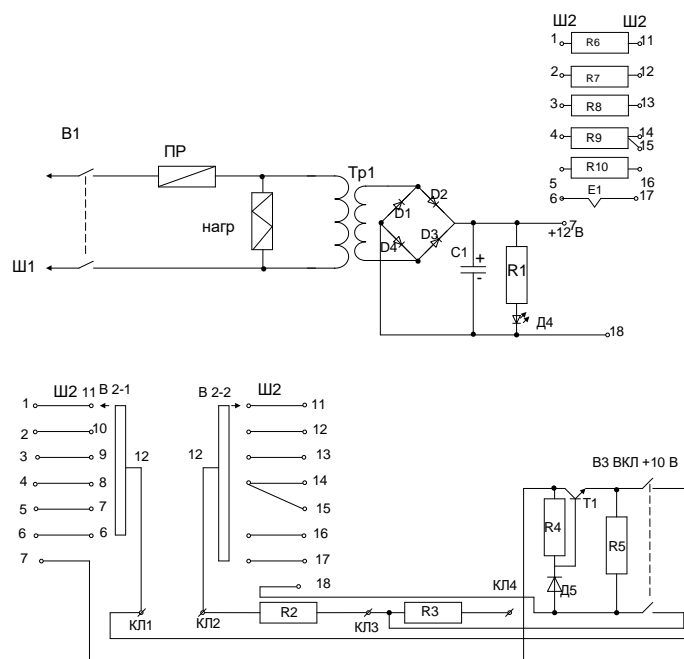


Рисунок 4 – Схема стенда «Исследование свойств тепловых измерительных преобразователей»

Для питания моста постоянным напряжением используется регулируемый выпрямитель.

Терморегулятор предназначен для автоматического поддержания температуры воздуха в жилых помещениях, теплицах, бытовых инкубаторах и т.д. в диапазоне от 5 до 45 °С в комплексе с бытовыми электронагревательными приборами мощностью от 25 до 300 Вт.

Терморегулятор имеет выносной термодатчик 1 и блок управления (рисунок 5). Нагревательный элемент подключают к розетке 2, ручкой регулировки 3 устанавливают необходимую температуру, а по индикатору 4 следят за режимом работы терморегулятора. Терморегулятор включается в сеть вилкой 5.

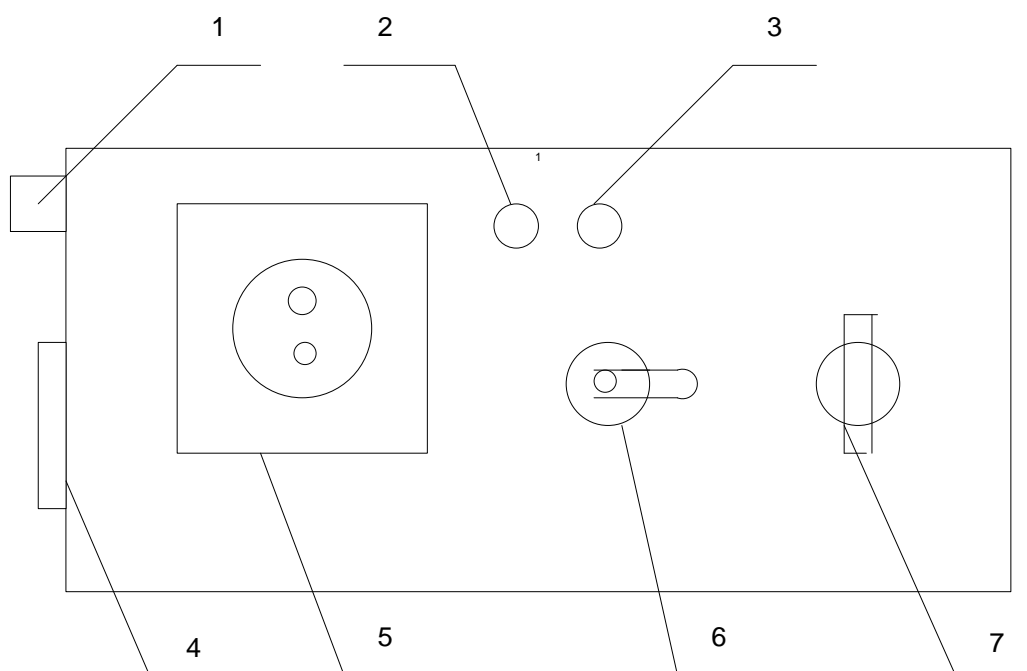


Рисунок 5 – Терморегулятор для теплового шкафа

1-предохранитель, 2-светодиод включения, 3-светодиод включения нагревателя, 4-сетевой разъем, 5-розетка подключения шкафа, 6-тумблер включения сети, 7 регулятор температуры

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В лабораторной работе используются приборы, питающиеся от сети переменного тока 220В. Корпуса этих приборов должны заземляться. При сборке схемы все проводники должны быть тщательно закреплены. Соединительные проводники не должны иметь оголенные участки. После сборки схема должна быть проверена преподавателем и только после проверки питающие напряжения могут быть включены. При всех переключениях в собранной схеме необходимо отключить ее от питающей сети.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1) Исследование термопреобразователей.

1.1) Подготовьте камеру к работе, для чего регулятор интенсивности нагрева камеры поверните влево до упора. Включите шнур питания камеры в розетку терморегулятора. Шнур терморегулятора включите в сеть.

1.2) Не включая тумблер питания на терморегуляторе, проведите измерение всех термопреобразователей при комнатной температуре.

Измерение резистивных термопреобразователей и термопары проводите прибором Щ68003. Пределы измерения выбирайте из условия максимального отображения значащих знаков.

1.3) Включите тумблеры питания на терморегуляторе и на камере. Установите на терморегуляторе температуру 30⁰С. Установите регулятором ток нагревателя в пределах 0,5-1,0А. В связи с тем, что камера обладает инерционностью, при подходе к температуре эксперимента, уменьшайте ток нагревателя до минимума. Измерение проводите в установившемся режиме, когда показания прибора установятся.

Аналогично проводите измерения в остальных температурных точках.

Результаты измерений внесите в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование термопреобразователей

Тип ИП	Температура						S ом/град
	Комн.	30	40	50	60	70	
КМТ-8							
КМТ-1							
КМТ-4							
ТСП-0879							
ТСМ-5071							
ТХК 2088							

Чувствительность ИП к изменению температуры определяется из соотношения:

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta t} \left[\frac{\text{Ом}}{\text{град}} \right]$$

Рекомендуется определять S В диапазоне изменения температур 40°-60°С.

1.4) Построить графики $R_H = f(t^\circ)$ для всех видов используемых ИП. R_H - нормированное значение сопротивления

$$R_H = \frac{R_t}{R_{\text{КОМН}^*}}$$

Для всех исследуемых ИП рассчитать коэффициент нелинейности

$$K_H = \frac{tg\alpha_{max} - tg\alpha_{min}}{tg\alpha_{cp}}$$

где α_{max} , α_{min} и α_{cp} - максимальный, минимальный и средний углы наклона касательной к характеристике.

На основании полученных данных сделать выводы по чувствительности и линейности.

2) Собрать мостовую схему согласно рисунку 6. Переключатель П поставить в положение 1. К клеммам 2-3 подключить измерительный прибор Щ68003, предварительно переключив его в режим измерения постоянного напряжения. К клеммам 1-3 подключить магазин сопротивлений, задав значение $K=1000$ Ом. Включить тумблер + 10 В на пульте.

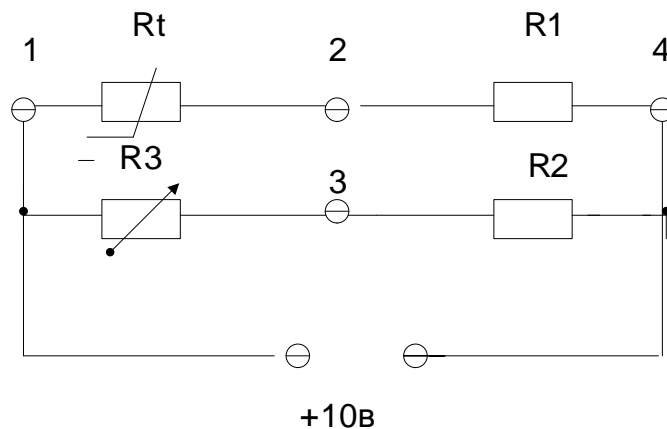


Рисунок 6 - Мостовая схема включения терморезистора

Не включая нагреватель камеры магазином R_3 , произвести уравновешивание моста.

Включить нагреватель и, фиксируя по спиртовому термометру температуру внутри камеры при каждом заданном значении температуры, измерить напряжение разбаланса моста. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Исследование терморезистора КМТ-1 в схеме моста

$t^{\circ}\text{C}$	комнатная	30°	40°	50°	60°	70°	80°
$U_{\text{м}},(\text{мВ})$							

Построить график зависимости $U_{\text{м}}=f(t^{\circ})$ и сравнить с графиком $R_{\text{н}}f(t^{\circ})$ по чувствительности преобразователей и линейности характеристик. Для получения графика рассчитать коэффициент нелинейности $K_{\text{н}}$ и сравнить его с $K_{\text{н}}$ по п. 1.3. Сделать вывод.

Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и усилительные устройства

Лабораторная работа № 4. Исследование резисторного усилительного каскада

Лабораторная работа имеет целью освоение методики экспериментального определения основных показателей и характеристик усилительного каскада, а также исследование зависимости показателей и характеристик усилительного каскада от параметров элементов схемы.

Завершается работа оформлением и защитой с оценкой отчета. Защита осуществляется методом экспресс-опроса в рамках теоретического и практического материала по теме лабораторной работы.

4.1 Краткие сведения из теории

Усилителем электрических сигналов называют устройство, предназначенное для усиления входного электрического колебания по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания. Усилитель может состоять из одного или нескольких усилительных каскадов. При этом *усилительным каскадом называют минимальную часть усилителя, содержащую один (реже – два) активный элемент и сохраняющую функции усилителя.*

Одним из наиболее важных параметров усилителя является коэффициент усиления. В зависимости от типа усиливаемой величины, различают коэффициенты усиления напряжения K_U , тока K_I и мощности K_P . Обычно каскады предварительного усиления характеризуют коэффициентом усиления напряжения, а оконечные каскады – коэффициентом усиления мощности (или тока).

Коэффициентом усиления напряжения усилителя называется отношение амплитудных (или действующих) значений выходного и входного напряжений (рисунок 4.1):

$$K_U = \frac{U_{m\text{вых}}}{U_{m\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_2}{U_1}.$$

(4.1)

Коэффициент усиления напряжения (как, впрочем, и остальные коэффициенты усиления) определяется **в установившемся режиме при гармоническом (синусоидальном) входном сигнале** (при этом частота испытательного сигнала, как правило, выбирается в пределах полосы пропускания усилителя).

Коэффициентом усиления тока усилителя называется отношение амплитудных (действующих) значений выходного и входного токов:

$$K_I = \frac{I_{m\text{вых}}}{I_{m\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_2}{I_1}.$$

(4.2)

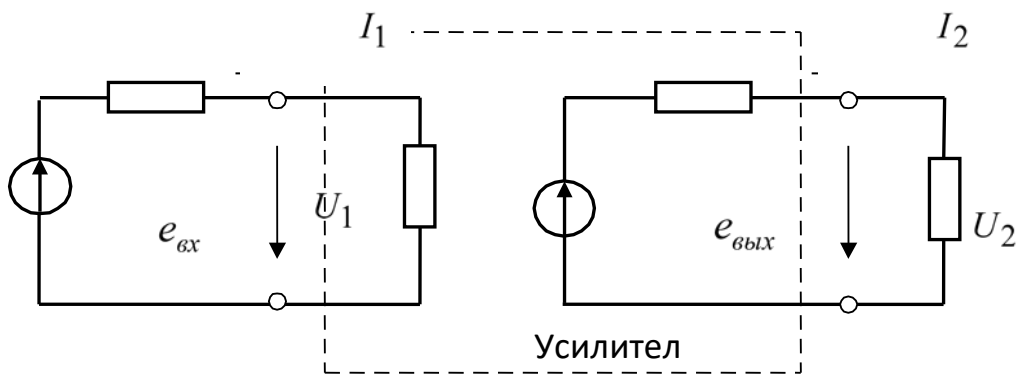


Рисунок 4.1

Отношение мощности усиленного колебания в нагрузке к мощности, подаваемой на вход усилителя, называется *коэффициентом усиления мощности*:

$$K_P = \frac{P_H}{P_{ex}}.$$

(4.3)

Все три коэффициента усиления взаимосвязаны очевидными соотношениями:

$$K_P = K_I K_U,$$

(4.4)

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 R_{ex}}{R_H U_1} = K_U \frac{R_{ex}}{R_H}.$$

(4.5)

На практике при определении коэффициентов усиления часто используется логарифмическая единица – *децибел*. В этом случае связь между коэффициентами усиления, выраженными в относительных и логарифмических единицах, устанавливается следующим образом:

– коэффициент усиления мощности

$$K_P, [\text{дБ}] = 10 \lg K_P,$$

(4.6)

$$K_P = 10^{\frac{K_P, [\text{дБ}]}{10}};$$

(4.7)

– коэффициент усиления напряжения

$$K_U, [\text{дБ}] = 20 \lg K_U, \quad (4.8)$$

$$K_U = 10^{\frac{K_U, [\text{дБ}]}{20}}; \quad (4.9)$$

– коэффициент усиления тока

$$K_I, [\text{дБ}] = 20 \lg K_I, \quad (4.10)$$

$$K_I = 10^{\frac{K_I, [\text{дБ}]}{20}}. \quad (4.11)$$

Любой усилительный каскад содержит реактивные элементы (разделительные и блокировочные конденсаторы, емкости p - n -переходов активных элементов и др.), поэтому его входное и выходное сопротивления, в общем случае, являются комплексными величинами. В определенном диапазоне частот входного сигнала сопротивлением реактивных элементов можно пренебречь ввиду его малости, тогда амплитуда напряжения на выходе усилителя будет определяться только усилительными свойствами каскада и параметрами входного сигнала и не будет зависеть от частоты входного сигнала. Однако вне названного диапазона частот, где влиянием реактивных сопротивлений нельзя пренебрегать, будет наблюдаться существенная зависимость выходного напряжения каскада от частоты входного сигнала.

Предположим, что на вход усилителя поступает сигнал, действующее значение напряжения которого в комплексной форме равно $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1(\omega)}$. В

результате усиления на нагрузке усилителя выделяется напряжение $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2(\omega)}$. Тогда комплексный коэффициент усиления напряжения равен

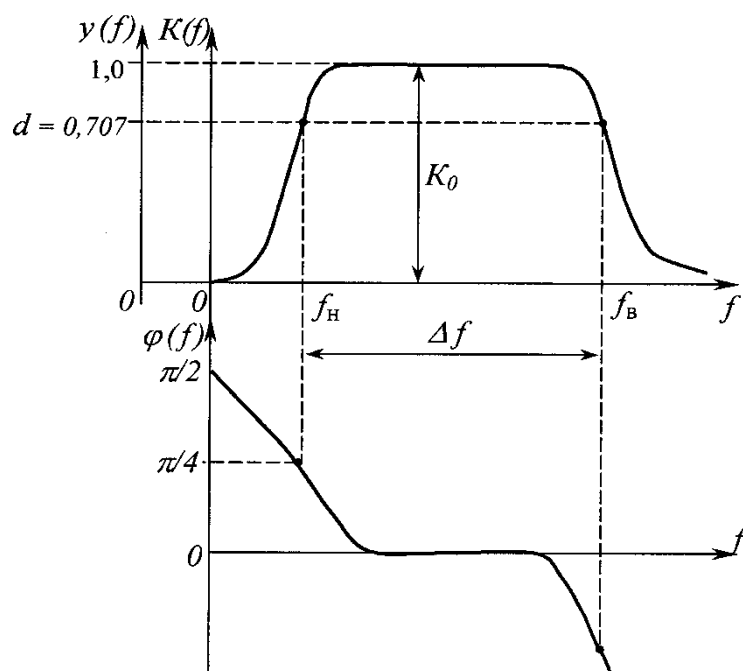
$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j[\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)]} = K_U(\omega) e^{j\varphi(\omega)}.$$

(4.12)

В выражении (4.12) модуль комплексного коэффициента усиления напряжения K_U для краткости называют коэффициентом усиления напряжения усилителя. Зависимость коэффициента усиления напряжения от частоты называется **амплитудно-частотной** (кратко – **частотной**) **характеристикой** (АЧХ) усилителя. На рисунке 4.2 показан вид типовой АЧХ усилителя. В качестве аргумента функции вместо угловой частоты ω взята циклическая частота f ($f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$). Для АЧХ типичным является наличие так называемой *области средних частот*, в которой K_U почти не зависит от частоты и обозначается K_0 . Его иногда называют *номинальным коэффициентом усиления*.

Рисунок 4.2

Часто на АЧХ по вертикальной оси используют *относительный масштаб*, откладывая *нормированное усиление* $y = K / K_0$, т. е.



коэффициент усиления, отнесенный к его значению на средних частотах. Такая АЧХ $y(f)$ называется *нормированной*.

На нижних и верхних (низших и высших) частотах АЧХ обычно спадает. Частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается относительно своего значения на средних частотах в $\sqrt{2}$ раз, называются *граничными частотами* полосы пропускания усилителя: f_H (ω_H) и f_B (ω_B) – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты. При использовании логарифмического представления коэффициента усиления, его уменьшению в $\sqrt{2}$ раз соответствует спад АЧХ в области нижних и верхних частот на 3 дБ.

*Диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления напряжения усилителя уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз (не более чем на 3 дБ), называется **полосой пропускания усилителя**. Ширина полосы пропускания (Π) усилителя может быть найдена из выражения*

$$\Pi = f_B - f_H.$$

(4.13)

Вследствие спада усиления на краях полосы пропускания не все спектральные составляющие сложного колебания усиливаются в одинаковое число раз. Это приводит к искажениям его формы, которые называются *частотными искажениями*.

Аргумент $\varphi(\omega)$ комплексного коэффициента усиления напряжения, представляющий собой *зависимость фазового сдвига* $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, вносимого усилителем в усиливаемый сигнал, от частоты называется его **фазочастотной** (кратко – **фазовой**) **характеристикой** (ФЧХ). Типовая ФЧХ усилителя представлена в нижней части рисунка 4.2.

Из рисунка 4.2 видно, что в разных областях частотного диапазона сдвиг фаз между выходным и входным колебаниями в усилителе будет разным. В области средних частот (где K_U не зависит от частоты) ФЧХ практически не зависит от частоты. На граничных частотах сдвиг фаз составляет $\pm \frac{\pi}{4}$ относительно своего значения в середине полосы пропускания. Из теории цепей известно, что если ФЧХ четырехполосника не является прямой, исходящей из начала координат, то время прохождения через него различных спектральных составляющих сложного колебания различно. Это приводит к искажениям его формы, которые называются *фазовыми*.

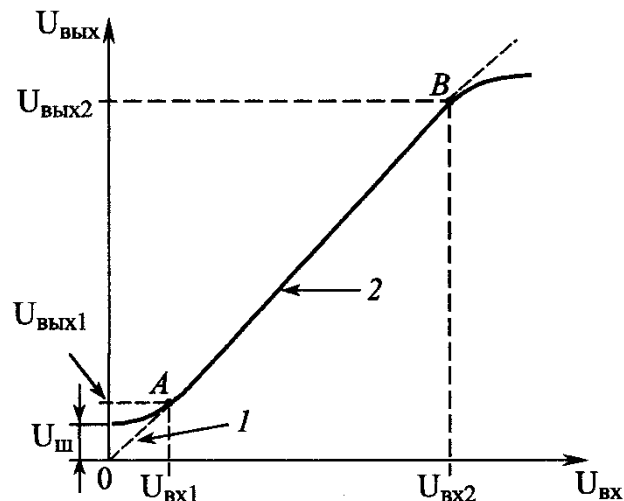
Частотные и фазовые искажения называются *линейными*, так как создаются емкостями и индуктивностями схемы, которые являются линейными элементами. Они искажают форму лишь сложного колебания, а форму гармонического (синусоидального) колебания не изменяют. Линейные искажения не приводят к появлению новых составляющих в спектре сигнала. Они вызывают лишь изменение соотношения амплитуд и фаз между отдельными спектральными составляющими.

Амплитудной характеристикой (АХ) усилителя называется *зависимость установившегося значения выходного напряжения от напряжения, подаваемого на вход усилителя* (рисунок 4.3). Снимают

амплитудные характеристики усилителей при синусоидальном входном сигнале для одной из частот, лежащих в пределах полосы пропускания.

Рисунок 4.3

Идеальная амплитудная характеристика усилителя представляет собой прямую линию, исходящую из начала координат (на рисунке 4.3 – штриховая линия). Однако реальная АХ совпадает с этой прямой только в средней части, на участке AB . Начальный участок АХ отклоняется от прямой из-за наличия на выходе усилителя напряжения собственных помех $U_{ш}$. Верхний загиб АХ обусловлен наступлением перегрузки одного из каскадов усилителя, в результате чего начинается ограничение амплитуды выходного колебания. Ограничение амплитуды выходного сигнала (то есть искажение его формы) обусловлено изменением его спектрального состава. Искажения сигнала, связанные с изменением его спектра, называются *нелинейными искажениями*. Чтобы усиливаемый сигнал не искажался при прохождении через усилитель, необходимо, чтобы его



значения находились в диапазоне от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$. При изменении входного напряжения в пределах от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$ усилитель можно считать линейным устройством, для которого существует линейная зависимость между приростами входного и выходного напряжений. Таким образом, АХ дает

возможность определить пределы изменения U_{ex} , для которых усилитель с необходимой точностью можно рассматривать как линейное устройство.

Отношение наибольшего входного напряжения усилителя к наименьшему в пределах линейной части амплитудной характеристики называется **динамическим диапазоном D** усилителя:

$$D = \frac{U_{ex2}}{U_{ex1}}.$$

(4.14)

Обычно динамический диапазон выражают в децибелах:

$$D, [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_{ex2}}{U_{ex1}}.$$

Типовая схема резисторного усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, приведена на рисунке 4.4. Такие каскады применяют в качестве каскадов предварительного усиления.

Рисунок 4.4

Схема содержит *входную цепь*, состоящую из резисторов R_1 и R_2

(*базовый делитель*), задающих положение исходной рабочей точки (ИРТ) и емкости C_{p1} , обеспечивающей гальваническую развязку между источником входного сигнала u_{ex} и входом усилителя. В каскадах

предварительного усиления транзистор работает в режиме *A*, поэтому сопротивление резисторов R_1 и R_2 подбирают таким образом, чтобы при отсутствии входного сигнала $u_{вх}$ ИРТ располагалась на середине нагрузочной прямой (точка O на отрезке AB , рисунок 4.5).

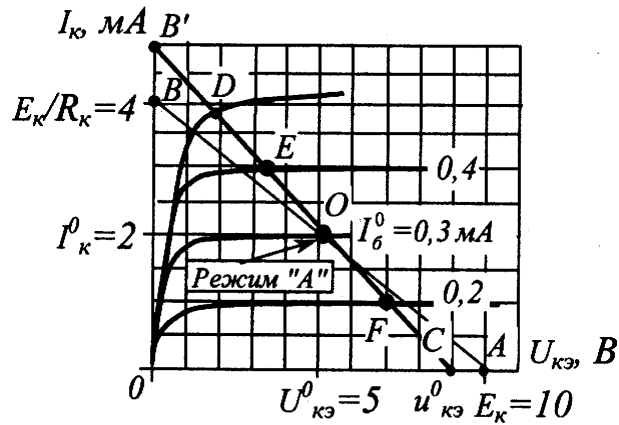


Рисунок 4.5

Управляемый источник тока выполнен на биполярном транзисторе VT с коллекторной нагрузкой R_K . В эмиттерную цепь транзистора включен резистор $R_Э$, выполняющий роль элемента цепи отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току. Наличие цепи ООС повышает температурную стабильность каскада и снижает влияние на работу каскада флуктуаций напряжения питания. Действие цепи ООС проявляется только на постоянном токе, поскольку по переменному току эмиттер транзистора соединен с «землей» (общим проводом) через блокировочный конденсатор $C_б$. Входное переменное напряжение подается на базу транзистора через разделительный конденсатор C_{p1} . С выхода усилителя в нагрузку усиленное переменное напряжение подается через разделительный конденсатор C_{p2} .

Все конденсаторы в схеме выбираются так, чтобы для переменного тока в пределах полосы пропускания усилителя их сопротивление было незначительным.

При аналитическом расчете основных параметров усилительного каскада коэффициент усиления напряжения на средних частотах может быть вычислен по формуле

$$K_U = -\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{I_{вх} h_{21Э} R_{вых}}{I_{вх} R_{вх}} \approx -\frac{h_{21Э} R_{К экв}}{h_{11Э}},$$

(4.15)

где $R_{К экв}$ – эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки транзистора, которое может быть определено по формуле

$$R_{К экв} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H};$$

(4.16)

$h_{21Э} = \beta$ - коэффициент передачи тока базы транзистора;

$h_{11Э}$ – входное сопротивление транзистора:

$$h_{11Э} = \frac{U_{БЭ}}{I_B} = r_B + r_Э(1 + h_{21Э});$$

(4.17)

$r_Э = \frac{25 \text{ мВ}}{I_Э}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$r_B \approx \frac{r_Э}{1 - \alpha_{см}}$ - омическое сопротивление базовой области;

$\alpha_{cm} = \frac{\beta_{cm}}{1+\beta_{cm}}$ - статический коэффициент передачи тока эмиттера.

В приведенной формуле для расчета коэффициента усиления знак «-» указывает на то, что каскад с ОЭ меняет фазу входного сигнала на противоположную.

Коэффициент усиления тока определяется из выражения

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_K}{I_B} = h_{21Э}.$$

(4.18)

Входное и выходное сопротивления каскада, соответственно, равны

$$R_{вх} = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11Э},$$

(4.19)

$$R_{вых} = R_K \parallel R_H \parallel r_K \approx R_K,$$

(4.20)

где знак \parallel – означает параллельное соединение соответствующих сопротивлений;
 r_K – дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора.

4.2 Подготовка к работе

4.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя конспект лекций, рекомендованную литературу и подраздел 4.1 методических указаний.

4.2.2 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

4.3 Задание на проведение исследований

4.3.1 Исследовать влияние положения исходной рабочей точки транзистора на нелинейные искажения выходного сигнала.

4.3.2 Исследовать влияние амплитуды входного сигнала на нелинейные искажения выходного сигнала.

4.3.3 Исследовать влияние сопротивления нагрузки и емкости разделительных и блокировочных конденсаторов на АЧХ и ФЧХ усилительного каскада.

4.3.4 Снять амплитудную характеристику каскада и определить динамический диапазон усилителя.

4.3.5 На основе полученных экспериментальных данных определить основные параметры усилительного каскада.

