

Министерство образования Республики Беларусь

**БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

---

---

Кафедра «Электротехника и электроника»

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)**

по курсу «Промышленная электроника»  
для студентов специальностей Т.01.01, Т.01.03 Т.11.02

**Минск 2000**

## УДК 621.38

Лабораторный практикум предназначен в качестве учебного пособия по курсу «Промышленная электроника» для студентов энергетических специальностей Т.01.01.00 – «Электроэнергетика», Т.01.03.00 – «Автоматизация и управление энергетическими процессами» и специальности Т.11.02.00 – «Автоматизированный электропривод». Содержание практикума соответствует действующей программе курса и включает четырнадцать лабораторных работ. Работы предусматривают расчетную и экспериментальную части. Предварительный расчет к эксперименту студенты должны выполнять в период самостоятельной подготовки к работе, затем проверить полученные результаты опытным путем, провести дополнительные экспериментальные исследования.

К печати работы подготовили: Розум Т.Т. – № 1, 2; Пекарчик Л.С. - № 3; Новаш И.В. - № 4, 13; Домников С.В. - № 5; Климович Г.С. - № 6, 7, 12; Пекарчик А.С. - № 8; Бладыко Ю.В. - № 9, 10, 11; Силюк В.Ф. - № 14.

Составители:

Ю.В.Бладыко, С.В.Домников, Г.С.Климович, И.В.Новаш,  
А.С.Пекарчик, Л.С.Пекарчик, Т.Т.Розум, В.Ф.Силюк

Рецензент М.И.Полуянов

Белорусская государственная  
политехническая академия, 2000

# Лабораторная работа № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

**Ц е л ь р а б о т ы:** выяснение механизма образования *n-p* перехода; снятие вольтамперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона; ознакомление с принципом действия тиристора и снятие его основных характеристик.

### О б щ и е с в е д е н и я

К полупроводниковым относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление  $\rho=10^{-3} \dots 10^{10}$  Ом· см, зависящее от температуры, освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля и др.

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют простые полупроводниковые вещества - германий, кремний, селен - и некоторые химические соединения, например, арсенид галлия *GaAs*, антимонид индия *InSb*, фосфид индия *InP*, карбид кремния *SiC*.

Полупроводники имеют кристаллическую структуру, которая однородна при температуре абсолютного нуля. По мере нагрева часть валентных связей нарушается вследствие тепловых колебаний в кристаллической решетке, что приводит к одновременному образованию свободных электронов и незаполненных связей (дырок). Генерация пар носителей заряда может происходить также под действием света, электрического поля, излучения и др. Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями заряда (электронами и дырками), называют с о б с т в е н н о й . Вводя в собственный полупроводник примеси, получают п р и м е с н у ю электропроводность. Донорные примеси, атомы которых отдают электроны, образуют полупроводники с преобладающей электронной электропроводностью (*n*-типа). Полупроводники с преобладающей дырочной электропроводностью называют полупроводниками *p*-типа, а соответствующие примеси - акцепторами.

Область на границе контакта двух полупроводников с противоположным типом электропроводности называется э л е к т р о н н о - д ы р о ч н ы м или *n-p*-переходом. Переход обладает несимметричной проводимостью, т. е. имеет нелинейное сопротивление. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и др.) основана на использовании свойств *n-p*-переходов.

Рассмотрим процессы в *n-p*-переходе при отсутствии внешнего источника напряжения (рис.1.1). Так как носители заряда совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Концентрация электронов в *n*-слое больше, чем в *p*-слое, и

часть электронов перейдет из  $n$ -слоя в  $p$ -слой. Одновременно наблюдается диффузионный переход дырок из  $p$ -слоя в  $n$ -слой. В результате в  $n$ -слое оста-

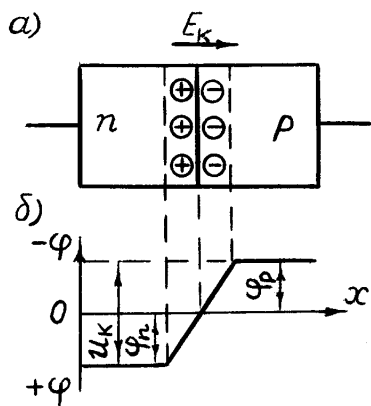


Рис.1.1

ется нескомпенсированный объемный заряд положительных ионов (в основном донорной примеси), а в  $p$ -слое - нескомпенсированный объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов  $U_k = \phi_n - \phi_p$  и электрическое поле напряженностью  $E_k$ . На потенциальной диаграмме  $n$ - $p$ -перехода (рис.1.1б) за нулевой потенциал принят потенциал граничного слоя. В  $n$ - $p$ -переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному перемещению

носителей заряда. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. На рис.1.1б изображен барьер для электронов, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области  $n$  в область  $p$ .

Таким образом, в  $n$ - $p$ -переходе вследствие ухода электронов и дырок вглубь  $p$ - и  $n$ -областей образуется обедненный зарядами слой, называемый **запирающим** и обладающий большим сопротивлением в сравнении с сопротивлением остальных объемов  $n$ - и  $p$ -областей.

Если источник внешнего напряжения положительным полюсом подключить к полупроводнику  $p$ -типа и отрицательным к  $n$ -типа (прямое включение), то электрическое поле, создаваемое в  $n$ - $p$ -переходе прямым напряжением  $U_{пр}$ , действует навстречу контактной разности потенциалов  $U_k$ . Потенциальный барьер понижается до величины  $U_k - U_{пр}$ , уменьшаются толщина запирающего слоя и его сопротивление  $R_{пр}$ .

Если полярность внешнего источника изменить на обратную, то потенциальный барьер возрастает до величины  $U_k + U_{обр}$ . В этом случае через переход могут пройти только неосновные носители: электроны из  $p$ -области в  $n$ -область и дырки во встречном направлении. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных, то прямые токи на несколько порядков больше обратных. Электронно-дырочный переход обладает **выпрямляющими** свойствами, которые используются для создания диодов.

**Диодом** называют полупроводниковый прибор с одним  $n$ - $p$ -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды де-

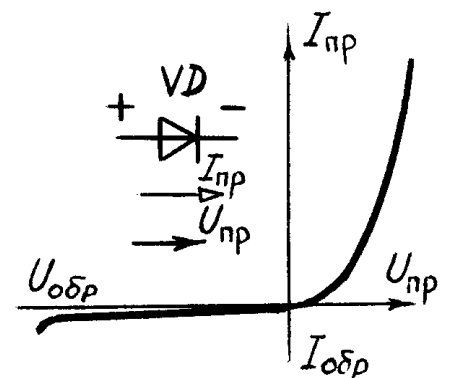


Рис.1.2

ляют на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т.д. Их изготавливают на основе германия или кремния. Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. Вольтамперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение даны на рис.1.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток диода  $I_{пр.мах}$  и максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.мах}$ .

**С т а б и л и т р о н** представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое  $n-p$ -перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис.1.3. Основные параметры стабилитрона: напряжение стабилизации  $U_{ст.ном}$ , минимальный  $I_{ст.мин}$  и максимальный  $I_{ст.мах}$  токи стабилизации, максимальная мощность  $P_{ст.мах}$ .

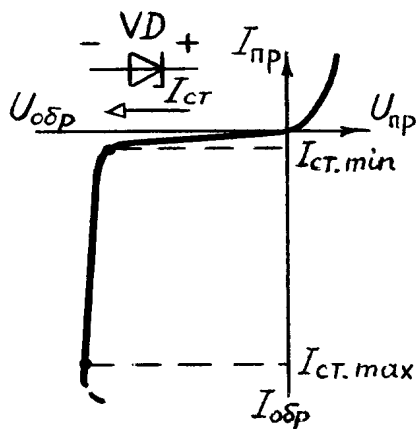


Рис.1.3

**Т и р и с т о р о м** называют полупроводниковый прибор с тремя или более  $n-p$ -переходами и двумя (д и н и с т о р ) или тремя (т р и н и с т о р ) выводами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрит) или высокой проводимости (открыт). Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольтамперная характеристика даны на рис.1.4а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний  $p$ -слой называют анодом (А), внешний  $n$ -слой - катодом (К), а два внутренних слоя - базами. Одна из баз имеет вывод - управляющий электрод (У).

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 - в обратном направлении. До тех пор, пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок  $oa$  характеристики рис. 1.4в). При некотором значении прямого напряжения, равном  $U_{вкл.мах}$ , за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается (точка  $a$ ). Сопротивление его быстро уменьшается (участок  $ab$ ), и тиристор работает на участке  $бв$  характеристики, которая подобна ВАХ диода.

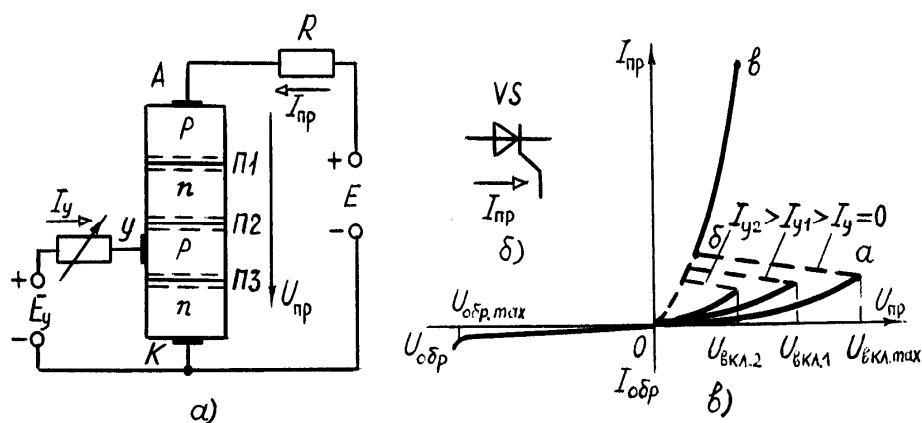


Рис.1.4

Напряжение включения  $U_{\text{вкл.мах}}$  можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда на рис.1.4а вводятся в слой  $p$  от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником  $E_y$ . При увеличении тока управления  $I_y$  характеристика (рис.1.4в) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания  $I_{\text{уд}}$ . Как только  $I_{\text{пр}}$  станет меньше  $I_{\text{уд}}$ , тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока  $I_{\text{уд}}$ , и тогда ток управления  $I_y$  не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами  $I_y$ .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3, и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $U_{\text{обр.мах}}$ .

Основные параметры, используемые при выборе тиристорov: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора  $I_{\text{пр.мах}}$ , предельно допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр.мах}}$ , предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора  $U_{\text{пр.мах}}$ , ток удержания  $I_{\text{уд}}$ .

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

## Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта.

Т а б л и ц а 1 . 1

Вариант	В о п р о с
1	Можно ли с помощью тока управления закрыть тиристор?
2	Рассчитайте прямое сопротивление выпрямительного диода, если $I_{пр}=0,05\text{А}$ , $U_{пр}=0,67\text{В}$ . Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока диода?
3	Можно ли с помощью тока управления включить тиристор при анодном напряжении, практически равном нулю?
4	Рассчитайте статическое сопротивление стабилитрона, если $U_{ст}=4\text{В}$ , $I_{ст}=0,05\text{А}$ . Как изменится $R_{ст}$ при увеличении тока стабилитрона?
5	Нужно ли поддерживать ток управления после включения тиристора для дальнейшей его работы в открытом состоянии?
6	Рассчитайте сопротивление открытого тиристора при $U_{пр}=1\text{В}$ , $I_{пр}=0,19\text{А}$ . Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока тиристора?
7	Как следует изменить ток управления тиристора для уменьшения напряжения его включения?
8	Что такое ток удержания тиристора? Закроется ли тиристор при уменьшении прямого тока, если $I_{пр}>I_{уд}$ ?

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

1. Изучить лабораторный стенд по схеме рис.1.5. Установить регулятор потенциометра  $R2$  в крайнее левое положение, переключателем П2.1 подключить выпрямительный диод.

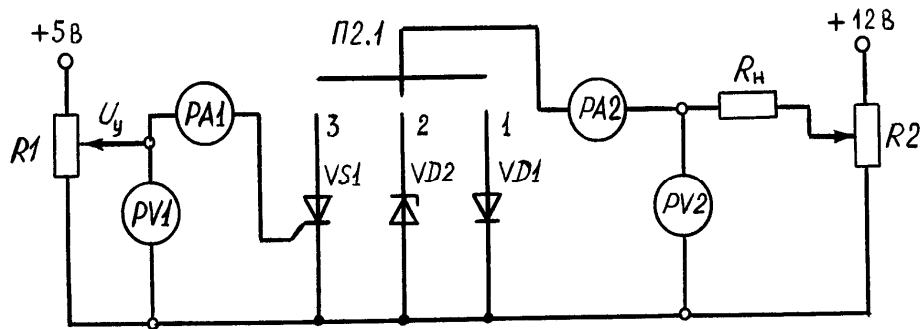


Рис.1.5

2. Включить цепь под напряжение с помощью шнура питания стенда и, регулируя напряжение потенциометром  $R2$ , снять ВАХ диода в прямом направлении  $I_{пр}(U_{пр})$ . Результаты измерений записать в табл.1.2.

Т а б л и ц а 1.2

$I_{пр}, \text{мА}$						
$U_{пр}, \text{В}$						

3. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 2).

4. Установить потенциометр  $R2$  в исходное положение (п.1), затем подключить стабилитрон и снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона  $I_{обр}(U_{обр})$ . Измерения записать в табл.1.3.

5. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 4).

Т а б л и ц а 1.3

$I_{обр}, \text{мА}$						
$U_{обр}, \text{В}$						

6. Снять характеристику включения тиристора  $U_{вкл}(I_y)$ . Для этого переключателем подключить тиристор, регуляторы  $R1, R2$  установить в крайние левые положения. Регулируя анодное напряжение от 0 до 12 В степенями через 2 В и медленно увеличивая ток управления  $I_y$  до момента включения ти-



ристора, зафиксировать и записать в табл.1.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора  $U_{\text{вкл}}(I_y)$ .

Т а б л и ц а 1.4

$U_{\text{вкл}}$ , В	0	2	4	6	8	10	12
$I_y$ , мА							

7. Снять характеристику прямой передачи тока тиристора  $I_{\text{пр}}(I_y)$ : потенциометром  $R1$  установить ток  $I_y=0$ , а потенциометром  $R2$  - напряжение  $U_{\text{пр}}=8$  В, затем увеличивать ток управления до момента включения тиристора, записать значения  $I_y$ ,  $I_{\text{пр}}$ . Увеличивая далее  $I_y$  до 10 мА, убедиться в постоянстве анодного тока. Построить график  $I_{\text{пр}}(I_y)$ .

8. Снять вольтамперную характеристику тиристора  $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$  при  $I_y=5...6$  мА. Результаты измерений представить таблицей, подобно табл.1.2. Построить график ВАХ.

9. Проверить экспериментом ответы на вопросы предварительного задания (варианты 1,3,5...8).

#### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; ответ на вопрос предварительного задания; схема исследований (рис.1.5); таблицы измерений; ВАХ выпрямительного диода, стабилитрона и тиристора; характеристики включения  $U_{\text{вкл}}(I_y)$  и прямой передачи  $I_{\text{пр}}(I_y)$  тиристора; сравнение прямых падений напряжений на диоде, стабилитроне и тиристоре; выводы о возможном практическом использовании выпрямительных диодов, стабилитронов и тиристоров.

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Что представляет собой собственная и примесная электропроводности? 2. Что такое  $n$ - $p$ -переход и как объяснить его вентильные свойства? 3. Чем обусловлена контактная разность потенциалов  $n$ - $p$ -перехода? 4. Охарактеризуйте состояния  $n$ - $p$ -перехода при прямом и обратном включении? 5. Поясните графики ВАХ диода и стабилитрона. Как влияет температура на ВАХ? 6. Каковы основные параметры диода, стабилитрона? 7. Поясните устройство и принцип работы тиристора, вид его ВАХ? 8. Каково влияние тока управления на работу тиристора? 9. Что такое динистор, тринистор, однооперационный и двухоперационный (запираемый) тиристоры? 10. Каковы основные параметры и характеристики тиристора? 11. Приведите примеры использования диодов, стабилитронов, тиристоров.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение устройства и принципа работы транзисторов; снятие их статических характеристик в схемах с общим эмиттером и общим истоком, определение основных параметров; сравнительный анализ.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Б и п о л я р н ы м т р а н з и с т о р о м называют полупроводниковый прибор с двумя  $n-p$ -переходами, образованными слоями полупроводникового материала  $n-p-n$  или  $p-n-p$ -типа. Он имеет три или более выводов, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис.2.1 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов  $n-p-n$ -типа (рис.2.1,а) и  $p-n-p$ -типа (рис.2.1,б).

Средний слой кристалла называют б а з о й . Ее толщина мала, состав-

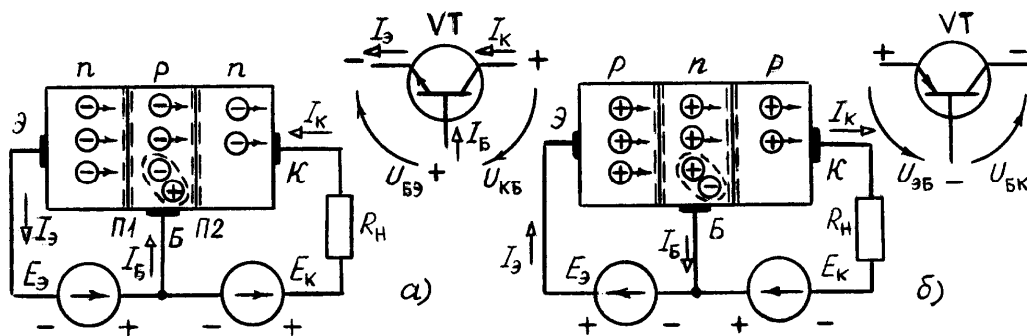


Рис.2.1

ляет несколько микрометров и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют э м и т т е р о м (Э) и к о л л е к т о р о м (К).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю - этот режим называют о т с е ч к о й . Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало, и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют н а с ы щ е н и е м . В усилительном каскаде транзистор работает в а к т и в н о м р е ж и м е , при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном (рис.2.1). Прямосмещенный

эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление - несколько Ом. Коллекторный переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление - несколько МОм, поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузку с большим сопротивлением, практически не изменяя тока коллектора.