4.4 Порядок проведения исследований

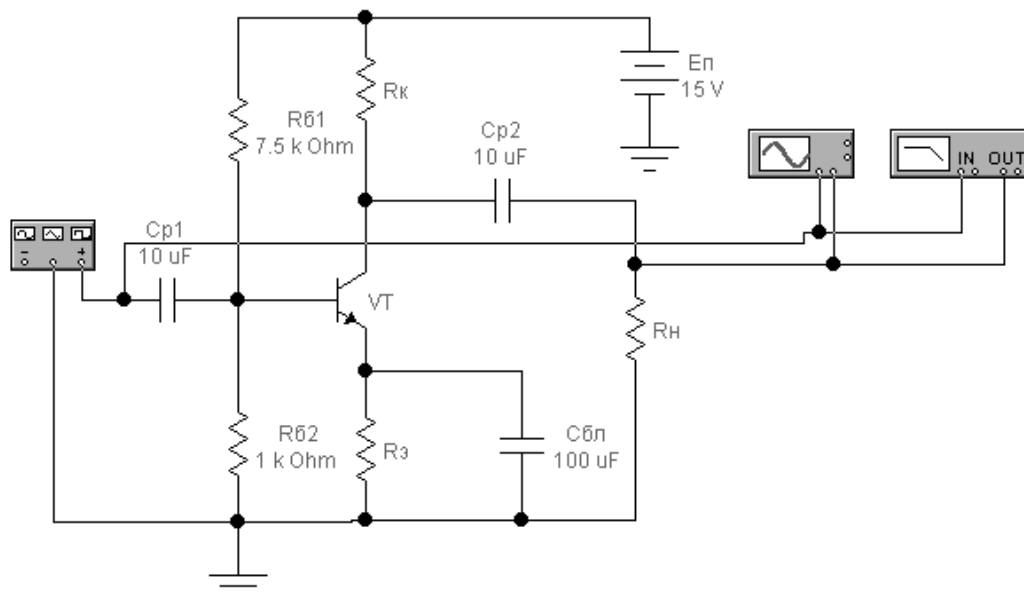
4.4.1 Собрать схему лабораторной установки, приведенную на рисунке 4.6. Задать номиналы резисторов R_K , R_H и тип транзистора VT в соответствии с номером варианта индивидуальных заданий (таблица 4.6), а сопротивление резистора $R_{Э}$ – исходя из условия $R_{Э} = (0,2 \dots 0,3) R_K$.

Рисунок 4.6



4.4.2 Включить моделирование и снять АЧХ усилительного каскада с помощью измерительного прибора «Vode Plotter» (рисунок 4.7). Определить верхнюю и нижнюю граничные частоты полосы пропускания, ширину полосы пропускания и значение коэффициента усиления напряжения в диапазоне средних частот (то есть максимальное значение K_0). Изображение АЧХ усилительного каскада поместить в отчет.

Рисунок 4.7



4.4.3 Снять ФЧХ усилительного каскада. По ФЧХ определить частоты, на которых фаза выходного сигнала изменяется на $\pm\pi/4$ по сравнению с ее значением в диапазоне средних частот (в середине полосы пропускания). Сравнить эти частоты с граничными частотами полосы пропускания усилительного каскада.

Поместить в отчет изображение ФЧХ усилительного каскада.

4.4.4 Выбрать вид сигнала, формируемого функциональным генератором – *синусоидальное колебание*. Установить амплитуду сигнала равной $U_{m u} = 10$ мВ, а частоту f_c – соответствующей частоте, при которой коэффициент усиления напряжения принимает максимальное значение (в пределах полосы пропускания). Измерить с помощью осциллографа амплитуды напряжений на входе усилителя и на нагрузке R_H . Определить коэффициент усиления напряжения усилителя.

Примечание – Если форма сигнала на выходе усилителя отличается от синусоидальной, то, прежде чем проводить измерение амплитуд напряжений, необходимо добиться устранения искажения формы выходного напряжения, *плавно уменьшая сопротивление резистора $R_{\sigma 2}$* .

Вид экрана осциллографа поместить в отчет.

4.4.5 Изменяя сопротивление резистора $R_{\sigma 1}$ в сторону уменьшения (6,8 кОм; 6,2 кОм; 5,6 кОм; 5,1 кОм; 4,7 кОм; 4,3 кОм; 3,9 кОм; 3,6 кОм; 3,3 кОм), следить за изменениями формы сигнала на нагрузке. Значение сопротивления, при котором явно проявляются нелинейные искажения выходного сигнала, записать в отчет. Занести в отчет изображение экрана осциллографа при наличии нелинейных искажений. Проанализировать причину возникновения нелинейных искажений. Сформулировать выводы.

Восстановить исходное значение сопротивления резистора $R_{\sigma 1}$.

4.4.6 Изменяя амплитуду входного сигнала, с помощью осциллографа измерять амплитуду сигнала на нагрузке. Результаты заносить в таблицу 4.1. Одновременно следить за изменениями формы сигнала на нагрузке. Записать в отчет значение амплитуды входного сигнала, при котором возникают нелинейные искажения выходного сигнала. Занести в отчет изображение экрана осциллографа при входном напряжении $U_{m u} = 300$ мВ.

Таблица 4.1

U_{in} , мВ					0	0	0	00	50	00	00
$U_{вых}$, мВ											

Используя результаты измерений (таблица 4.1), построить амплитудную характеристику усилительного каскада.

Определить динамический диапазон усилителя (принять $U_{вх1} = 25$ мкВ).

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

Восстановить амплитуду входного сигнала, равной $U_{m u} = 10$ мВ.

4.4.7 Поочередно изменяя сопротивление нагрузки R_H , емкость разделительных конденсаторов C_{p1} и C_{p2} , емкость блокировочного конденсатора $C_{ол}$, с помощью прибора «Vode Plotter» измерять значение коэффициента усиления напряжения на частоте входного сигнала f_c . Результаты измерений занести в соответствующие таблицы (таблицы 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5).

Примечание – Каждый раз, начиная исследования влияния очередного элемента схемы на величину коэффициента усиления напряжения, восстановить исходные значения всех остальных элементов.

Сформулировать выводы о влиянии параметров элементов схемы на величину коэффициента усиления напряжения.

Восстановить исходные значения всех элементов схемы.

Таблица 4.2

R_H , кО	0,		1	2	5	10	20
М	1	1	0	0	0	0	0

K_U							
-------	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 4.3

C_p							
1,	0,0	0,	0		1	2	1
МК	01	01	,1	1	0	0	00
Ф							
K_U							

Таблица 4.4

C_p							
2,	0,0	0,	0		1	2	1
МК	01	01	,1	1	0	0	00
Ф							
K_U							

Таблица 4.5

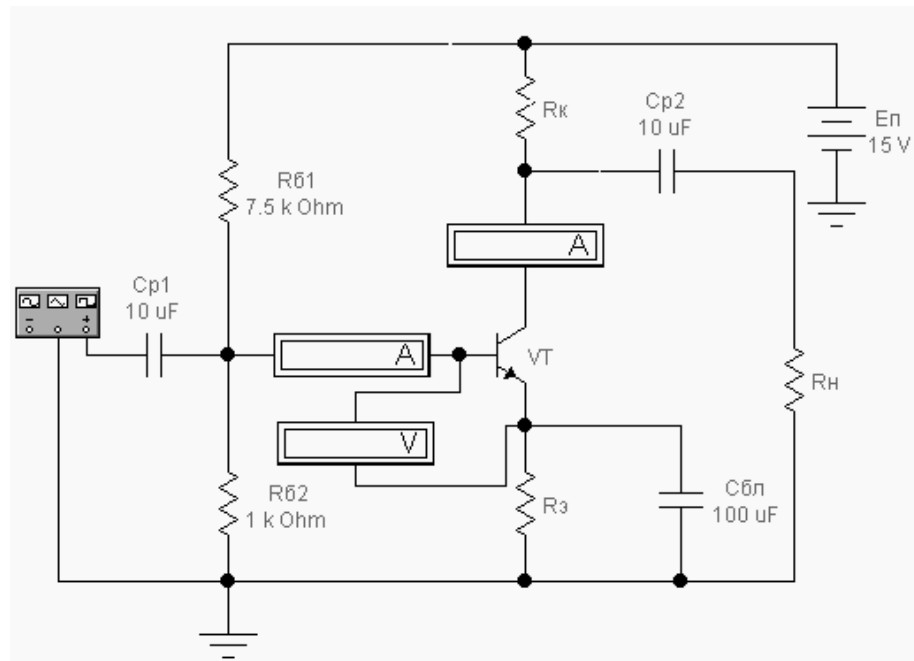
C_6							
ль,	0,0	0,	0		1	2	1
МК	01	01	,1	1	0	0	00
Ф							
K_U							

4.4.8 Собрать схему, приведенную на рисунке 4.8. Параметры сигнала на выходе функционального генератора задать, как в п. 4.4.4. Амперметры и вольтметр подготовить для измерения синусоидальных токов и напряжения (режим АС).

Рисунок 4.8

Включить моделирование и записать полученные значения токов I_B , I_K и напряжения $U_{БЭ}$. Используя формулы (4.15) ... (4.20), вычислить основные параметры усилительного каскада: входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления тока, коэффициент усиления напряжения.

Сравнить рассчитанное значение коэффициента усиления напряжения с аналогичным параметром, полученным в п. п. 4.4.2, 4.4.4.



Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

4.5 Примерный перечень контрольных вопросов

4.5.1 Что называется усилителем электрических сигналов?

4.5.2 Перечислить основные параметры усилителя. Дать им определение.

4.5.3 Как определяется коэффициент усиления напряжения, тока, мощности?

4.5.4 Как связаны коэффициенты усиления, выраженные в относительных величинах и децибелах?

4.5.5 Записать выражение для комплексного коэффициента усиления напряжения.

4.5.6 Что называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя?

4.5.7 Что называется фазочастотной характеристикой усилителя?

4.5.8 Какой вид АЧХ имеет усилитель синусоидальных колебаний?

4.5.9 Что называется амплитудной характеристикой усилителя?

4.5.10 Как определяется сопротивление нагрузки усилителя по переменному току?

4.5.11 Что называется нагрузочной прямой? Как построить нагрузочную прямую постоянного тока?

4.5.12 Как выбирают положение исходной рабочей точки при работе транзистора в режиме класса А?

4.5.13 Как влияет положение исходной рабочей точки на нелинейные искажения сигнала?

4.5.14 Как влияет амплитуда входного сигнала на нелинейные искажения сигнала?

4.5.15 Как влияют емкости разделительных и блокировочных конденсаторов на полосу пропускания усилителя?

4.6 Варианты исходных данных

Таблица 4.6

№№ п/п	R_K , кОм	R_H , кОм	Тип транз.	№№ п/п	R_K , кОм	R_H , кОм	Тип транз.
1	0,62	15	2N2218	16	1,5	15	2N2218
2	0,68	12	2N2222	17	1,3	12	2N2222
3	0,75	10	2N3904	18	1,2	10	2N3904
4	0,82	20	2N4401	19	1,1	20	2N2218
5	0,91	22	2N2218	20	1	22	2N2222
6	1	24	2N2222	21	0,91	24	2N3904

7	1,1	27	2N3904	22	0,82	27	2N4401
8	1,2	30	2N4401	23	0,75	30	2N2218
9	1,3	15	2N2218	24	0,68	15	2N2222
10	1,5	12	2N2222	25	0,62	12	2N3904
11	1,6	10	2N3904	26	2,7	30	2N4401
12	1,8	20	2N4401	27	2,4	15	2N2218
13	2,0	22	2N2218	28	2,2	12	2N2222
14	2,2	24	2N2222	29	1,8	10	2N3904
15	2,4	27	2N3904	30	1,6	20	2N4401

**Тема 1. Аналоговые измерительные преобразователи и
усилительные устройства**
**Лабораторная работа № 5. Исследование преобразователей аналоговых
сигналов на операционных усилителях**

Операционные усилители (ОУ) составляют основу современных устройств обработки (усиления, линейного и нелинейного преобразования, фильтрации) аналоговых сигналов. Целью лабораторной работы является освоение методики экспериментального определения основных показателей и характеристик линейных преобразователей аналоговых сигналов на ОУ, а также исследование зависимости показателей и характеристик схем, построенных на основе ОУ, от параметров элементов внешних цепей.

Завершается работа оформлением и защитой с оценкой отчета. Защита осуществляется методом экспресс-опроса в рамках теоретического и практического материала по теме лабораторной работы.

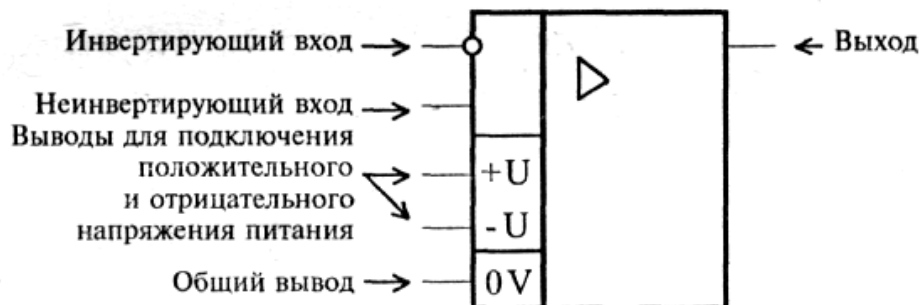
5.1 Краткие сведения из теории

Операционный усилитель – это унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, выполненный, как правило, в виде интегральной микросхемы. Он успешно применяется как при решении многих технических задач (усиление, генерирование, детектирование и преобразование сигналов, стабилизация напряжения и тока и т. п.), так и при выполнении математических операций над аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и т. д.).

На ранних этапах развития вычислительной техники ОУ использовались в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций. С этим, в основном, и связано такое название интегральных усилителей данного класса, как *операционные (решающие)* усилители.

Идеальный ОУ должен обладать следующими параметрами и характеристиками:

- высокий коэффициент усиления напряжения ($K_{U0} \rightarrow \infty$);
 - большое входное и малое выходное сопротивления ($R_{ex} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$);
 - высокая линейность передаточной характеристики;
 - высокая верхняя граничная частота полосы пропускания ($f_B \rightarrow \infty$).
- Следует отметить, что на практике ни одно из перечисленных выше



требований к ОУ не может быть удовлетворено полностью. Достоверность допущений об идеальности свойств в каждом конкретном случае подтверждается сопоставлением реальных параметров ОУ и требований к разрабатываемым электронным устройствам. Так, если требуется разработать усилитель с коэффициентом усиления 100, то стандартный ОУ с коэффициентом усиления 250 000 можно рассматривать для этого случая как идеальный.

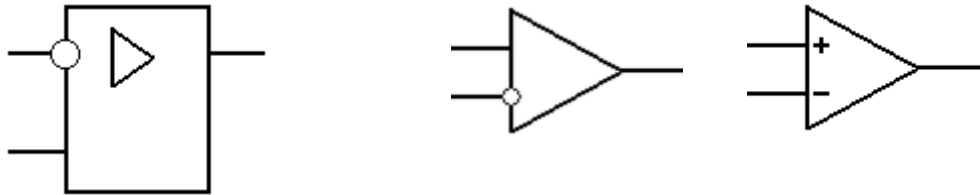
Условное графическое обозначение (УГО) ОУ приведено на рисунке 5.1. Треугольник в правом поле УГО операционного усилителя означает, что ОУ относится к классу усилителей.

Рисунок 5.1

Как видно из рисунка, ОУ имеет два входа – *инвертирующий* и *неинвертирующий*. Поэтому при одновременной подаче сигналов на оба входа напряжение на выходе ОУ будет определяться выражением

$$U_{вых} = K_{U0}(U_{ex+} - U_{ex-}).$$

(5.1)



Входные сигналы подают на ОУ относительно общего провода. Нагрузка подключается к усилителю между выходом и общим проводом.

Для нормального функционирования ОУ требуется подключение к нему двух разнополярных источников питания $+U$ и $-U$ (двухполярный источник питания), причем $|+U| = |-U|$. Общую точку двухполярного источника питания также подключают к общему проводу (общей шине для входных и выходного сигналов). В реальных ОУ напряжение питания лежит, в основном, в диапазоне $\pm 6 \text{ В} \dots \pm 15 \text{ В}$. Использование двухполярного источника питания обеспечивает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

На рисунке 5.1 показаны только шесть основных выводов ОУ. Однако реальные операционные усилители снабжаются большим числом выводов, которые используются для подключения дополнительных элементов контроля, балансировки, коррекции частотной характеристики и других функций.

На рисунке 5.2, *а* приведено упрощенное УГО операционного усилителя, часто используемое при изображении схем в учебной и технической литературе. Как видно, для упрощения на нем не показаны выводы, к которым подключают источники питания. Кроме этого в литературе используют условное обозначение операционного усилителя, как функционального элемента (рисунок 5.2, *б*).

а

б

Рисунок 5.2

К основным параметрам реальных ОУ относятся:

– коэффициент усиления напряжения K_{U0} (значение которого для разных типов ОУ может находиться в диапазоне $500 \dots 10^6$);

- напряжение смещения $U_{см}$ – постоянное напряжение, которое необходимо подать на один из входов, чтобы при отсутствии входных сигналов напряжение на выходе равнялось нулю (обычно составляет 1 ... 10 мВ);

- верхняя граничная частота f_B (в зависимости от типа ОУ составляет единицы Гц – единицы кГц);

- частота единичного усиления f_1 – частота, на которой ОУ не усиливает входной сигнал (0,1 ... 10 МГц);

- скорость нарастания напряжения на выходе ОУ при подаче на его вход скачка напряжения, $V_{U_{ВЫХ}}$ (0,1 ... 90 В/мкс).

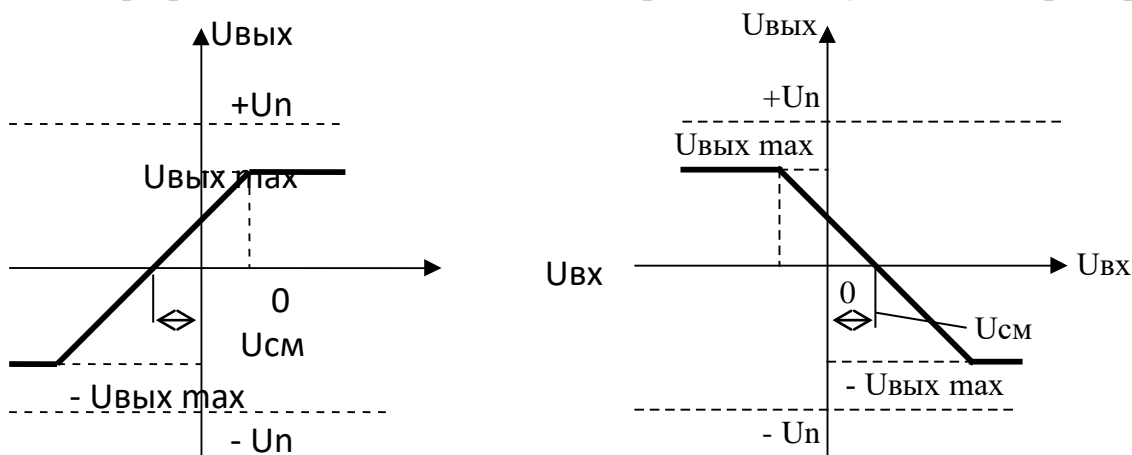
Основными характеристиками ОУ являются *передаточная* и *амплитудно-частотная характеристики*. Различают передаточную характеристику для неинвертирующего и инвертирующего входов. Применение двух источников питания в ОУ при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение. Следовательно, передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рисунке 5.3, *а* и *б* приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинвертирующего и инвертирующего входов. Из этих характеристик следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ($U_{вых\ max}$) всегда меньше напряжения источников питания.

а

б

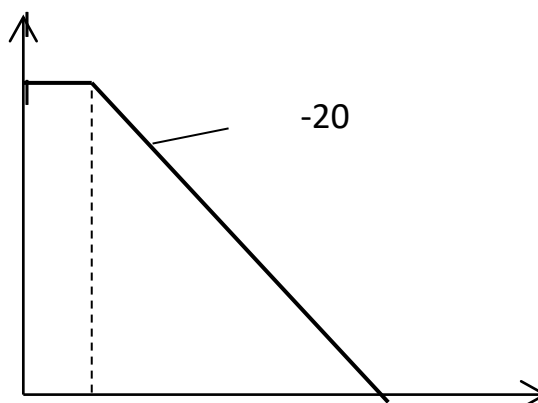
Рисунок 5.3

Логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) операционного усилителя примерно

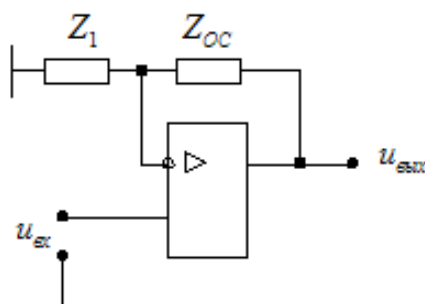


имеет вид, представленный на рисунке 5.4. Спад ЛАЧХ в области высоких частот составляет около -20 дБ/дек.

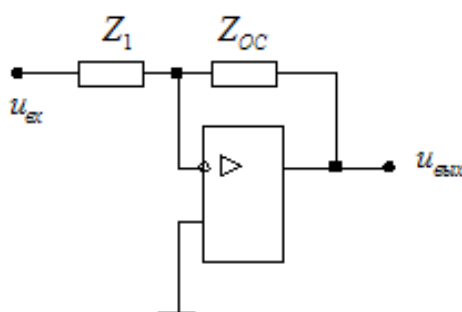
Рисунок 5.4



С учетом того, что ширина полосы пропускания ОУ существенно ограничена (f_B составляет единицы Гц – единицы кГц), основное достоинство ОУ – большой коэффициент усиления, может быть использовано, в основном, при усилении постоянных напряжений (токов). При использовании ОУ в качестве усилителя переменного тока, с целью расширения его полосы пропускания вводят отрицательную обратную связь (ООС). В зависимости от способа подключения к ОУ элементов цепи ООС, на его основе может быть



получен *неинвертирующий* (рисунок 5.5) или *инвертирующий* (рисунок 5.6)



усилитель.

Рисунок 5.5

Рисунок 5.6

Коэффициент усиления напряжения неинвертирующего усилителя вычисляется по формуле

$$K_{U_{OOC}} \approx \frac{Z_1 + Z_{OC}}{Z_1} = 1 + \frac{Z_{OC}}{Z_1},$$

(5.2)

а инвертирующего – по формуле

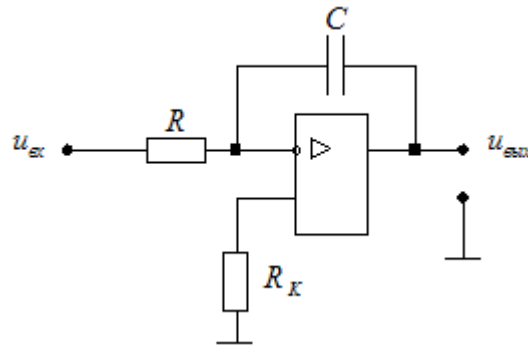
$$K_{U_{OOC}} \approx -\frac{Z_{OC}}{Z_1}.$$

(5.3)

Знак минус в выражении (5.3) указывает на то, что фаза (полярность) напряжения на выходе инвертирующего усилителя противоположна фазе (полярности) входного напряжения. Из выражений (5.2) и (5.3) видно, что численное значение коэффициента усиления напряжения усилителей на основе ОУ, охваченных ООС, определяется только параметрами элементов цепи ООС и не зависит от величины собственного коэффициента усиления напряжения ОУ K_{U_0} . Кроме этого инвертирующий усилитель может иметь сколь угодно малое значение коэффициента усиления напряжения, а минимальное значение $K_{U_{OOC}}$ неинвертирующего усилителя равно единице.

Цепь ООС, охватывающая ОУ, может быть как частотонезависимой, так и частотозависимой. Кроме этого элементы цепи ООС могут быть как линейными, так и нелинейными. Это позволяет получать на основе ОУ схемы различных электронных устройств, реализующих операции линейного и нелинейного преобразования аналоговых сигналов: суммирования, вычитания, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования, возведения в степень и др.

Рассмотрим некоторые устройства линейного преобразования



аналоговых сигналов, реализованные на основе ОУ. В частности к линейным относятся такие математические операции, как интегрирование и дифференцирование.

Интегратором (интегрирующим усилителем) называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Интеграторы широко применяются для формирования линейно нарастающего или линейно убывающего напряжений (в электронных реле времени, в некоторых типах аналого-цифровых преобразователей, в генераторах развертки луча осциллографов и др.).

Простейшую схему интегратора можно получить, если включить в цепь ООС конденсатор, как это показано на рисунке 5.7.

Выходное напряжение идеального интегратора связано с его входным напряжением соотношением

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt ,$$

(5.4)

где $\tau = RC$ – постоянная времени RC – цепи.

Рисунок 5.7

Если на вход схемы, приведенной на рисунке 5.7, подать скачок напряжения с постоянным значением $u_{\text{вх}} = E_0$, то выходное напряжение будет равно

$$u_{\text{вых}}(t) = -E_0 \frac{t}{\tau},$$

(5.5)

то есть, напряжение на выходе схемы будет линейно изменяться во времени.

Как видно из соотношения (5.5), выходное напряжение не зависит от коэффициента усиления ОУ и определяется только величиной входного напряжения и постоянной времени RC -цепи.

Чтобы обеспечить высокую точность интегрирования (малую погрешность интегрирования), постоянная времени $\tau = RC$ должна быть выбрана достаточно большой. Например, если требуется обеспечить погрешность интегрирования прямоугольного импульса, не превышающую 1%, то постоянная времени RC -цепи должна быть больше длительности импульса в 50 раз.

Недостатком схемы, приведенной на рисунке 5.7, является дрейф выходного напряжения, обусловленный напряжением смещения и входными токами ОУ.

Это нежелательное явление можно ослабить, если к конденсатору C подключить резистор $R1$ с большим сопротивлением (рисунок 5.8), обеспечивающий стабилизацию рабочей точки за счет отрицательной обратной связи по постоянному току.

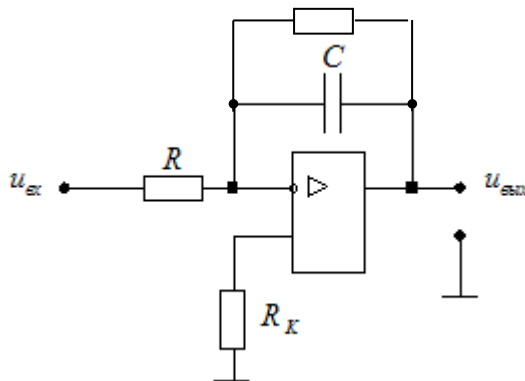
Абсолютная погрешность интегрирования прямоугольного импульса в интеграторе может быть определена из выражения

$$\Delta_{\text{инт}} = U_{\text{вых лин}} - U_{\text{вых изм}},$$

(5.6)

где $U_{\text{вых лин}} = \frac{U_{\text{вх}} t}{RC}$ – напряжение на выходе идеального интегратора;

t – интервал времени, в течение которого продолжалось интегрирование;
 $U_{\text{вых изм}}$ – измеренное значение напряжения на выходе реального интегратора (собранныго, например, по схеме, приведенной на рисунке 5.7 или



5.8).

Рисунок 5.8

Относительная погрешность интегрирования определяется выражением

$$\delta_{\text{инт}} = \frac{\Delta_{\text{инт}}}{U_{\text{вых лин}}} 100\% .$$

(5.7)

Интегратор может быть использован в качестве простейшего фильтра низших частот (ФНЧ) с частотой среза ω_B , определяемой (для схемы на рисунке 5.7) из соотношения

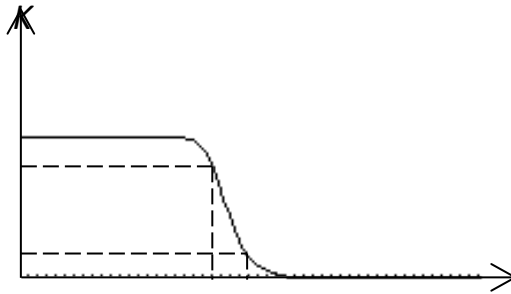
$$\omega_B \approx \frac{1}{K_{U0} RC} ,$$

(5.8)

где K_{U0} – собственный коэффициент усиления ОУ, а для схемы, приведенной на рисунке 5.8 – из соотношения

$$\omega_B \approx \frac{1}{K_U RC} = \frac{1}{R_1 C},$$

(5.9)



где $K_U = \frac{R_1}{R}$ – коэффициент усиления инвертирующего усилителя с ООС.

Частота, на которой коэффициент усиления интегратора равен единице, для схемы на рисунке 5.7 определяется из выражения

$$\omega_1 = \frac{1}{RC},$$

(5.10)

а для схемы на рисунке 5.8 – соответственно выражением

$$\omega_1 = \frac{1}{RC} = \frac{K_U}{R_1 C}.$$

(5.11)

Вид АЧХ интегрирующего усилителя (рисунок 5.8) представлен на рисунке 5.9.

Рисунок 5.9

Дифференциатор (дифференцирующий усилитель) – это устройство, выходное напряжение которого пропорционально скорости изменения входного напряжения. Дифференциаторы применяются для получения коротких импульсов, выделения фронтов импульсов и т. д. Схема простейшего дифференциатора приведена на рисунке 5.10.

Рисунок 5.10

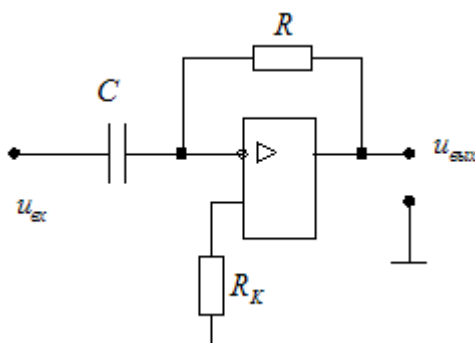
Напряжение на выходе дифференциатора определяется выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = -RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt},$$

(5.12)

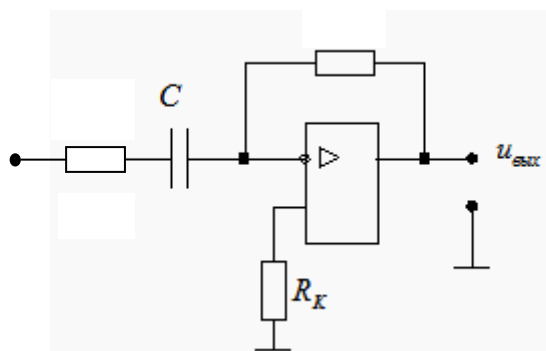
или

$$U_{\text{вых}} \approx -RC \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta t}.$$



(5.13)

Из-за ограниченной полосы пропускания и конечного значения коэффициента усиления реальных ОУ достаточно точно реализовать полученную зависимость не представляется возможным. Кроме того, анализ показывает, что в простейшей схеме дифференцирующего усилителя на ОУ могут возникать самовозбуждения из-за спада коэффициента усиления реального ОУ на высоких частотах и дополнительных фазовых сдвигов, вносимых цепью ООС. Поэтому на практике применяют различные



модифицированные схемы дифференциаторов, в которых частично или полностью устранены отмеченные недостатки. Пример одной из таких схем представлен на рисунке 5.11.

Рисунок 5.11

и

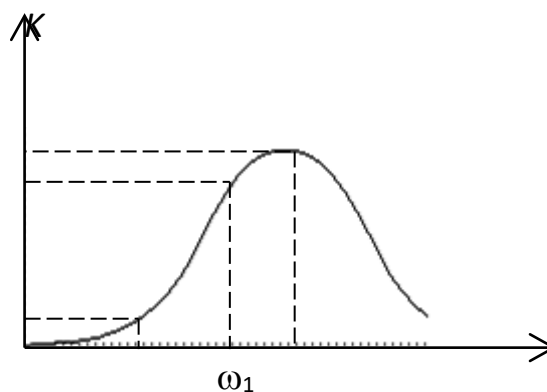
Дифференциатор может быть использован в качестве простейшего фильтра высших частот (ФВЧ) с частотой среза ω_H , определяемой (для схемы на рисунке 5.11) из соотношения

$$\omega_H \approx \frac{1}{RC} = \frac{K_U}{R_1 C}.$$

(5.14)

Частота единичного усиления ФНЧ определяется из выражения

$$\omega_1 \approx \frac{1}{R_1 C} = \frac{1}{K_U R C},$$



(5.15)

где $K_U = \frac{R_1}{R}$ – коэффициент усиления инвертирующего усилителя с ООС.

Вид АЧХ дифференцирующего усилителя (рисунок 5.11) представлен на рисунке 5.12.

Как видно из представленной АЧХ, схема дифференцирующего усилителя может в полной мере выполнять свои функции (дифференцирование входного сигнала) только в диапазоне частот от 0 до ω_B . На более высоких частотах наблюдается спад АЧХ, обусловленный спадом собственной АЧХ операционного усилителя. Именно по этой причине реальный дифференцирующий усилитель по своим характеристикам ближе к полосовым фильтрам.

Рисунок 5.12

5.2 Подготовка к работе

5.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя конспект лекций, рекомендованную литературу и подраздел 5.1 методических указаний.

5.2.2 Используя исходные данные, приведенные в таблице 5.1 (для своего варианта), выполнить расчет:

- коэффициента усиления напряжения инвертирующего усилителя ($K_{U\text{ООС}}$) при $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 1,5R_1 \text{ кОм}$;
- коэффициента усиления напряжения неинвертирующего усилителя ($K_{U\text{ООС}}$) при $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 1,5R_1 \text{ кОм}$;
- для схемы интегрирующего усилителя – верхнюю граничную частоту ω_B и частоту единичного усиления ω_1 при $C = 0,05 \text{ мкФ}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$;
- для схемы дифференцирующего усилителя – нижнюю граничную частоту ω_H и частоту единичного усиления ω_1 при $C = 0,05 \text{ мкФ}$.

5.2.3 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

5.3 Задание на проведение исследований

5.3.1 Исследовать работу ОУ в неинвертирующем и инвертирующем включении.

5.3.2 Исследовать схему интегратора на ОУ:

- снять экспериментально переходные и частотные характеристики;
- установить зависимость погрешности интегрирования от параметров RC -цепи.

5.3.3 Исследовать схему дифференциатора на ОУ:

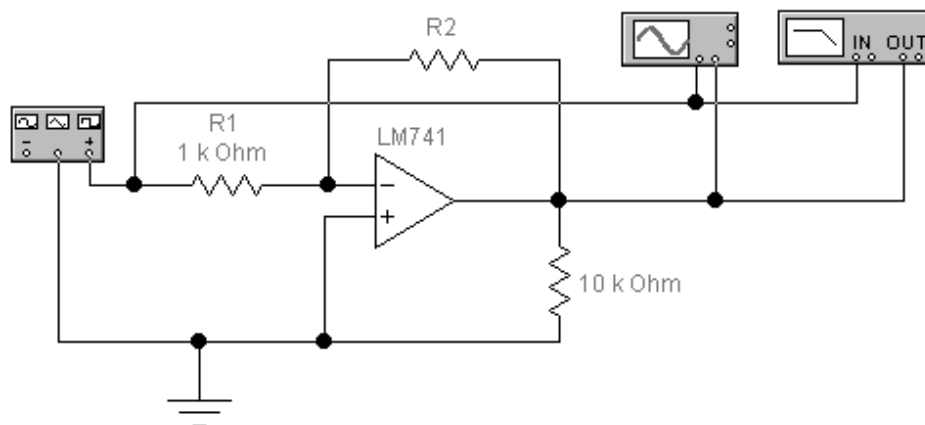
- снять экспериментально переходные и частотные характеристики;
- установить зависимость между параметрами выходного и входного напряжений схемы дифференциатора.

5.4 Порядок проведения экспериментов

5.4.1 Собрать схему инвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 5.13), задать параметры резистора R_2 в соответствии с вариантом (таблица 5.1).

Рисунок 5.13

Подать на вход схемы от источника сигнала гармоническое колебание с частотой $f_{ex} = 1$ кГц и амплитудой $U_{ex} = 10$ мВ. Включить схему. Измерить амплитуды сигналов на входе и выходе ОУ.



Примечание – При измерении амплитуды сигнала во всех экспериментах вход осциллографа должен быть включен в режим измерения переменного напряжения (режим «АС»).

Используя измеренные значения амплитуд сигналов, определить коэффициент усиления напряжения усилителя $K_{U\text{ оос}}$. Сравнить полученный результат с результатом, полученным аналитически при подготовке к лабораторной работе.

Сравнить фазы колебаний на входе и выходе усилителя.

Вид экрана осциллографа занести в отчет.

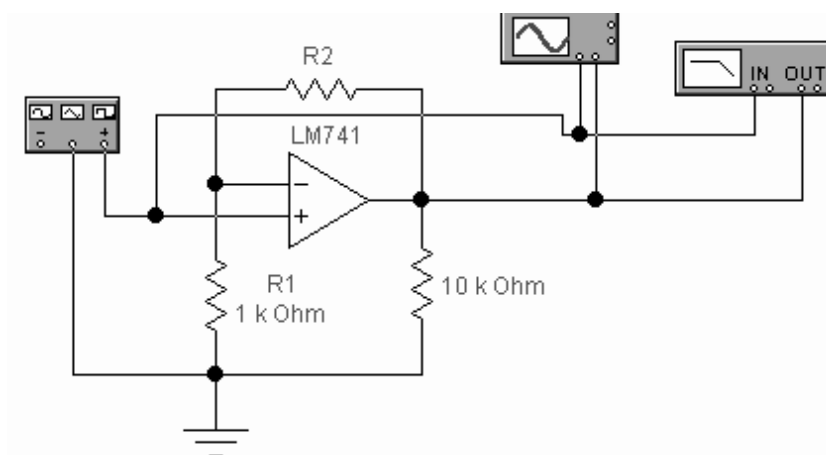
Снять АЧХ усилителя и определить по ней ширину полосы пропускания. Вид АЧХ занести в отчет.

Установить сопротивление резистора $R1$ равным $R1 = 1,5R2$. Повторить все предыдущие операции по п. 5.4.1.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

5.4.2. Собрать схему неинвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 5.14), задать параметры резистора $R2$ в соответствии с вариантом (таблица 5.1).

Подать на вход схемы от источника сигнала *гармоническое* колебание с частотой $f_{ex} = 1$ кГц и амплитудой $U_{ex} = 10$ мВ. Включить схему. Измерить амплитуды сигналов на входе и выходе ОУ.



Используя измеренные значения амплитуд сигналов, определить коэффициент усиления напряжения усилителя $K_{U\text{ оос}}$. Сравнить полученный результат с результатом, полученным аналитически при подготовке к лабораторной работе.

Рисунок 5.14

Сравнить фазы колебаний на входе и выходе усилителя.

Вид экрана осциллографа занести в отчет.

Снять АЧХ усилителя и определить по ней ширину полосы пропускания. Вид АЧХ занести в отчет.

Установить сопротивление резистора $R1$ равным $R1 = 1,5R2$. Повторить все предыдущие операции по п. 5.4.2.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

5.4.3. Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.15. Подать на вход интегратора *прямоугольные* импульсы амплитудой 5 В. Частоту повторения импульсов f_{ex} и сопротивление резистора $R1$ задать в соответствии с вариантом индивидуального задания (таблица 5.1).

Рисунок 5.15

Включить моделирование. Получить на экране осциллографа изображение входного и выходного сигналов. Перенести полученные изображения в отчет.

По экрану осциллографа измерить интервал времени, в течение которого происходит убывание выходного напряжения интегратора за время действия импульса положительной полярности на входе, а также размах входного ($U_{вх}$) и выходного ($U_{вых\ изм} = U_{вых\ макс} - U_{вых\ мин}$) напряжения.

Вычислить абсолютную (5.6) и относительную (5.7) погрешности интегрирования.

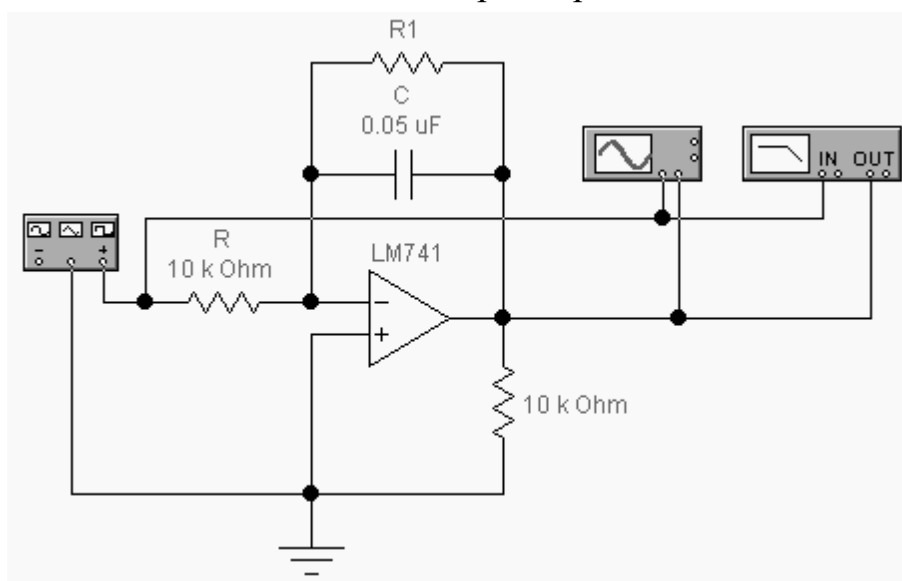
Результаты расчетов занести в отчет.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

5.4.4 Снять амплитудно-частотную характеристику интегратора. Перенести вид АЧХ в отчет. По АЧХ определить частоту среза (ω_B) и частоту единичного усиления (ω_1). Полученные результаты занести в отчет.

Сравнить значения ω_B и ω_1 с аналогичными параметрами, полученными аналитически при подготовке к лабораторной работе. Сформулировать выводы.

5.4.5 Задать емкость конденсатора C , равной 0,1 мкФ. Повторить все



операции, изложенные в п.п. 5.4.3 и 5.4.4.

Сформулировать выводы о зависимости основных параметров и характеристик интегратора от параметров элементов цепи ООС.

5.4.6 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.16. Подать на вход дифференциатора импульсы *треугольной* формы амплитудой 5 В. Частоту повторения импульсов установить равной $f_{вх} = 1$ кГц, сопротивление резистора $R1$ задать в соответствии с вариантом (таблица 5.1).

Рисунок 5.16

Включить моделирование. Получить на экране осциллографа изображение входного и выходного сигналов. Перенести полученные изображения в отчет.

По экрану осциллографа измерить интервал времени Δt , в течение которого входное напряжение изменяется от минимального до максимального уровня, а также величину приращения входного напряжения $\Delta U_{вх}$ ($\Delta U_{вх} = U_{вх.макс} - U_{вх.мин}$). Измерить выходное напряжение $U_{вых.изм}$ при максимальном значении входного напряжения.



Вычислить напряжение $U_{вых}$ по формуле (5.13). Сравнить полученный результат с измеренным значением.

Результаты измерений и расчетов занести в отчет.

Сформулировать выводы.

5.4.7 Частоту повторения импульсов установить равной $f_{ex} = 2$ кГц. Повторить исследование по п. 5.4.6. Сравнить результаты, полученные в п.п. 5.4.6 и 5.4.7. Сформулировать выводы.

5.4.8. Снять амплитудно-частотную характеристику дифференцирующего усилителя. Перенести вид АЧХ в отчет. По АЧХ определить наибольшее значение коэффициента усиления $K_{U\ ooc}$, а также нижнюю граничную частоту (ω_H) и частоту единичного усиления (ω_1). Полученные результаты занести в отчет.

Сравнить значения ω_H и ω_1 с аналогичными параметрами, полученными аналитически при подготовке к лабораторной работе. Сформулировать выводы.

Сформулировать выводы о зависимости выходного напряжения дифференциатора от скорости нарастания входного напряжения, а также о зависимости нижней частоты среза АЧХ от параметров элементов цепи ООС.

5.5 Примерный перечень контрольных вопросов

5.5.1 Что называется операционным усилителем?

5.5.2 Как определяется коэффициент усиления напряжения при неинвертирующем включении ОУ?

5.5.3 Как определяется коэффициент усиления напряжения при инвертирующем включении ОУ?

5.5.4 Из каких функциональных узлов состоит схема ОУ?

5.5.5 Что называется интегратором?

5.5.6 Что называется дифференциатором?

5.5.7 Как связано выходное напряжение интегратора со входным напряжением?

5.5.8 Как связано выходное напряжение дифференциатора со входным напряжением?

5.5.9 Как определить граничную частоту и частоту единичного

усиления в схеме интегратора?

5.5.10 Как определить граничную частоту и частоту единичного усиления в схеме дифференциатора?

5.5.11 Как зависит точность интегрирования от параметров RC -цепи?

5.5.12 Из каких условий выбирают постоянную времени интегратора для обеспечения высокой точности интегрирования?

5.6 Варианты исходных данных

Таблица 5.1

№ № п/п	Усили	Интегр.		Дифф	№№ п/п	Усили	Интегр.		Дифф
	- тель	$f_{вх}$,	$R1$,	$R1$,		- тель	$f_{вх}$,	$R1$,	$R1$,
	$R2$,	кГц	кОм	кОм		$R2$,	кГц	кОм	кОм
1	100	0,8	75	1	16	85	1,6	64	5,6
2	120	0,5	62	1,5	17	55	1,7	93	1,1
3	91	0,9	56	2	18	112	1,8	86	1,2
4	68	0,95	115	2,5	19	73	1,9	57	2,6
5	51	1	130	3	20	84	2	65	6,4
6	110	1,1	135	3,5	21	47	1,1	67	6,8
7	82	1,2	43	4,3	22	96	1,2	98	2,4
8	75	1,3	58	4,5	23	78	1,3	85	2,8
9	62	1,4	100	5,1	24	64	1,4	55	3,2
10	56	1,5	120	3,3	25	93	1,5	112	3,9
11	115	1,6	91	2,7	26	86	0,8	73	4,3
12	130	1,7	68	1,8	27	57	0,5	84	4,7
13	135	1,8	51	1,3	28	65	0,9	47	2,5
14	43	1,9	110	6,2	29	67	0,95	96	3,1

15	58	2	82	1,6	30	98	1	78	3,4
----	----	---	----	-----	----	----	---	----	-----

Тема 2. Цифровые преобразователи и основы цифровой логики

Лабораторная работа № 6. Исследование логических элементов

Логические элементы составляют основу логических устройств, применяемых в цифровой электронике. Чтобы выполнить синтез любого логического устройства, необходимо знать, какую простейшую логическую функцию реализует тот или иной логический элемент. Целью лабораторной работы является закрепление знаний по основам цифровой электроники, а также освоение методики исследования логических элементов, реализующих простейшие логические функции.

Завершается работа оформлением и защитой с оценкой отчета. Защита осуществляется методом экспресс-опроса в рамках теоретического и практического материала по теме лабораторной работы.

Краткие сведения из теории

Логическим элементом называется физическое устройство, реализующее одну из операций алгебры логики или простейшую логическую функцию. Входные и выходные сигналы логических элементов могут принимать значения, соответствующие двум уровням напряжения – низкому или высокому. При *положительной логике* низкий уровень напряжения соответствует «логическому нулю», высокий – «логической единице» (при отрицательной логике – наоборот).

Схема, составленная из конечного числа логических элементов, называется *логической схемой*.

Для описания алгоритмов работы и структуры логических схем используют аппарат *алгебры логики* (булевой алгебры). В основе алгебры логики лежит три *логических операции*:

- *логическое отрицание* (операция НЕ, *инверсия*), обозначаемое надчеркиванием над логической переменной или логическим выражением (\bar{x} ; $x_1 + \bar{x}_2$);
- *логическое сложение* (операция ИЛИ, *дизъюнкция*), обозначаемое знаком «+» или « \vee » ($\bar{x}_1 + x_2$; $x_1 \vee x_2$);
- *логическое умножение* (операция И, *конъюнкция*), обозначаемое

одним из знаков: « \times », « \cdot », « $\&$ » или « \wedge » (x_1x_2 ; $\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$; $\bar{x}_1 \times x_2$; $x_1 \& x_2$; $x_1 \wedge \bar{x}_2$).

Перечисленные логические операции могут быть применены к *двоичным (булевым) переменным*.

Булевыми переменными называются такие переменные x_1, x_2, \dots, x_n , которые могут принимать только одно из двух значений «0» или «1».

Логической (переключательной) функцией называется такая функция $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая так же как и ее аргументы (булевы переменные) может принимать только одно из двух значений «0» или «1».

Конкретная комбинация значений аргументов называется *набором*. Каждый набор имеет индекс, численно равный десятичному эквиваленту двоичного числа. Очевидно, что функция от n переменных в общем случае может быть определена на 2^n наборах их значений.

Логические функции от *одной и двух переменных* принято называть *элементарными*. Эти функции имеют специальные названия и обозначения и используются при воспроизведении более сложных логических функций.

Для выражения логических функций от многих переменных достаточно иметь ограниченное число разнотипных элементарных логических функций, называемое *системой*. Система логических функций называется *функционально полной*, если при помощи этих функций можно выразить любую сложную логическую функцию. Примеры функционально полных систем:

- конъюнкция, дизъюнкция, инверсия;
- конъюнкция, инверсия;
- дизъюнкция, инверсия;
- стрелка Пирса (отрицание дизъюнкции);
- штрих Шеффера (отрицание конъюнкции).

Первая система булевых функций образует так называемый *булев базис функций*, а две последние – *универсальный базис*.

Логическое отрицание описывается логической функцией $Y = \bar{x}_0$ и может быть реализовано с помощью логического элемента, называемого *инвертором*. Условное графическое обозначение инвертора приведено на



рисунке 6.1, *а*. На рисунке 6.1, *б* показано обозначение инвертора, используемое в программе Electronics Workbench.

а

б

Рисунок 6.1



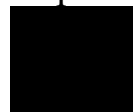
Функция логического сложения двух переменных x_0 и x_1 – $Y = x_0 \vee x_1$ может быть реализована с помощью логического элемента *дизъюнктора*, условное графическое обозначение которого представлено на рисунке 6.2, *а* (соответственно, используемое в Electronics Workbench – на рисунке 6.2, *б*).

а

б

Рисунок 6.2

Функция логического умножения двух переменных x_0 и x_1 – $Y = x_0 x_1$



может быть реализована с помощью логического элемента *конъюнктора*, условное графическое обозначение которого представлено на рисунке 6.3, *а* (соответственно, используемое в Electronics Workbench – на рисунке 6.3, *б*).

а

б

Рисунок 6.3

Для реализации логических функций *отрицание дизъюнкции* и *отрицание конъюнкции* используются соответствующие элементы Пирса (ИЛИ-НЕ) и Шеффера (И-НЕ). Условные графические обозначения элементов приведены на рисунке 6.4.

Рисунок 6.4

Одной из форм представления логической функции является *таблица истинности*. **Таблицей истинности** или комбинационной таблицей называется *таблица, которая содержит все возможные комбинации (наборы) входных переменных x_{n-1}, \dots, x_1, x_0 и соответствующие им значения выходных переменных y_i логической функции Y* . В общем случае таблица истинности содержит 2^n строк. На рисунке 6.5 в качестве примера представлена таблица истинности некоторой логической функции ($Y = f(x_0, x_1, x_2)$) трех переменных.



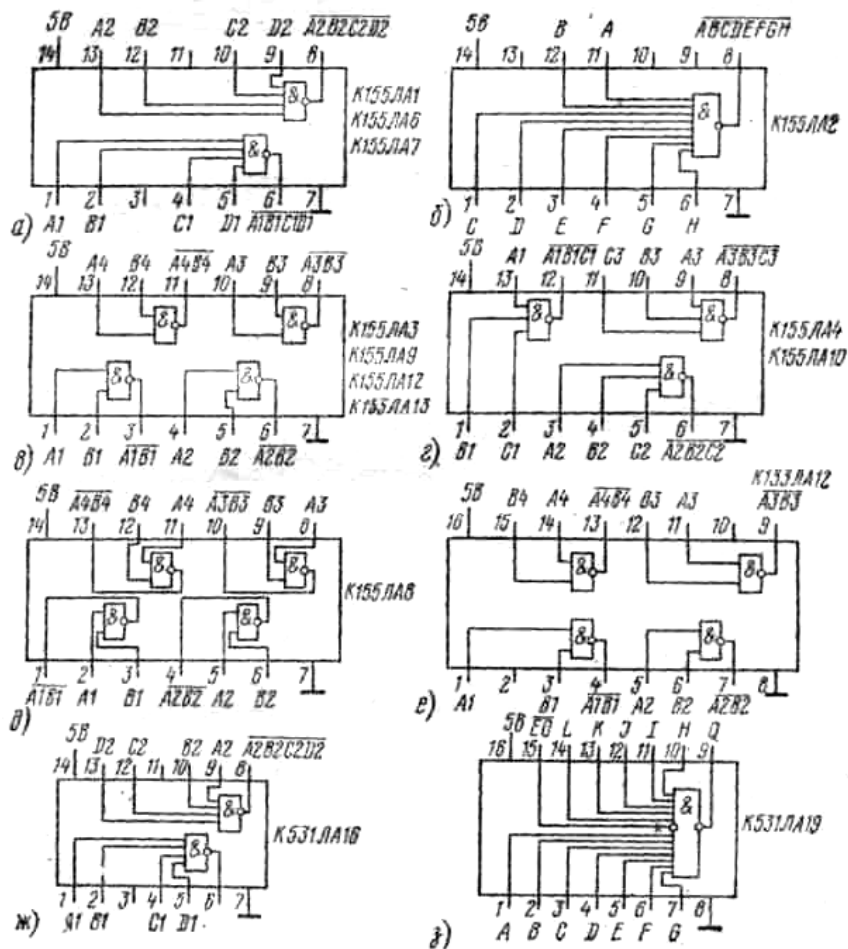
№№ набор.	x_2	x_1	x_0	Y
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0

5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

Рисунок 6.5

На практике однотипные логические элементы, реализующие элементарные логические функции, объединяют по несколько элементов в одном корпусе цифровой интегральной микросхемы (ИМС). На рисунке 6.6 показаны примеры таких микросхем 155 серии транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

Рисунок 6.6



В справочной литературе для каждой цифровой ИМС указывают ее функциональный состав. Например, для ИМС К155ЛА1 в справочнике записано: два элемента 4И-НЕ (или кратко – 2-4И-НЕ).

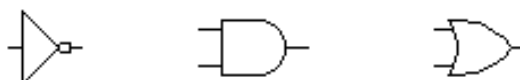
Подготовка к работе

Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя конспект лекций, рекомендованную литературу и подраздел 6.1 методических указаний.

Используя справочную литературу, ознакомиться с техническими характеристиками ИМС серий К555, К1531, содержащих логические элементы, реализующие элементарные логические функции.

Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

Задание на проведение исследований



На основе экспериментальных данных составить таблицы истинности простейших логических элементов и их сочетаний.

Определить логические функции по таблицам истинности логических элементов, полученным экспериментально.

Порядок проведения исследований

Составить таблицы истинности логических элементов НЕ, И, ИЛИ (рисунок 6.7).