Под действием источника  $E_3$  основные носители заряда из эмиттера преодолевают  $n-p$ -переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы  $I_6$ . Так как концентрация дырок (для  $n-p-n$ -типа) и электронов (для  $p-n-p$ -типа) в базе мала, то не все инжектированные из эмиттера заряды рекомбинируют. Большинство зарядов, вследствие диффузии и поля источника  $E_к$ , преодолевает коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_к / \Delta I_3 \text{ при } U_{кб} = const.$$

В современных транзисторах база очень тонкая и  $\alpha = 0,99$  и больше.

Когда  $I_3 = 0$ , то будет небольшой ток через коллекторный переход  $I_{к0}$ , обусловленный движением неосновных носителей заряда.

Рассмотренная на рис.2.1 схема включения транзистора называется схемой с общей базой (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ) - рис.2.2,а. Входным здесь является ток базы  $I_6$ , а выходным - ток коллектора  $I_к$ .

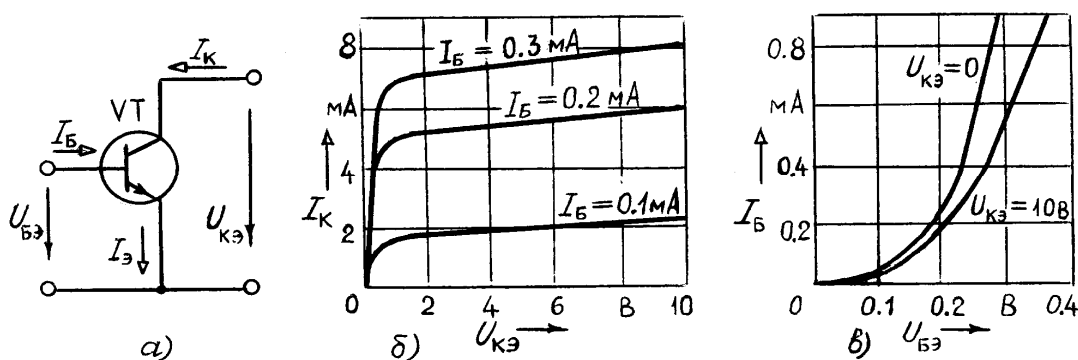


Рис.2.2

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_к / \Delta I_6 \text{ при } U_{кэ} = const, \beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1.$$

Эта схема обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности.

Основными характеристиками транзисторов ОЭ являются

- 1) выходные -  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_б=const$  (рис.2.2,б),
- 2) входные -  $I_б(U_{бэ})$  при  $U_{кэ}=const$  (рис.2.2,в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами в настоящее время используются  $h$ -параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в  $h$ -параметрах. Коэффициенты четырехполюсника ( $h$ -параметры) выражаются следующим образом:

$h_{11}=\Delta U_{бэ}/\Delta I_б$  при  $U_{кэ}=const$  - входное сопротивление  $R_{вх}$ , Ом;

$h_{12}=\Delta U_{бэ}/\Delta U_{кэ}$  при  $I_б=const$  - безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

$h_{21}=\Delta I_k/\Delta I_б$  при  $U_{кэ}=const$  - безразмерный коэффициент передачи тока ( $\beta$ );

$h_{22}=\Delta I_k/\Delta U_{кэ}$  при  $I_б=const$  - выходная проводимость ( $1/R_{вых}$ ), См.

$h$ -параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Биполярные транзисторы управляются током и потребляют заметную мощность от входной цепи. Указанного недостатка лишены полевые транзисторы (ПТ) - это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), поэтому их иначе называют у н и п о л я р н ы м и .

Главным достоинством ПТ является высокое входное сопротивление, т.е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают хорошей воспроизводимостью требуемых параметров.

По способу создания канала различают ПТ с управляющим  $n$ - $p$ -переходом, со встроенным каналом и с индуцированным каналом. Последние два типа относятся к разновидностям МДП-транзисторов с изолированным затвором.

У ПТ с у п р а в л я ю щ и м  $n$  -  $p$  - п е р е х о д о м (рис.2.3,а) канал - это слой полупроводника  $n$ -типа (может быть  $p$ -типа), заключенный между двумя  $n$ - $p$ -переходами. Канал имеет два вывода во внешнюю цепь: и с т о к (И), из которого заряды выходят в канал, с т о к (С), в который заряды входят из канала. Слои  $p$ -типа соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый з а т в о р о м (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

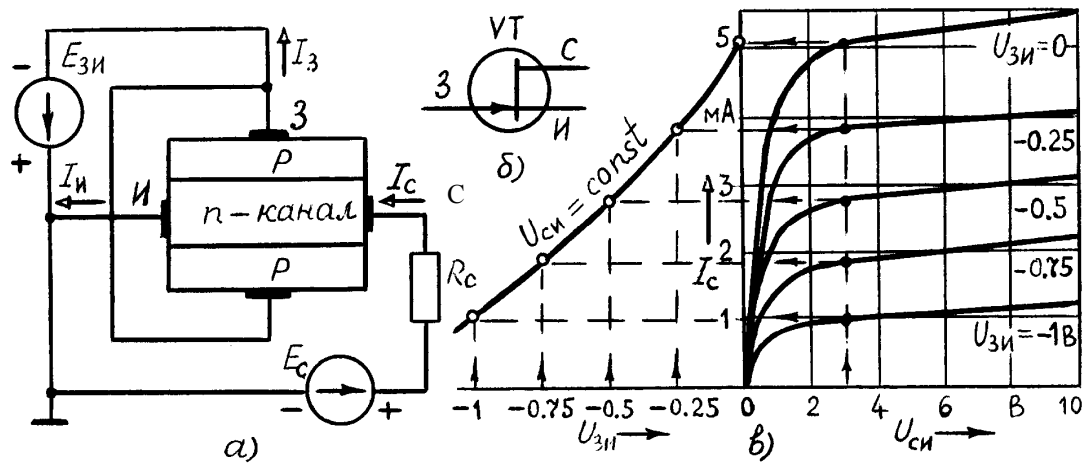


Рис.2.3

Управляющее напряжение между 3 и И является обратным для обоих  $n-p$ -переходов ( $U_{зи} < 0$ ). Оно вызывает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда при  $U_{си} = 0$ . Изменяя  $U_{зи}$ , изменяют ширину  $n-p$ -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего канала и его проводимость. Напряжение  $U_{си} > 0$  вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

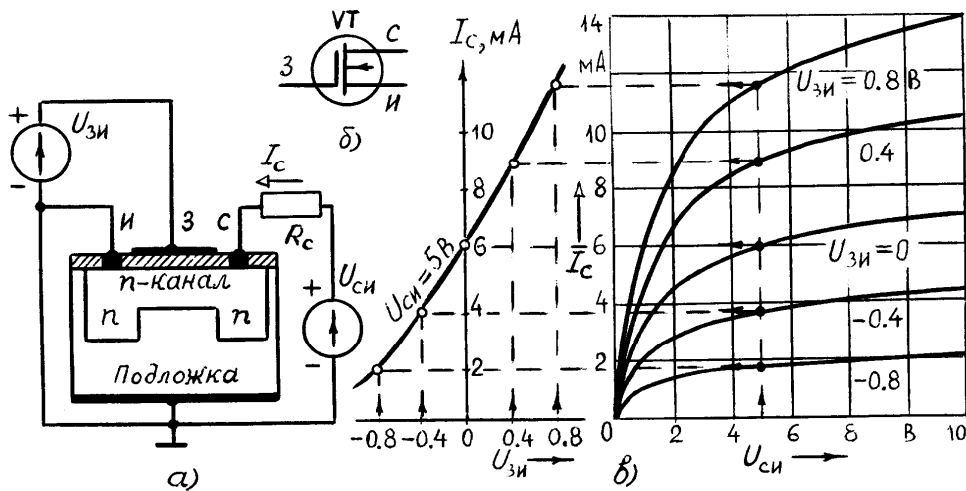


Рис.2.4

Управляющее действие затвора иллюстрируют п е р е д а т о ч н о й (стоко-затворной) характеристикой  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$ . На практике чаще используют в ы х о д н ы е (стоковые) характеристики  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ , по которым строят передаточные (рис.2.3,в).

МДП - т р а н з и с т о р ы с о в с т р о е н н ы м к а н а л о м имеют структуру металл - диэлектрик - полупроводник. У поверхности кристалла полупроводника (подложки  $p$ -типа) созданы две области  $n$ -типа и тонкая перемычка между ними - к а н а л (рис.2.4,а). Области  $n$ -типа имеют вы-

воды: И - и с т о к и С - с т о к . Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика  $SiO_2$ , на которой расположен металлический затвор (З), электрически изолированный от цепи исток - сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора, либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

При отрицательном потенциале на затворе  $U_{зи} < 0$  поле затвора выталкивает электроны из канала в  $p$ -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается и ток стока уменьшается. Такой режим называют режимом обеднения. Характеристики  $I_c(U_{си})$  располагаются ниже кривой при  $U_{зи}=0$  (рис.2.4,в). Если на затвор подано  $U_{зи} > 0$ , то под действием поля затвора канал насыщается электронами из  $p$ -подложки, истока и стока - это режим обогащения.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си}=const$  и стоковые  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи}=const$  характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис.2.4,а,б,в.

МДП - т р а н з и с т о р ы с и н д у ц и р о в а н н ы м к а н а л о м не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при  $U_{зи}=0$  выходной ток  $I_c=0$ . Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе  $U_{зи} > 0$  благодаря притоку электронов из  $p$ -подложки, истока и стока. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

Основными параметрами полевых транзисторов являются крутизна  $S=\Delta I_c/\Delta U_{зи}$  при  $U_{си}=const$  и внутреннее (выходное) сопротивление  $R_i=\Delta U_{си}/\Delta I_c$  при  $U_{зи}=const$ . Иногда пользуются третьим параметром - коэффициентом усиления  $\mu=\Delta U_{си}/\Delta U_{зи}$  при  $I_c=const$ ;  $\mu=SR_i$ .

### Предварительное задание к эксперименту

1. По характеристикам биполярного транзистора ОЭ (рис.2.2,б,в) определить заданный вариантом табл.2.1 параметр транзистора, указать размерность, пояснить физический смысл.

Т а б л и ц а 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Параметр	$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$	$R_{вх}$	$\beta = \Delta I_c/\Delta I_b$	$R_{вых}$	$K_U = \Delta U_{кэ}/\Delta U_{бэ}$
$U_{си}, В$	5	3	10	4	6	4,5	7	5,5

2. По стоковой характеристике полевого транзистора (рис.2.4,в) построить передаточную характеристику  $I_c(U_{зи})$  при заданном в табл.2.1 напряжении  $U_{си}$ . Определить крутизну  $S$ , внутреннее сопротивление  $R_i$  при  $U_{зи}=0$  и коэффициент усиления  $\mu$ .

### 3. Сравнить свойства биполярного и полевого транзисторов.

#### П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

1. Подготовить схему рис.2.5 для исследования биполярного транзистора  $VT1$ : регуляторы  $R1$  и  $R2$  установить в крайние левые положения, переключатель  $\Pi 2$  установить в положение 4. После проверки преподавателем включить схему к источнику напряжения.

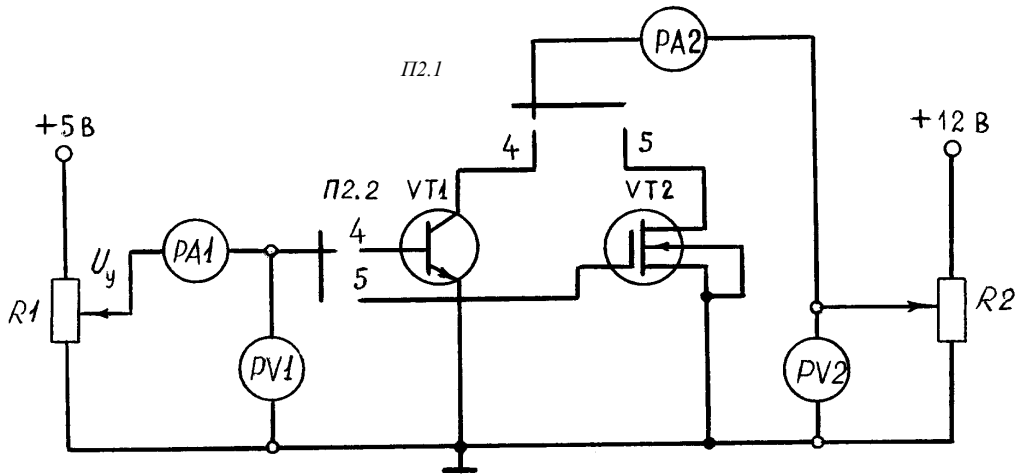


Рис.2.5

2. Снять семейство выходных (коллекторных) характеристик транзистора  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_б=const$ . Для этого тумблер управляющего напряжения включить в положение «+», регулятором  $R1$  установить значение  $I_б$  согласно табл. 2.2 и, изменяя регулятором  $R2$  напряжение  $U_{кэ}$  от 0 до 8...10 В, записать значения тока коллектора  $I_k$  в табл.2.2.

Проверить работу транзистора при  $I_б=0$ .

Т а б л и ц а   2.2

$U_{кэ}, В$		0	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	8...10
$I_k, мА$ при	$I_б=0,1 мА$							
	$I_б=0,2 мА$							
	$I_б=0,3 мА$							
	$I_б=0,4 мА$							

3. Снять семейство входных характеристик  $U_{бэ}(I_б)$  при  $U_{кэ}=0$  и при  $U_{кэ}=8...10 В$ . Для этого регулятором  $R2$  установить напряжение  $U_{кэ}$  и, поддерживая его неизменным, изменять регулятором  $R1$  ток базы согласно табл.2.3. Значения напряжения  $U_{бэ}$  записать в табл.2.3.

Т а б л и ц а 2.3

$I_{бэ}, \text{мА}$		0	0,1	0,2	0,4	0,6
$U_{бэ}, \text{мВ}$ при	$U_{кэ}=0$					
	$U_{кэ}=8...10$					

4. Регуляторы  $R1$  и  $R2$  установить в крайние левые положения. Переключатель П2.1 установить в положение 5 для исследования полевого транзистора  $VT2$ .

5. Снять семейство выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ . С этой целью регулятором  $R1$  поочередно установить заданные табл.2.4 значения напряжения  $U_{зи}$  и, поддерживая  $U_{зи} = const$ , изменять регулятором  $R2$  напряжение  $U_{си}$  от 0 до 8...10В. Значения тока стока записать в табл.2.4 (во избежание повреждения транзистора ток стока не должен превышать 13 мА).

Т а б л и ц а 2.4

$U_{си}, \text{В}$		0	0,2	0,5	1,0	2	3	4	6	8...10
$I_c, \text{мА}$ при	$U_{зи}=0,8 \text{ В}$									
	$U_{зи}=0,4 \text{ В}$									
	$U_{зи}=0$									
	$U_{зи}=-0,4 \text{ В}$									
	$U_{зи}=-0,8$									

6. Снять передаточные характеристики  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$ . Для этого регулятором  $R2$  установить заданные табл. 2.5 значения напряжения  $U_{си}$  и, изменяя  $U_{зи}$  согласно табл.2.5, записать значения тока стока.

Т а б л и ц а 2.5

$U_{зи}, \text{В}$		0,8	0,4	0	-0,4	-0,8
$I_c, \text{мА}$ При	$U_{си}=5 \text{ В}$					
	$U_{си}=8...10 \text{ В}$					

7. По результатам п.п.2,3 и 5,6 построить характеристики. По характеристикам п.п.2,3 определить параметр биполярного транзистора, заданный вариантом предварительного задания. По характеристикам п.п.5,6 определить крутизну  $S$ , внутреннее сопротивление  $R_i$  и коэффициент усиления  $\mu$  полевого транзистора. Сравнить эти значения с полученными в предварительном задании.



## С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; расчет предварительного задания к эксперименту с вычерченными на миллиметровой бумаге графиками характеристик биполярного и полевого транзисторов (рис.2.2,б,в; 2.4,в); сравнительный анализ биполярного и полевого транзисторов; схему экспериментальной установки (рис.2.5); таблицы измерений; на графиках рис.2.2,б,в и 2.4,в нанести экспериментальные точки; зависимость  $\beta(I_K)$  при  $U_{кэ}=10$  В; расчет максимального значения крутизны передаточной характеристики полевого транзистора при  $U_{си}=10$  В.

## К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Как образуется *n-p*-переход и каковы его свойства? 2. Каково устройство биполярного транзистора и принцип его работы в схеме с общей базой и с общим эмиттером. 3. Как изображают на схемах транзисторы *n-p-n* и *p-n-p*-типов? 4. Какова полярность напряжений между электродами транзисторов *n-p-n* и *p-n-p* типов? 5. Какие функции выполняет эмиттер и коллектор? 6. Объясните характер входных и выходных характеристик биполярного транзистора. 7. Почему запрещается отключать вывод базы при наличии напряжения на эмиттере и коллекторе? 8. Что представляет собой обратный ток коллекторного перехода? 9. Объясните физический смысл *h*-параметров транзисторов и как они определяются по входным и выходным характеристикам? 10. Почему коэффициент усиления по току  $\beta$  не остается постоянным при изменении тока эмиттера? 11. Каковы конструкции полевых транзисторов с *n-p*-переходом и с изолированным затвором? 12. Принцип действия полевых транзисторов, их основные характеристики и параметры. 13. Что такое напряжение отсечки полевого транзистора, как оно определяется? 14. Что такое ток насыщения транзистора и как он определяется? 15. Каковы преимущества полевых транзисторов перед биполярными?