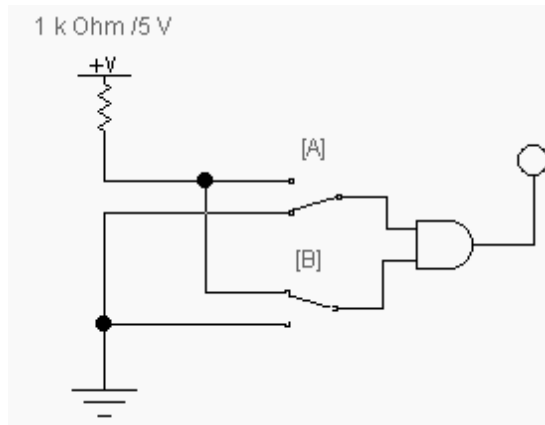


Рисунок 6.7

Для проведения исследований использовать схему, пример которой показан на рисунке 6.8. Комбинацию входных переменных задавать с помощью переключателей «А», «В» (в общем случае число переключателей зависит от числа входов логического элемента). Логической единице входной переменной соответствует подключение источника +5 В, логическому нулю – подключение общего провода («схемной земли»). Значение логической функции определять по цвету индикатора, подключенного к выходу логического элемента: красный цвет индикатора соответствует значению «1», а белый – «0». Результаты заносить в таблицу истинности, составленную для каждого элемента (пример – таблица 6.1).

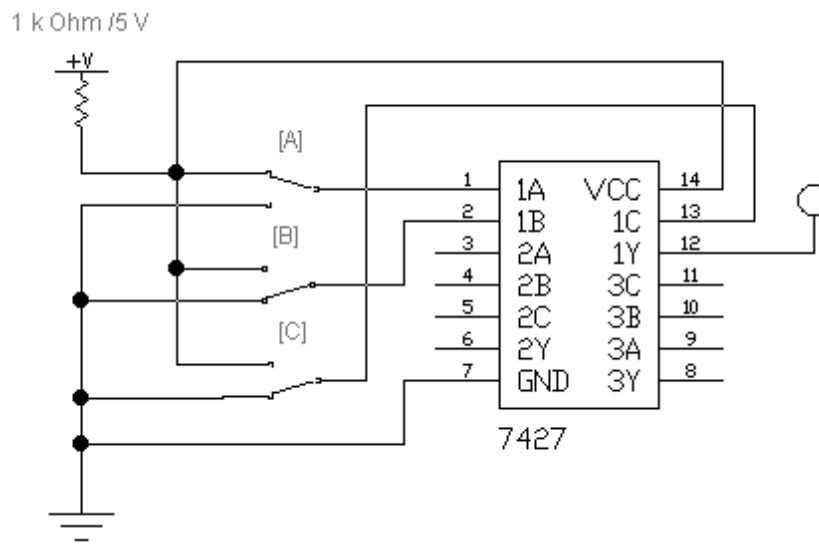
По полученной таблице истинности определить тип логического элемента.

Рисунок 6.8

Таблица 6.1

Номер набора	x_1 (В)	x_0 (А)	Y
0	0	0	
1	0	1	
2	1	0	
3	1	1	

Составить таблицы истинности для пары логических элементов (рисунок 6.9, а) и логического элемента, приведенного на рисунке 6.9, б. По



полученным таблицам истинности определить тип логического элемента.

а б

Рисунок 6.9

Повторить операции по п. 6.4.2 для пары логических элементов (рисунок 6.10, а) и логического элемента, приведенного на рисунке 6.10, б. По полученным таблицам истинности определить тип логического элемента.

а б

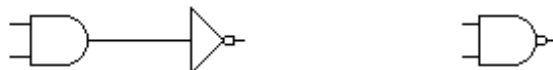


Рисунок 6.10

Составить таблицы истинности логических элементов, входящих в состав логических интегральных схем, в соответствии с индивидуальным заданием (таблица 6.2). Для этой цели использовать схему, приведенную на



рисунок 6.11. По полученным таблицам истинности определить тип логических элементов и описать функциональный состав исследованных интегральных схем (с учетом наборов логических элементов).

Рисунок 6.11

Примерный перечень контрольных вопросов

1. Какие переменные называют логическими (булевыми)?
2. Какую функцию называют логической (булевой)?
3. Что называется набором логических переменных?
4. Что называется логическим элементом?
5. Что называется логической схемой?
6. Какие логические функции называют элементарными?
7. Какая система логических функций называется функционально полной?
8. Что называется конституентой единицы (нуля)?
9. Что называется СДНФ (СКНФ) логической функции?
10. Какие известны методы минимизации логических функций?
11. Записать правило де Моргана для двух логических переменных.
12. Записать логические выражения для логических операций НЕ, И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ.
13. Привести условные графические обозначения логических элементов: инвертор, дизъюнктор, конъюнктор, штрих Шеффера, стрелка Пирса.
14. Привести таблицы истинности логических функций: инверсия, дизъюнкция, конъюнкция.

6.6 Варианты исходных данных

Таблица 6.2

№№ п/п	Типы ИС	№№ п/п	Типы ИС
1	7400, 7410	16	7402, 7408
2	7402, 7411	17	7400, 7402
3	7428, 7411	18	7411, 7400
4	7408, 7427	19	7427, 7400
5	7428, 7410	20	7428, 7402
6	7402, 7410	21	7411, 7428

7	7408, 7411	22	7400, 7410
8	7408, 7427	23	7402, 7411
9	7400, 7428	24	7428, 7411
10	7402, 7408	25	7408, 7427
11	7400, 7402	26	7428, 7410
12	7411, 7400	27	7402, 7410
13	7427, 7400	28	7408, 7411
14	7428, 7402	29	7408, 7427
15	7411, 7428	30	7400, 7428

Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы

Лабораторная работа № 7. Исследование характеристик полупроводниковых приборов

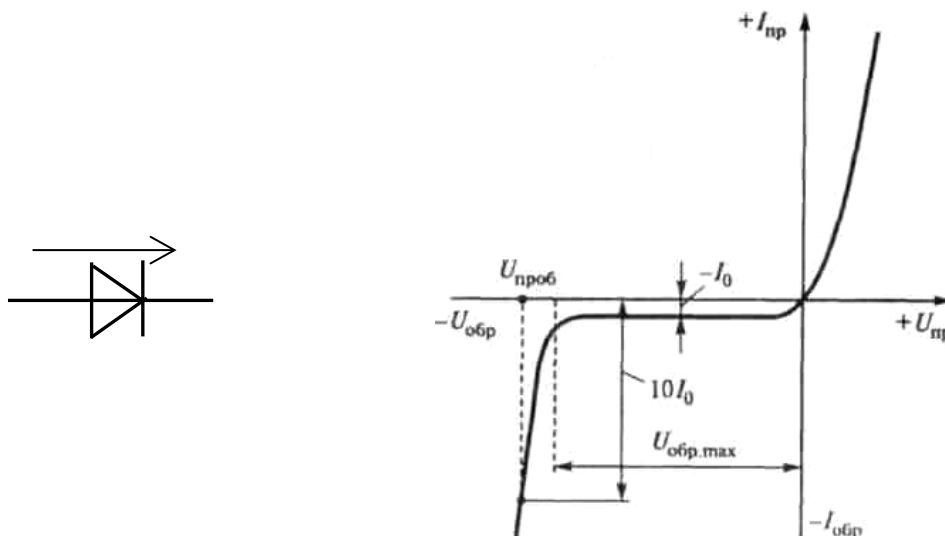
Лабораторная работа имеет целью исследование основных характеристик и параметров полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов, а также приобретение навыков использования возможностей компьютерной программы Electronics Workbench 5.12 для этих целей.

Завершается работа оформлением и защитой с оценкой отчета. Защита осуществляется методом экспресс-опроса в рамках теоретического и практического материала по теме лабораторной работы.

3.1 Краткие сведения из теории

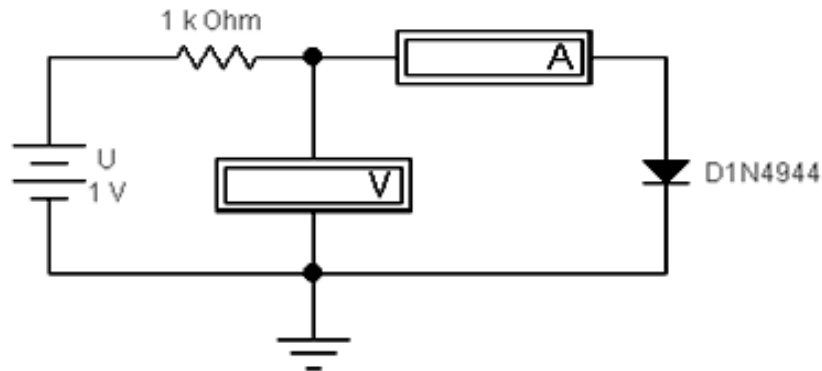
3.1.1 Полупроводниковые диоды

Как известно из курса электротехники, вольтамперная характеристика (ВАХ) элемента электрической цепи представляет собой зависимость тока, протекающего через элемент от напряжения на выводах этого элемента (или наоборот, зависимость напряжения от тока). ВАХ диода имеет две ветви: *прямую* (снимается, когда диод смещен в прямом направлении) и



обратную (снятую при обратном смещении диода). На рисунке 3.1, а показано условное графическое обозначение (УГО) выпрямительного диода.

Если полярность приложенного напряжения соответствует указанной на рисунке, то диод смещен в прямом направлении и через него течет прямой ток I_{np} . Примерный вид ВАХ диода при прямом и обратном смещении показан на рисунке 3.1, б.



а

б

Рисунок 3.1

Чтобы снять прямую ветвь ВАХ диода, можно воспользоваться схемой измерения, приведенной на рисунке 3.2. Для снятия обратной ветви ВАХ необходимо поменять полярность источника напряжения U .

Рисунок 3.2

Диод представляет собой нелинейный элемент, поэтому его нельзя характеризовать величиной сопротивления, как линейный резистор. В связи с этим различают *статическое* сопротивление диода и *динамическое (дифференциальное)* сопротивление диода. *Статическое сопротивление* в заданной точке ВАХ можно определить по формуле

$$r_{\partial CT} = \frac{U_{\partial}}{I_{\partial}}. \quad (3.1)$$

Для определения *дифференциального сопротивления* диода используют формулу

$$r_{\partial \text{ диф}} = \frac{dU_{\partial}}{dI_{\partial}} \approx \frac{\Delta U_{\partial}}{\Delta I_{\partial}},$$

(3.2)

где ΔU_{∂} и ΔI_{∂} – соответственно приращения напряжения и тока диода, определяемые по графику ВАХ.

Из рисунка 3.1, б видно, что как статическое, так и динамическое сопротивления диода существенно зависят от тока, протекающего через диод.

Основным отличием стабилитронов от выпрямительных диодов является то, что их используют в режиме электрического пробоя, который наблюдается при обратном смещении диода. Материалы, используемые в стабилитронах, имеют высокую концентрацию примесей. Это приводит к тому, что напряженность электрического поля в их *p-n*-переходах значительно выше, чем у остальных типов диодов. За счет этого при относительно небольших обратных напряжениях в *p-n*-переходе возникает электрический пробой. Механизм пробоя может быть **туннельным**, **лавинным** или **смешанным**. Обычно у низковольтных стабилитронов более вероятен туннельный пробой, а у высоковольтных – лавинный. В обоих случаях сильного нагрева *p-n*-перехода не происходит, поэтому теплового пробоя не наступает.

Обратная ветвь ВАХ стабилитрона и его УГО представлены на рисунке 3.3. Такая ВАХ может быть обеспечена только при *лавинном* или *туннельном* пробоях. Лавинный пробой имеет место у диодов, изготовленных из полупроводника с большой шириной запрещенной зоны. Поэтому основным материалом для изготовления стабилитронов является кремний.

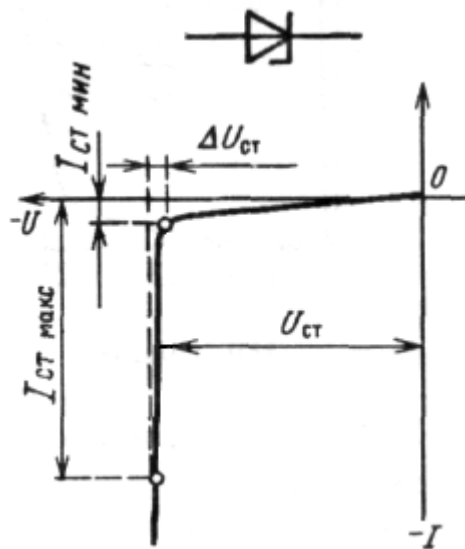


Рисунок 3.3

К основным параметрам стабилитрона относят:

- напряжение стабилизации ($U_{ст}$);
- минимально допустимый ток стабилизации ($I_{ст. мин}$);
- максимально допустимый ток стабилизации ($I_{ст. макс}$);
- дифференциальное сопротивление стабилитрона ($r_{ст диф}$) на участке пробоя;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации ($\alpha_{U_{ст}}$).

Напряжение стабилизации – это напряжение на стабилитроне при прохождении через него заданного тока стабилизации. На практике в исходной рабочей точке ток стабилизации задают равным

$$I_{ст} = \frac{I_{ст. мин} + I_{ст. макс}}{2}.$$

(3.3)

Следовательно, напряжение стабилизации $U_{ст}$ соответствует обратному напряжению на стабилитроне, при котором по нему течет ток $I_{ст}$.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст диф}$ определяют так же, как и у выпрямительного диода. Качество стабилитрона (то есть его способность стабилизировать напряжение при изменении проходящего по нему тока) тем выше, чем ниже его дифференциальное сопротивление.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{cm}}$ – это величина, определяемая отношением относительного изменения напряжения стабилизации к изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации.

Пусть при температуре t_1 напряжение стабилизации было равно u_{cm1} , а при температуре t_2 – соответственно u_{cm2} . Тогда температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{cm}}$ может быть найден из формулы

$$\alpha_{U_{cm}} = \frac{u_{cm2} - u_{cm1}}{u_{cm1}(t_2 - t_1)}.$$

(3.4)

3.1.2 Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор является активным элементом, управляемым током в цепи управляющего вывода – *базы*. Для него могут быть построены две разновидности ВАХ – *входная*, представляющая собой зависимость тока в цепи базы транзистора от напряжения, приложенного между базой и эмиттером **при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером** и *семейство выходных ВАХ*, полученное как зависимость тока коллектора транзистора от напряжения между коллектором и эмиттером **при фиксированных значениях тока в цепи базы**.

На рисунке 3.4, в частности, приведены ВАХ маломощного транзистора КТ 315Б (аналог транзистора Q2N2712): слева – входные, справа – семейство выходных.

Рисунок 3.4

Токи I_B , I_K и I_E биполярного транзистора тесно взаимосвязаны. В частности, самый большой ток протекает в эмиттерной области транзистора.

Для тока эмиттера можно записать

$$I_E = I_B + I_K.$$

(3.5)

Ток коллектора можно определить из равенства

$$I_K = \alpha_{cm} I_E + I_{K0},$$

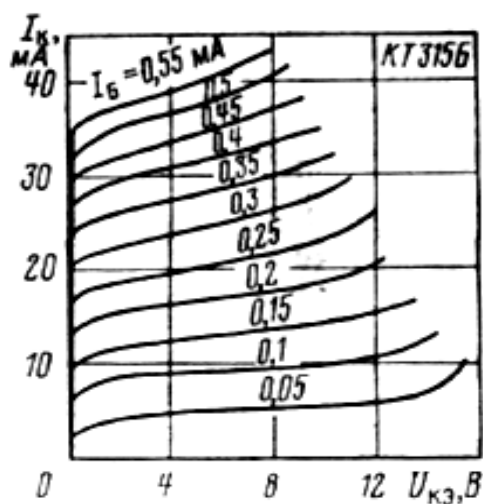
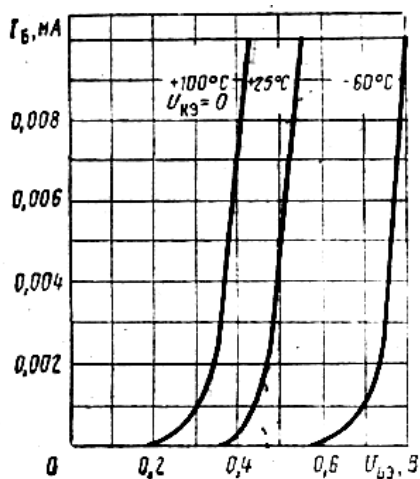
(3.6)

где α_{cm} – статический коэффициент передачи тока эмиттера;

I_{K0} – обратный (тепловой) ток коллектора.

На практике $\alpha_{cm} = 0,95 \dots 0,998$.

Ток коллектора можно представить через ток базы:



$$I_K = \beta_{cm} I_B + (\beta_{cm} + 1) I_{K0},$$

(3.7)

где $\beta_{cm} = \frac{\alpha_{cm}}{1-\alpha_{cm}}$ – статический коэффициент передачи тока базы в

схеме с

общим эмиттером (в справочной литературе используется обозначение $h_{21Э}$;

обычно принимает значение 10 ... 500 в зависимости от типа и мощности

транзистора).

Статический коэффициент передачи тока базы, с учетом (3.7), может быть определен из выражения

$$\beta_{cm} = \frac{I_K - I_{K0}}{I_B + I_{K0}} \approx \frac{I_K}{I_B},$$

(3.8)

а статический коэффициент передачи тока эмиттера, соответственно, из выражения

$$\alpha_{cm} = \frac{\beta_{cm}}{1 + \beta_{cm}}.$$

(3.9)

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы (в режиме усиления сигнала) определяются из выражения

$$\beta = \left. \frac{di_K}{di_B} \right|_{u_{КЭ} = const} \approx \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B},$$

(3.10)

где Δi_K и Δi_B – взаимозависимые приращения соответственно тока коллектора и

тока базы при фиксированном значении напряжения $u_{KЭ}$ (полученные из

семейства выходных ВАХ транзистора).

Дифференциальное входное сопротивление $r_{вх\ диф}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при **фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер**. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы (по входной ВАХ транзистора):

$$r_{вх\ диф} = \left. \frac{du_{БЭ}}{di_B} \right|_{u_{KЭ} = const} \approx \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_B}.$$

(3.11)

С учетом наклона выходных ВАХ транзистора, выражение (3.7) примет вид

$$i_K = \beta_{cm} i_B + (\beta_{cm} + 1) I_{K0} + \frac{u_{KЭ}}{r_K},$$

(3.12)

где r_K – дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора:

$$r_K = \left. \frac{du_{KЭ}}{di_K} \right|_{i_B = const} \approx \frac{\Delta u_{KЭ}}{\Delta i_K}.$$

(3.13)

3.2 Подготовка к работе

3.2.1 Изучить раздел 2 методических указаний. Ознакомиться с интерфейсом моделирующей компьютерной программы Electronics Workbench.

3.2.2 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя конспект лекций, рекомендованную литературу и подраздел 3.1 методических указаний.

3.2.3 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

3.3 Задание на проведение исследований

Используя экспериментальные данные, построить прямую и обратную ветви ВАХ выпрямительного диода.

Определить статическое и дифференциальное сопротивления выпрямительного диода на заданных участках ВАХ.

Используя экспериментальные данные, построить прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона.

Определить дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке электрического пробоя.

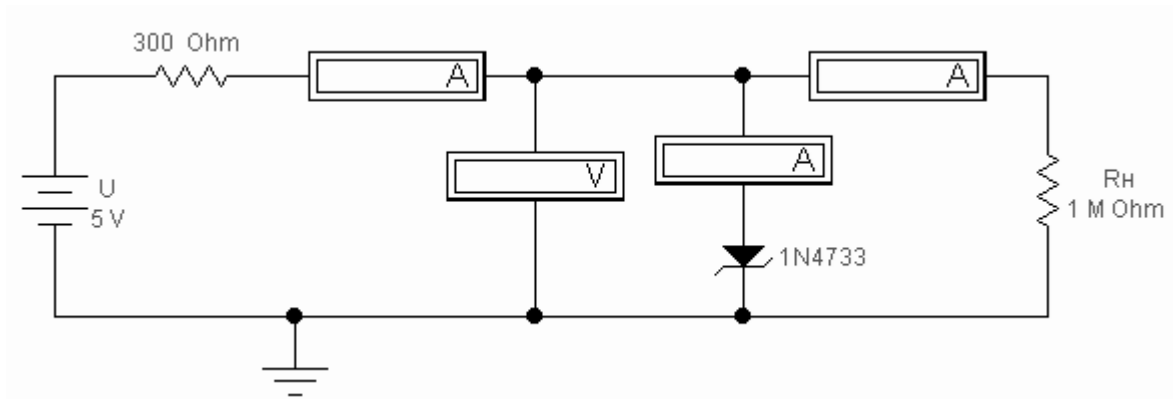
Построить нагрузочную характеристику параметрического стабилизатора.

3.3.6 Используя экспериментальные данные, построить входную ВАХ биполярного транзистора при различных температурах его корпуса.

Используя экспериментальные данные, построить одну ветвь выходных ВАХ транзистора.

Используя ВАХ транзистора и результаты измерений, определить его основные параметры: I_{K0} , $\beta_{ст}$, β , $\alpha_{ст}$, $r_{вх\ диф}$, r_K .

По полученным экспериментальным данным построить графики ВАХ



выпрямительного диода $I_{\Delta np} = f(U_{\Delta np})$ и $I_{\Delta obr} = f(U_{\Delta obr})$.

Определить статическое и дифференциальное сопротивления диода при прямом смещении напряжением $U = 6$ В и при обратном смещении напряжениями $U = -50$ В, $U = -(125 \dots 130)$ В. Ответы записать в отчет. Сравнить значения статического и дифференциального сопротивлений диода.

Собрать схему для исследования стабилитрона (рисунок 3.5). Последовательно изменяя значения ЭДС источника U , записать в таблицу 3.3 значения напряжения $U_{\Delta np}$ и тока $I_{\Delta np}$ стабилитрона при прямом смещении.

Рисунок 3.5

Таблица 3.3

$U,$ В	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5	6	8
U_{Δ} <i>np</i> , В												
$I_{\Delta np}$, мА												

Изменить полярность источника U на противоположную. Последовательно изменяя значения ЭДС источника U , записать в таблицу 3.4 значения напряжения $U_{\Delta obr}$ и тока $I_{\Delta obr}$ стабилитрона при обратном смещении.

Таблица 3.4

$U,$ В	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	-12	-15
U_{∂} <i>обр,</i> В												
I_{∂} <i>обр,</i> мА												

По полученным экспериментальным данным построить графики ВАХ стабилизатора $I_{\partial np} = f(U_{\partial np})$ и $I_{\partial obr} = f(U_{\partial obr})$ (в одной системе координат).

Используя график обратной ветви ВАХ стабилизатора, определить, чему равно значение напряжения стабилизации и вычислить дифференциальное сопротивление стабилизатора на участке стабилизации. Полученные результаты записать в отчет.

Установить напряжение источника равным $U = -10$ В. Изменяя сопротивление нагрузки (R_H) в заданном диапазоне (таблица 3.5), снимать показания измерительных приборов и результаты заносить в таблицу. По полученным данным построить график зависимости напряжения на стабилизаторе от тока нагрузки (сопротивления нагрузки) $U_{\partial obr} = f(I_H)$.

Таблица 3.5

$R_H,$ Ом	10	50	100	500	1000	5000
$I_{общ},$ мА						
$I_H,$ мА						

По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора $I_B = f(U_{БЭ})$. По входной ВАХ в окрестности напряжения $U_{БЭ} = 0,8$ В найти сопротивление $r_{вх\ диф}$.

Установить температуру транзистора в соответствии с вариантом индивидуального задания. Повторить измерения по п. 3.4.10. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 3.6. По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора, совместив ее с ВАХ, построенной в п. 3.4.10.

Установить напряжение источника в цепи базы равным 0 В. Включить схему. Записать измеренное значение обратного тока коллектора $I_{К0}$.

Собрать схему для исследования выходной ВАХ транзистора (рисунок 3.7). Установить ток базы в соответствии с вариантом задания.

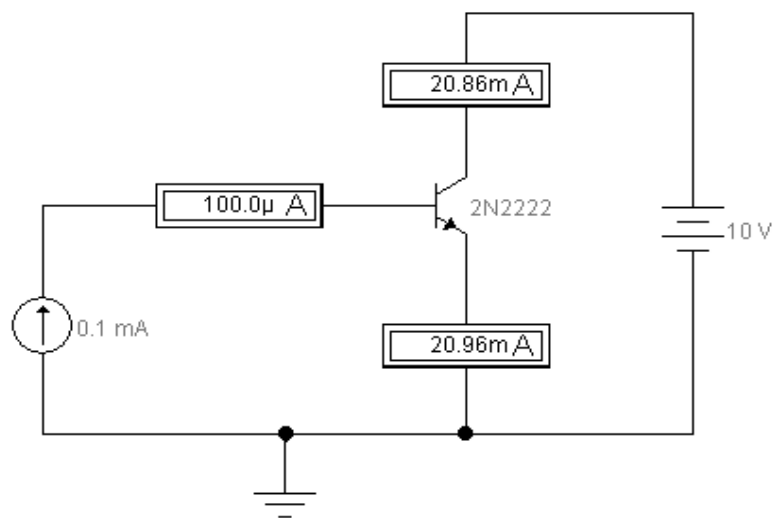


Рисунок 3.7

Проанализировать изменение токов коллектора и эмиттера транзистора при изменении напряжения источника $U_{КЭ}$. Показания приборов занести в таблицу 3.7.

Таблица 3.7

$U_{КЭ},$ В	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

$I_K,$ мА												
$I_E,$ мА												

3.4.14 По данным таблицы построить выходную вольт-амперную характеристику транзистора $I_K = f(U_{KЭ})$.

3.4.15 Определить статические коэффициенты передачи тока базы ($\beta_{ст}$) и тока эмиттера ($\alpha_{ст}$) при $U_{KЭ} = 2, 6$ и 10 В. Установить зависимость этих коэффициентов от напряжения $U_{KЭ}$. Определить дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора r_K . Проверить выполнение равенств (3.5), (3.6) и (3.7) при $U_{KЭ} = 10$ В.

Сформулировать выводы о проделанной работе.

3.5 Примерный перечень контрольных вопросов

С какой целью в полупроводниковый материал добавляют примесь?

В каком случае примесь называется донорной, а в каком акцепторной?

Что называется $p-n$ -переходом?

Что называется контактной разностью потенциалов? Чему равна контактная разность потенциалов в $p-n$ -переходе на основе кремния и германия?

В чем состоят различия между выпрямительным диодом и стабилитроном?

Влияет ли значение сопротивления нагрузки на степень стабилизации выходного напряжения стабилизатора?

От чего зависит ток коллектора транзистора?

Зависит ли коэффициент $\beta_{ст}$ от тока коллектора? Если да, то в какой степени? Обосновать ответ.

На семействе выходных ВАХ транзистора показать область насыщения и область отсечки коллекторного тока.

Что оказывает большее влияние на ток коллектора – ток базы или напряжение коллектор-эмиттер?

Что можно сказать по входной ВАХ транзистора о сходстве или различии между базо-эмиттерным переходом транзистора и $p-n$ -переходом диода, смещенного в прямом направлении?

Одинаково ли значение $r_{ex\ диф}$ в любой точке входной характеристики?

Как подключаются источники напряжения к переходам база-эмиттер и база-коллектор?

Что является источником тока I_{K0} ?

Изобразить УГО транзисторов $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типов.

Какими математическими соотношениями связаны токи транзистора?

В чем различия между статическим и дифференциальным входными сопротивлениями транзистора? Как их можно определить?

Как определить дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора r_K ?