## Лабораторная работа № 3

### ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение структуры, основных характеристик фотодиода и фоторезистора, принципа функционирования простейших устройств на оптронах.

#### О б щ и е с в е д е н и я

О п т о э л е к т р о н и к о й называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические средства и методы. В оптоэлектронике световой луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники обладают некоторыми существенными преимуществами по сравнению с чисто электронными устройствами. В них обеспечивается полная гальваническая развязка между входными и выходными цепями. Отсутствует обратное влияние приемника сигнала на его источник. Облегчается согласование между собой электрических цепей с разными входными и выходными сопротивлениями. Оптоэлектронные приборы имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, высокое быстродействие и большую информационную емкость оптических каналов связи ( $10^{13}$  -  $10^{15}$  Гц). На оптические цепи не оказывают влияние различные помехи, вызванные электрическими и магнитными полями.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: низкая температурная и временная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая мощность; сложность изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с ИМС, необходимость жестких требований к технологии изготовления.

Оптоэлектронные приборы излучают и преобразуют излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра. Основным компонентом оптоэлектроники является пара с фотонной связью, называемая оптроном. Простейший оптрон можно представить четырехполюсником, состоящим из трех элементов: источник света - 1, световод - 2 и приемник света - 3 (рис.3.1).

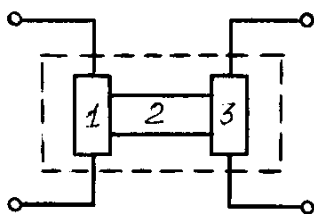


Рис.3.1

Входной сигнал в виде импульса или перепада входного тока возбуждает фотоизлучатель и вызывает световое излучение. Световой сигнал по световоду попадает в фотоприемник, на выходе которого образуется электрический импульс или перепад выходного тока.

В оптронных устройствах в качестве источников света применяются обычно лампы накаливания, электролюминесцентные конденсаторы или светодиоды. В качестве приемников света используют фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры, фототранзисторы и различные комбинации этих приборов. Условные обозначения некоторых типов оптронов показаны на рис.3.2 (а) - диодный, б) - резисторный, в) - динисторный).

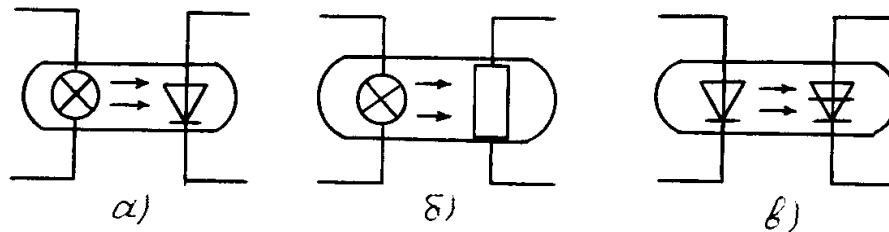


Рис.3.2

Работа фоторезисторов основана на явлении изменения сопротивления вещества под воздействием внешнего светового излучения. Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности

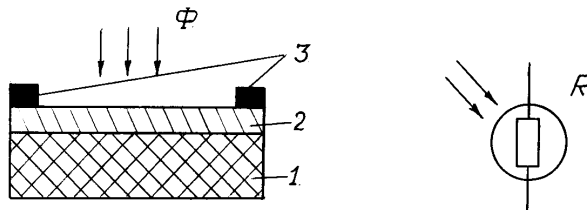


Рис.3.3

которой нанесены электроды. Структура фоторезистора и условное обозначение показаны на рис.3.3, где 1 - диэлектрическая пластина; 2 - полупроводник; 3 - контакты фоторезистора.

Основными характеристиками фоторезистора являются:

1. Вольтамперная характеристика - зависимость тока  $I$  через фоторезистор от напряжения  $U$ , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока  $\Phi$ , либо освещенности  $E$  (рис.3.4). Ток при  $\Phi=0$  называется темновым током  $I_T$ , при  $\Phi>0$  общим током  $I_{общ}$ . Их разность равна фототок  $I_\Phi = I_{общ} - I_T$ .
2. Энергетическая характеристика - это зависимость фототока от светового потока, либо освещенности при  $U=const$ . В области малых  $\Phi$  она линейна, а при увеличении светового потока рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности ре-

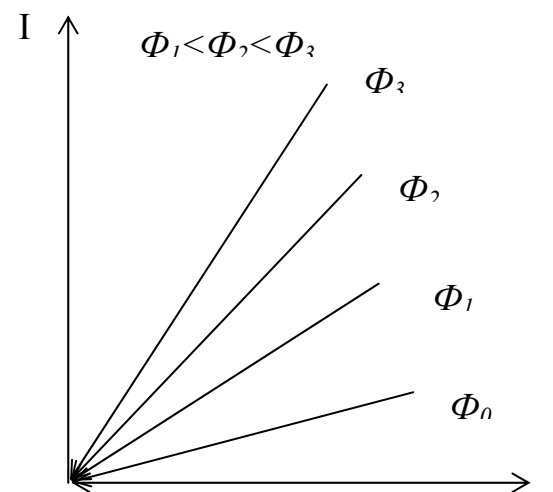


Рис.3.4

комбинации носителей заряда (рис.3.5). Энергетическая характеристика иногда называется люксампеной, в том случае, если по оси абсцисс откладывают освещенность  $E$  в люксах.

3. Чувствительность - это отношение выходной величины к входной. В зависимости от того, какой величиной характеризуется излучение, различают токовую чувствительность к потоку

$$S_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}$$

и токовую чувствительность к освещенности  $E$

$$S_E = \frac{I_{\Phi}}{E}$$

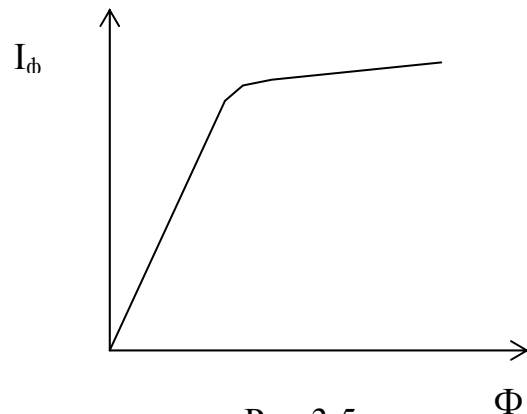


Рис.3.5

В качестве одного из основных параметров фоторезистора используют величину удельной интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1В.

$$S_{\Phi \text{ инт.уд}} = \frac{I_{\Phi}}{(\Phi U)}$$

У промышленных фоторезисторов удельная интегральная чувствительность имеет пределы десятые, сотые доли  $\frac{\text{мА}}{\text{В} \cdot \text{лм}}$  при освещенности  $E=200$  лк.

Важными характеристиками фоторезистора являются также: спектральная характеристика; граничная частота сигнала, модулирующая световой поток; температурный коэффициент фототока и пороговый поток.

Фотодиоды имеют структуру обычного  $p-n$ -перехода (рис.3.6), где  $a$ ) - условное обозначение фотодиода,  $b$ ) - структура фотодиода. Вследствие оптического возбуждения в  $p$  и  $n$  областях возникает неравновесная концентрация носителей заряда.

На границе перехода неосновные носители заряда под влиянием электрического поля, перебрасываются через переход в область, где они являются основными носителями. Электрический ток, созданный ими есть полный фототок. Если  $p-n$ -переход разомкнут, то перенос носителей заряда, генерируемых светом, приводит к накоплению отрицательного в  $n$ -области и положительного в  $p$ -области зарядов. Новое равновесное состояние соответствует меньшей высоте потенциального барьера, равной  $(U_k - E_{\Phi})$ . ЭДС  $E_{\Phi}$ , возникающую при этих процессах, на значение которой снижается потенциальный

барьер  $U_k$  в  $p-n$ -переходе, называют ф о т о э л е к т р о д в и ж у щ е й с и л о й (фото-ЭДС) В данной ситуации фотодиод работает в режиме фотогенератора, преобразуя световую энергию в электрическую.

Фотодиод может работать совместно с внешним источником (рис.3.6в). При освещении фотодиода поток неосновных носителей заряда через  $p-n$ -переход возрастает. Увеличивается ток во внешней цепи, определяемый напряжением источника и световым потоком. Значение фототока можно найти из выражения  $I_{\phi} = S_{\text{инт}} \Phi$ , где  $S_{\text{инт}}$  - интегральная чувствительность. Вольтамперные характеристики освещенного  $p-n$ -перехода показаны на рис.3.9,б. Фототок суммируется с обратным током теплового происхождения.

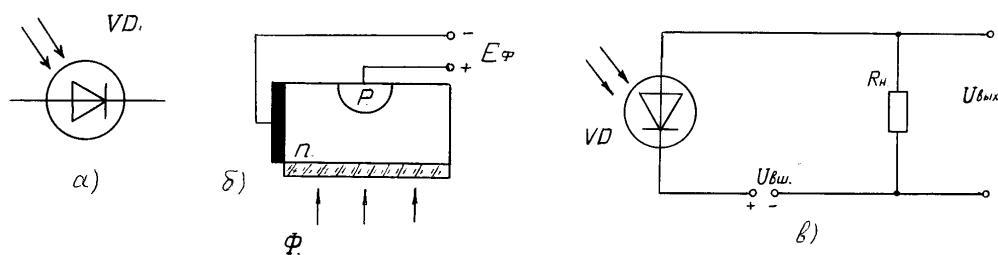


Рис.3.6

К основным характеристикам фотодиода относят:

1. Энергетические характеристики, которые связывают фототок со световым потоком. Причем фотодиод может быть включен без

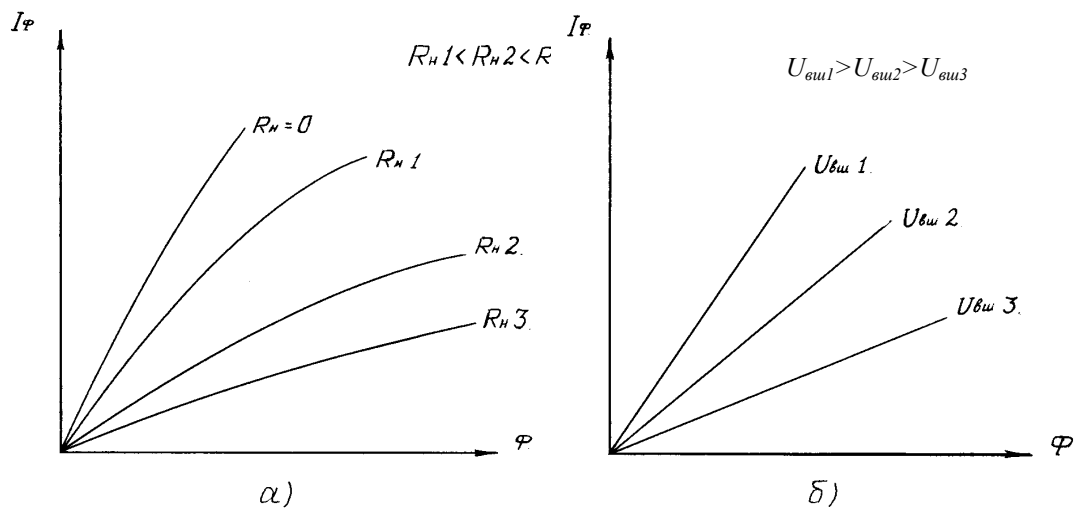


Рис.3.7

внешнего источника ЭДС (генераторный режим), так и с внешним источником (рис.3.7: а) - генераторный режим; б) - при работе с внешним источником).

2. **Абсолютные и относительные спектральные характеристики** – это зависимости абсолютной либо относительной чувствительности от длины волны регистрируемого потока излучения. Они аналогичны соответствующим характеристикам фоторезистора и зависят от материала полупроводника и введенных примесей.

В качестве фотоприемников в оптронных устройствах также используются **фототиристоры и фототранзисторы**.

У **фототранзисторов** интегральная чувствительность значительно выше, чем у диода и составляет сотни миллиампер на люмен.

Биполярный фототранзистор представляет собой обычный транзистор, но в корпусе его сделано прозрачное окно, через которое световой поток воздействует на область базы, вызывая в ней генерацию носителей зарядов. Они диффундируют к коллекторному переходу, где происходит их разделение. Дырки под воздействием поля коллектора идут из базы в коллектор и увеличивают ток коллектора, а электроны, оставаясь в базе, повышают прямое напряжение эмиттерного перехода, что усиливает инжекцию дырок в этом переходе. Если базовый вывод транзистора не подключается к схеме, то такое включение называют с “плавающей” базой. В этом случае режим работы транзистора будет сильно зависеть от температуры. Вывод базы используют для задания оптимального режима работы фототранзистора, при котором достигается максимальная чувствительность к световому потоку.

**Фототиристоры** имеют четырехслойную структуру (рис.3.8,а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии

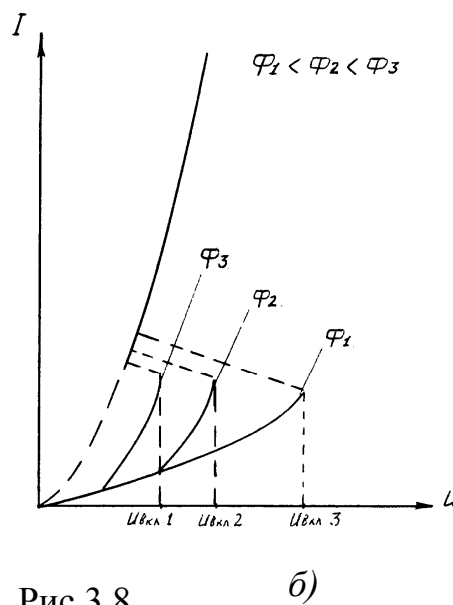
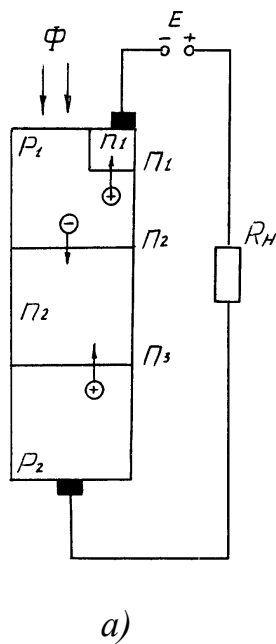


Рис.3.8

влияния света на область базы  $p_1$  в этой области генерируются электроны и дырки.

Электроны, попадая в область перехода  $П2$ , находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. В результате происходит увеличение инжекции носителей из переходов  $П1$  и  $П3$ . Ток через структуру прибора лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой

поток, действующий на тиристор, тем при меньшем напряжении включается

ется тиристор (рис.3.8,б).

Фототиристоры могут успешно применяться в различных автоматических устройствах в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей. Важные достоинства тиристоров: малое потребление мощности во включенном состоянии, малые габариты, отсутствие искрения, малое время включения.

### Предварительное задание к эксперименту

Используя вольтамперные характеристики (рис.3.9: а) – фоторезистора, б) - фотодиода), а также данные таблицы 3.1, для заданного вариантом  $U$  найти значения фототока  $I_{\phi}$ , и по полученным значениям построить энергетическую характеристику фотоэлектронного прибора. Определить величину токовой чувствительности к освещенности  $S_E$  при  $E=200$ лк.

Т а б л и ц а 3 . 1

Тип прибора	Фоторезистор				Фотодиод			
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Напряжение на приборе	10	8	6	4	2	4	8	12

### П о р я д о к в ы п о л н е н и я э к с п е р и м е н т а

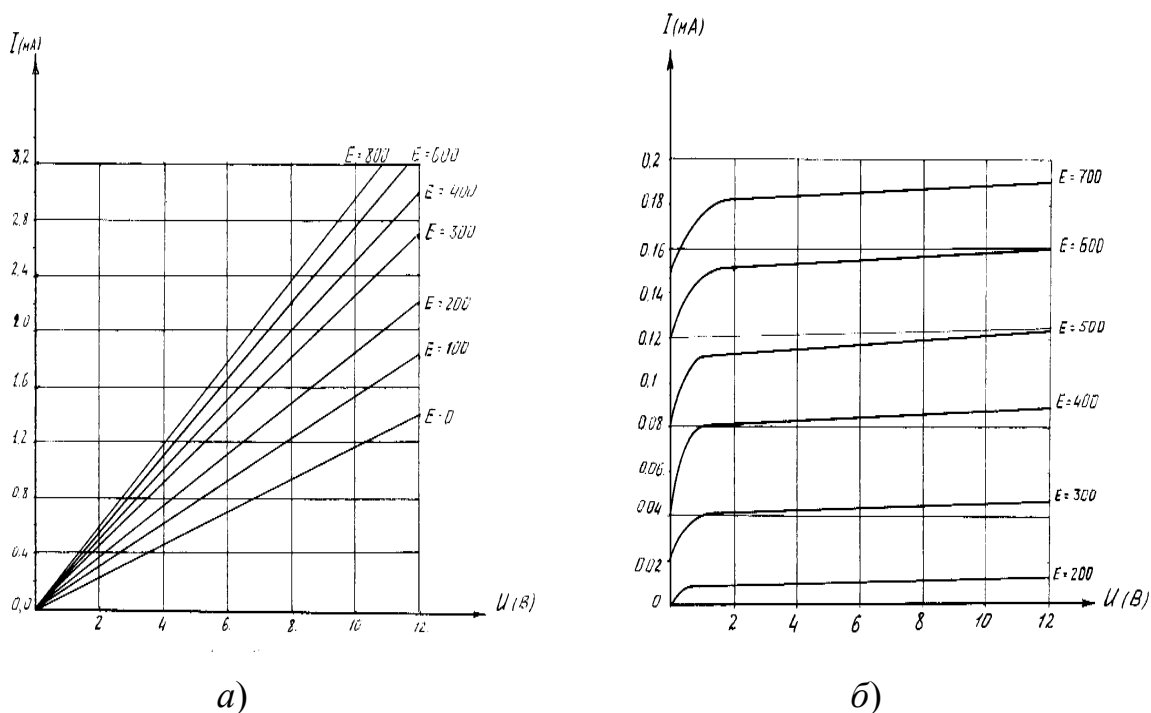


Рис.3.9

Перед началом выполнения работы привести стенд в исходное состояние. Для этого ручки регуляторов Р1 и Р2 повернуть влево до упора. выключатели В1, В2, В3, В5 установить в нижнее положение. Ручку управления Р3 установить в положение А. Соединить с помощью перемычки гнезда Г1 и Г2. Подключить к гнездам Г1 и Г6 цифровой вольтметр. Переключатель пределов измерения микроамперметра В4 установить в положение наименьшей чувствительности  $\times 100$  и в дальнейшем, перед проведением очередного эксперимента, возвращать его в это положение. Подключить стенд к сети. Тумблер В5 установить в верхнее положение.

**Примечание:** в процессе измерений не допускать «зашкаливания» прибора!

1. Снять вольтамперную характеристику  $I_{\Phi}(U)$  фоторезистора. Для этого ручку переключателя Р3 установить в положение А, а тумблер В1 перевести в верхнее положение. Данные эксперимента занести в таблицу 3.2.

Т а б л и ц а 3 . 2

$U, В$		2	4	6	8	10	12
$I_{\Phi},$ мкА	$E=0$ лк						
	$E=200$ лк						
	$E=400$ лк						
	$E=1000$ лк						

2. Вернуть в левое положение ручки регуляторов Р1 и Р2. Установить ручкой регулятора Р1 напряжение на фоторезисторе  $U=3 В$  и снять зависимость фототока от освещенности  $I_{\Phi}(E)$ , задавая значение  $E$  регулятором Р2, поддерживая постоянным напряжение на фоторезисторе ручкой Р1. Полученные значения занести в таблицу 3.3.

Т а б л и ц а 3 . 3

$E, лк$	0	100	200	400	1000	1200	1500	2000
$I_{\Phi}, мкА$								

3. Соединить перемычкой гнезда Г1 и Г3, тумблер В1 должен находиться в верхнем положении. Снять вольтамперные характеристики фотодиода для различных значений освещенности  $E$ . Напряжение на фотодиоде устанавливать регулятором Р1. Полученные данные занести в таблицу 3.4.

Т а б л и ц а 3 . 4

$U, В$		2	4	6	8	10	12
$I_{\Phi}, мкА$	$E=200$ лк						
	$E=400$ лк						
	$E=1000$ лк						

4. Для снятия энергетических характеристик фотодиода в генераторном режиме установить тумблер В1 в нижнее положение, ручки регуляторов Р1 и Р2 в крайнее левое положение. Соединить перемычкой гнезда Г1 с Г3 (в ре-



жиме  $R_H=0$ ), с Г4 ( $R_H=200$  Ом), с Г5 ( $R_H=500$  Ом). Снять зависимость фототока  $I_\phi$  от освещенности  $E$ . Данные занести в таблицу 3.5.

Т а б л и ц а 3 . 5

$E$ , лк		200	400	1000	1200	1500	2000
$I_\phi$ , мкА	$R_H=0$						
	$R_H=200$ Ом						
	$R_H=500$ Ом						

5. Перевести тумблер В1 в верхнее положение и снять энергетические характеристики фотодиода для случая, когда напряжение внешнего источника  $U_{вн}$  отлично от нуля. Полученные значения занести в таблицу 3.6.

Т а б л и ц а 3 . 6

$E$ , лк		200	400	1000	1200	1500	2000
$I_\phi$ , мкА	$U_{вн}=2$ В						
	$U_{вн}=4$ В						

7. Исследовать работу порогового устройства, состоящего из динисторного оптрона и элемента, выполняющего функцию логического И. При подаче на вход элемента И двух логических единиц (тумблеры В1 и В2 в верхнем положении), на выходе формируется сигнал высокого уровня, о чем сигнализирует зажигающийся светодиод  $VD1$ . В результате этого загорается и светодиод оптрона  $VD2$ , освещающий динистор оптрона и вызывающий его включение, о чем сигнализирует лампочка Л1.

По окончании работы тумблер В5 перевести в нижнее положение, отключить стенд от сети.

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

1. Расчет предварительного задания к эксперименту. 2. Таблицы экспериментальных значений. 3. Энергетическая характеристика, построенная по данным предварительного задания и сравнительный анализ ее вида с аналогичной характеристикой, построенной по экспериментальным данным. 4. Вольтамперные и энергетические характеристики фоторезистора, построенные по снятым значениям. 5. Вольтамперные и энергетические характеристики фотодиода в генераторном режиме и режиме с внешним источником напряжения.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Перечислите достоинства и недостатки оптоэлектронных приборов. 2. Назовите основные характеристики фоторезисторов. 3. Почему световые характеристики фоторезисторов нелинейны? 4. Что такое удельная чувствительность фоторезистора? 5. Назовите возможные режимы работы фотодиодов. 6. Опишите механизм образования фото-ЭДС при освещении светом р-п-перехода. 7. Перечислите основные параметры фотодиода.

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение устройства, принципа действия и режимов работы однофазных выпрямителей и сглаживающих фильтров.

#### О б щ и е с в е д е н и я

В ы п р я м и т е л е м называют устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии источника переменного тока в электрическую энергию, потребляемую приемником постоянного тока. Такое преобразование необходимо в том случае, когда первичным источником электроэнергии является однофазная (трехфазная) сеть или автономный генератор переменного тока, а потребитель электроэнергии работает на постоянном токе.

Для потребителей постоянного тока мощностью до нескольких сотен ватт используют о д н о ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к однофазной сети переменного тока. Однофазные выпрямители, как правило, входят в состав и с т о ч н и к о в в т о р и ч н о г о э л е к т р о - п и т а н и я (ИВЭ) радио- и телевизионных, измерительных, вычислительных электронных устройств, применяют для питания электродвигателей постоянного тока, зарядки аккумуляторных батарей и др.

Для потребителей постоянного тока мощностью более 1 кВт используют т р е х ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к промышленной трехфазной сети.

Структурная схема традиционного однофазного источника питания постоянного тока представлена на рис.4.1.

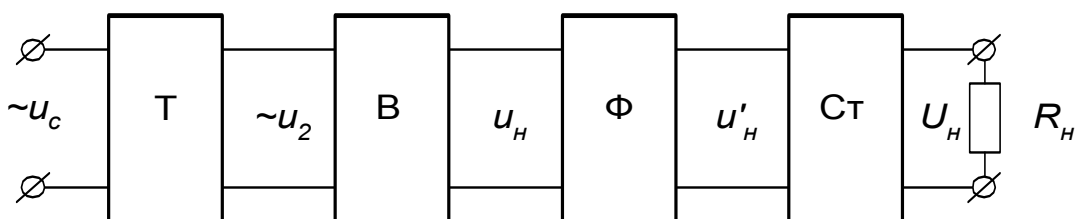


Рис. 4.1

Основным и обязательным элементом схемы является в ы п р я м и - т е л ь (В) на полупроводниковых вентилях. Принцип действия любого выпрямителя основан на односторонней проводимости вентилях, преобразующих переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя может быть включен сглаживающий фильтр (Ф), а при необхо-

димости постоянства величины напряжения  $U_n$  на нагрузке - стабилизатор напряжения (Ст). Выпрямитель подключается к питающей сети переменного тока через трансформатор (Т) в случае, если требуется преобразование уровня напряжения питающей сети  $U_c$  к необходимому уровню напряжения нагрузки  $U_n$ , а также для электрического разделения цепей.

Основными недостатками выпрямителей с трансформаторным входом являются большие габариты, масса трансформатора и сглаживающего фильтра. В малогабаритных ИВЭ электронной аппаратуры применяют схемы с бестрансформаторным входом, работа которых основана на многократном преобразовании электрической энергии. В таких схемах выпрямитель подключен непосредственно к питающей сети, а согласование уровней напряжений сети и нагрузки производится трансформатором на повышенной промежуточной частоте переменного тока, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформатора и фильтра.

В данной работе рассматриваются два вида неуправляемых однофазных выпрямителей: **о д н о п о л у п е р и о д н ы й** и **д в у х п о л у п е р и о д н ы й м о с т о в о й**. В неуправляемых выпрямителях нет возможности регулировать величину выпрямленного напряжения, потому что они выполняются на неуправляемых вентилях - **п о л у п р о в о д н и к о в ы х д и о д а х**. При анализе работы выпрямителей будем считать вентили и трансформатор идеальными, т.е. сопротивление диодов при прямом включении равно нулю, при обратном включении - бесконечности; для трансформатора пренебрегаем сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток.

**О д н о ф а з н ы й о д н о п о л у п е р и о д н ы й** выпрямитель содержит один вентиль  $VD$ , включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора  $T$  последовательно с нагрузкой  $R_n$  (рис.4.2,а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на активную нагрузку без фильтра, представлены на рис.4.2,б. В первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора  $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ , когда оно положительно, диод  $VD$  открыт, т.к. на его аноде действует положительный потенциал. На этом интервале времени ( $0 - T/2$ ) через нагрузку будет протекать ток

$$i_n = \frac{U_{2m}}{R_n} \sin(\omega t), \text{ являющийся для диода}$$

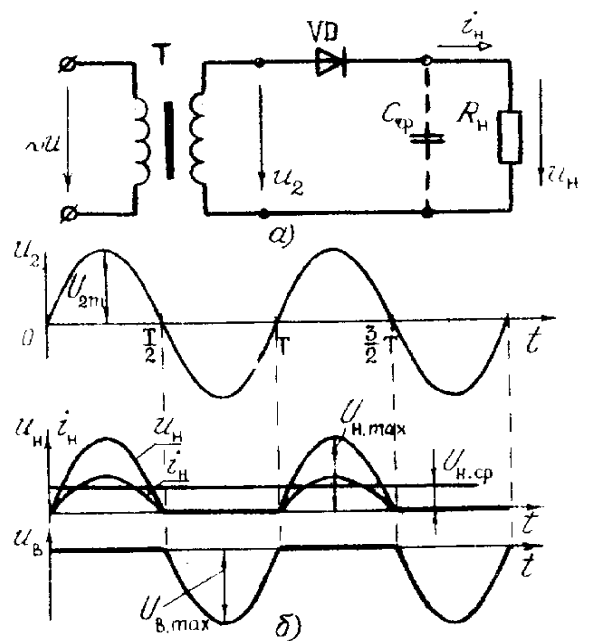


Рис.4.2

прямым током. При этом  $u_B=0$ ,  $u_H=u_2=U_{2m} \sin(\omega t)$ . На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, отрицательного потенциала на аноде диод  $T$ )  $i_H=0$ ,  $u_H=0$ , напряжение на вентиле  $u_B=$  ным напряжением диода.

В результате такой работы вентиля в течение только одного полупериода пер на нагрузке периодическое несинусои значение которого может быть определено

$$U_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

Средний ток через вентиль  $I_{пр}$  рав Максимальное напряжение на закры

$$U_{обр.м} = U_{2m} = \sqrt{2}U$$

Действующее значение напряжения в

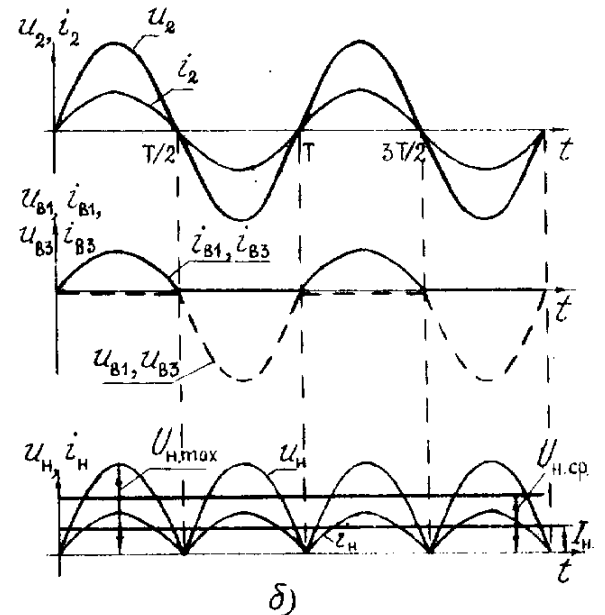
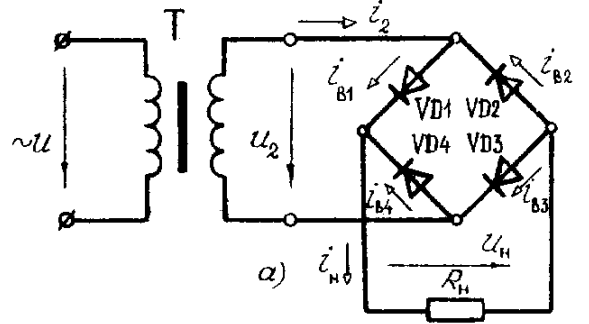
$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}U$$

Действующее значение тока вторичи

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi U}{R_H}$$

Расчетная мощность трансформатор

$$S_T = (S_1 + S_2) / 2 \approx S_2 = U_2 I_2$$



Недостатками однополупериодного выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напря Рис. 4.3 нужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора ( $S_T=3,5P_H$ ), низкие коэффициенты использования вентилях ( $K_I=I_{в.макс}/I_H=\pi$ ,  $K_U=U_{обр.макс}/U_H=\pi$ ), малый КПД выпрямителя  $\eta=0,481$ .

Однополупериодные выпрямители применяются для питания мало- мощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных уста- новках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентилях, включенных по мостовой схеме (рис.4.3,а). К одной диагонали моста подано переменное напряжение  $u_2=U_{2m} \sin(\omega t)$ , к другой - подключена нагрузка  $R_H$ . Временные диаграммы напряжений и токов представлены на рис.4.3,б. В первый полупериод напряже- ния  $u_2$ , когда потенциал на аноде  $VD1$  положительный, диоды  $VD1$  и  $VD3$  от- крыты, и ток нагрузки протекает через  $VD1$ ,  $R_H$  и  $VD3$ . В этом интервале вре- мени  $u_H=u_2$ , диоды  $VD2$  и  $VD4$  закрыты и находятся под обратным напряже- нием. На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, и диоды  $VD1$  и  $VD3$  будут теперь в закрытом состоянии находиться под обрат-

ным напряжением, а диоды  $VD2$  и  $VD4$  - открыты. Ток  $i_n$  будет протекать через  $VD2$ ,  $VD4$  и через нагрузку  $R_n$  в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

В результате такой попарной работы диодов ток в нагрузке будет протекать в течение двух полупериодов и вызывать напряжение  $u_n$ , среднее значение которого будет в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении

$$U_n = 2 \cdot U_m / \pi = 0,9U_2; U_2 = 1,11U_n; I_2 = 1,11I_n.$$

Так как пары диодов проводят ток нагрузки поочередно по полпериода, то прямой ток вентилей будет равен  $I_{пр} = 0,5I_n$ .

Максимальное напряжение на закрытых вентилях  $U_{обр.т} = U_{2m} = 1,57U_n$ .

Расчетная мощность трансформатора  $S_T = S_1 = S_2 = U_2 I_2 = 1,23P_n$ .

Д в у х п о л у п е р и о д н ы й выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие преимущества: выпрямленный ток и напряжение вдвое больше, значительно меньший уровень пульсаций  $u_n$ , вентили выбираются по половине тока нагрузки, хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника. Мостовая схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.

Для оценки пульсаций выпрямленного напряжения пользуются понятием к о э ф ф и ц и е н т а п у л ь с а ц и й  $q$ , который равен отношению амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению:  $q = U_{1Гм} / U_{н.ср}$ .

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют с г л а ж и в а ю щ и е ф и л ь т р ы . Основными элементами п а с с и в н ы х фильтров являются реактивные элементы: к о н д е н с а т о р ы и д р о с с е л и . На базе т р а н з и с т о р о в и о п е р а ц и о н н ы х усилителей выполняются более сложные а к т и в н ы е фильтры. Эффективность фильтра характеризуется к о э ф ф и ц и е н т о м с г л а ж и в а н и я , равным отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра

$$S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}.$$

Е м к о с т н о й фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение  $u_n = u_C$  определяется процессами заряда и разряда конденсатора. В однополупериодном выпрямителе конденсатор  $C_\phi$  будет заряжаться через вентиль,

если  $u_2 > u_C$  (интервал времени  $t_1 - t_2$  на рис. 4.4). Когда  $u_2 < u_C$  ( $t_2 - t_3$ ), вентиль закрыт, и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки  $R_n$  с постоянной времени  $\tau_p = C_\phi R_n$ ; при этом  $u_n = u_C = U_{Cmax} e^{-t/\tau_p}$ .

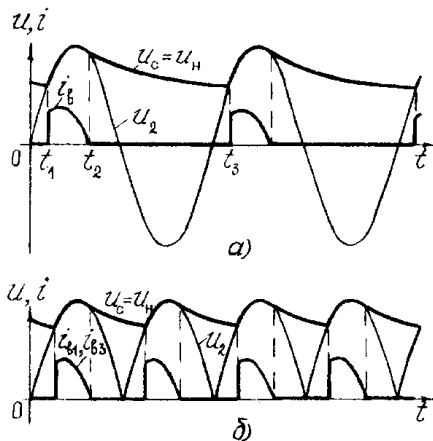


Рис. 4.4

Достоинством емкостного фильтра является простота, повышенное напряжение на нагрузке и хорошее сглаживание при малых выходных токах. С увеличением тока нагрузки при уменьшении  $R_n$  уменьшается постоянная разряда конденсатора и возрастает коэффициент пульсаций на нагрузке. Емкостной фильтр целесообразно использовать при высокоомной нагрузке с малым значением выпрямленного тока.

И н д у к т и в н ы й фильтр состоит из индуктивной катушки (дросселя), включаемой последовательно с нагрузкой. Дроссель с

индуктивностью  $L_\phi$  не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, но подавляет переменные составляющие тока, для которых реактивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты высших гармоник.