3.6 Варианты исходных данных

Таблица 3.8

№№ п/п	Тип диода	$t^{\circ}\text{C}$	I_B , мА	№№ п/п	Тип диода	$t^{\circ}\text{C}$	I_B , мА
1	D1N4001	-60	0,05	16	D1N4936	45	0,25
2	D1N4002	-55	0,1	17	D1N4937	50	0,3
3	D1N4003	-50	0,15	18	D1N4942	55	0,35
4	D1N4004	-45	0,2	19	D1N4944	60	0,4
5	D1N4005	-40	0,25	20	D1N4946	65	0,45
6	D1N4006	-35	0,3	21	D1N4947	70	0,5
7	D1N4007	-30	0,35	22	D1N4948	75	0,55
8	D1N4245	-25	0,4	23	D1N5059	80	0,05
9	D1N4246	-20	0,45	24	D1N5060	85	0,1
10	D1N4247	-15	0,5	25	D1N5061	90	0,15
11	D1N4248	-10	0,55	26	D1N5062	95	0,2
12	D1N4249	10	0,05	27	D1N5391	100	0,25
13	D1N4933	15	0,1	28	D1N5393	105	0,3
14	D1N4934	35	0,15	29	D1N5394	110	0,35

15	D1N4935	40	0,2	30	D1N5395	115	0,4
----	---------	----	-----	----	---------	-----	-----

Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы

Лабораторная работа № 8. Исследование последовательностных логических устройств

Целью лабораторной работы является закрепление знаний по основам цифровой электроники, изучение принципов функционирования последовательностных цифровых устройств – счетчиков и регистров, а также исследование зависимости выходных информационных сигналов от входных информационных и управляющих сигналов.

Завершается работа оформлением и защитой с оценкой отчета. Защита осуществляется методом экспресс-опроса в рамках теоретического и практического материала по теме лабораторной работы.

На выполнение и защиту лабораторной работы № 5 отводится 3 академических часа.

7.1 Краткие сведения из теории

Счетчиком называют последовательностное цифровое устройство (цифровой автомат), предназначенное для подсчета числа импульсов, поступающих на вход и формирования на выходе двоичного кода, эквивалентного числу подсчитанных импульсов. Счетчики находят применение в ЭВМ для формирования адресов команд, подсчета числа выполненных операций и др.

В процессе работы счетчик последовательно изменяет свое состояние (логические уровни на выходах Q_i) в определенном порядке. Количество разрешенных состояний счетчика называется *коэффициентом счета* $K_{сч}$. Одно из возможных состояний счетчика принимается за начальное. Если счетчик начал счет от начального состояния, то каждый импульс, кратный модулю счета $K_{сч}$, снова устанавливает счетчик в начальное состояние.

Для синтеза счетчиков используются D -, T - или JK -триггеры, соединенные определенным образом. Существует несколько способов

классификации счетчиков. В частности, по направлению счета счетчики делятся на: *суммирующие, вычитающие и реверсивные*.

Если выходные коды счетчика при поступлении входных импульсов изменяются в возрастающем порядке, то счетчик называют *суммирующим*, если в убывающем порядке – *вычитающим*. Счетчики, у которых направление перебора кода может изменяться, называют *реверсивными*.

По способу синхронизации различают счетчики *синхронные* и *асинхронные*. Если для работы счетчика требуется наличие синхросигнала, то такой счетчик называют *синхронным*. Счетчики, которые работают без синхросигналов, называют *асинхронными*.

В случае динамической синхронизации в последовательностных логических устройствах синхровходы обозначаются определенными символами (рисунок 7.1). В частности, обозначение синхровхода, показанное на рисунках 7.1, *а* и *б*, указывает на то, что передача информации со в хода на выход устройства будет производиться при переходе синхроимпульса от низкого уровня к высокому, а на рисунках 7.1 *в* и *г* – что передача информации будет производиться при переходе синхроимпульса от высокого уровня к низкому.

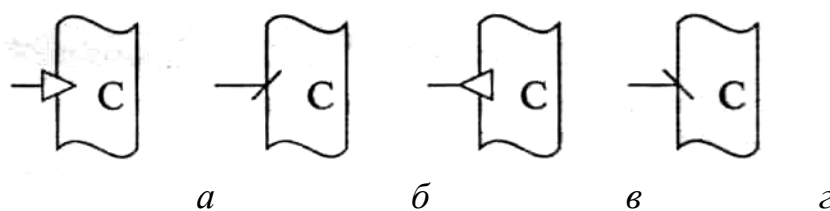


Рисунок 7.1

По модулю счета различают счетчики:

- *двоично-десятичные;*
- *двоичные;*
- *с произвольным постоянным модулем счета;*
- *с переменным модулем счета.*

Счетчик в общем случае можно представить как устройство, содержащее входную логику, управляющую работой счетчика, и выходную

логику, которая используется для указания окончания счета или формирования сигнала переноса P . Для приведения счетчика в начальное состояние (как правило – логические нули на всех выходах), как и во всех последовательных устройствах, используется сигнал сброса, поступающий на вход R .

Выходными сигналами счетчика обычно являются сигналы, снимаемые с выходов отдельных разрядов $Q_0 \dots Q_n$.

В качестве примера ниже приведены (рисунок 7.2) функциональная схема и условное графическое обозначение четырехразрядного асинхронного суммирующего счетчика К155ИЕ5. В таблице 7.1 представлено назначение выводов счетчика.

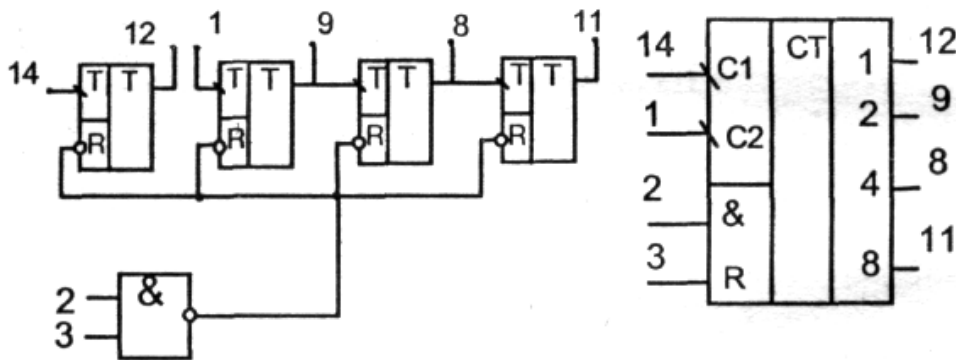


Рисунок 7.2

Таблица 7.1 – Назначение выводов ИМС К155ИЕ5

№ вывода	Назначение	№ вывода	Назначение
1	Тактовый вход делителя на 2	8	Выход Q2
2	Вход установки 0	9	Выход Q1
3	Вход установки 0	10	Общий провод
4	Не используется	11	Выход Q3
5	+ 5 В	12	Выход Q0
6	Не используется	13	Не используется
7	Не используется	14	Тактовый вход делителя на 8

Обозначение выводов 1 и 14 указывает на то, что изменение состояний счетчика происходит по перепаду входных импульсов от высокого к низкому уровню. ИМС К155ИЕ5 является аналогом ИМС 7493.

Регистром называется последовательностное логическое устройство, предназначенное для хранения n -разрядного машинного слова и для выполнения над ним поразрядных логических операций. К таким операциям можно отнести:

- прием, хранение и выдача машинного слова;
- преобразование последовательного кода в параллельный и наоборот;
- сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов.

В качестве элементов памяти в регистре, как и в счетчике, используется совокупность триггеров, число которых равно числу двоичных разрядов выходного слова. Кроме этого регистр содержит комбинационную схему, позволяющую выполнять над словом перечисленные операции.

По способу ввода-вывода информации регистры делятся на:

- *параллельные;*
- *последовательные;*
- *комбинированные.*

По направлению передачи информации различают регистры *однонаправленные* и *реверсивные*.

На рисунке 7.3 приведено условное графическое обозначение универсального четырехразрядного реверсивного сдвигающего регистра К555ИР11, а в таблице 7.2 – назначение выводов данного регистра. ИМС К555ИР11 является аналогом ИМС 74194.

К555ИР11 – универсальный четырехразрядный сдвигающий регистр, в который можно записывать информацию последовательным или параллельным кодом, а также сдвигать ее вправо или влево. Микросхема имеет входы $D1 \dots D4$ для информации параллельного кода и входы для подачи сигналов при последовательной записи и сдвиге вправо (в сторону возрастания номеров выходов) DR или влево (убывания номеров выходов) DL ,

управляющие входы SR и SL , входы для подачи тактовых импульсов C и сброса R .

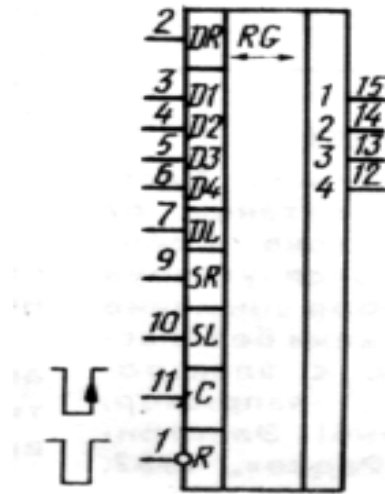


Рисунок 7.3

Таблица 7.2 – Назначение выводов ИМС К555ИР11

№ вывод а	Назначение	№ вывода	Назначение
1	Вход установки выходов в 0	9	Разрешение сдвига вправо
2	Вход последовательных данных при сдвиге вправо	10	Разрешение сдвига влево
3	Вход параллельных данных D0	11	Тактовый вход
4	Вход параллельных данных D1	12	Выход Q3
5	Вход параллельных данных D2	13	Выход Q2
6	Вход параллельных данных D3	14	Выход Q1
7	Вход последовательных данных при сдвиге влево	15	Выход Q0
8	Общий провод	16	+ 5 В

При поступлении уровня 0 на вход R триггеры регистра устанавливаются в нулевое состояние. При уровне 1 на входе R режим работы регистра определяется сигналами на входах SR и SL . В частности:

при $SR = 1$, $SL = 0$ передним фронтом положительного импульса на входе C информация, приходящая на вход DR , записывается последовательно и сдвигается вправо;

при $SR = 0$, $SL = 1$ передним фронтом положительного импульса на входе C информация, приходящая на вход DL , записывается последовательно и сдвигается влево;

при $SR = 1$, $SL = 1$ передним фронтом положительного импульса на входе C обеспечивается параллельная запись информации со входов $D1 \dots D4$ на выходы $Q1 \dots Q4$;

при $SR = 0$, $SL = 0$ обеспечивается хранение информации (при любых изменениях сигналов на входах триггеры регистра не переключаются).

7.2 Подготовка к работе

Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя конспект лекций, рекомендованную литературу и подраздел 7.1 методических указаний.

Подготовить информацию для последующего ввода в регистр: в соответствии с вариантом (таблица 7.4), выполнить перевод входных данных из шестнадцатеричного в двоичный код.

Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

7.3 Задание на проведение исследований

Исследовать функциональные возможности асинхронного двоичного счетчика К155ИЕ5 (на основе аналога ИМС 7493). Определить коэффициент счета при различных вариантах использования счетчика.

Исследовать функциональные возможности универсального восьмиразрядного реверсивного сдвигающего регистра, выполненного на двух четырехразрядных регистрах К555ИР11 (на основе аналога ИМС 74194).

7.4 Порядок проведения исследований

Собрать схему, представленную на рисунке 7.4.

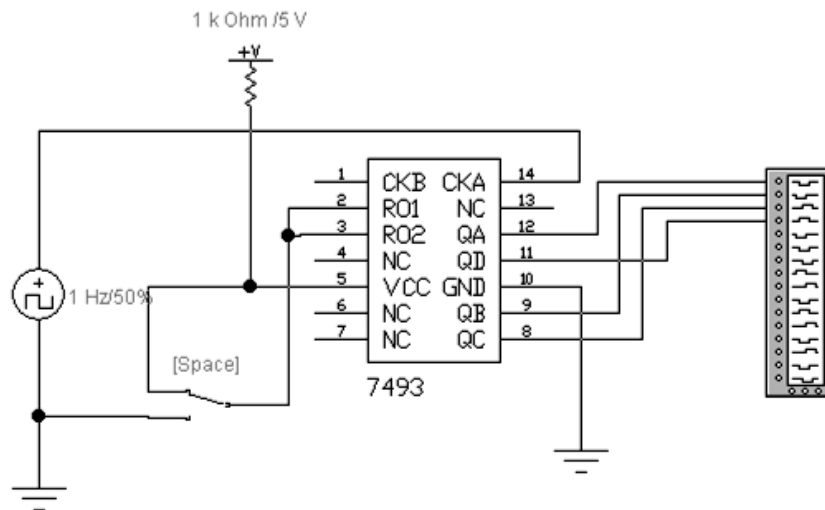


Рисунок 7.4

Выполнить настройки логического анализатора следующим образом:

- а) Clocks per division – установить равным 1;
- б) Clock – нажать Set... и в открывшемся окне «Clock setup» установить «Internal clock rate» равным 1 Гц. Подтвердить выбор нажатием кнопки «Асерт».

Установить параметры источника сигнала:

- а) Frequency = 1 Гц;
- б) Duty Cycle = 50%;
- в) Voltage = 5 В.

Определить период входного сигнала.

Подключить входы R01, R02 к общему проводу. Запустить моделирование кнопкой «О/И», и через 5 ... 10 с остановить его. По осциллограмме на экране логического анализатора определить период последовательности импульсов на выходе QA, учитывая, что длительность

одного такта равна 1 с. Сравнить полученное значение с периодом входного сигнала. Определить коэффициент счета $K_{сч}$ первой половины счетчика.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

Источник входного сигнала подключить к выводу 1 (СКВ) ИМС.

Запустить моделирование, и через 15 ... 20 с остановить его. Определить периоды последовательностей импульсов на выходах QB , QC , QD . Определить коэффициенты счета $K_{сч}$ относительно выходов QB , QC , QD , а также общий коэффициент счета второй половины счетчика.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

Источник входного сигнала подключить к выводу 14 (СКА) ИМС. Вывод 1 (СКВ) ИМС подключить к выводу 12 (QA).

Запустить моделирование, и через 18 ... 20 с остановить его. Определить период последовательности импульсов на выходе QD . Определить коэффициент счета $K_{сч}$ счетчика при такой схеме включения.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

Запустить моделирование. Через 5 ... 10 с подключить входы $R01$, $R02$ к источнику питания +5 В. Через 5 ... 7 с снова подключить входы $R01$, $R02$ к общему проводу. По экрану логического анализатора наблюдать за изменениями сигналов на выходах счетчика. Сформулировать вывод о назначении входов $R01$, $R02$.

Сформулировать выводы по результатам исследования счетчика.

Собрать схему, представленную на рисунке 7.5.

Переключатели на схеме предназначены:

- $\langle C \rangle$ - для формирования синхроимпульса (исходное положение - нижнее);
- $\langle P \rangle$ - для формирования данных при вводе двоичного слова последовательным кодом;
- $\langle 1 \rangle$, $\langle 2 \rangle$, ... $\langle 8 \rangle$ - для формирования данных при вводе двоичного слова параллельным кодом;
- $\langle L \rangle$ - управление сдвигом влево (в сторону от старших к младшим разрядам);
- $\langle R \rangle$ - управление сдвигом вправо (в сторону от младших к старшим разрядам).

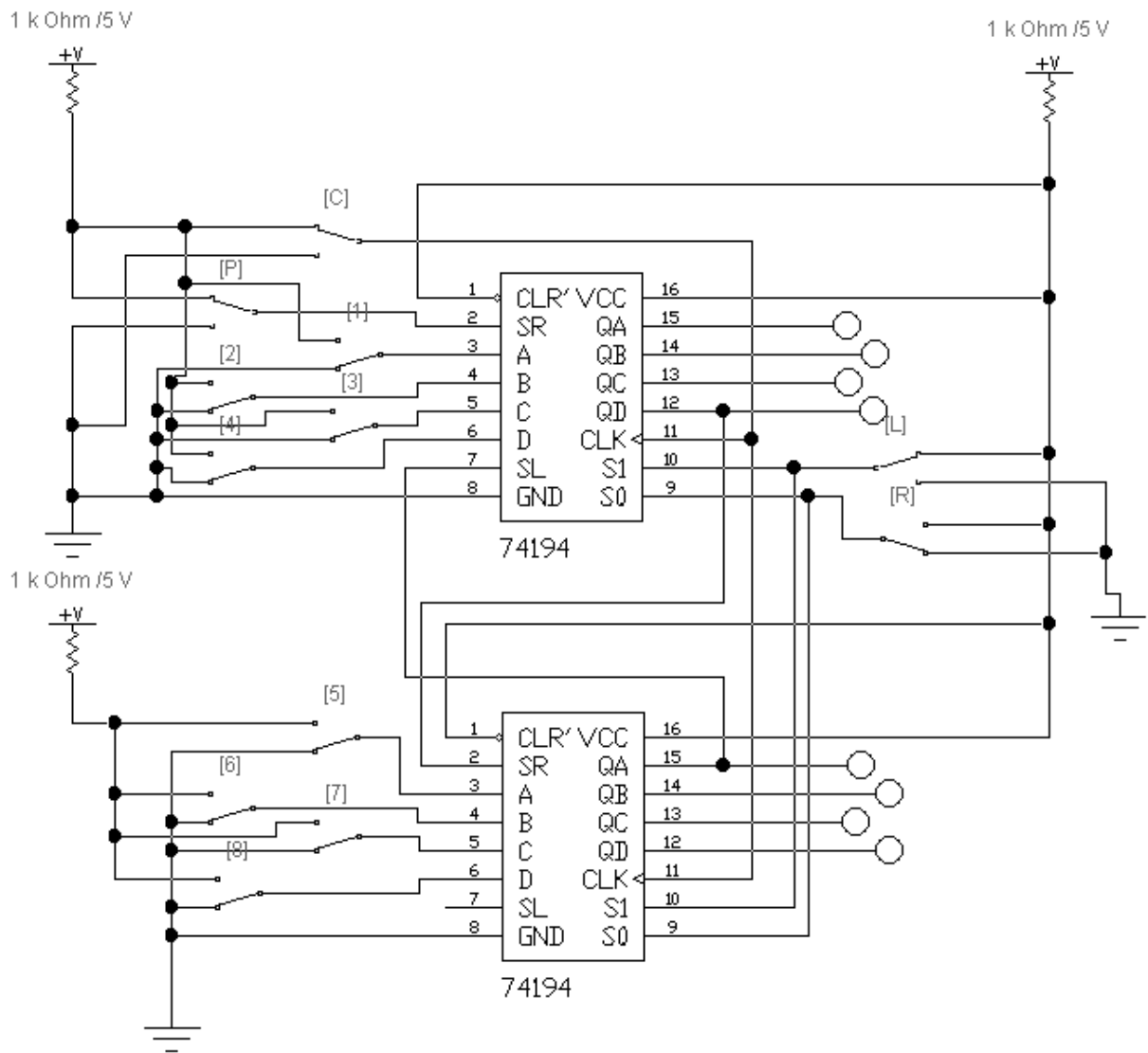


Рисунок 7.5

Подготовить с помощью переключателей <1> ... <8> данные для записи в регистр параллельным кодом (в соответствии с номером варианта).

С помощью переключателей <L> и <R> задать режим ввода данных параллельным кодом.

Включить моделирование. Подать на ИМС импульс синхронизации (переключатель <C> перевести в верхнее положение, затем вернуть в исходное положение). Проанализировать состояние индикаторов, подключенных к выходам регистра. Данные, записанные в регистр, занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты исследований универсального регистра

№№ п/п	<i>QD2</i>	<i>QC2</i>	<i>QB2</i>	<i>QA2</i>	<i>QD1</i>	<i>QC1</i>	<i>QB1</i>	<i>QA1</i>

С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига информации в регистре вправо. Переключатель $\langle P \rangle$ установить в нижнее положение. Подать на ИМС импульс синхронизации с помощью переключателя $\langle C \rangle$ три раза, занося в таблицу состояния выходов регистра в каждом такте (после каждой подачи синхроимпульса).

С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига информации в регистре влево. Подать на ИМС импульс синхронизации с помощью переключателя $\langle C \rangle$ три раза, занося в таблицу состояния выходов регистра в каждом такте.

7.4.9 Очистить содержимое регистра (выключить и снова включить переключатель «О/І» в правой верхней части окна программы). С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига вправо.

Используя переключатели $\langle P \rangle$ и $\langle C \rangle$, ввести в регистр данные в соответствии с вариантом последовательным кодом (начиная со старшего разряда). Состояния выходов регистра в каждом такте заносить в таблицу 7.3.

Проанализировать результаты выполнения пунктов 7.4.7 – 7.4.9.

Сформулировать выводы по результатам исследования универсального регистра.

7.5 Примерный перечень контрольных вопросов

Что называется триггером?

Привести таблицу переходов асинхронного *RS*-триггера.

Привести таблицу переходов асинхронного *JK*-триггера.

Привести таблицу переходов асинхронного *D*-триггера.

Привести таблицу переходов асинхронного *T*-триггера.

Что называется счетчиком?

Где находят применение счетчики?

На основе каких элементов синтезируют счетчики?

Как классифицируют счетчики?

Как создать счетчик с требуемым коэффициентом счета, используя ИМС счетчика с заданным коэффициентом счета?

Что называется регистром?

Какие логические операции можно выполнять с помощью регистра?

Как классифицируют регистры по способу ввода-вывода информации?

Как увеличить количество разрядов регистра, используя ИМС регистра с заданной разрядностью?

Пояснить назначение каждого из выводов исследованного регистра.

Как перевести регистр в режим хранения данных?

Как обнулить все информационные выходы регистра?

7.6 Варианты исходных данных

Таблица 7.4

№№ п/п	Данные	№№ п/п	Данные	№№ п/п	Данные
1	A2	11	1B	21	C3
2	A3	12	2B	22	C4
3	4A	13	3B	23	C5
4	A5	14	4B	24	C6
5	A6	15	5B	25	C7
6	A7	16	6B	26	C8
7	A8	17	7B	27	C9
8	A9	18	8B	28	AB
9	2D	19	D6	29	8D
10	D3	20	5D	30	D9

Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы
Лабораторная работа № 9 «Исследование работы цифро-аналогового преобразователя в интегральном исполнении, численный расчет отклонения экспериментальных данных, и определения точности»

Цель работы: ознакомиться с принципами преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. Изучить работу цифро-аналогового преобразователя К572 ПА 1А, провести численный расчёт отклонения экспериментальных данных.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 1) Комплект лабораторного оборудования по электронной технике К32
- 2) Устройство сменное УС11.
- 3) Вольтметр цифровой Щ6803.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

В информационно – измерительных системах широко используется цифро-аналоговые преобразователи, когда необходимо перейти от цифрового кода к аналоговому сигналу, необходимому для управления исполнительными устройствами, для создания отрицательной обратной связи, при создании аналого-цифровых преобразователей.

Все виды ЦАП можно условно разделить на две группы: с прецизионными резистивными матрицами, безматричные ЦАП. В первой группе по способу формирования сигнала различают три типа схем: с суммированием токов, с делением напряжения, с суммированием напряжения; однако в микроэлектронном исполнении применяются структуры только первых двух типов.

Любое число в двоичной системе может быть представлено в следующем виде:

$$N = a_1 \times 2^{-1} + a_2 \times 2^{-2} + \dots + a_n \times 2^{-n}$$

Где каждый коэффициент α : имеет значение 1 или 0 поскольку весь диапазон преобразователя принимается равны единице, а часть его, определяемая конкретной кодовой комбинацией, интегрируется в виде дроби. Например, дробное кодовое слово 101101 имеет значение $\left[1 \times 0,5 \left(\frac{1}{2} \right) \right] + \left[0 \times 0,25 \left(\frac{1}{4} \right) \right] + \left[1 \times -0,125 \left(\frac{1}{8} \right) \right] + \left[1 \times 0,0625 \left(\frac{1}{16} \right) \right] + \left[0 \times 0,03125 \left(\frac{1}{32} \right) \right] + \left[1 \times 0,015625 \left(\frac{1}{64} \right) \right]$, или 0,0703125 от значения полной шкалы.

Из данного примера следует, что старший (1-ый) разряд равен половине полной шкалы, 2-й разряд - четверти полной шкалы и т.д. Самый младший, n -й разряд составляет $1/2^n$ значения полной шкалы. Если во всех разрядах $a_i = 1$ (т.е. все разряды включены), то соответствующее этому состоянию значение аналогового сигнала будет отличаться от значения полной шкалы (будет меньше его значения) на величину $\Delta = 1/2^n$, соответствующую весу младшего разряда. Например: 10-разрядный ЦАП со всеми включенными разрядами имеет на входе код 1111111111 (1024) Для диапазона выходного сигнала от 0 до +10В действительное значение аналогового сигнала на выходе ЦАП будет $(1 - 2^{-10}) \times 10\text{В} = 9,990235 \text{ В}$ при этом вес МЗР $\Delta = 10\text{В}/2^{10} = 9,77 \text{ мВ}$.

ЦАП, как правило, постоянно отслеживает текущее значение входных цифровых сигналов. Когда необходимо отделить основную схему преобразователя от источника цифровой информации, на входе ЦАП ставят буферный регистр, в который записывается цифровая информация только при наличии разрешающего сигнала строб-импульс.

Основные характеристики ЦАП и АЦП.

Основными параметрами, характеризующими ЦАП и АЦП, являются:

- статические характеристики: разрешающая способность, нелинейность, коэффициент преобразования, абсолютная и относительная погрешность полной шкалы, смещение нуля, абсолютная погрешность;

– динамические характеристики: время установления, время преобразования.

Разрешающая способность

Двоичный n -разрядный преобразователь имеет 2^n дискретных значений, а его разрешающая способность равна $1/2^n$. В целом разрешающая способность не может служить однозначной оценкой точности преобразователя.

В преобразователях различают наименьший (МЗР) и наибольший значащий разряды (БЗР). В двоичной системе кодирования МЗР – это тот, который имеет наименьший вес. Вес одного младшего разряда Δ определяет разрешающую способность. Наибольший значащий разряд несет в себе наибольший вес. В двоичном кодировании СЗР имеет вес $1/2$ номинального значения полной шкалы преобразования.

Разрешающая способность может выражаться либо в процентах, либо в долях от полной шкалы. Например, 12-разрядный АЦП имеет разрешающую способность $1/4096$, или 0,0245% полной шкалы при изменении двоичного входного кода на один двоичный разряд. Нелинейность, или, как ее часто называют, погрешность нелинейности, $\Delta_{nl}(x)$ характеризуется отклонением значений реальной характеристики 2 преобразователя $f_p(x)$ от прямой 1 (Рисунок 1).