Недостатками индуктивных фильтров являются большие габариты и масса дросселя, поэтому применяются такие фильтры преимущественно в трехфазных выпрямителях большой и средней мощности при низкоомной нагрузке с большими значениями токов.

Для более эффективного сглаживания применяют составные или многозвенные фильтры, коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев  $S_\phi = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n$ . К составным фильтрам можно отнести  $\Gamma$ - и  $\Pi$ -образные  $LC$ -фильтры (см. табл. 4.1).

Расчет выпрямителя сводится к выбору вентиляй, определению типа и параметров фильтра и трансформатора. Исходными данными к расчету являются напряжение  $U_1 = U_c$  и частота  $f_1$  питающей сети, напряжение  $U_n$  и мощность  $P_n$  нагрузки.

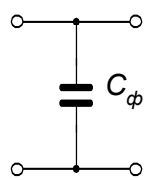
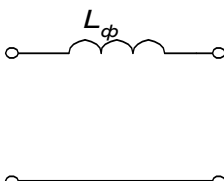
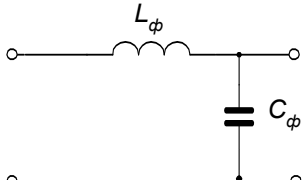
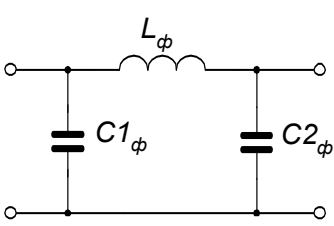
Для надежной работы вентиляй их выбирают из условия, чтобы среднее значение тока через открытый вентиль  $I_{пр}$  и максимальное обратное напряжение на закрытом вентиле  $U_{обр.м}$  не превышали допустимый прямой ток вентиля  $I_{пр.маx}$  и обратное максимальное напряжение  $U_{обр.маx}$

$$I_{пр} < I_{пр.маx} \text{ И } U_{обр.м} < U_{обр.маx} .$$

$I_{пр}$  и  $U_{обр.м}$  рассчитываются из соотношений, приведенных в табл. 4.2 для соответствующей выпрямительной схемы, а  $I_{пр.маx}$  и  $U_{обр.маx}$  определяются из справочника для выбираемых вентиляй.

Выбор трансформатора проводится по расчетной мощности  $S_T$  и коэффициенту трансформации  $k_T = U_1/U_2$  (см. табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4 . 1

Тип фильтра	Коэффициент Сглаживания фильтра	Условия Эффективной Работы
1. Емкостной 	$S_C = 2\pi f_1 m R_n C_\phi,$ где $m$ – число пульсаций выпрямленного напряжения	$\frac{1}{\omega_{П(1)} C_\phi} \ll R_n;$ $C_\phi \gg \frac{1}{\omega_{П(1)} R_n},$ где $\omega_{П(1)}$ - частота основной гармоники пульсаций;
2. Индуктивный 	$S_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_n}$	$R_\phi \ll R_n$ $\omega_{П(1)} L_\phi \gg R_n$ $L_\phi \gg \frac{R_n}{\omega_{П(1)}}$
3. Г-образный 	$S_\Gamma = S_L S_C =$ $= m^2 \omega^2 C_\phi L_\phi,$ где $\omega = 2\pi f_1;$	$\omega_{П(1)} L_\phi = (5 \div 10) R_n;$ $\frac{1}{\omega_{П(1)} C_\phi} = (0,1 \div 0,2) R_n;$
4. П-образный 	$S_\Pi = S_{C1} S_\Gamma$	Задаввшись $C_{\phi 1} = C_{\phi 2},$ Определяют $S_{C1}, S_\Gamma = \frac{S_\Pi}{S_{C1}}$

При расчете фильтра известными являются: величина допустимого коэффициента пульсаций на нагрузке  $q_n = q_{вых}$ , коэффициент пульсаций выпрямителя  $q = q_{вх}$ , и соотношения определяемых параметров фильтра с его коэффициентом сглаживания (см. Табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4 . 2

Схема	$U_2/U_{н.ср.}$	$I_2/I_n$	$I_{1nT}/I_n$	$S_T/P_n$	$U_{обр.м}/U_n$	$I_B/I_n$	$q$	$m$
Однополу- периодная	2.22	1.57	1.21	3.5	3.14	1	1.57	1
Мостовая	1.11	1.11	1.11	1.23	1.57	0.5	0.667	2

Основной характеристикой выпрямителя является в н е ш н я я характеристика, которая показывает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки  $U_n = f(I_n)$ . Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_n = U_{н.ср.}^{XX} - (R_T + R_{np} + R_\phi)I_n = U_{н.ср.}^{XX} - R_{вых}I_n,$$

где  $U_{н.ср.}^{XX}$  - выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

$R_T$  – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{np}$  – суммарное сопротивление открытых вентиляей;

$R_\phi$  – суммарное сопротивление фильтра.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для заданного в табл.4.3 выпрямителя и указанных там же значений напряжения  $U_n$ , мощности  $P_n$  нагрузки рассчитать прямой ток вентиляей  $I_{np}$ , обратное напряжение  $U_{обр.т}$  и по справочнику выбрать диоды. Определить для трансформатора напряжение вторичной обмотки  $U_2$ , коэффициент трансформации  $n_T$ , расчетную мощность  $S_T$ , если напряжение питающей сети  $U_I=220$  В, частота  $f_I=50$  Гц. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра для обеспечения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки  $q_n$  согласно данным табл.4.3. Для составных фильтров принять  $C_\phi=20$  мкФ. Результаты расчетов записать в табл.4.4.

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданного в табл.4.3 выпрямителя, приняв его  $R_{вых}=10 \dots 15$  Ом в диапазоне изменения нагрузочного тока от 0 до 500 мА.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

Т а б л и ц а 4 . 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис.4.2	Рис.4.3	Рис.4.2	Рис.4.3	Рис.4.2	Рис.4.3	Рис.4.2	Рис.4.3
$U_n$ , В	7	13	8	14	8,5	15	9	16
$P_n$ , Вт	1,2	4	0,4	4	0,05	3	0,01	1,6
Тип фильтра	$L$	$\Gamma$ -обр. $LC$	$\Pi$ -обр. $LC$	$L$	$C$	$\Gamma$ -обр. $LC$	$C$	$\Pi$ -обр. $LC$
$q_n$	0,02		0,01		0,01		0,02	





5. Зарисовать с экрана осциллографа кривые выпрямленного напряжения на нагрузке для всех режимов работы выпрямителей согласно п.4. Для режимов работы с фильтром график напряжения зарисовать для режима холостого хода и максимальной нагрузки. На рисунках показать масштабную сетку, ось времени и значения масштабов по напряжению и времени.

6. Подключить осциллограф на шунт  $R_{ш}$ , получить на экране осциллографа и зарисовать временную диаграмму тока вентиля  $i_B(t)$  при максимальном токе нагрузки и отключенном фильтре.

7. По результатам измерений (табл.4.5) построить в единой системе координат внешние характеристики выпрямителей при работе с разными типами фильтров. Сопоставить внешнюю характеристику, рассчитанную в предварительном задании с экспериментальными. Рассчитать по экспериментальным характеристикам  $R_{вых}$  выпрямителей при работе без фильтра, сравнить расчетные значения с диапазоном значений в предварительном задании.

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; схема лабораторной установки (рис.4.5), расчет предварительного задания, внешние характеристики выпрямителей без фильтра и с фильтрами в общей системе координат, осциллограммы временных диаграмм напряжений и токов.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Объясните принцип действие выпрямителей. 2. Как влияет емкостный фильтр на величину обратного напряжения на вентиле? 3. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении емкостного или индуктивного фильтра? 4. Достоинства и недостатки разных типов фильтров. 5. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания? 6. По каким критериям осуществляется выбор вентиля? 7. Как определяется мощность трансформатора в выпрямителях? 8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при пробое одного вентиля в исследуемых выпрямителях?

## Лабораторная работа № 5

### УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучить работу однофазного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку; исследовать работу инвертора, ведомого сетью; снять основные характеристики управляемого выпрямителя и инвертора.

### О б щ и е с в е д е н и я

Для плавного и бесконтактного регулирования напряжения в различных отраслях промышленности широко применяются управляемые выпрямители (УВ), в вентильном звене которых устанавливаются тиристоры вместо диодов. Регулирование тока и напряжения нагрузки в широком диапазоне осуществляется путем изменения момента включения тиристоров с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Дополнительным преимуществом управляемых выпрямителей является возможность работы в режиме инвертирования, т.е. преобразования постоянного тока в переменный. Установки, совмещающие оба режима работы, получили название управляемых преобразователей.

### У п р а в л я е м ы й в ы п р я м и т е л ь

Рассмотрим работу однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку (рис.5.1,а). Для простоты предположим, что тиристоры, подобно диодам, включаются в точках естественного открывания, в данном случае, после прохождения положительных полусинусоид вторичного напряжения  $U_2$  через нуль.

По отношению к средней точке напряжения обеих вторичных полуобмоток сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  (рис.5.1, б). В первый полупериод, когда на аноде тиристора  $VS1$  появляется положительный потенциал по отношению к катоду, в верхнем контуре протекает ток от полуобмотки трансформатора через открытый тиристор в нагрузку (направление тока выделено жирной стрелкой при полярности напряжения, указанной на рис.5.1,а). В этом интервале времени тиристор  $VS2$  закрыт отрицательным анодным напряжением.

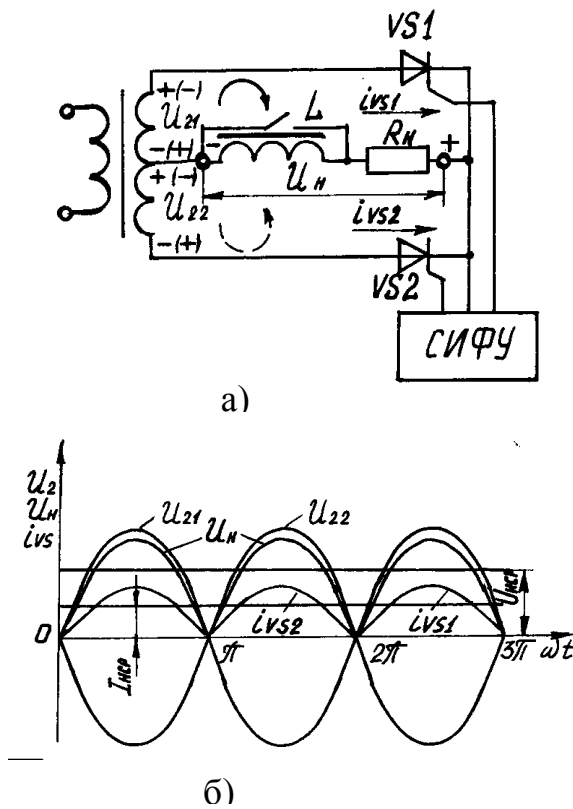


Рис.5.1

В следующий полупериод полярность напряжения на полуобмотках трансформатора изменяется, и через открывшийся тиристор  $VS2$  в нижнем контуре протекает ток по направлению штриховой стрелки. В этом интервале времени тиристор  $VS1$  закрыт и не пропускает тока (рис.5.1,б).

Таким образом в двухполупериодной схеме выпрямления оба тиристора работают поочередно, а в нагрузке протекает пульсирующий ток одного и того же направления.

Форма этого тока повторяет огибающую положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора (рис.5.1,б), а величина зависит от сопротивления нагрузки и мгновенных значений напряжения. Форма выпрямленного напряжения на нагрузке в идеальном случае приближается к огибающей положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора.

Для регулирования тока в нагрузке каждый тиристор необходимо включать с некоторым запаздыванием по отношению к точке естественного открывания. Такое включение производится положительными импульсами, подаваемыми поочередно от СИФУ на управляющие электроды тиристоров с фазовым сдвигом  $\omega t_1, \omega t_2, \dots$  (рис.5.2). Соответствующие этому сдвигу по фазе углы запаздывания в электрических градусах называются углами регулирования и обозначаются буквами  $\alpha', \alpha''$  и т.д.

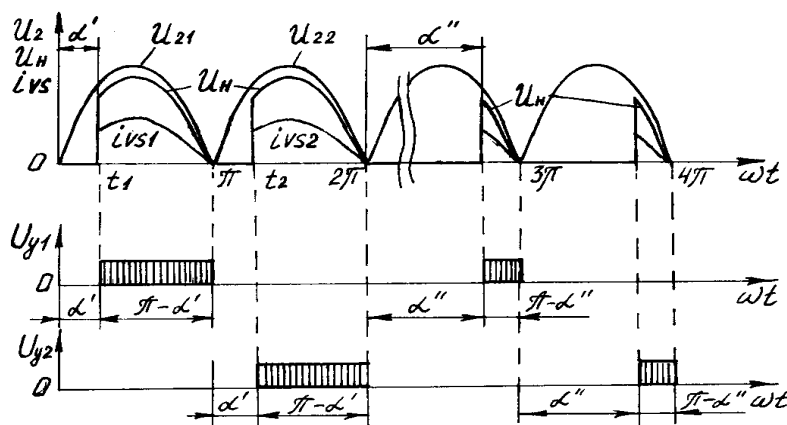


Рис.5.2

В данной схеме УВ углы регулирования можно изменять в пределах от  $0$  до  $180^\circ$ . Рассмотренный ранее граничный случай соответствовал условию  $\alpha=0$ . При втором граничном случае,  $\alpha=180^\circ$ ,

ни один из тиристоров не сможет включиться, поскольку моменты подачи управляющих импульсов совпадают с нулевыми значениями напряжений на полуобмотках трансформатора.

Для промежуточных значений  $0 < \alpha < 180^\circ$  (рис.5.2) в течение части положительного полупериода  $\omega t = \alpha$  каждый тиристор остается закрытым, а включается только в момент подачи управляющего импульса. При этом ток в нагрузке возрастает скачком и в интервале  $\omega t = (\pi - \alpha)$  оставшейся части полупериода изменяется по синусоидальному закону. С увеличением угла  $\alpha$  сокращается время работы каждого вентиля и, естественно, снижается среднее значение выпрямленного тока и напряжения (рис.5.2). Таким образом, при изменении угла регулирования в диапазоне  $0 \dots 180^\circ$  эти величины уменьшаются от своих предельных значений  $U_{н0}$  (при  $\alpha = 0$ ) до нуля (при  $\alpha = 180^\circ$ ).

Среднее значение выпрямленного напряжения на активной нагрузке (без учета потерь) определяется выражением

$$U_H = U_{н0}(1 + \cos \alpha)/2$$

Зависимость  $U_H = f(\alpha)$  является регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя.

При работе на активно-индуктивную нагрузку кривая тока остается непрерывной (рис.5.3,а), поскольку энергия, запасенная в дросселе в проводящую часть полупериода, расходуется на поддержание тока до момента включения следующего тиристора. Теоретически, при  $L \rightarrow \infty$ , форма тока в нагрузке должна представлять собой прямую линию, а в каждом плече выпрямителя - прямоугольник.

Нельзя не отметить, что при индуктивном характере нагрузки тиристоры могут оставаться открытыми даже при отрицательном уровне напряжения каждой полуобмотки, пока ЭДС самоиндукции способствует протеканию непрерывного тока (рис.5.3). Такие условия работы сохраняются только до значений  $\alpha < 90^\circ$ , случаю  $\alpha = 90^\circ$  соответствуют равновеликие площади положительных и отрицательных участков полусинусоид (сравните заштрихованные площадки на рис.5.3.б). При этом среднее значение выпрямленного напря

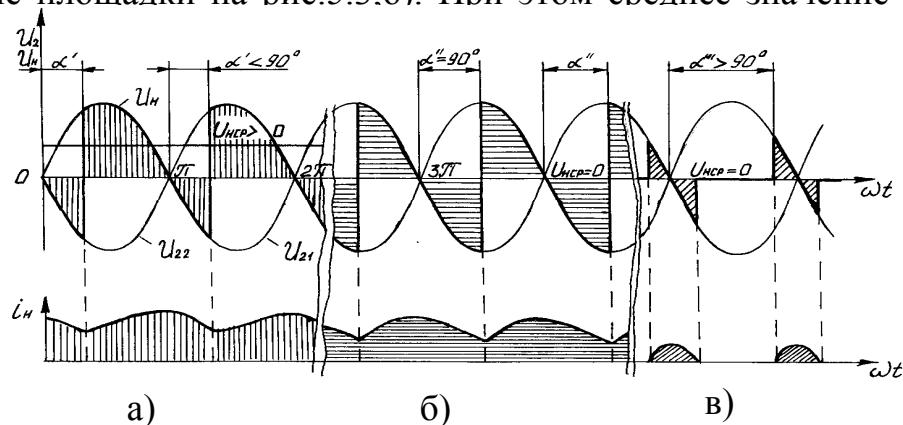


Рис.5.3

Для чисто индуктивной нагрузки регулировочная характеристика подчиняется косинусоидальному закону,  $U_H = U_{H0} \cos \alpha$ . При конечных значениях индуктивности в нагрузочной цепи эта кривая отклоняется от косинусоиды в сторону больших предельных углов регулирования.

Внешние характеристики управляемого выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  при фиксированных значениях угла регулирования ( $\alpha = \text{const}$ ) образуют семейство прямых линий с постоянным наклоном, поскольку величина падения напряжения в элементах схемы УВ не зависят от угла  $\alpha$ .

### И н в е р т о р .

И н в е р т и р о в а н и е м называется преобразование постоянного тока в переменный ток определенной величины и частоты. В связи с изменением направления потока энергии выходным звеном инвертора становится трансформатор, а на входные зажимы подключается независимый источник постоянного тока. Полярность его выбирается противоположной (по отношению к режиму выпрямления), чтобы обеспечить прямую проводимость вентиляй. Для получения переменного напряжения необходимо периодически прерывать постоянный ток и распределять его по обмоткам (фазам) трансформатора тем или иным способом. В управляемых преобразователях функции ключей-распределителей выполняют тиристоры.