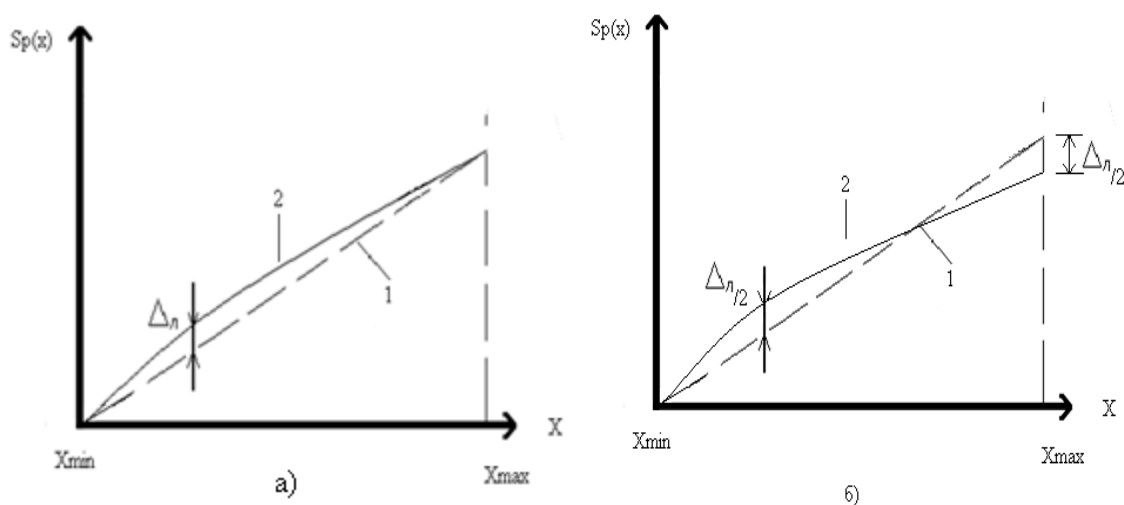


Рисунок 1 – Методы линеаризации

На рисунке 1 приведены два способа линеаризации, из которых следует, что способ линеаризации для получения \min значения Δ_L (рис. б) позволяет уменьшить погрешность вдвое по сравнению с методом линеаризации по граничным точкам (Рисунок 1.а). Для ЦАП с n двоичными разрядами в идеальном случае (при отсутствии погрешности преобразования) аналоговый выход $U_{\text{вых}}$ соотносится с входным двоичным числом следующим образом

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}(a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + \dots + a_n \cdot 2^{-n})$$

где $U_{\text{оп}}$ - опорное напряжение ЦАП.

Т.к. $\sum_{i=1}^n 2^{-i} = 1 - 2^{-n}$, то при всех включенных разрядах выходное напряжение ЦАП:

$$U_{\text{вых}}|_{a_1 \dots a_n = 1} = U_{\text{оп}}(1 - 2^{-n}) = \frac{U_{\text{оп}}}{2^n} \times (2^n - 1) = \Delta(2^n - 1) = U_{\text{п.ш.}}$$

где $U_{\text{п.ш.}}$ - напряжение полной шкалы.

Таким образом, при включении всех разрядов выходное напряжение ЦАП, которое в этом случае образует $U_{\text{п.ш.}}$, отличается от значения опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ на величину младшего (МЗР) разряда преобразователя Δ , определяемого как $\Delta = U_{\text{оп}}/2^n$.

При включении какого-либо i -го разряда выходное напряжение ЦАП определится соотношением $U_{\text{вых}}/a_i = U_{\text{оп}} \times 2^{-i}$.

Выражение $U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}(a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + \dots + a_n \cdot 2^{-n})$, показывает линейную зависимость между аналоговым сигналом на выходе и цифровым – на входе преобразователя, что позволяет осуществить простой и эффективный контроль линейности.

Наихудшим случаем при определении погрешности линейности является включение всех разрядов, поскольку при этом погрешность определяется суммой погрешностей всех разрядов. Преобразователь считается линейным, если его максимальная погрешность линейности Δ_L не превышает

$\Delta/2$. Процедура оценки линейности АЦП аналогична процедуре оценки для ЦАП.

Нелинейность, как ЦАП, так и АЦП имеет первостепенное значение для оценки качества преобразователей, так как все другие погрешности (смещение нуля, погрешность шкалы и т.д.) могут быть сведены к нулю соответствующими регулировками. Погрешность линейности обычно выражается в процентах от полной шкалы или в долях от единицы младшего разряда (разрешающей способности).

Дифференциальная нелинейность определяется отклонением разности двух аналоговых сигналов, соответствующих соседним кодам от номинального значения МЗР. Дифференциальная нелинейность идеального преобразователя равна нулю. Это значит, что при изменении входного кода преобразователя на единицу его выходной сигнал меняет своё значение на величину МЗР. Допустимым значением дифференциальной нелинейности считается: $\pm \Delta/2$ (то есть $1/2$ единицы МЗР).

Дифференциальная нелинейность может быть вычислена следующим образом. Для конкретного n-разрядного преобразователя расчетное значение единицы МЗР:

$$\Delta_{\text{расч.}} = U_{\text{п.ш.}} / (2^n - 1),$$

отсюда дифференциальная нелинейность, выраженная в долях единицы младшего разряда

$$\delta_{\text{н.диф}} = \frac{\Delta_{\text{ф}} - \Delta_{\text{расч.}}}{\Delta_{\text{расч.}}};$$

где $\Delta_{\text{ф}}$ -фактическое приращение выходного сигнала, вызванное изменением двоичного числа на единицу.

Как правило, наибольшая дифференциальная нелинейность наблюдается при выполнении смены кода 011...1 на 100...0. Когда происходит выключение всех МР и включение одного СЗР. Объясняется это

тем, что при формировании выходного сигнала для кода 011...1 происходит суммирование погрешностей всех разрядов (кроме 1-го).

Коэффициент преобразования – это отношение приращения выходного сигнала к приращению входного сигнала для линейной характеристики преобразования. Коэффициент преобразования преобразователя определяет угол наклона его характеристики. Для идеального ЦАП наклон характеристики должен быть таким, чтобы при включении всех разрядов (двоичный код полной шкалы № на его цифровых входах 111...1) выходное напряжение полной шкалы $U_{п.ш.}$ ЦАП было $\Delta/2$ меньше опорного напряжения $U_{оп}$ на величину МЗР (прямая 2 на рисунке).

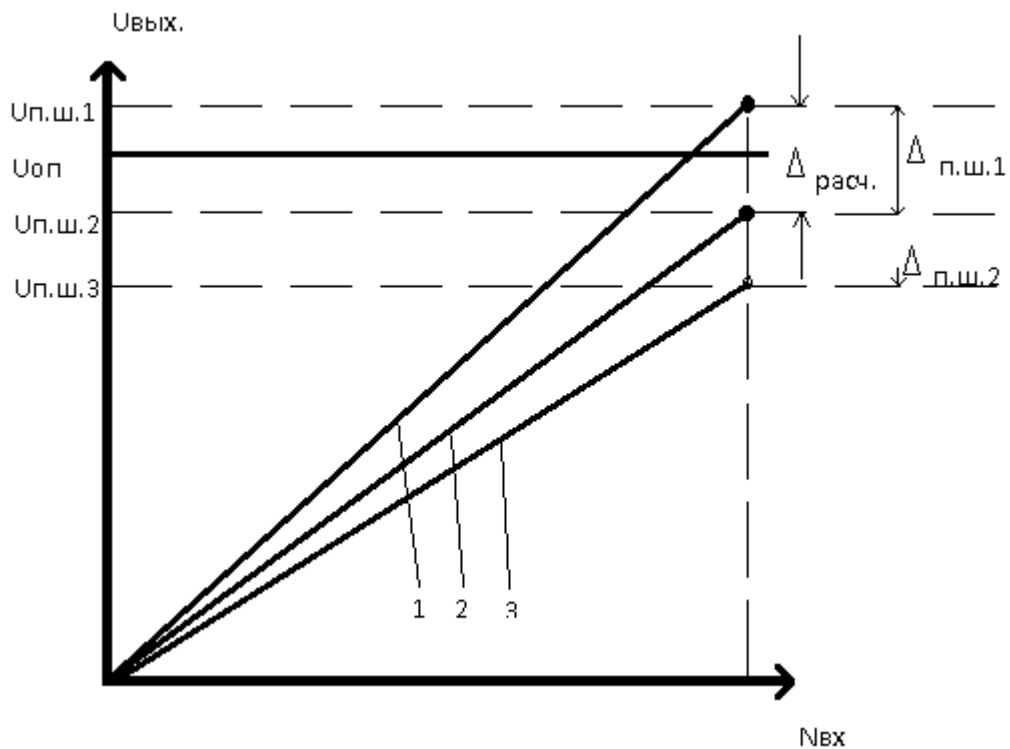


Рисунок 2 – Степени отклонения

Степень отклонения реального значения коэффициента преобразования от расчетного характеризуется абсолютной погрешностью полной шкалы $\Delta_{п.ш.}$, под которой понимают разность между номинальным значением напряжения полной шкалы преобразователя $U_{п.ш..ном}$, определяемым соотношением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}(1 - 2^{-n}) = \frac{U_{\text{оп}}}{2^n}(2^n - 1) = \Delta(2^n - 1) = U_{\text{пш}}$$

Фактическим его значением $U_{\text{п.ш.ф}}$, то есть для ЦАП:

$$\Delta_{\text{п.ш.}} = U_{\text{п.ш.ном.}} - U_{\text{п.ш.ф}} = \frac{U_{\text{оп}}}{2^n}(2^n - 1) - U_{\text{п.ш.ф}}$$

Погрешность полной шкалы для ЦАП характеризуется отклонением действительного выходного напряжения от его расчетного значения для полномасштабного входного кода. Данные погрешности могут быть обусловлены погрешностями опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, значений номиналов резисторов многозвенного резистивного делителя, коэффициентом усиления усилителя и т.д. Погрешность полной шкалы можно скорректировать, регулируя коэффициент усиления выходного усилителя или значения опорного напряжения.

Погрешность нуля (смещения) Δ_0 для ЦАП (см. рисунок 3) – это выходное напряжение ЦАП с нулевым входным кодом, а для АЦП – среднее значение выходного напряжения АЦП, необходимое для получения нулевого кода на его выходе.

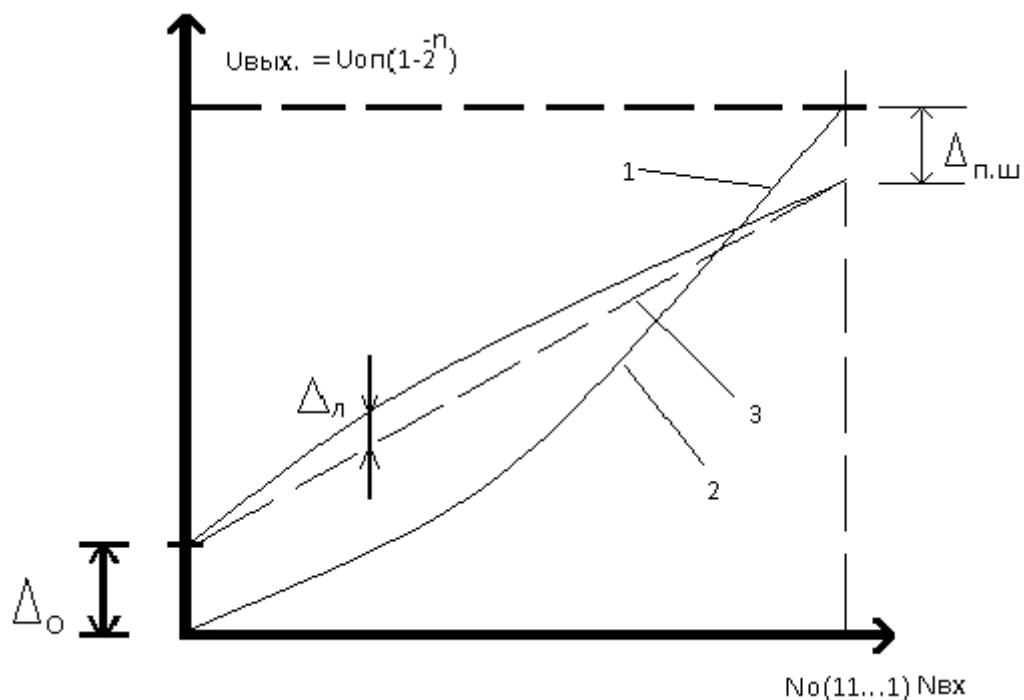


Рисунок 3 погрешность нуля Δ_0

Смещение нуля реальной характеристике 2 относительно идеальной 1 вызвано током утечки через коммутирующие разрядные ключи ЦАП, входным током или напряжением смещения выходного усилителя ЦАП или компаратора АЦП.

Данную погрешность можно скомпенсировать с помощью внешней, по отношению к ЦАП или АЦП, регулировки нулевого смещения. Погрешность нуля Δ_0 может быть выражено в процентах от полной шкалы и в долях единицы МЗР.

Погрешность полной шкалы $\Delta_{п.ш.}$ (как видно из рис.) определяется с учетом погрешности нуля Δ_0 характеристики преобразователя, в то время как при определении погрешности линейности линеаризующая прямая 3 должна проходить через начало реальной функции преобразования $f_p(x)$, то есть при определении погрешности линейности необходимо предварительно , откорректировать погрешность нуля Δ_0 , так как она вносит погрешность в измерение линейности ЦАП.

Действительно для ЦАП справедливо неравенство:

$$U_{\text{вых.}}(B_1 + B_2 + \dots + B_n) + \Delta_0 \neq U_{\text{вых.}} \times B_1 + U_{\text{вых.}} \times B_2 + U_{\text{вых.}} \times B_n + n\Delta_0$$

(где B_1 -весовые разрядные коэффициенты), поскольку погрешность нуля Δ_0 в левой части данного неравенства суммируется один раз (все разряды включены), а в правой части- n раз (n отдельных считываний выходного сигнала ЦАП) следует обратить внимание, что при определении погрешности линейности $\Delta_{л.}$ не следует учитывать погрешность нуля Δ_0 . и погрешность полной шкалы $\Delta_{п.ш.}$ поскольку они могут быть скомпенсированы или учтены различными способами (аналоговыми или цифровыми). Поэтому необходимо проводить идеальную линеаризующую прямую с учетом погрешности нуля Δ_0 то есть не из нулевой точки.

Абсолютная погрешность преобразования отражает отклонение фактического выходного сигнала преобразователя от теоретического, вычисленного для идеального преобразователя. Эта погрешность приводится

обычно в процентах от полной шкалы преобразования. Абсолютная погрешность преобразования находится в прямой зависимости от текущего значения $U_{оп}$.

Время установления выходного сигнала ЦАП является важным динамическим параметром и определяется как интервал времени, в течении которого выходной аналоговый сигнал ЦАП при смене кодовой комбинации на его цифровых входах достигает своего установившегося значения (соответствующего статичному режиму преобразования с допустимой погрешностью, значение которой выражается частью от полной шкалы преобразования и обычно равно $\pm \Delta/2$).

При этом чем больше изменение входного воздействия, а следовательно, и больше перепад выходного аналогового сигнала, тем продолжительнее время установления. Время установления зависит не только от значения перепада выходного сигнала ЦАП, но и (в большей степени) от того, относительно какого уровня происходят эти перепады, то есть от того количества разрядов, которые меняют свое состояние при формировании нового значения выходного сигнала ЦАП. Наиболее длительное время установления наблюдается при периодическом формировании полной шкалы (то есть при смене кодовых комбинация на цифровых входах ЦАП 00...0 на 11...1), а также при так называемом главном кодовом переходе, когда меняются кодовые комбинации 011...1 и 100...0. Это объясняется тем, что выключение разрядов происходит, как правило, быстрее их включения. Поэтому при смене указанных кодовых комбинаций в течении определенного времени ЦАП будет иметь нулевой выход, после чего его выходной сигнал возвращается в предыдущему значению за вычетом единицы МЗР.

Рассмотренные выше характеристики помогут правильно выбрать тип преобразователя для конкретного применения в системах и устройствах автоматики.

Цифро-аналоговые преобразователи

ЦАП строят в основном по принципу параллельного преобразования на переключателях тока или напряжения. Такие ЦАП имеют два типа входов: аналоговый, на который подается напряжение постоянного тока, определяющее масштаб цифро-аналогового преобразования (в случае отсутствия в ЦАП встроенного ИОН), и цифровой, на который подается цифровой код, подлежащий преобразованию в аналоговый сигнал.

Если аналоговый вход допускает изменение входного опорного напряжения в широких пределах, то такой ЦАП называют умножающим.

ЦАП, допускающий подачу на аналоговый вход только фиксированного значения опорного напряжения, которое может формироваться ИОН, называют линейным.

В зависимости от структуры используемых резистивных цепочек ЦАП можно подразделить на преобразователи с двоично-взвешенной резистивной матрицей и с резистивной матрицей типа R-2R. При этом данные структуры ЦАП подразделяют на преобразователи с коммутацией напряжений или токов (ЦАП с токовыми ключами).

ЦАП с двоично-взвешенной резистивной матрицей

Он состоит из параллельно соединенных через разрядные ключи двоично-взвешенных резисторов, номиналы которых меняются по закону 2^i , источника опорного напряжения $U_{оп}$ и нагрузки.

В общем случае цифровой сигнал, управляющий разрядными ключами n-разрядного ЦАП, можно описать соотношением:

$$N_{вх} = a_1 \times 2^1 + a_2 \times 2^2 + \dots + a_i \times 2^i + \dots + a_n \times 2^n$$

Основой для нахождения однозначного соответствия может служить выражение:

$$U_{вых} = U_{оп} (a_1 \times 2^{-1} + a_2 \times 2^{-2} + \dots + a_n \times 2^{-n})$$

Каждый i-ый разряд входного цифрового сигнала управляем ключом К_{li}, который подключает резистор с номиналом $R_i = R/2^i$ к источнику опорного напряжения, при $a_i = 1$. Используемый при этом ИОН, должен иметь внутренне сопротивление $R_{вн}$ несоизмеримо меньше, чем минимальное

сопротивление R матрицы резисторов (в идеальной случае $R_{вн} \approx 0$). С учетом того, что номиналы разрядных резисторов возрастают от старшего разряда к младшему по двоичному закону (то есть если сопротивление резистора СЗР равно R , то значение сопротивления в МЗР равно $2^{n-1} \times R$), входное напряжение n -разрядного ЦАП с симулированием токов на нагрузке R_H будет:

$$U_{\text{вых.}} = U_{\text{оп}} \frac{\left(\frac{1}{R}\right) \sum_{i=1}^n a_i \times 2^{i-1}}{\frac{1}{R_H} + \left(\frac{1}{R}\right) \sum_{i=1}^n a_i \times 2^{i-1}} = U_{\text{оп}} \frac{N_{\text{вх}}/R}{\left(1/R_H + N_{\text{вх}}/R\right)},$$

где $a_i = 1$, если i -ый разряд входит в числовое значение кода $N_{\text{вх}}$, то есть, когда замкнут ключ Кл_i , $a_i = 0$, если i -разряд не входит в числовое значение кода $N_{\text{вх}}$ и ключ Кл_i разомкнут.

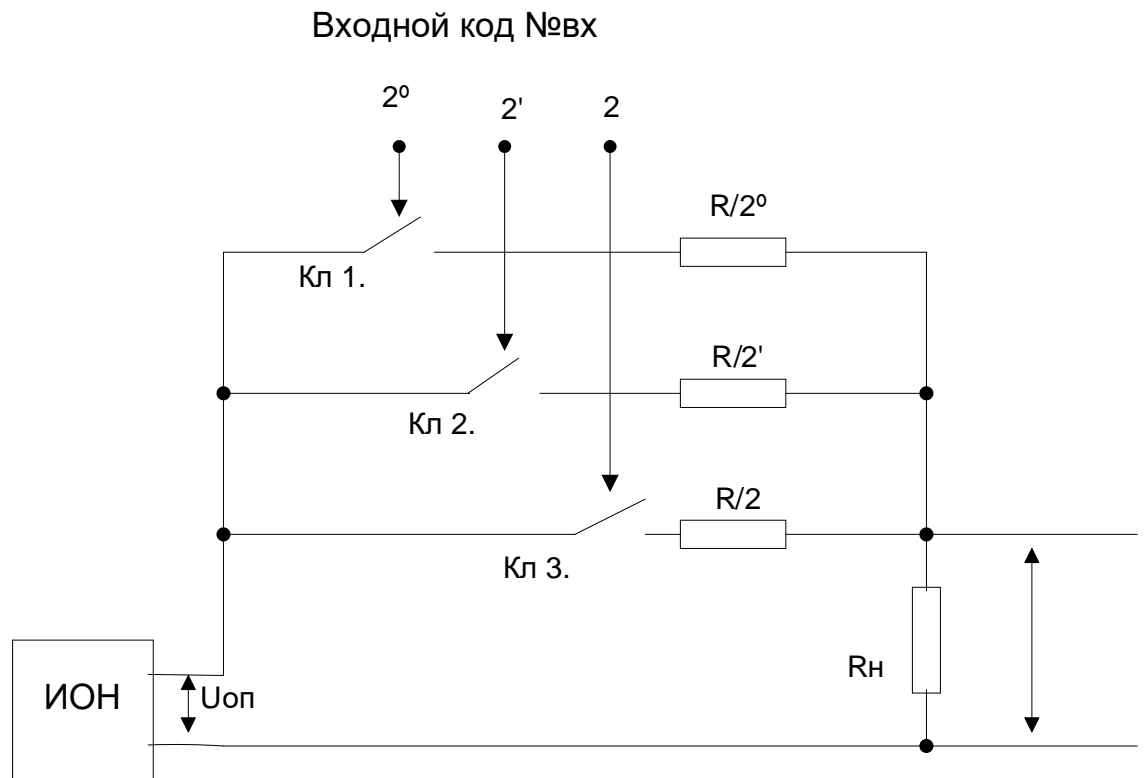


Рисунок 4 – ЦАП с двоично-взвешенной резистивной матрицей

При этом входное и выходное значение ЦАП будут:

$$R_{\text{вых}} \approx R_H; R_{\text{вх}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right) \sum_{i=1}^n a_i \times 2^{i-1}} + R_H,$$

значение последнего меняется от ∞ до $R/N_{\text{вх}0} + R_{\text{н}}$, где $N_{\text{вх}0}$ - входной цифровой сигнал, соответствующий включению всех разрядов (полная шкала).

В ЦАП с суммированием токов выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ нелинейно зависит от $N_{\text{вх}}$, что обусловлено членом $N_{\text{вх}}/R$ в знаменателе формулы для

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} \frac{N_{\text{вх}}/R}{\frac{1}{R_{\text{н}}} + \frac{N_{\text{вх}}}{R}}.$$

Очевидно, нелинейность будет тем меньше, чем меньше отношение $N_{\text{вх}} \cdot R_{\text{н}}/R$.

Из-за нелинейности в таком ЦАП возникает методическая погрешность $\delta_{\text{м}}$. Определим эту погрешность при условии, что для ее уменьшения коэффициент пропорциональности β между $N_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ выберем постоянным и равным коэффициенту преобразования при $N_{\text{вх}} = N_{\text{вх}0}/2$, тогда

$$\beta = \frac{U_{\text{вых.л}}}{N_{\text{вх}}} = \frac{(U_{\text{оп}}/R) \times N_{\text{вх}}}{N_{\text{вх}} \times (1/R_{\text{н}} + N_{\text{вх}0}/2R)} = \frac{2R_{\text{н}} \times U_{\text{оп}}}{2R + R_{\text{н}} \times N_{\text{вх}0}}.$$

При этом условии относительная методическая погрешность ЦАП

$$\delta_{\mu} = \frac{U_{\text{вых.л}} - U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.н}}} = \frac{R_{\text{н}} \times N_{\text{вх}} (N_{\text{вх}} - 0.5 N_{\text{вх}0})}{(R + R_{\text{н}} \times N_{\text{вх}}) \times N_{\text{вх}0}},$$

где $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение ЦАП при нелинейной зависимости; $N_{\text{вх}0}$ - входной цифровой сигнал, соответствующий включению всех разрядов; $U_{\text{вых.л}}$ - выходное напряжение ЦАП при линейной зависимости с коэффициентом β ; $U_{\text{вых.н}}$ - номинальное выходное напряжение ЦАП, соответствующее включению всех его разрядов.

При $N_{\text{вх}} = 0,5 N_{\text{вх}0}$ и $N_{\text{вх}} = 0$ погрешность $\delta_{\text{м}} = 0$, при $N_{\text{вх}} = N_{\text{вх}0}$, погрешность достигает максимума

$$\delta_{\mu \text{ max}} = 0.5 N_{\text{вх}0} \times \frac{R_{\text{н}}}{(R + R_{\text{н}} \times N_{\text{вх}0})}.$$

Чтобы свести методическую погрешность к незначительной величине, необходимо выполнение условия $\frac{N_{\text{ВХ0}} \times R_{\text{Н}}}{[2(R+R_{\text{Н}} \times N_{\text{ВХ0}})]} \ll 1$, тогда соответственно

снижается и коэффициент использования опорного напряжения: $\mu = \frac{U_{\text{ВЫХ.Н.}}}{U_{\text{ОП}}} =$

$$\frac{N_{\text{ВХ0}}/R}{1/R_{\text{Н}} + N_{\text{ВХ0}}/R} = \frac{N_{\text{ВХ0}} \times R_{\text{Н}}}{R + R_{\text{Н}} \times N_{\text{ВХ0}}} = 2\delta_m \ll 1.$$

Поэтому в ЦАП с суммированием токов максимальное выходное напряжение во много раз меньше $U_{\text{оп}}$. Чтобы свести рассмотренную методическую погрешность преобразования к пренебрежимо малому значению и повысить коэффициент μ до требуемого значения, в качестве сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ используется ОУ- преобразователь тока напряжение, у которого $R_{\text{вх}} = R_{\text{Н}} \rightarrow 0$, и, следовательно, $\delta_m \rightarrow 0$. Поскольку значение выходного напряжения ЦАП в этом случае определяется коэффициентом преобразования преобразователя ток-напряжение выбором соответствующего номинала резистора $R_{\text{о.с.}}$ в цепи обратной связи ОУ обеспечивается требуемое значение коэффициента μ . Так при $R_{\text{о.с.}} = R/2^n$ значение $\mu = 1$.

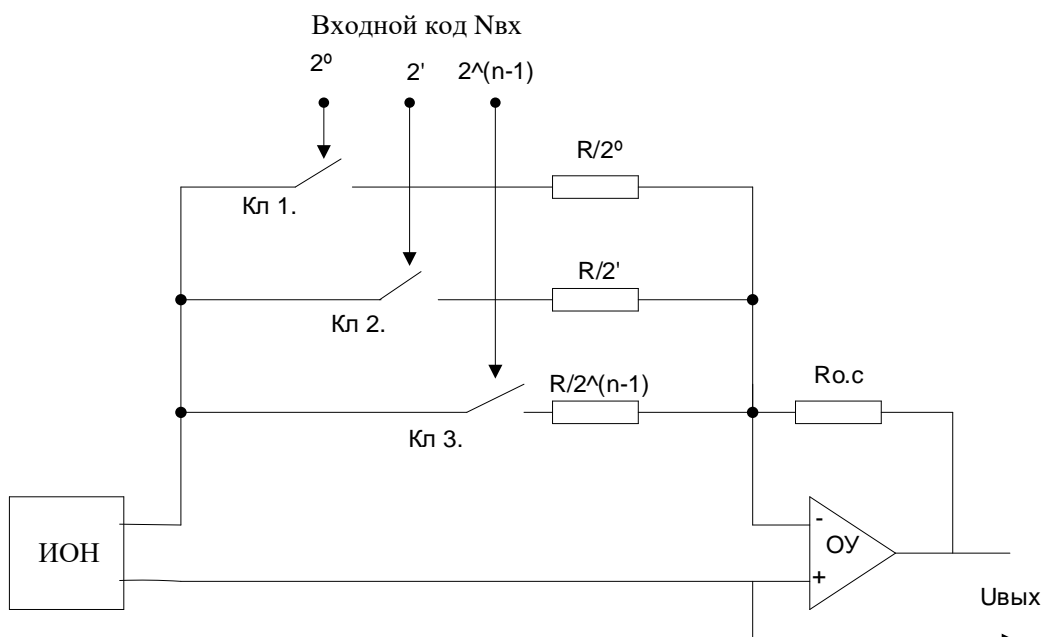


Рисунок 5 – Схема ЦАП с двоично-взвешенной резистивной матрицей и преобразователем выходного тока в напряжение.

Кроме методической погрешности в ЦАП с суммированием токов возникают погрешности от влияния переходных сопротивлений контактов r_k коммутирующих ключей, нестабильности значений разрядных сопротивлений, контактных ЭДС ключей $\varepsilon_{кл}$, нестабильности опорного напряжения $\Delta U_{оп.}$, параметров ОУ и др.

Рассмотрим каждую из этих погрешностей отдельно. Переходные сопротивления контактов r_k изменяют ток в каждой из включенных параллельных ветвей.

Изменения тока в i -й ветви

$$\Delta I_i = -\frac{r_{ki}}{R_i} \times \frac{U_{оп.}}{R_i}.$$

Суммарное изменение выходного напряжения ЦАП, вызванное этой причиной:

$$\Delta U_{выхrk} = -\sum_{i=1}^m a_i \times \frac{R_H}{R_i} \times \frac{U_{оп.}}{R_i} \times r_{ki},$$

где $a_i = 1$, если i -ый разряд включен; $R_i = R/2^{i-1}$ – сопротивление цепи ЦАП, формирующий ток i -го разряда.

Относительная погрешность ЦАП от влияния переходных сопротивлений контактов:

$$\delta_{rk} = \frac{\Delta U_{выхrk}}{U_{вых.}} = -\frac{\sum_{i=1}^n R_H \times U_{оп.} \times r_{ki} \times a_i / R_i^2}{U_{оп.} \times R_H \times \sum_{i=1}^n a_i / R_i} = -\frac{\sum_{i=1}^n r_{ki} \times a_i / R_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i / R_i}$$

Контактные ЭДС ключей также изменяют ток в каждой из включенных ветвей ЦАП, при этом в i -й ветви изменения тока $\Delta I_i = \varepsilon_{ki} / R_i$ и суммарно изменение выходного напряжения ЦАП составит:

$$\Delta U_{вых.ek} = \sum_{i=1}^n R_H \times \varepsilon_{ki} \times a_i / R_i ;$$

где ε_{ki} – контактная ЭДС ключей выключенных разрядов.

Отсюда относительная погрешность ЦАП от ЭДС ключей.

$$\delta_{\varepsilon k} = \frac{\sum_{i=1}^n R_H \times \varepsilon_{ki} \times a_i / R_i}{[U_{оп} \times R_H (\sum_{i=1}^n a_i / R_i)]}$$

При одинаковых значениях ЭДС во всех ключах $\varepsilon_{ki} = \varepsilon_k$ получим:

$$\delta \varepsilon_k = \varepsilon_k / u_{оп}$$

Выходное напряжение каждого ЦАП прямо пропорционально напряжению $U_{оп}$, поэтому при изменении $U_{оп}$ соответственно меняется и выходное напряжение ЦАП. Изменение $U_{оп}$, вызванное внешними факторами (изменением температуры, колебаниями напряжения сети), обозначим $\Delta U_{оп.вх}$, а вызванное изменением тока нагрузки – $\Delta U_{оп.н}$.

Суммарное изменение опорного напряжения $\Delta U_{оп\Sigma} = \Delta U_{оп.вх} + \Delta U_{оп.н}$, тогда относительная погрешность ЦАП от нестабильности напряжения $U_{оп}$ будет:

$$\delta_{\Delta U_{оп.}} = \delta_{в.н} + \delta_{н} = \Delta U_{оп.вх} / U_{оп} + \Delta I_{н} \times r_{U_{оп}} / U_{оп},$$

где $r_{U_{оп}}$ - изменение тока нагрузки источника опорного напряжения.

Погрешность от нестабильности значений разрядных сопротивлений ΔR_i имеет тот же физический смысл, что и погрешность δ_{r_k} от влияния переходных сопротивлений контактов коммутирующих ключей. Поэтому относительная погрешность преобразования $\delta_{\Delta R_i}$, обусловленное нестабильностью значений R_i , определяется также, как и погрешность δ_{r_k} , то есть:

$$\delta_{\Delta R_i} = \frac{\Delta U_{в.н} \times \Delta R_i}{U_{в.н}} = - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta R_i \times a_i / R_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i / R_i}.$$

ЦАП с резистивной матрицей типа R-2R.

Перечисленные выше недостатки, свойственные ЦАП с разрядными сопротивлениями, номиналы которых меняются по двоичному закону,

исключаются, если в качестве формирователей разрядных токов использовать многозвенную цепочку резисторов типа R-2R.

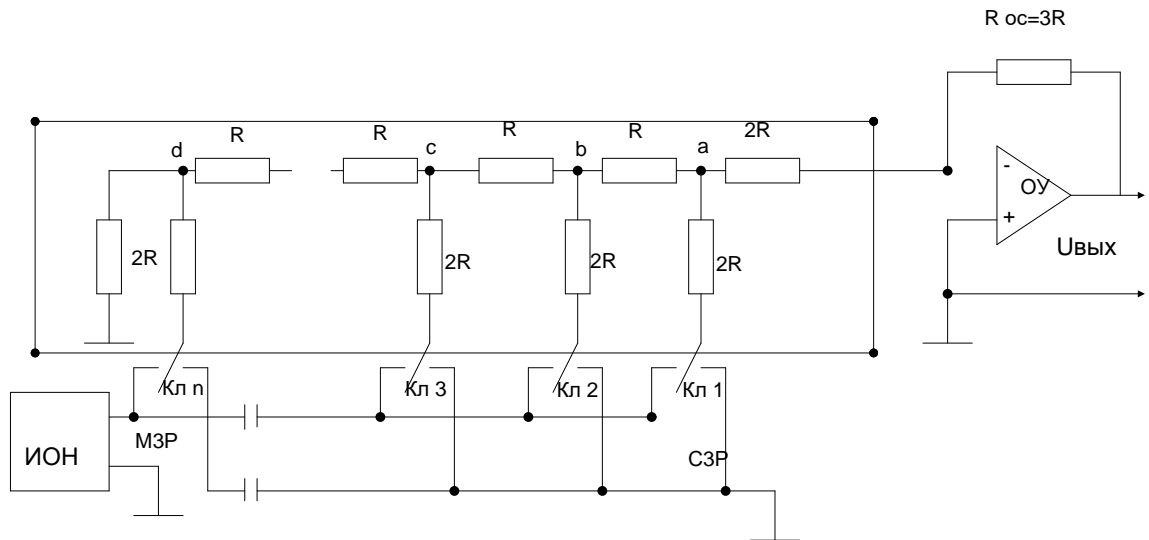
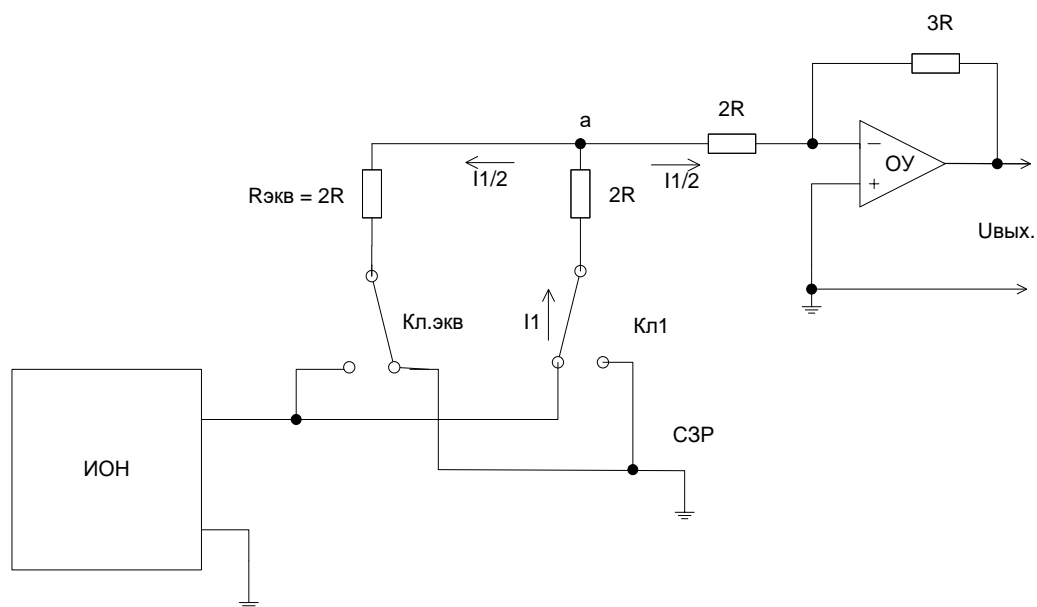


Рисунок 6 – Схема ЦАП с резистивной матрицей R-2R

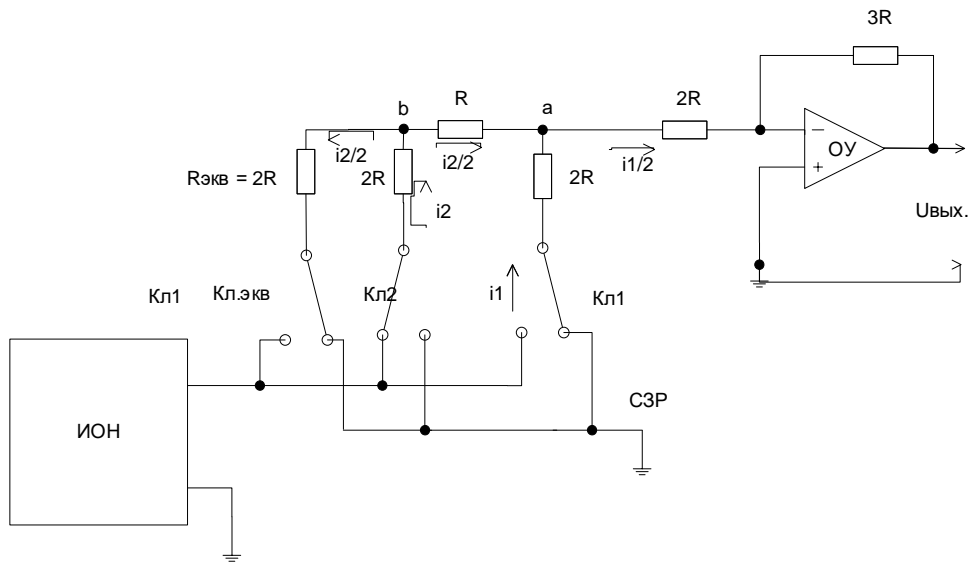
В этом случае резистивная цепочка состоит из резисторов только двух номиналов. Уменьшение формируемых значений разрядных токов (так же оп двоичному закону) обеспечивается включением резисторов таким образом, что резисторы более старшего разряда учувствуют в формировании (путем уменьшения) разрядных токов более младших разрядов. Это позволяет реализовать формирователь разрядных токов на резистивной цепочке только с двумя номиналами резисторов. Резистивная цепочка является линейкой, поэтому ее работу можно проанализировать методом суперпозиции т.е. рассчитать ток каждого разряда независимо от других. При этом необходимо учитывать, что на выходе ЦАП стоит операционный усилитель с сопротивлением в цепи обратной связи $R_{oc}=3R$. Чтобы обеспечить равенство напряжения полной шкалы ЦАП и опорного напряжения $U_{оп}$ (т.е.=1), окончательный результат преобразования следует рассматривать в виде напряжения $U_{вых}$ на выходе ОУ с учетом его коэффициента преобразования $K=-3/2$. Определим значение формируемого разрядного тока с помощью ключа Кл1 (тока старшего разряда), подключающего резистор 2R разрядной цепочки к источнику $U_{оп}$ при условии, что все остальные ключи замкнуты на землю. Эквивалентное сопротивление цепи слева от узла, а равно 2R.

Рассматривая каждый узел этой цепи (узлы б, с и т. д.) нетрудно убедиться, что эквивалентное сопротивление с любой стороны от этого узла равно $2R$ при условии, что в конце цепочки нагружена на резистор $2R$, а потенциал инвертирующего входа ОУ равен нулю. Таким образом, если к $U_{оп}$ подключен только резистор $2R$ старшего разряда, а резисторы всех остальных разрядов подключены на землю, (ЦАП с эквивалентной схемой цепочки резисторов изображен на рис.) то ток I_1 от ИОН через резистор $2R$ старшего разряда при включении Кл 1 делится пополам, обеспечивая на узле, а напряжение:

$$U_a = U_{оп} \cdot R / 3R = U_{оп} / 3$$



а)



б)

Рисунок 7 – Эквивалентная схема ЦАП с резистивной матрицей R-R2 при включении 1-го (старшего) разряда (а) и 2-го разряда (б)

Поскольку коэффициент передачи ОУ относительно узла «а» равен $k = 3/2$ ($R_{o.c.} = 3R$), то выходное напряжение ОУ, обусловленное током СЗР, будет:

$$U_{\text{вых1}} = \frac{U_{\text{оп}}}{3} \left(-\frac{3}{2}\right) = -\frac{U_{\text{оп}}}{2}.$$

Если к ИОН подключен только 2-й разряд, а старший и все остальные подключены на землю (рис. б), то токи, вытекающие из узла b, одинаковы и, следовательно, в узле b напряжение

$$U_b = U_{\text{оп}}/3$$

Согласно схеме на рис. б это напряжение относительно узла «а» делится пополам, и, следовательно, напряжение на выходе ОУ от тока I_2 второго по старшинству разряда определится соотношением

$$U_{\text{вых2}} = \frac{U_{\text{оп}}}{3} \times \frac{1}{2} \times \left(-\frac{3}{2}\right) = -\frac{U_{\text{оп}}}{4}$$

Аналогичным образом можно убедиться, что значение выходного напряжения при последовательном включении каждого разряда по двоичному закону. Тогда для суммарного выходного напряжения ОУ можно записать:

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{оп}}(a_1 \times 2^{-1} + a_2 \times 2^{-2} + \dots + a_n \times 2^{-n}) = -U_{\text{оп}} \times 2^{-n} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \times 2^i$$

где $a_i = 0$ или $a_i = 1$ в зависимости от того подключен i -й ключ соответственно к нулевому потенциалу или к источнику $U_{\text{оп}}$.

Таким образом, выходное напряжение ЦАП пропорционально сумме напряжений, обусловленных лишь теми ключами, которые подключены к источнику $U_{\text{оп}}$. При этом доля СЗР составляет $\frac{U_{\text{оп}}}{2}$, второго по старшинству разряда - $\frac{U_{\text{оп}}}{4}$ и т.д.; значение МЗР составит $\Delta = U_{\text{оп}} \times 2^{-n}$, где n - число разрядов ЦАП.

Достоинством рассмотренной схемы является то, что резистивная матрица состоит только из двух номиналов, при этом нет необходимости добиваться высокой точности их абсолютных значений. Важны только временная стабильность и высокая точность относительного значения, что, естественно, значительно повышает технологичность данной схемы в интегрированном исполнении. Немало важно постоянство входного сопротивления резистивной цепочки $R_{\text{вх}}=3R$ со стороны ИОН при любых комбинациях включения разрядных ключей, что позволяет использовать прецизионный источник с достаточно большим выходным сопротивлением, не вызывая изменения значения его напряжения в процессе работы ЦАП. Выходное сопротивление ЦАП при нулевом внутреннем сопротивлении ИОН равно $R_{\text{вых}}=3R$. К достоинствам следует так же отнести отсутствие у данной схемы методической погрешности.

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость использования ключей, коммутирующих напряжение. Наличие в этом случае значительной разности потенциалов между контактами ключей и существенной емкости между элементами преобразователя обуславливает

длительный переходной процесс, который уменьшает быстродействие ЦАП. Предпочтительней использовать в ЦАП токовые ключи, у которых потенциалы между контактами близки к нулю, а, следовательно, и переходные процессы менее продолжительны. Это даёт возможность существенно (на порядок и больше) повысить быстродействие ЦАП (до нескольких десятков наносекунд).

Из динамических параметров наиболее существенными являются время установления выходного напряжения или тока и максимальная частота преобразования. Время установления $t_{уст}$ - интервал времени от подачи входного кода до вхождения выходного сигнала в заданные. Максимальная частота преобразования $f_{прб}$ – наибольшая частота дискретизации, при которой параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

В настоящее время в зависимости от значений параметров выделяют прецизионные и быстродействующие ЦАП. Прецизионные ЦАП имеют $\delta_{л} < 0,1\%$, а быстродействующие $t_{уст} = 100\text{нс}$.

Составными частями ЦАП являются резистивная матрица, токовые ключи, логика управления токовыми ключами и опорный источник.

Исследуемый ЦАП К572 ПА1А относится к прецизионным. Его погрешность $\delta_{л} = 0,1 - 0,8\%$. Он выполнен по КМОП технологии. Из – за сложности исполнения опорного источника на одной подложке, у исследуемого ЦАП имеется вывод, к которому подключается внешний опорный источник. Благодаря тому, что токовые ключи выполнены по КМОП технологии, имеется возможность менять полярность опорного источника и таким образом работать в двух квадрантах.

Схема ЦАП К572 ПА1А приведена на рисунок 8.

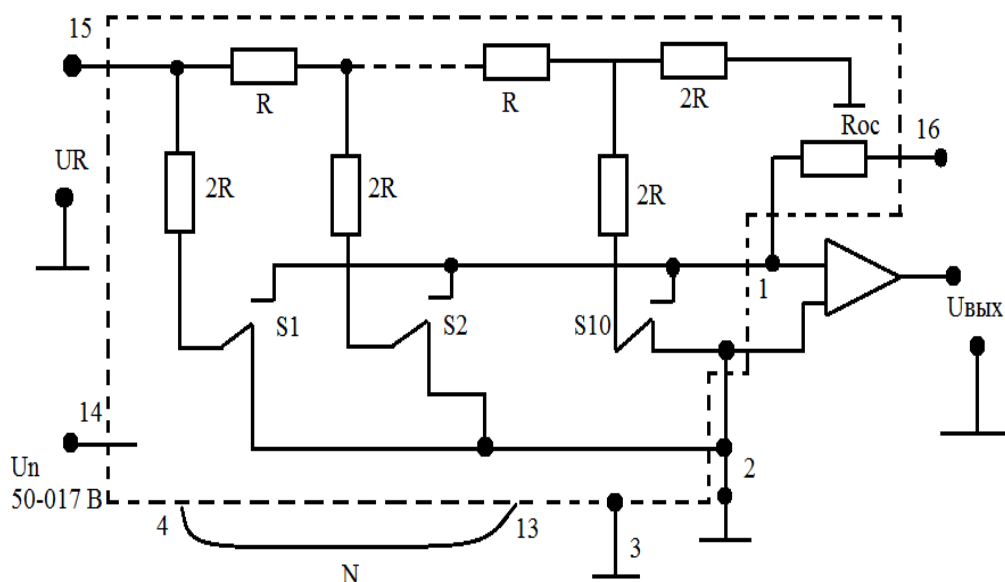


Рисунок 8 – Матрица выполнена из прецизионных резисторов номиналов R и $2R$. $S_1 - S_{10}$ – ключи, переключающие резисторы в соответствии с набранным кодом.

К контактам 4 – 13 подводится двоичный код. Питание матрицы осуществляется от внешнего прецизионного источника.

Выход матрицы подключен ко входу, операционного усилителя, который преобразует выходной ток матрицы в пропорциональное напряжение. Резистор R_{oc} (вывод 16) подключается к выходу усилителя.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В лабораторной работе используются приборы, питающиеся от сети переменного тока 220В. Корпуса этих приборов должны заземляться. При сборке схемы все проводники должны быть тщательно закреплены. Соединительные проводники не должны иметь оголенные участки. После сборки схема должна быть проверена преподавателем и только после проверки питающие напряжения могут быть включены. При всех переключениях в собранной схеме необходимо отключить ее от питающей сети.

КОМПЛЕКТ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ ТИПА К32

Комплект лабораторного оборудования К32 состоит из следующих составных частей (рисунок 9): блока управления комплектом (БУК); устройства вспомогательное для генератора типа ЛЗ1 (далее генератор); кассеты и устройств сменных (УС).

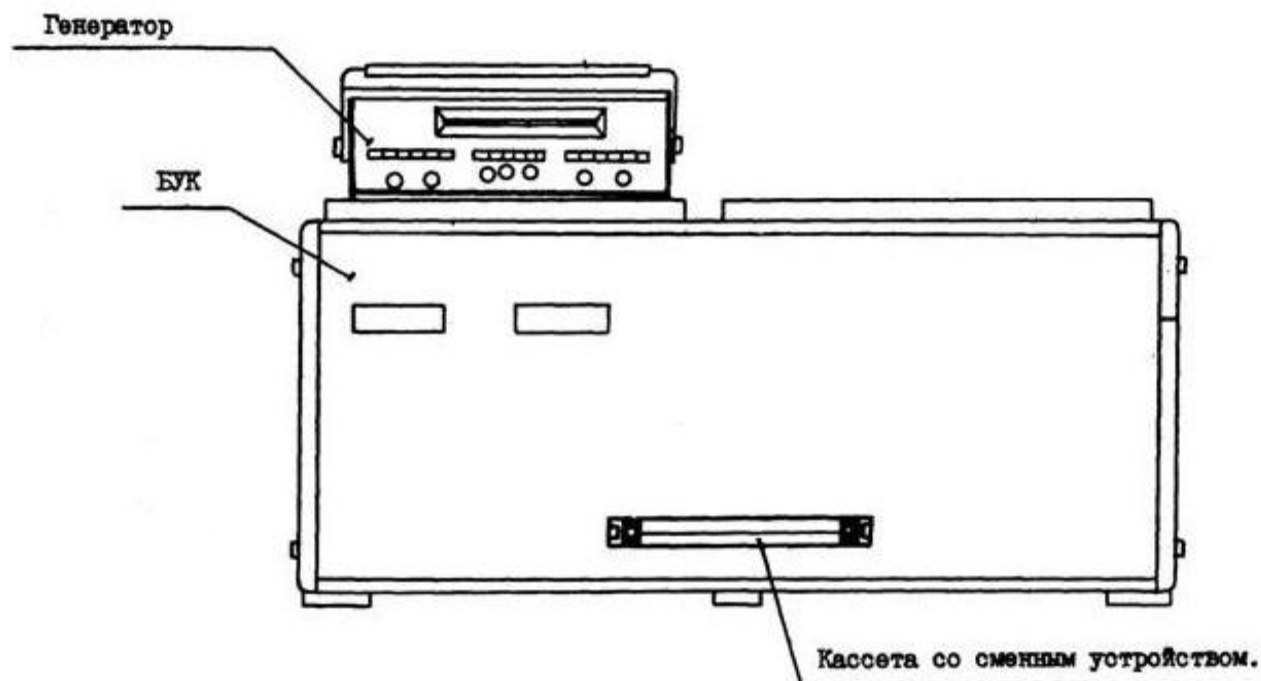


Рисунок 9 – Комплект лабораторного оборудования К32

БУК состоит из следующих частей (рисунок 10): передней панели (ПП); программатора серии импульсов (ПСИ); блока цифровой индикации (БЦИ); блока аналоговых сигналов (БАС); блока питания (БП).

Органы управления на ПП БУК объединены в группы согласно их функциональному назначению. Обозначение « $\overline{A|B}$ » у кнопок означает, что если кнопка не нажата, то выполняется функция А, а если нажата, то выполняется функция В.

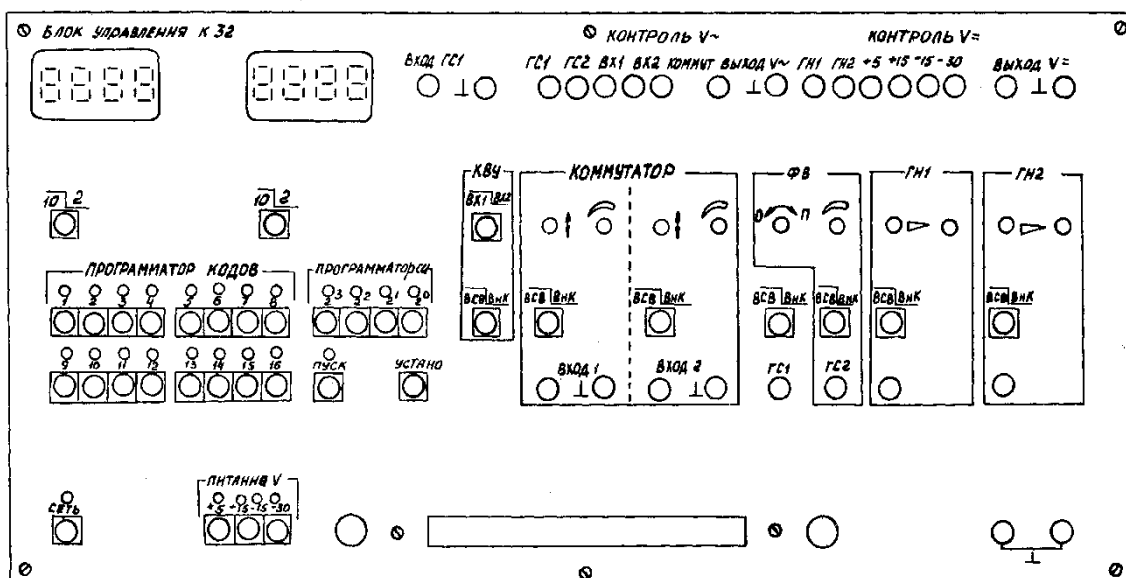


Рисунок 10 – Блок управления комплексом (БУК)

Светодиоды над кнопками служат для индикации срабатывания кнопок – светодиоды светятся при нажатой кнопке (кроме кнопки «ПУСК») и сигнализации об исправности электрической цепи, которую коммутируют с помощью кнопочного переключателя. Кнопки под надписью «ПРОГРАММАТОР КОДОВ» служат для генерации комбинации сигналов «логический ноль» («0») – постоянного напряжения от 0 до 0.4 В – или «логическая единица» («1») – постоянного напряжения величиной от 2.4 до 5 В, генерация «1» происходит при нажатой кнопке, а «0» - при отпущенной. Кнопки « $\overline{10} \begin{matrix} 2 \\ \square \end{matrix}$ » служат для выбора режима работы БЦИ. Кнопки «2⁰», «2¹», «2²», «2³» под надписью «ПРОГРАММАТОР СИ» предназначены для набора двоичного кода количества импульсов в серии, генерируемой ГСИ, или номера канала прохождения импульсов (КПИ). Кнопка «ПУСК» служит для включения ГСИ. Кнопка «УСТАН 0» служит для установки ГСИ в исходное состояние. ПСИ предназначен для генерации пачек импульсов от одного до пятнадцати импульсов в серии с амплитудой от 2.4 до 5 В для коммутации цифровых сигналов, поступающих с плат сменных устройств на входы коммутатора и для генерации прямоугольных импульсов с амплитудой от 2.4 до 5 В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает комплект лабораторного оборудования по электронной технике К32, вольтметр цифровой Ц6803, устройство сменное УС11.

Установка К32 предусматривает выполнение 43 лабораторных работ по электронной технике. Для выполнения конкретных работ существуют устройства сменные.

Для изучения работы ЦАП используется устройство сменное УС11. На этом устройстве расположен ЦАП (D8), операционный усилитель (DA), два пятнадцати разрядных двоичных делителя частоты (DD6, DD7). Выходы делителей частоты соединены с дискретными входами ЦАП. Опорное напряжение UR подается с генератора ГН1. Уровень UR регулируется ручками ГН1. Кнопка ВСВ ВНК должна быть выключена. Напряжение UR можно контролировать на гнездах «Выход U=» при нажатой кнопке ГН1.

Состояние входов N АЦП можно менять с помощью программатора СИ.