В зависимости от того, какими средствами осуществляется переход тока от вентиля к вентилю (коммутация тока), различают:

автономные (независимые) инверторы (с принудительной емкостной коммутацией при любой задаваемой частоте);

инверторы, ведомые сетью (с коммутацией напряжением сети при частоте сети).

В данной работе исследуется инвертор второй группы, в котором активная мощность передается от источника  $\pm 120$  В в сеть переменного тока при одновременном потреблении реактивной из сети.

В инверторном режиме тиристоры должны пропускать ток преимущественно при отрицательных полупериодах напряжения в каждой полуобмотке.

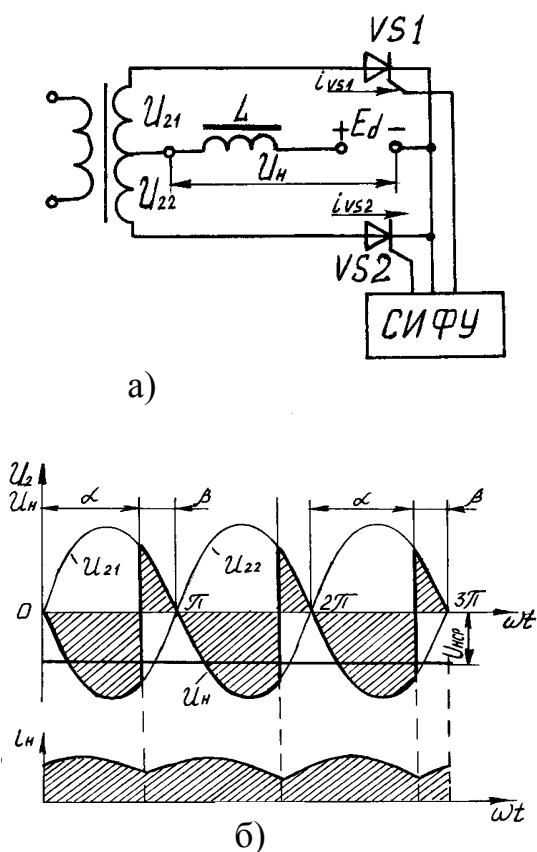


Рис.5.4

Их переключение происходит благодаря тому, что напряжение на аноде открываемого тиристора оказывается положительным и более высоким, чем у работающего за счет источника постоянного тока, а также возникающей ЭДС самоиндукции. В этом случае дроссель способствует поддержанию непрерывного тока в каждом контуре, улучшает форму кривой переменного напряжения и фильтрует высшие гармоники.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что протекание токов в вентильных полуобмотках трансформатора при изменении полярности ЭДС свидетельствует об изменении направления потока энергии - от источника постоянного тока в сеть переменного тока (рис.5.4,а).

Переход преобразователя от выпрямительного к инверторному режиму показывают временные диаграммы напряжения и тока (сравните рисунки 5.3 и 5.4).

При углах регулирования  $\alpha < 90^\circ$  преобразователь отдает непрерывный ток в активно-индуктивную нагрузку (рис.5.3,а), и напряжение на ее зажимах положительно ( $U_H > 0$ ).

При установке  $\alpha = 90^\circ$  ЭДС самоиндукции дросселя еще поддерживает непрерывный ток, однако напряжение на нагрузке равно нулю. В этом случае трансформатор выпрямителя обменивается с сетью реактивной мощностью (рис.5.3,б).

При дальнейшем увеличении углов регулирования,  $\alpha > 90^\circ$ , наступает режим прерывистых токов, поскольку отдаваемая в контур энергия индуктивности дросселя не может превысить запасенную им в проводящую часть периода (рис.5.3,в).

Если же при  $\alpha > 90^\circ$  источник постоянного тока с полярностью, указанной на рис.5.4,а обеспечивает непрерывный ток, то преобразователь переходит в инверторный режим с изменением знака напряжения

$$U_H = U_{HO} \cos \alpha = U_{HO} \cos(\pi - \beta) = -U_{HO} \cos \beta.$$

Здесь угол  $\beta$ , вводимый по аналогии с выпрямительным режимом, называется углом опережения включения. Этот угол отсчитывается от точек  $\omega t = k\pi$  в сторону нуля (рис.5.4,б),  $k=1,2,\dots$ .

С увеличением угла регулирования  $\alpha$  до  $180^\circ$  среднее значение напряжения преобразователя увеличивается. Теоретически, при  $\beta=0$  напряжение холостого хода инвертора соответствует этой же величине при  $\alpha=0$  для управляемого выпрямителя. Однако в реальных условиях необходимо ввести запас по углу  $\beta_{\min} \approx 10 \dots 15^\circ$ , с тем, чтобы завершить процесс коммутации переключаемых фаз и восстановить управляющие свойства тиристорov до момента их естественного открывания.

Входные характеристики инвертора  $U_H = f(I_H)$  при фиксированных значениях углов опережения ( $\beta = \text{const}$ ) подобны внешним характеристикам управляемого выпрямителя.

## П р е д в а р и т е л ь н о е   з а д а н и е   к   э к с п е р и м е н т у

В экспериментальной части данной работы предусмотрено исследование основных характеристик для схемы однофазного преобразователя с выводом нулевой точки трансформатора. Предварительно необходимо для преобразователя, работающего в режиме выпрямителя на чисто активную нагрузку:

1. Рассчитать и построить регулировочную характеристику  $U_n=f(\alpha)$  для  $\alpha$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . При этом принять, что напряжение  $U_2=127$  В.

2. Для значений  $\alpha$ , приведенных в таблице 5.1, рассчитать внешнюю характеристику  $U_n=f(I_n)$ , приняв  $x_a=60$  Ом.

Т а б л и ц а   5 . 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$ , град.	2 0	4 0	5 0	7 0	8 0	1 0 0	1 2 0	1 5 0

3 . Построить совмещенные временные диаграммы  $u_2(\omega t)$ ,  $u_n(\omega t)$  и  $i_n(\omega t)$  для  $\alpha$ , заданного вариантом таблицы 5.1.

### П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

1. Ознакомиться с назначением всех элементов на передней панели стенда и после разрешения преподавателя подать питание от сети 220 В. Переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”.

2. Включить осциллограф, подключить его входы к гнездам “управляющий электрод” и “катод” тиристоров и зарисовать форму управляющих импульсов, обратив внимание на изменение их длительности в диапазоне  $\alpha=0\dots180^\circ$ . Отсчет углов регулирования - по фазоуказателю.

3. Снять регулировочные характеристики управляемого выпрямителя  $U_n=f(\alpha)$  для активной (при закороченном дросселе) и активно-индуктивной нагрузки ( $R_{n\max}$ ). Результаты эксперимента занести в табл.5.2. и сопоставить с рассчитанной в предварительном задании характеристикой  $U_n=f(\alpha)$ .

Т а б л и ц а   5 . 2

Угол регулирования, $\alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	Прим.
$U_n$	Активная нагрузка						
	Активно-индуктивная нагрузка						

4. На экране осциллографа просмотреть форму выпрямленного напряжения на нагрузке, при включенном дросселе и без него, для разных уг-



лов регулирования. Зарисовать осциллограммы при  $\alpha=0$  и  $\alpha=60^\circ$  при минимальном значении тока нагрузки.

5. Изменяя ступенями сопротивление резистора  $R_n$ , снять семейство внешних характеристик выпрямителя  $U_n=f(I_n)$  для активной и активно-индуктивной нагрузки при фиксированных значениях  $\alpha=30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $\alpha$ , заданного табл.5.1. Результаты эксперимента занести в табл.5.3 и сопоставить с результатами предварительного расчета.

Т а б л и ц а 5 . 3

Активная нагрузка	$\alpha = 30^\circ$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						
	$\alpha = 60^\circ$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						
	$\alpha =$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						
Активно-индуктивная нагрузка	$\alpha = 30^\circ$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						
	$\alpha = 60^\circ$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						
	$\alpha =$	$U_n(\text{В})$						
		$I_n(\text{мА})$						

6. Перевести преобразователь в режим инвертирования. Для этого установить по фазоуказателю максимальный угол, подать от стабилизированного источника питания постоянное напряжение  $\pm 120$  В на стенд и установить переключатель режима работы преобразователя в положение “ИНВЕРТОР”.

Примечание: при этом переключении реле блока защиты замыкает цепь нагрузки и включает реостат последовательно с источником постоянного тока. О нормальной работе лабораторного стенда сигнализирует красная лампочка.

7. Изменяя сопротивление резистора  $R_n$  снять семейство входных характеристик инвертора  $U_n=f(I_n)$  для фиксированных значений углов регулирования,  $\alpha=120^\circ$ ,  $\alpha=150^\circ$  (соответственно  $\beta=60^\circ$  и  $\beta=30^\circ$ ). Данные эксперимента внести в табл.5.4.

Т а б л и ц а 5 . 4

$\beta = 30^\circ$ ( $\alpha = 150^\circ$ )	$I_n(\text{мА})$					
	$U_n(\text{В})$					
$\beta = 60^\circ$ ( $\alpha = 120^\circ$ )	$I_n(\text{мА})$					
	$U_n(\text{В})$					

После окончания эксперимента переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”. Снять питание постоянного тока, отключить напряжение сети, схему привести в исходное состояние.

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Схема лабораторной установки. 2. Результаты предварительного расчета. 3. Временные диаграммы управляющих импульсов СИФУ. 4. Регулировочные характеристики УВ для активной и активно-индуктивной нагрузки (на одном графике). 5. Семейства внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора (на одном графике). 6. Осциллограммы выпрямленного напряжения для активной и активно-индуктивной нагрузки при  $\alpha=0^\circ$  и  $\alpha=60^\circ$ .

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Опишите работу УВ и назовите область его применения.
2. Объясните различие между режимом выпрямления и инвертирования.
3. Перечислите достоинства и недостатки управляемых преобразователей.
4. Что представляют собой регулировочные характеристики УВ?
5. Какие функции выполняет дроссель в схеме УВ?
6. Объясните ход внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора.
7. Как изменяется величина пульсации выпрямленного напряжения при изменении углов регулирования и при изменении величины тока?

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора постоянного напряжения и стабилизатора тока.

#### О б щ и е с в е д е н и я

С т а б и л и з а т о р о м называют устройство, автоматически поддерживающее с заданной точностью напряжение или ток в нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки в обусловленных пределах.

Основным параметром стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации напряжения, а стабилизатора тока - коэффициент стабилизации тока

$$K_{ст\ U} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \div \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}; \quad K_{ст\ I} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \div \frac{\Delta I_{вых}}{I_{вых}} \text{ при } R_H = const,$$

где  $U_{вх}$ ,  $U_{вых}$ ,  $I_{вых}$  - номинальные напряжения на входе и выходе стабилизатора и номинальный ток нагрузки;

$\Delta U_{вх}$ ,  $\Delta U_{вых}$ ,  $\Delta I_{вых}$  - изменения напряжений на входе и выходе стабилизатора и изменение тока нагрузки.

Влияние нагрузки  $R_H$  оценивается по внешним характеристикам  $U_{вых}(I_{вых})$  и  $I_{вых}(R_H)$  или выходным (внутренним) сопротивлением стабилизатора

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} \text{ при } U_{вх} = const.$$

Для стабилизатора напряжения  $R_{вых} \ll R_H$ , а для стабилизатора тока -  $R_{вых} \gg R_H$ .

Применяют два типа стабилизаторов: параметрические и компенсационные.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), обеспечивающие постоянство напряжения при значительных изменениях тока для стабилизаторов напряжения и постоянство тока при изменении напряжения в стабилизаторах тока. Такими элементами могут быть стабилитроны, бареттеры или транзисторы.

Компенсационные стабилизаторы напряжения имеют большие коэффициенты стабилизации и меньшее  $R_{вых}$  при более высоком КПД. Структурная схема такого стабилизатора приведена

на рис.6.1. Стабилизатор состоит из источника эталонного напряжения (1), измерительного элемента (2) и регулирующего элемента (3).

На входы измерительного элемента подаются эталонное напряжение  $U_0$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Если  $U_{\text{ВЫХ}}$  не равно  $U_0$  появляется сигнал рассогласования, который поступает на вход регулирующего элемента. Под действием этого сигнала падение напряжения на регулирующем элементе меняется таким образом, чтобы  $U_{\text{ВЫХ}}$  оставалось постоянным

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - \Delta U = \text{const.}$$

В качестве источника эталонного напряжения чаще всего используется стабилитрон, а роль регулирующего элемента выполняет транзистор или составной транзистор. В большинстве современных стабилизаторов измерительный элемент выполняется на операционном усилителе.

В работе предлагается исследовать компенсационный стабилизатор на транзисторе, схема которого показана на рис.6.2. Источник эталонного напряжения выполнен на стабилитроне  $VD$ , режим которого задается резистором  $R_2$ . Транзистор  $VT2$  выполняет роль измерительного элемента. Изменение  $U_{\text{ВЫХ}}$  приводит к изменению  $I_{\text{б}2}$  и соответственно к изменению  $I_{\text{к}2}$ . Изменение  $I_{\text{к}2}$  вызывает противоположное изменение  $I_{\text{б}1}$ , так что  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{к}31}$  остается практически неизменным.

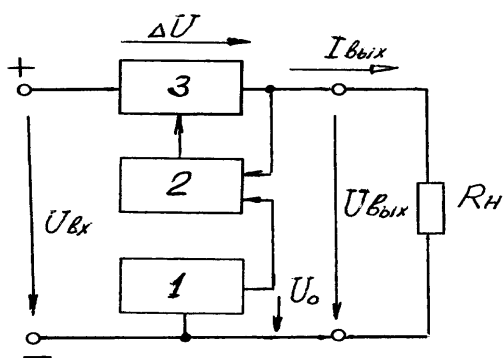


Рис.6.1

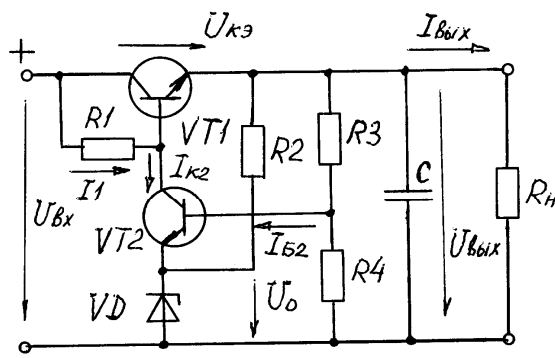


Рис.6.2

$$K_{\text{см}U} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \cdot R_1 \cdot R_4}{U_{\text{ВХ}} \cdot (R_3 + R_4)} h_{21} / (h_{11} + R_1); \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{11} \cdot R_4}{h_{21} \cdot (R_3 + R_4)}.$$

В настоящее время широко применяются стабилизаторы в интегральном исполнении. Например, микросхема К142ЕН1 представляет собой регулируемый стабилизатор с выходным напряжением 3-12 В на ток до 150 мА. В схеме предусмотрена защита от перегрузки и коротких замыканий на выходе.

Схема исследуемого стабилизатора тока показана на рис.6.3. На базе транзистора  $VT$  поддерживается постоянный потенциал, задаваемый параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD$ . Нагрузка  $R_H$  включена в коллекторную цепь транзистора  $VT$ , который работает по схеме ОБ, где  $I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}}$ .

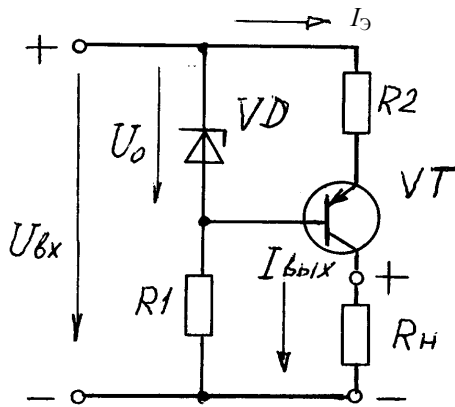


Рис.6.3

Ток эмиттера  $I_э$  определяется напряжением  $U_{э6} = U_0 - R_2 I_э$

Благодаря этому устанавливается режим работы

$$I_э = (U_0 - U_{э6}) / R_2 = const$$

У современных транзисторов  $\alpha \rightarrow 1$ , таким образом, получается устройство, выходной ток которого  $I_{вых} = I_к \approx I_э$ , не зависит от  $R_n$ , а определяется только  $U_0$  и  $R_2$ . Режим

стабилизации поддерживается до тех пор, пока транзистор  $VT$  работает в активном режиме, т.е.  $U_{вх} > \Delta U + I_{вых} R_n$ , где  $\Delta U$  - напряжение насыщения транзистора.

Отсюда максимальное значение сопротивления нагрузки, при котором сохраняется рабочий режим стабилизатора

$$R_{н\ max} = \frac{U_{вх} - \Delta U}{I_{вых}}$$

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{ст} = I_{вых} / (U_{вх} h_{22})$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{ввых} = \frac{h_{21} \cdot R_2}{h_{22}(r_d + h_{11})}$$

### Предварительное задание к эксперименту

Для компенсационного стабилизатора напряжения (рис.6.2) рассчитать  $K_{ст}$  и  $R_{ввых}$ , если  $R1=6,8$  кОм;  $R3=1,2$  кОм;  $R4=6,8$  кОм; для транзистора  $VT2$ :  $h_{11}=1,2$  кОм;  $h_{21}=180$ . Входное и выходное напряжения принять  $U_{вх}=22$  В;  $U_{ввых}=12$  В.

Используя метод эквивалентного генератора при  $U_{ввых}$  холостого хода 12 В и рассчитанном в п.1 значении  $R_{ввых}$ , определить изменение выходного напряжения  $\Delta U$  и выходное напряжение стабилизатора при заданном в табл.6.1 токе нагрузки  $I_n$ .

Рассчитать  $R_{ввых}$  стабилизатора тока (рис.6.3), если  $R2=180$  Ом, дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_d=35$  Ом. Транзистор  $VT$  имеет следующие параметры:  $h_{11}=50$  Ом;  $h_{22}=1$  мСм;  $h_{21}=30$ .

Определить для стабилизатора тока максимально допустимое сопротивление нагрузки  $R_{н\ max}$  при  $U_{вх}$  и  $I_{вых}$ , заданных в табл.6.1. Принять  $\Delta U=1$  В. Используя результаты расчетов по п.3 и п.4, определить относительное изменение выходного тока  $\Delta I_{вых} / I_{вых\ к}$  при изменении сопротивления нагрузки от 0 до  $R_{н\ max}$  ( $I_{вых\ к}$  - ток при  $R_n=0$ ).

Т а б л и ц а 6 . 1

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_H$ , мА	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{вх}$ , В	23		24		25		26	
$I_{ввых}$ , мА	20				40			

### П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

Входное напряжение  $U_{вх}$  на стабилизаторы подается от выпрямителя, который исследовался в лабораторной работе 4.  $U_{вх}$  измеряется вольтметром  $V1$ .

Подготовить схему однофазного мостового выпрямителя с  $\Pi$ -образным фильтром, поставив в нужное положение выключатели В1-В4.

Подключить нагрузку  $R_H$  к выходным клеммам стабилизатора напряжения и дополнительные цифровые приборы для измерения тока нагрузки  $I_H$  и выходного напряжения  $U_{ввых}$ .

Включить выключатель стабилизатора напряжения и выключатель выпрямителя (выключатель стабилизатора тока должен быть выключен). При минимальном токе нагрузки снять зависимость  $U_{ввых}(U_{вх})$ , изменяя  $U_{вх}$  от 0 до максимального значения с помощью регулятора напряжения  $U_1$ . Построить график зависимости и определить по ней  $K_{см}$ . Сравнить с расчетным по п.1 предварительного задания  $K_{см}$ .

Установить максимальное входное напряжение  $U_{вх}$ . Изменяя сопротивление нагрузки во всем диапазоне, снять зависимость  $U_{ввых}(I_H)$ . Построить выходную характеристику стабилизатора и определить по ней  $R_{ввых}$ . Сравнить с результатами расчетов по п.2 предварительного задания.

Отключить выключатели выпрямителя и стабилизатора напряжения. Подключить нагрузку к выходу стабилизатора тока.

Включить выключатель стабилизатора тока и выключатель выпрямителя. Установить с помощью регулятора  $U_1$  максимальное входное напряжение. Изменяя  $R_H$  во всем диапазоне, снять зависимость  $I_{ввых}(U_{ввых})$ . По полученным результатам рассчитать для каждого измерения  $R_H$  и построить  $I_{ввых}(R_H)$ . Определить  $R_{H\max}$  и  $R_{ввых}$  стабилизатора. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

Установить минимальное сопротивление нагрузки  $R_H$  (минимальное  $U_{ввых}$ ). Изменяя  $U_{вх}$  от 0 до максимального значения, снять зависимость  $I_{ввых}(U_{вх})$ . Построить график  $I_{ввых}(U_{вх})$  и определить  $K_{см}$ . Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

## С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; полные схемы компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока с обозначением всех элементов, указанием токов, напряжений; результаты расчета предварительного задания; результаты эксперимента в виде таблиц и графиков; результаты расчетов  $K_{ст}$ ,  $R_{вых}$  по графикам; сравнительный анализ результатов.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов? 2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор напряжения и тока? 3. Поясните назначение элементов схемы компенсационного стабилизатора напряжения? 4. От каких элементов зависит коэффициент стабилизации? 5. Как можно осуществить регулирование  $U_{вых}$  стабилизатора напряжения? 6. Поясните принцип действия стабилизатора тока. 7. Как можно изменить выходной ток стабилизатора? 8. Почему стабилизатор тока может работать только на нагрузку с  $R$  меньше  $R_{нmax}$ ? 9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучить принцип работы усилительного каскада с ОЭ и исследовать влияние элементов схемы на параметры и характеристики усилителя.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Каскад усиления переменного тока по схеме ОЭ построен на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис.7.1). Расчет каскада сводится к выбору точки покоя на статической линии нагрузки, определению величин  $R_k$  и  $R_B$  по заданным параметрам нагрузки, например,  $U_{m\text{ вых}}$  и  $R_H$ , и напряжению источника питания  $E_K$ .

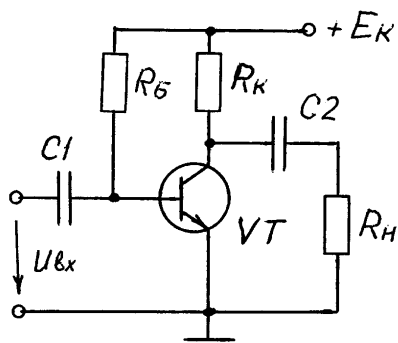


Рис.7.1

Линию нагрузки можно построить в координатах  $I_K, U_{KЭ}$  по двум точкам. Одна из них - точка покоя П, координаты которой определены. Вторая может быть получена согласно уравнению - если принять  $I_K=0$ , то  $U_{KЭ}=E_K$ . Построение статической линии нагрузки показано на рис.7.2 (линия *ав*).

Чтобы обеспечить заданный режим покоя, надо рассчитать величины  $R_k$  и  $R_B$ :

Выбранная точка покоя должна обеспечить требуемую величину тока в нагрузке, напряжения на нагрузке без нелинейных искажений и удовлетворять предельным параметрам транзистора. Поэтому ток покоя:

$$I_{кп} \geq I_{мин} = U_{m\text{ вых}} / R_H$$

Напряжение покоя обычно выбирается  $U_{кэп} = E_K / 2$ , чтобы обеспечить максимальное выходное напряжение без искажений.

Уравнение статической линии нагрузки

$$I_K = \frac{E_K - U_{KЭ}}{R_K}$$

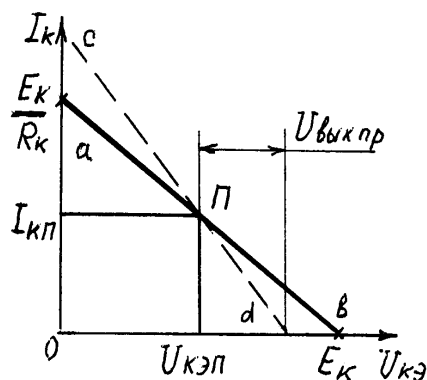


Рис.7.2



$$R_k = \frac{E_k - U_{кэп}}{I_{кп}};$$

$$R_b = \frac{E_k - U_{бэп}}{I_{бп}}; I_{бп} = I_{кп}/h_{21}$$

При работе каскада в режиме холостого хода и  $i_{вх} = I_{мвх} \sin \omega t$  рабочая точка перемещается по статической линии нагрузки в обе стороны от точки покоя. Амплитуда переменной составляющей напряжения коллектор-эмиттер или равного ей выходного напряжения не может быть больше  $E_k/2$ .

При работе каскада на нагрузку в коллекторную цепь параллельно  $R_k$  включается  $R_n$ . Поэтому режим работы каскада меняется. Рабочая точка перемещается по динамической линии нагрузки, уравнение которой

$$\Delta u_{кэ} = \Delta i_{кэ} \frac{R_k R_n}{R_k + R_n};$$

Динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя **П** (частный случай -  $\Delta i_{кэ} = 0$ ). Вторую точку можно получить, задавшись приращением  $\Delta i_k$  и подсчитав изменение напряжения  $\Delta U_{кэ}$  относительно координат точки покоя. Динамическая линия нагрузки показана на рис.7.2 (c-d). Очевидно, что угол между осью  $U_{кэ}$  и динамической линией нагрузки тем больше, чем меньше  $R_n$  (при  $R_n = 0$  он составит  $90^\circ$ ). В связи с этим предельная амплитуда выходного напряжения  $U_{ввых пр}$  с уменьшением  $R_n$  становится меньше  $E_k/2$ . Это может вызвать появление нелинейных искажений. Если заданное значение  $U_{м ввых}$ , больше, чем  $U_{ввых пр}$ , чтобы избежать нелинейных искажений, надо сместить точку покоя. Увеличивают  $I_{кп}$  и анализ повторяют.

Динамические параметры каскада:

$$K_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_k R_n}{R_k + R_n};$$

$$K_i = h_{21} \frac{R_k}{R_k + R_n};$$

$$K_p = K_u K_i.$$

## Предварительное задание к эксперименту

Транзистор каскада имеет следующие параметры:

$$h_{11} = 0,5 \text{ кОм}; h_{21} = 25; h_{22} = 0,3 \text{ мкСм}; h_{12} = 0.$$

Напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$  принять равным во всех режимах 0,6 В. Напряжением  $U_{кэ}$  в режиме насыщения пренебречь. Напряжение источника питания  $E_k = 12$  В.

1. Рассчитать величину  $R_k$ , которая обеспечит на холостом ходу заданный в таб.7.1. коэффициент усиления. Начертить в координатах  $I_k, U_{кэ}$  линию нагрузки. Рассчитать сопротивление  $R_b$ , которое позволит получить максимальную амплитуду выходного напряжения  $U_{м ввых}$ , без искажений. Показать

положение точки покоя на линии нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{вых пр}}$ .

2. Определить амплитуду входного напряжения  $U_{\text{м вх}}$ , соответствующего определенному в п.1 значению  $U_{\text{вых пр}}$ .

3. Рассчитать при заданном в табл. 7.1 сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$  значения коэффициентов усиления  $\kappa_{\text{и}}$ ,  $\kappa_{\text{р}}$ ,  $\kappa_{\text{и}}$ . Построить динамическую линию нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{м вх}}$ , сравнить с предыдущими результатами.

4. Рассчитать амплитуду входного напряжения  $U_{\text{м вх}}$ , позволяющего получить максимальное выходное напряжение без искажений.

5. Определить  $R_{\text{н}}$ , при котором  $\kappa_{\text{р}}$  достигает максимального значения. Рассчитать это значение  $\kappa_{\text{р}}$ .

Т а б л и ц а 7 . 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\kappa_{\text{и}}$	35	40	45	50	55	60	65	70
$R_{\text{н}}$ , кОм	0,5	1,0	1,5	2,02	2,5	3,0	3,5	4,0

#### П о р я д о к в ы п о л н е н и я э к с п е р и м е н т а

Математическая модель каскада усиления реализована в программе LAB7.EXE. При запуске она иллюстрирует работу каскада при выбранных в качестве примера значениях  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{б}}$ ,  $R_{\text{н}}$  и  $U_{\text{м вх}}$ , которые высвечиваются на экране монитора. На экран выводятся линии нагрузки с указанием положения точки покоя, осциллограммы входного и выходного напряжений, значения коэффициентов усиления и параметры точки покоя. После нажатия клавиши “Ввод” изображается амплитудная характеристика каскада, и программа переходит в диалоговый режим.

Ввод новых значений  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{б}}$ ,  $R_{\text{н}}$  и  $U_{\text{м вх}}$  производится в рамку, которая высвечивается у соответствующей величины. Перемещение рамки с помощью клавиш “Вверх”, “Вниз”. После ввода данных нажать клавишу “Ввод”.

1. Ввести рассчитанные значения  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{б}}$  и  $R_{\text{н}}=1000$  кОм для режима холостого хода. Записать значение  $\kappa_{\text{и}}$ , параметры режима покоя и начертить с экрана в масштабе амплитудную характеристику каскада. По характеристике определить  $U_{\text{вых пр}}$  и сравнить с результатом расчета предварительного задания.

2. Увеличить в 2 раза  $R_{\text{к}}$ . Записать значение  $\kappa_{\text{и}}$  и нанести на предыдущий график амплитудную характеристику каскада в этом режиме. Объяснить изменения  $\kappa_{\text{и}}$ .

3. Ввести рассчитанные значения  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{н}}$ . Записать значения  $\kappa_{\text{и}}$ ,  $\kappa_{\text{и}}$ ,  $\kappa_{\text{р}}$  и сравнить с расчетными. На предыдущем графике нанести амплитудную характеристику. Определить  $U_{\text{вых пр}}$ . Сравнить с расчетным.

4. Ввести рассчитанную в п.4 предварительного задания величину  $U_{m\text{ вх}}$  и проверить отсутствие искажений. Перечертить с экрана осциллограммы входного и выходного напряжений.

5. Увеличить  $U_{m\text{ вх}}$  в два раза, обратить внимание на появление нелинейных искажений. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений.

6. Изучить влияние  $R_B$  на форму  $U_{\text{вых}}$ , для чего ввести при первоначальном значении  $U_{m\text{ вх}}$  значения  $R_B$ , равные 0,6 и 2,0 от расчетного. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений. Объяснить причины появления нелинейных искажений.

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы: схема исследуемого каскада; расчет предварительного задания; значения коэффициентов усиления, амплитудные характеристики и осциллограммы по каждому пункту выполненного эксперимента; краткие выводы.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Объяснить принцип работ каскада усиления, назначение основных элементов схемы. 2. Какими параметрами характеризуется усилитель? 3. Какое влияние на параметры каскада оказывает  $R_K$ ? 4. Что такое нелинейные искажения и причина их появления? 5. Можно ли получить неискаженный выходной сигнал, если заданное  $U_{\text{вых м}} > E_K/2$ ? 6. Какое влияние оказывает  $R_B$  на положение точки покоя? 7. Всегда ли нужно выбирать  $U_{\text{кэп}} \approx E_K/2$  ?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение основных характеристик операционного усилителя (ОУ); исследование типовых аналоговых и импульсных устройств на базе ОУ.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению  $\kappa_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$  и высокое входное сопротивление  $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$ .

Современные ОУ выполняются многокаскадными и включают в себя ряд дополнительных устройств (защиту, термокомпенсацию и др.) Массовое применение ОУ обусловлено их универсальностью: устройства на их базе могут

осуществлять усиление, выполнять математические операции, сравнивать электрические величины, генерировать сигналы различной формы.

В данной работе использована микросхема К544УД1А, которая представляет собой операционный усилитель общего назначения с высоким входным сопротивлением. На рис.8.1 приведены условные обозначения и типовая схема включения ОУ. Он имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на инвертирующий вход  $U_{\text{вх.и}}$  приращение выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  находится в противофазе (противоположное по знаку) с приращением  $U_{\text{вх}}$ , а при подаче на неинвертирующий вход - совпадают по фазе (одинаковы по знаку). В зависимости от конкретного устройства на базе ОУ используют как инвертирующий, так и неинвертирующий входы.

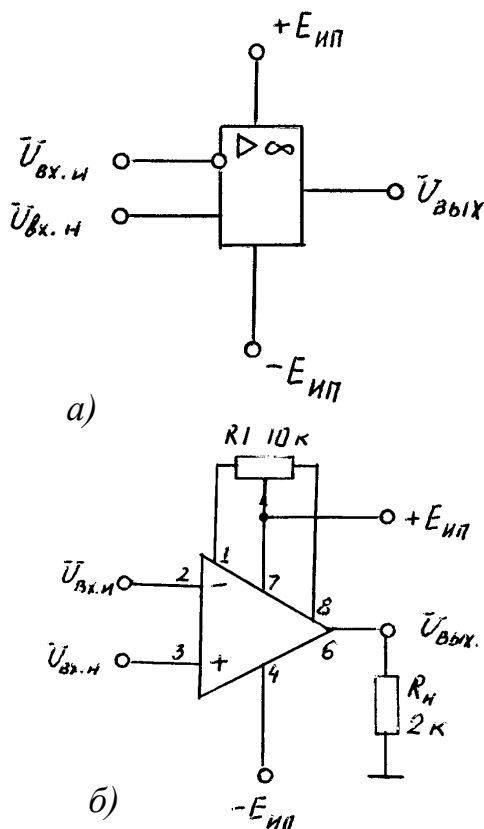


Рис.8.1

На рис.8.2 приведена принципиальная схема ОУ К544УД1А. Высокое входное сопротивление ОУ обеспечивается согласованной парой полевых транзисторов  $VT1$ ,

$VT5$  входного дифференциального каскада, включающего в себя кроме названных транзисторы  $VT2$ ,  $VT4$  и резисторы  $R1$ ,  $R3$ . Работа этого каскада обеспечивается стабилизатором тока, включающим транзисторы  $VT6$ ,  $VT7$  и резисторы  $R4$ ,  $R5$ . Температурная компенсация осуществляется звеном, выполненным на

транзисторах  $VT10$ ,  $VT14$  и резисторах  $R8$ ,  $R10$ . ОУ имеет защиту от коротких замыканий по выходу ( $VT16$ ,  $VT18$ ,  $R12$ ). Выходным каскадом является составной эмиттерный повторитель ( $VT12$ ,  $VT17$ ,  $VT15$ ,  $R11$ ), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий нагрузочную способность. Выходной каскад имеет свой стабилизатор тока ( $VT11$ ,  $VT13$ ,  $R9$ ). В согласующее звено между входными и выходными цепями входят элементы:  $R6$ ,  $R7$ ,  $VT8$ ,  $VT9$ ,  $VD1$ ,  $C1$ .

Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные)  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  (рис.8.3)

и амплитудно-частотные (АЧХ)  $\kappa_U(f)$ . Последние имеют вид АЧХ усилителя постоянного тока за исключением специальных частотнозависимых устройств (избирательный усилитель и др.). Передаточные характеристики имеют линейный участок, для которого  $\kappa_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \text{const}$ , и нелинейный -  $\kappa_U' < \kappa_U$ .