Для этого надо набрать на кнопках $2^0 - 2^8$ требуемый код. Затем с помощью кнопок «усто» и «пуск» записать набранный код в делители частоты DD6 и DD7. Состояние делителей частоты можно контролировать полевому индикатору при выключенной кнопки 10_2 . Состояние входов 12, 13 меняется с помощью кнопок 3 и 4 программатора кодов. Выход ЦАП контролируется с помощью цифрового вольтметра на гнезде XS3.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Установить устройство сменное УС11 в разъем К32 и тщательно затянуть винты каркаса платы.

Выключить кнопку ВСВ ВНК генератора ГН1.

Выключить кнопку левого индикатора 10_2 .

Включить кнопку «СЕТЬ», включить питающие напряжения «+5 В» «+15 В; -15 В». На левом индикаторе установится произвольный шестнадцатеричный код. С помощью программатора СИ подавайте импульсы

до обнуления индикатора. Включите кнопку ГН1 контроля $U=U$ подключите к гнездам вольтметр цифровой Щ6803. Ручками ГН1 установите напряжение U_R . Подключите вольтметр к гнезду XS3 на степном устройстве нулевые показания вольтметра.

Снимите характеристику ЦАП при значениях

$U_R = +5 \text{ В}; -5 \text{ В}; +10 \text{ В}; -10 \text{ В}$.

Показания занесите в таблицу.

Таблица 1

UR +5 В	Код	0100	0200	0300	0400	0500	0600	0700	...	1515
	Uвых									

Постройте графики для всех значений U_R по экспериментальным данным и теоретические графики. Определите отклонение от теоретических данных.

Определите относительную погрешность ЦАП в проверяемых точках.

Сделайте заключение о точности ЦАП.

Тема 3. Полупроводниковые приборы и цифровые интегральные схемы

Лабораторная работа №10 «Исследование аналого-цифрового преобразователя и численный расчет его погрешности»

Цель работы: исследовать характеристики аналого-цифрового преобразователя в интегральном исполнении, а также рассчитать его погрешность.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) применяются в информационно измерительных системах для согласования аналоговых источников измерительных сигналов с цифровыми устройствами обработки и представления результатов измерения.

Основными характеристиками АЦП являются: разрешающая способность, точность и быстродействие. Разрешающая способность определяется разрядностью и максимальным диапазоном входного аналогового напряжения, точность – абсолютной погрешностью полной шкалы $\delta_{\text{пш}}$, нелинейностью и дифференциальной нелинейностью. Дифференциальная нелинейность характеризует идентичность соседних приращений сигнала.

Быстродействие АЦП характеризуется временем преобразования $t_{\text{прб}}$, т.е. интегралом времени от момента заданного изменения сигнала на входе до появления на выходе установившегося кода.

По структуре построения АЦП делятся на два типа: с применением ЦАП и без них. В настоящее время в интегральном исполнении реализованы АЦП развертывающего типа. Развертывающий АЦП переводит аналоговый сигнал в цифровой код последовательно, начиная с младшего значащего разряда до цифрового кода на выходе, соответствующего уровню входного аналогового напряжения АЦП.

Одним из наиболее распространенных является метод поразрядного уравнивания, называемый также методом последовательного приближения. В АЦП, построенным этим методом, код в регистре результата

меняется так, чтобы обеспечить по возможности быстрое уравнивание входного напряжения, напряжением, получаемым с выхода ЦАП, присоединенного к упомянутому регистру. Уравнивание начинается со старшего разряда.

Компаратор сравнивает входное напряжение с напряжением старшего разряда и если оно больше, то разряд включается. Цикл продолжается до тех пор, когда набранное напряжение станет равным входному.

К недостаткам этого типа относится отсутствие помехоподавления сетевой помехи (50 Гц).

Различают два типа сетевой помехи параллельная и последовательная.

Параллельная помеха прикладывается между выходом АЦП и корпусом системы. Для подавления параллельной помехи изолируют измерительную схему системы от корпуса.

Последовательная помеха прикладывается между входом АЦП и его нулевым проводом. Воздействие этой помехи приводит к вариации результата преобразования.

Для борьбы с сетевыми помехами были разработаны интегрирующие АЦП. Они по быстродействию уступают предыдущим типам. Вместе с тем они обладают высокой помехоустойчивостью, отсутствует дифференциальная нелинейность, имеют минимальное число необходимых точных компонентов. Наибольшее применение нашли АЦП двойного интегрирования. В соответствии с этим принципом в первом такте производится интегрирование входного сигнала за период сетевой помехи. Во втором такте интегрирования ко входу АЦП подается сигнал от образцового источника и идет интегрирование до достижения нуля на выходе интегратора. В течении второго такта интегрирования на вход счетчика поступает частота от генератора в котором накапливается результат преобразования. Первый интервал интегрирования формируется с помощью того же генератора, частота которого подстраивается под частоту помехи. Благодаря тому, что

входная сетевая помеха интегрируется за период сети, то такой интеграл равен «0» и на результат измерения не влияет.

АЦП двойного интегрирования широко используется в информационно – измерительных системах, где не требуется большая скорость измерения, а требуется высокая точность и помехозащищенность от сетевых помех. Такой АЦП может измерять со скоростью не более 25 измерений в секунду.

Функциональная схема АЦП кр572пв2 приведена на рисунке 1

**Функциональная схема
АЦП КР572ПВ2**

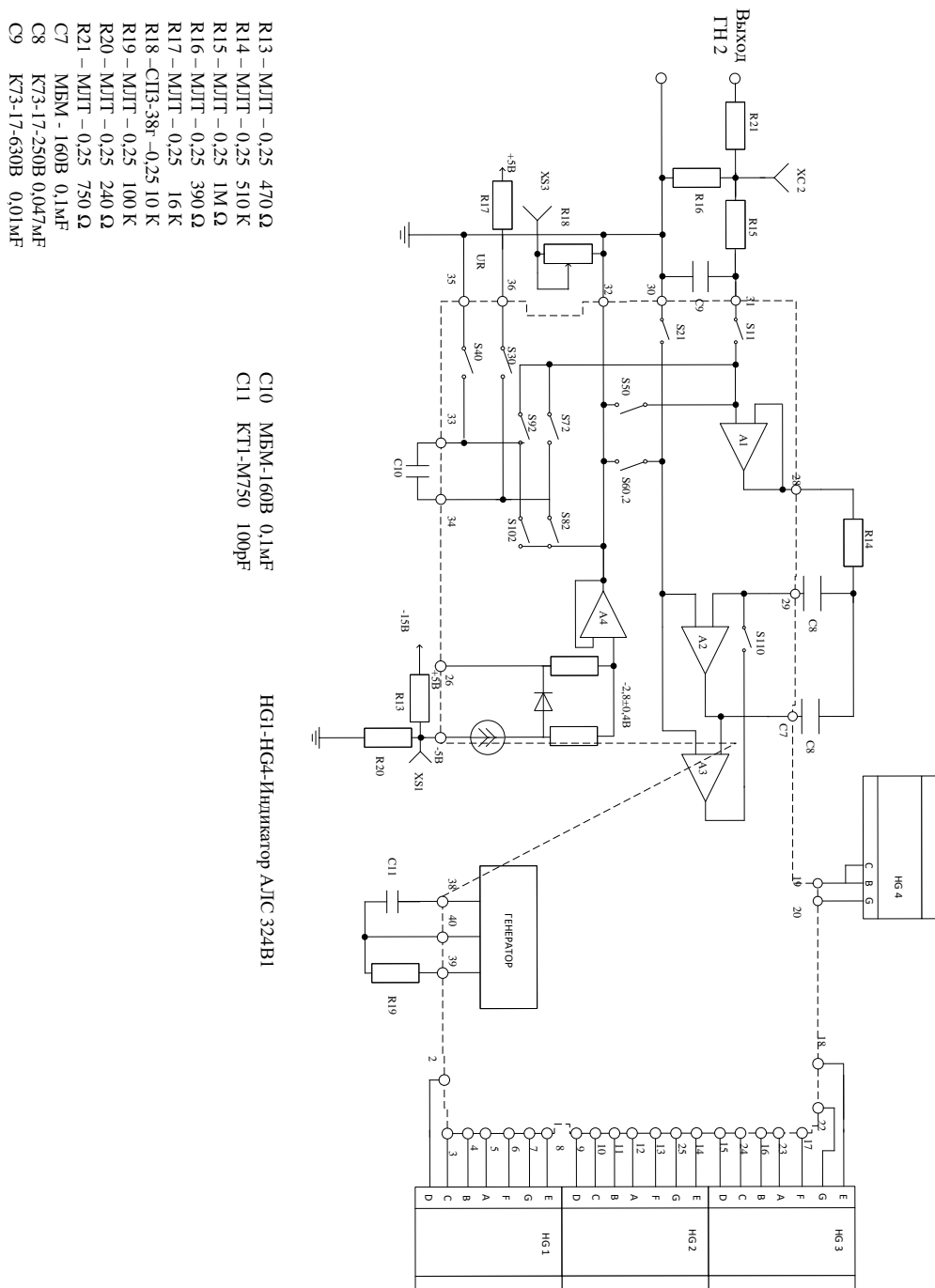


Рисунок 1 – Функциональная схема АЦП кр572пв2

АЦП кр572пв2 содержит буферный повторитель напряжения А1, интегратор, выполненный на операционном усилителе А2, компаратор А3, узел формирования общего потенциала, включающий в себя операционный усилитель А4, систему аналоговых ключей S1-S11, цифровую часть.

Постоянная времени интегратора определяется внешними элементами R14, C7. Конденсатор C8 используется в цепи коррекции напряжения смещения усилителей A1, A2 и A3.

На конденсаторе C10 запоминается опорное напряжение U_r .

Резистор R19 и конденсатор C11 определяют частоту встроенного тактового генератора.

На входе АЦП установлен фильтр нижних частот R15C9, сглаживающий пульсации входного сигнала.

Двум основным тактам интегрирования, соответствующим принципу действия двойного интегрирования предшествует такт автокоррекции. Обозначение ключей на функциональной схеме снабжены цифровыми индексами, указывающими номер такта, в котором эти ключи замыкаются. При автокоррекции замыкаются ключи S3-S6, S11. При этом входы буферного усилителя и интегратора присоединяются к общему потенциалу, а выход компаратора A3 соединяется с инвертирующим входом операционного усилителя интегратора A2. В результате усилители A2 и A3 оказываются охваченными отрицательной обратной связью с коэффициентом равным «1», в следствии этого их суммарный коэффициент усиления становится равным «1». На нижней обкладке конденсатора C8 устанавливается напряжение, равное сумме напряжения смещения A2 и A3. На верхней обкладке этого конденсатора будет присутствовать напряжение смещения усилителя A1.

Таким образом на конденсаторе C8 в такте автокоррекции запоминается напряжение ошибки, обусловленное смещением всех трех усилителей. В последующих тактах интегрирования ключ S11 размыкается и запомненное напряжение на конденсаторе C8 вычитается из входного сигнала операционного усилителя A2. По результатам интегрирования первого такта по компаратору A3 определяется полярность входного и включается опорное напряжение той полярности, которое обеспечивает разряд интегратора. Длительность второго такта интегрирования определяется временем, в

течении которого напряжение на выходе интегратора уменьшится до «0» о чем будет свидетельствовать срабатывание компаратора АЗ.

Количество импульсов тактового генератора, посчитанное за это время, представляет собой результат преобразования АЦП.

$$N = f_{\tau} \cdot T_2 = f_{\tau} \cdot T_1 \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_r} = \frac{N1 U_{\text{ВХ}}}{U_r}$$

где N-выходной код АЦП.

f_{τ} -частота тактовых импульсов.

N1-число тактовых импульсов первого периода интегрирования.

Из формулы видно, что частота тактового генератора не влияет на результат измерения, если она постоянна в 1 и 2 тактах интегрирования. Постоянная времени интегрирования не влияет на результат измерения. Для подавления помехи с частотой 50Гц необходимо выбирать время интегрирования в первом такте либо равным периоду сетевой помехи, либо кратным этому периоду.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для исследования АЦП интегрального исполнения КР572ПВ2В состоит из блока управления К32, сменного устройства УС 18 и цифрового вольтметра Щ6803.

На сменном устройстве располагается АЦП КР572ПВ2В и четыре светодиодных индикатора АЛС324Б1. АЦП питается от двух источников +5 В; -5 В, подаваемых соответственно на входы 1 и 26 микросхемы АЦП.

Опорное напряжение формируется из +5 В и регулируется с помощью резистора R18 и подается на контакт 36 АЦП.

Цифровые индикаторы питаются напряжением +5 В. Цифровые выходы АЦП выполнены в семеричном коде и на прямую стыкуются с индикаторами.

АЦП КР572ПВ2В предназначен для работы по принципу двойного интегрирования. Конденсатор С7 и резистор R14 являются элементами интегратора. Конденсатор С8 предназначен для автокоррекции. Конденсатор С11 и резистор R19 определяют частоту тактового генератора.

Диапазоны измеряемых напряжений 1,999 В. Контроль входного напряжения выполняется цифровым вольтметром Щ6803.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В лабораторной работе используются приборы, питающиеся от сети переменного тока 220В. Корпуса этих приборов должны заземляться. При сборке схемы все проводники должны быть тщательно закреплены. Соединительные проводники не должны иметь оголенные участки. После сборки схема должна быть проверена преподавателем и только после проверки питающие напряжения могут быть включены. При всех переключениях в собранной схеме необходимо отключить ее от питающей сети.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Установите устройство сменное в блок управления и надежно закрепите винтами.

Подключите цифровой вольтметр Щ6803 к клеммам «кл1»; «кл2».

Включите блок управления кнопкой «СЕТЬ».

Включите питающие напряжения «+5 В» «+15 В; -15 В». Резистором R22 установите напряжение 1,5 В. С помощью резистора R18 установите показания индикаторов АЦП такое же как у цифрового прибора.

Снимите характеристику АЦП изменяя входное напряжение резистором R22 от -1,5 В до +1,5 В.

Результаты измерений внесите в таблицу 1.

Таблица 1

U _{вх} v	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5 В
U АЦП В								

По результатам измерений постройте графики выходной характеристики АЦП.

Определите фактическую относительную погрешность АЦП в измеряемых точках.

Сделайте заключение о точности измерений АЦП.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к самостоятельным работам

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) «Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов»
Квалификация выпускника – бакалавр

(Электронный документ)

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника и других технических специальностей. Они содержат рекомендации по организации самостоятельных работ студента для дисциплины «Информационно-измерительная техника и электроника».

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО в части содержания и уровня подготовки выпускников направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

1 Подготовка к лекциям.....	4
2 Подготовка к лабораторным работам	6
3 Подготовка к практическим занятиям	9
4 Самостоятельное изучение темы. Конспект.....	11
4 Подготовка к экзамену.....	14

1 Подготовка к лекциям

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях.

Конспект лекций лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места, опре-

деления, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось присить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

2 Подготовка к лабораторным работам

Подготовку к каждому практическому занятию студент должен начать с ознакомления с методическими указаниями, которые включают содержание работы. Тщательное продумывание и изучение вопросов основывается на проработке текущего материала лекции, а затем изучения обязательной и дополнительной литературы, рекомендованную к данной теме. На основе индивидуальных предпочтений студенту необходимо самостоятельно выбрать тему доклада по проблеме и по возможности подготовить по нему презентацию.

Если программой дисциплины предусмотрено выполнение практического задания, то его необходимо выполнить с учетом предложенной инструкции (устно или письменно). Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса. Результат такой работы должен проявиться в способности студента свободно ответить на теоретические вопросы семинара, его выступлении и участии в коллективном обсуждении вопросов изучаемой темы, правильном выполнении практических заданий и контрольных работ.

В зависимости от содержания и количества отведенного времени на изучение каждой темы практическое занятие может состоять из четырех-пяти частей:

1. Обсуждение теоретических вопросов, определенных программой дисциплины.
2. Доклад и/ или выступление с презентациями по выбранной проблеме.
3. Обсуждение выступлений по теме – дискуссия.
4. Выполнение практического задания с последующим разбором полученных результатов или обсуждение практического задания.
5. Подведение итогов занятия.

Первая часть – обсуждение теоретических вопросов – проводится в виде фронтальной беседы со всей группой и включает выборочную проверку преподавателем теоретических знаний студентов. Примерная продолжительность — до 15 минут. Вторая часть — выступление студентов с докладами, которые должны сопровождаться презентациями с целью усиления наглядности восприятия, по одному из вопросов практического занятия. Обязательный элемент доклада – представление и анализ статистических данных, обоснование социальных последствий любого экономического факта, явления или процесса. Примерная продолжительность — 20-25 минут. После докладов следует их обсуждение – дискуссия. В ходе этого этапа практического занятия могут быть заданы уточняющие вопросы к докладчикам. Примерная продолжительность – до 15-20 минут. Если программой предусмотрено выполнение практического задания в рамках конкретной темы, то преподавателями определяется его содержание и дается время на его выполнение, а затем идет обсуждение результатов. Подведением итогов заканчивается практическое занятие.

В процессе подготовки к практическим занятиям, студентам необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной учебно-методической (а также научной и популярной) литературы. Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной и популярной литературой, материалами периодических изданий и Интернета, статистическими данными является наиболее эффективным методом получения знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у студентов свое отношение к конкретной проблеме. Более глубокому раскрытию вопросов способствует знакомство с дополнительной литературой, рекомендованной преподавателем по каждой теме семинарского или практического занятия, что позволяет студентам проявить свою индивидуальность в рамках выступления на данных занятиях, выявить широкий спектр мнений по изучаемой проблеме.

3 Подготовка к практическим занятиям

Подготовку к каждому практическому занятию студент должен начать с ознакомления с методическими указаниями, которые включают содержание работы. Тщательное продумывание и изучение вопросов основывается на проработке текущего материала лекции, а затем изучения обязательной и дополнительной литературы, рекомендованную к данной теме. На основе индивидуальных предпочтений студенту необходимо самостоятельно выбрать тему доклада по проблеме и по возможности подготовить по нему презентацию.

Если программой дисциплины предусмотрено выполнение практического задания, то его необходимо выполнить с учетом предложенной инструкции (устно или письменно). Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса. Результат такой работы должен проявиться в способности студента свободно ответить на теоретические вопросы семинара, его выступлении и участии в коллективном обсуждении вопросов изучаемой темы, правильном выполнении практических заданий и контрольных работ.

В зависимости от содержания и количества отведенного времени на изучение каждой темы практическое занятие может состоять из четырех-пяти частей:

1. Обсуждение теоретических вопросов, определенных программой дисциплины.
2. Доклад и/ или выступление с презентациями по выбранной проблеме.
3. Обсуждение выступлений по теме – дискуссия.
4. Выполнение практического задания с последующим разбором полученных результатов или обсуждение практического задания.
5. Подведение итогов занятия.

Первая часть – обсуждение теоретических вопросов – проводится в виде фронтальной беседы со всей группой и включает выборочную проверку преподавателем теоретических знаний студентов. Примерная продолжительность — до 15 минут. Вторая часть — выступление студентов с докладами, которые должны сопровождаться презентациями с целью усиления наглядности восприятия, по одному из вопросов практического занятия. Обязательный элемент доклада – представление и анализ статистических данных, обоснование социальных последствий любого экономического факта, явления или процесса. Примерная продолжительность — 20-25 минут. После докладов следует их обсуждение – дискуссия. В ходе этого этапа практического занятия могут быть заданы уточняющие вопросы к докладчикам. Примерная продолжительность – до 15-20 минут. Если программой предусмотрено выполнение практического задания в рамках конкретной темы, то преподавателями определяется его содержание и дается время на его выполнение, а затем идет обсуждение результатов. Подведением итогов заканчивается практическое занятие.

В процессе подготовки к практическим занятиям, студентам необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной учебно-методической (а также научной и популярной) литературы. Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной и популярной литературой, материалами периодических изданий и Интернета, статистическими данными является наиболее эффективным методом получения знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала, формирует у студентов свое отношение к конкретной проблеме. Более глубокому раскрытию вопросов способствует знакомство с дополнительной литературой, рекомендованной преподавателем по каждой теме семинарского или практического занятия, что позволяет студентам проявить свою индивидуальность в рамках выступления на данных занятиях, выявить широкий спектр мнений по изучаемой проблеме.

4 Самостоятельное изучение темы. Конспект

Конспект – наиболее совершенная и наиболее сложная форма записи. Слово «конспект» происходит от латинского «conspectus», что означает «обзор, изложение». В правильно составленном конспекте обычно выделено самое основное в изучаемом тексте, сосредоточено внимание на наиболее существенном, в кратких и четких формулировках обобщены важные теоретические положения.

Конспект представляет собой относительно подробное, последовательное изложение содержания прочитанного. На первых порах целесообразно в записях ближе держаться тексту, прибегая зачастую к прямому цитированию автора. В дальнейшем, по мере выработки навыков конспектирования, записи будут носить более свободный и сжатый характер.

Конспект книги обычно ведется в тетради. В самом начале конспекта указывается фамилия автора, полное название произведения, издательство, год и место издания. При цитировании обязательная ссылка на страницу книги. Если цитата взята из собрания сочинений, то необходимо указать соответствующий том. Следует помнить, что четкая ссылка на источник – непереносимое правило конспектирования. Если конспектируется статья, то указывается, где и когда она была напечатана.

Конспект подразделяется на части в соответствии с заранее продуманным планом. Пункты плана записываются в тексте или на полях конспекта. Писать его рекомендуется четко и разборчиво, так как небрежная запись с течением времени становится малопонятной для ее автора. Существует правило: конспект, составленный для себя, должен быть по возможности написан так, чтобы его легко прочитал и кто-либо другой.

Формы конспекта могут быть разными и зависят от его целевого назначения (изучение материала в целом или под определенным углом зрения, подготовка к докладу, выступлению на занятии и т.д.), а также от характера произведения (монография, статья, документ и т.п.). Если речь идет просто об изложении содержания работы, текст конспекта может быть сплошным, с

выделением особо важных положений подчеркиванием или различными значками.

В случае, когда не ограничиваются переложением содержания, а фиксируют в конспекте и свои собственные суждения по данному вопросу или дополняют конспект соответствующими материалами их других источников, следует отводить место для такого рода записей. Рекомендуется разделить страницы тетради пополам по вертикали и в левой части вести конспект произведения, а в правой свои дополнительные записи, совмещая их по содержанию.

Конспектирование в большей мере, чем другие виды записей, помогает вырабатывать навыки правильного изложения в письменной форме важные теоретических и практических вопросов, умение четко их формулировать и ясно излагать своими словами.

Таким образом, составление конспекта требует вдумчивой работы, затраты времени и труда. Зато во время конспектирования приобретаются знания, создается фонд записей.

Конспект может быть текстуальным или тематическим. В текстуальном конспекте сохраняется логика и структура изучаемого произведения, а запись ведется в соответствии с расположением материала в книге. За основу тематического конспекта берется не план произведения, а содержание какой-либо темы или проблемы.

Текстуальный конспект желательно начинать после того, как вся книга прочитана и продумана, но это, к сожалению, не всегда возможно. В первую очередь необходимо составить план произведения письменно или мысленно, поскольку в соответствии с этим планом строится дальнейшая работа. Конспект включает в себя тезисы, которые составляют его основу. Но, в отличие от тезисов, конспект содержит краткую запись не только выводов, но и доказательств, вплоть до фактического материала. Иначе говоря, конспект – это расширенные тезисы, дополненные рассуждениями и доказательствами, мыслями и соображениями составителя записи.

Как правило, конспект включает в себя и выписки, но в него могут войти отдельные места, цитируемые дословно, а также факты, примеры, цифры, таблицы и схемы, взятые из книги. Следует помнить, что работа над конспектом только тогда будет творческой, когда она не ограничена текстом изучаемого произведения. Нужно дополнять конспект данными из другими источниками.

В конспекте необходимо выделять отдельные места текста в зависимости от их значимости. Можно пользоваться различными способами: подчеркиваниями, вопросительными и восклицательными знаками, репликами, краткими оценками, писать на полях своих конспектов слова: «важно», «очень важно», «верно», «характерно».

В конспект могут помещаться диаграммы, схемы, таблицы, которые придадут ему наглядность.

Составлению тематического конспекта предшествует тщательное изучение всей литературы, подобранной для раскрытия данной темы. Бывает, что какая-либо тема рассматривается в нескольких главах или в разных местах книги. А в конспекте весь материал, относящийся к теме, будет сосредоточен в одном месте. В плане конспекта рекомендуется делать пометки, к каким источникам (вплоть до страницы) придется обратиться для раскрытия вопросов. Тематический конспект составляется обычно для того, чтобы глубже изучить определенный вопрос, подготовиться к докладу, лекции или выступлению на семинарском занятии. Такой конспект по содержанию приближается к реферату, докладу по избранной теме, особенно если включает и собственный вклад в изучение проблемы.

4 Подготовка к экзамену

Экзаменационная сессия – очень тяжелый период работы для студентов и ответственный труд для преподавателей. Главная задача экзаменов – проверка качества усвоения содержания дисциплины.

На основе такой проверки оценивается учебная работа не только студентов, но и преподавателей: по результатам экзаменов можно судить и о качестве всего учебного процесса. При подготовке к экзамену студенты повторяют материал курсов, которые они слушали и изучали в течение семестра, обобщают полученные знания, выделяют главное в предмете, воспроизводят общую картину для того, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программы курса и конспект, которые указывают, что в курсе наиболее важно. Основной материал должен прорабатываться по учебнику, поскольку конспекта недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть проработан в течение семестра, а перед экзаменом важно сосредоточить внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением в памяти его краткого содержания в логической последовательности.

До экзамена обычно проводится консультация, но она не может возместить отсутствия систематической работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает лишь ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы. Польза от консультации будет только в том случае, если студент до нее проработает весь материал. Надо учиться задавать вопросы, вырабатывать привычку пользоваться справочниками, энциклопедиями, а не быть на иждивении у преподавателей, который не всегда может тут же, «с ходу» назвать какой-либо факт, имя, событие. На экзамене нужно показать не только знание предмета, но и умение логически связно построить устный ответ.

Получив билет, надо вдуматься в поставленные вопросы для того, чтобы правильно понять их. Нередко студент отвечает не на тот вопрос, который поставлен, или в простом вопросе ищет скрытого смысла. Не поняв вопроса и не обдумав план ответа, не следует начинать писать. Конспект своего ответа надо рассматривать как план краткого сообщения на данную тему и составлять ответ нужно кратко. При этом необходимо показать умение выражать мысль четко и доходчиво.

Отвечать нужно спокойно, четко, продуманно, без торопливости, придерживаясь записи своего ответа. На экзаменах студент показывает не только свои знания, но и учится владеть собой. После ответа на билет могут следовать вопросы, которые имеют целью выяснить понимание других разделов курса, не вошедших в билет. Как правило, на них можно ответить кратко, достаточно показать знание сути вопроса. Часто студенты при ответе на дополнительные вопросы проявляют поспешность: не поняв смысла того, что у них спрашивают, начинают отвечать и нередко говорят не по сути.

Следует помнить, что необходимым условием правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон, поэтому подготовка к экзаменам не должна быть в ущерб сну. Установлено, что сильное эмоциональное напряжение во время экзаменов неблагоприятно отражается на нервной системе и многие студенты из-за волнений не спят ночи перед экзаменами. Обычно в сессию студенту не до болезни, так как весь организм озабочен одним - сдать экзамены. Но это еще не значит, что последствия неправильно организованного труда и чрезмерной занятости не скажутся потом. Поэтому каждый студент помнить о важности рационального распорядка рабочего дня и о своевременности снятия или уменьшения умственного напряжения.