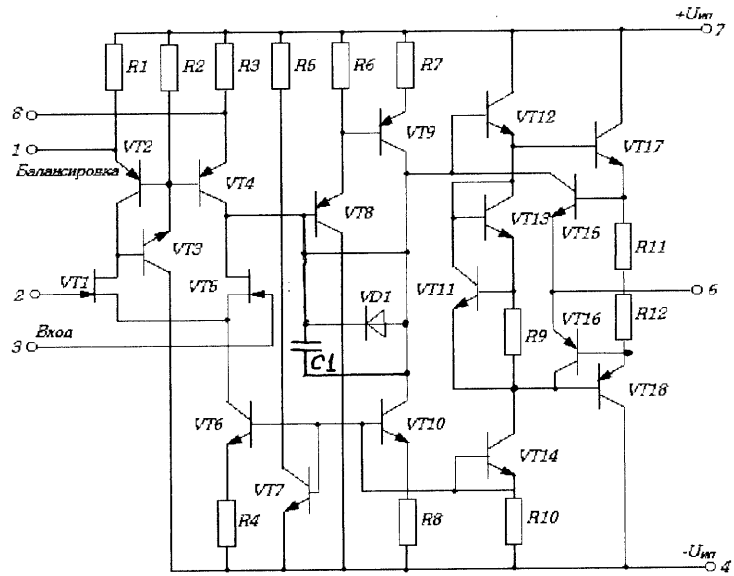


Рис.8.2

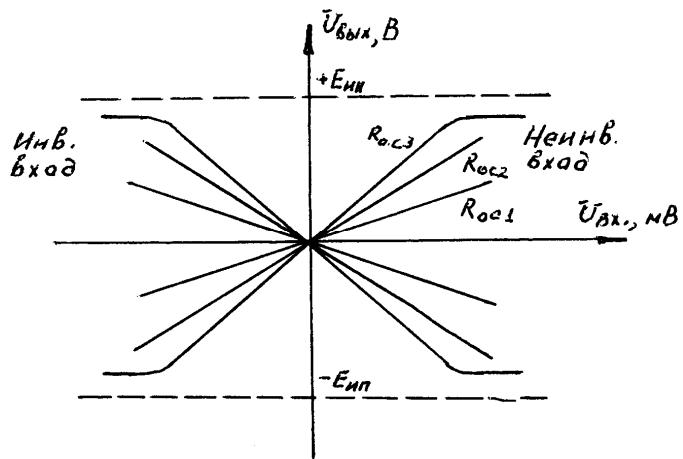


Рис.8.3

При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки. Рассмотрим примеры построения устройств на базе ОУ.

### Аналоговые схемы, работающие на линейных участках амплитудных характеристик.

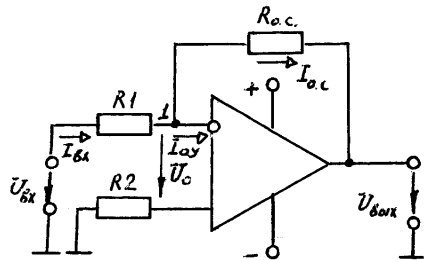


Рис.8.4

И н в е р т и р у ю щ и й у с и л и - т е л ь (рис.8.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор  $R1$  подается  $U_{вх}$  и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора  $R_{o.c.}$ . Коэффициент усиления

$$K_{U.и} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{o.c.}}{R_1}.$$

Для уменьшения погрешностей от изменения входных токов делают симметричные входы, выбирая  $R_2 = R_1 \parallel R_{o.c.}$ .

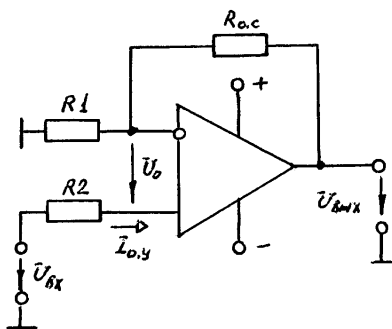


Рис.8.5

Н е и н в е р т и р у ю щ и й у с и л и - т е л ь (рис.8.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного и

$$K_{U.н} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{o.c.}}{R_1}.$$

В ы ч и т а т е л ь - у с и л и т е л ь (рис.8.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{o.c.} = R$ , то  $U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1}) \frac{R_{o.c.}}{R_1}$ .

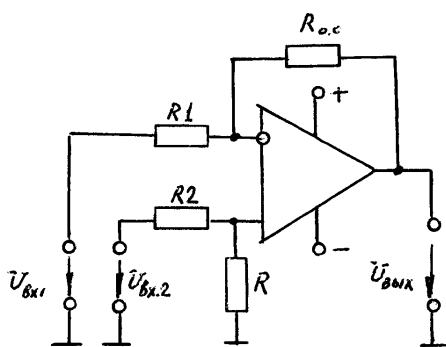


Рис.8.6

С у м м а т о р ы . Схемы инвертирующего и неинвертирующего сумматоров приведены на рис.8.7, 8.8. Для инвертирующего сумматора выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{вых} = -\left(\frac{R_{o.c.}}{R_1} U_{вх1} + \frac{R_{o.c.}}{R_2} U_{вх2} + \dots + \frac{R_{o.c.}}{R_n} U_{вхn}\right).$$

При равенстве входных сопротивлений  $R_1 = R_2 = R$

$U_{вых} = -\frac{R_{o.c.}}{R} (U_{вх.1} + U_{вх.2} + \dots + U_{вх.n})$  - для инвертирующего сумматора;

$U_{вых} = \frac{1 + R_{o.c.}/R}{n} (U_{вх1} + U_{вх2} + \dots + U_{вхn})$  - для неинвертирующего сумматора.

В схеме сумматоров переменным параметром является сопротивление обратной связи  $R_{o.c.}$ , которое и определяет коэффициент усиления. Формулы

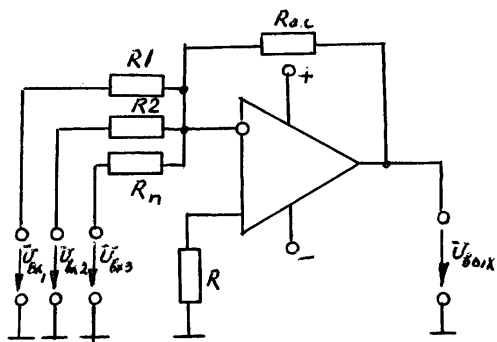


Рис.8.7

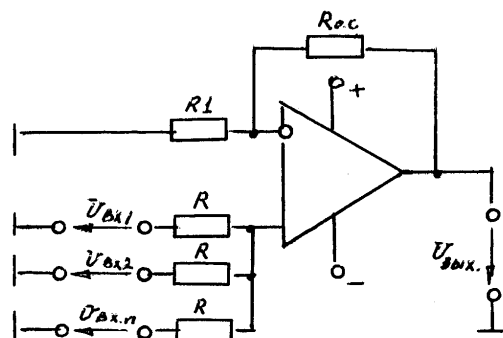


Рис.8.8

приведены для постоянных величин (числовой сумматор)  $U_{ex.1}$ ,  $U_{ex.2}$  и т.д. В работе исследуется также инвертирующий геометрический сумматор, для которого складываются мгновенные значения  $U_{ex.1}$  и  $U_{ex.2}$ .

Интегратор, схема которого показана на рис.8.9, реализует операцию

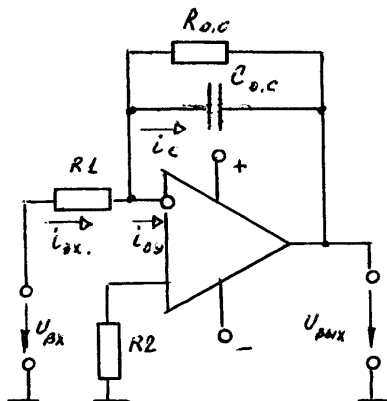


Рис.8.9

$$U_{вых} = -\frac{1}{R_1 C_{o.c.}} \int_0^t U_{ex} \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{ex} \cdot dt,$$

где  $\tau = R_1 C_{o.c.}$  - постоянная времени.

Дифференциатор (рис.8.10) выполняет операцию

$$U_{вых} = -R_{o.c.} C \frac{dU_{ex}}{dt} = -\tau \frac{dU_{ex}}{dt}.$$

Для интегратора и дифференциатора на инвертирующий вход подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора.

На рис.8.11,а приведен электрический аналог и на рис.8.11,б временные диаграммы, поясняющие принцип дифференцирования и интегрирования в электрических и электронных цепях.

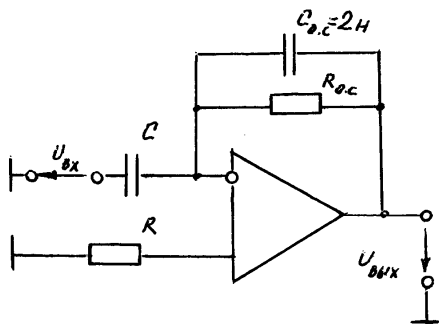


Рис.8.10

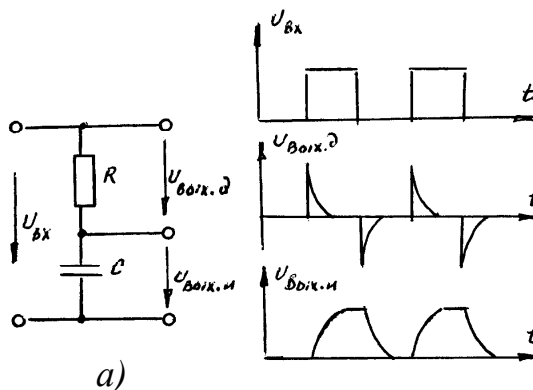


Рис.8.11

б)

Л и н е й н ы е у с и л и т е л и представлены инвертирующим усилителем (рис.8.12), для которого  $U_{вых} = -\frac{R_{o.c}}{R_1} \cdot U_{вх}$  и избирательным усилителем (рис.8.13) с частотно-зависимым двойным Т-образным мостом на базе резисторов  $R_1, R_2, R_3$  и конденсаторов  $C_1, C_2, C_3$ , подключенным по схеме отрицательной обратной связи, для которого  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ . Мост выполняется симметричным, т.е.  $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$  и  $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0,5R$ . Если  $C_3 = C_1 + C_2 = 2C$ , тогда  $\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{R_3 C_3} = \frac{1}{RC}$ .

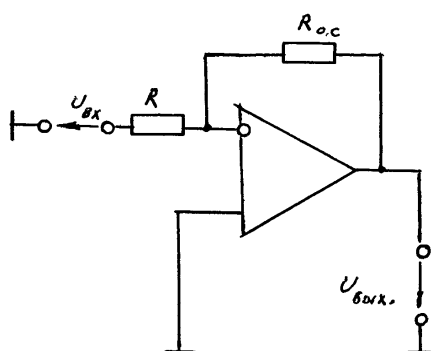


Рис.8.12

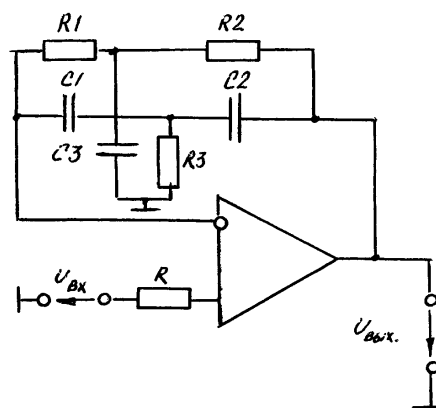


Рис.8.13

## Г е н е р а т о р ы

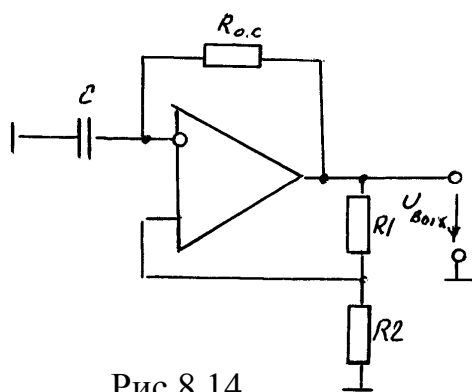


Рис.8.14

М у л ь т и в и б р а т о р о м называется генератор периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор (рис.8.14) является автогенератором и работает без подачи входного сигнала. Рассматриваемый генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны  $t_{и} = t_{п} = R_{o.c} C \cdot \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$ , при  $R_1 = R_2$

$t_{и} = t_{п} = R_{o.c} C \cdot \ln 3$ , период повторения импуль-

сов  $T_{п} = (t_{и} + t_{п}) = 2t_{и}$ , скважность  $Q = \frac{T_{п}}{t_{и}} = 2$ . Изменяя  $\tau = R_{o.c} C$  и величины  $R_1, R_2$ ,

можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Г е н е р а т о р гармонических колебаний с м о с т о м В и н а на базе ОУ (рис.8.15) является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов  $R_1, R_2, C_1, C_2$ , образует



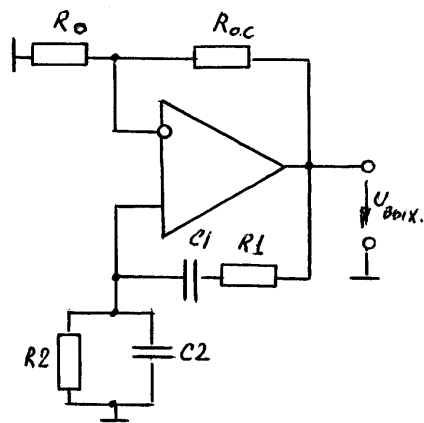


Рис.8.15

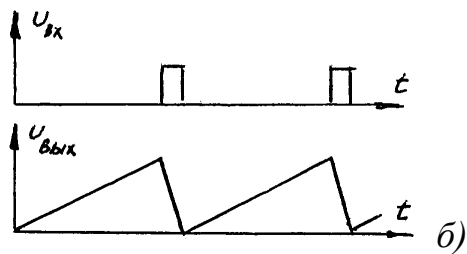
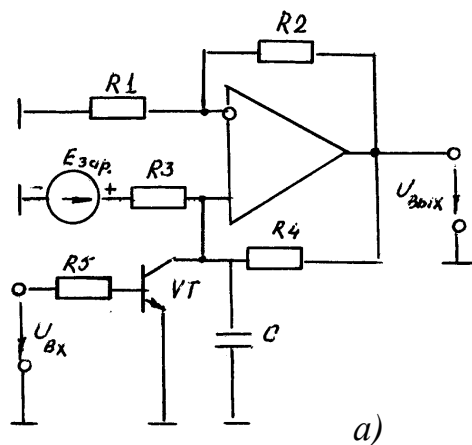


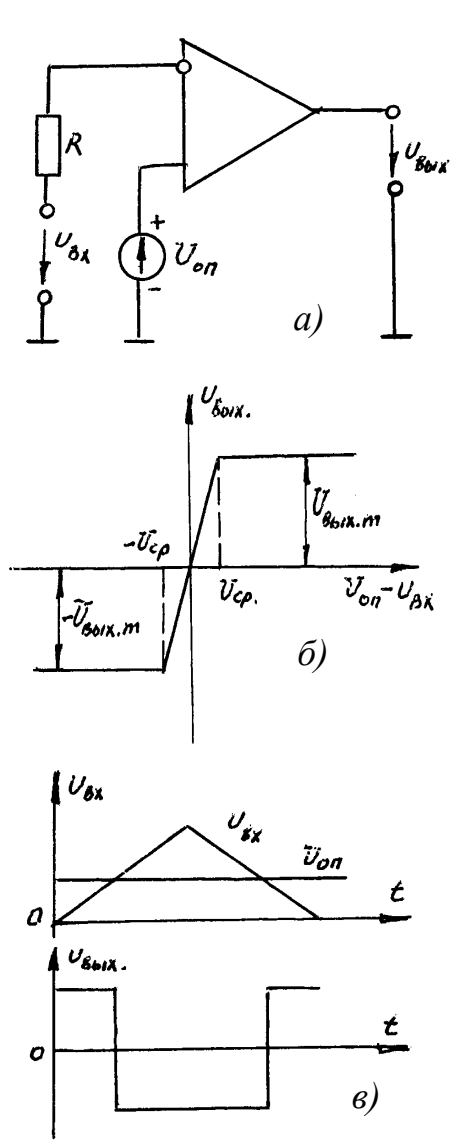
Рис.8.16

звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$  - частота генерации частотно-зависимой цепи. При  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$  (условие обязательное)  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ . Соотношение параметров  $R_{0.c}$  и  $R_0$  определяет коэффициент усиления  $k_u$ .

Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) предназначен для получения напряже-

ния, которое в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному или близкому к линейному закону и используется в каскадах сравнения, схемах временной задержки импульсов, для получения временных разверток в электронно-лучевых трубках и т.д. Реализация ГЛИНа на ОУ и временные диаграммы входного и выходного напряжений даны на рис.8.16. Принцип работы основан на применении зарядного или разрядного устройства, интегрирующего конденсатора  $C$  и электронного ключа на транзисторе  $VT$ . При закрытом состоянии ключа происходит заряд конденсатора  $C$  от  $E_{зар.}$  через  $R_3$  с постоянной времени  $\tau_{зар.} = R_3 C$ , что определяет длительность прямого (рабочего) хода. Замыкание ключа приводит к быстрой разрядке конденсатора и время обратного хода определяется сопротивлением насыщенного транзистора. Выходное напряжение повторяет форму напряжения на конденсаторе  $C$  и имеет вид "пилы".

Пороговые устройства предназначены для сравнения двух входных величин. В рассматриваемых схемах сравниваются постоянное  $U_{оп}$  и переменное  $U_{вх}$  напряжения. На рис.8.17,а приведен двухвходовой компаратор, у которого сравнивающиеся сигналы поступают на оба входа усилителя. Поэтому состояние выхода компаратора (полярность выходного напряжения) определяется большим по уровню напряжением одного из входов, что отражает идеализированная (без учета гистерезиса) передаточная характеристика (рис.8.17,б). При равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю. При  $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} > 0$



напряжение на выходе ОУ будет равно  $U_{вых} = U_{вых.м}$ , если же  $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} < 0$ , то  $U_{вых} = -U_{вых.м}$ .

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  (рис.8.17,в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

Для ускорения процесса переключения используют ускоряющие цепи на основе введения положительных обратных связей (ПОС). Такой компаратор с ПОС называется также триггером Шмитта (рис.8.18,а). Здесь применяется ПОС через цепочку  $R_1, R_2$ , а входной сигнал подается на инвертирующий вход. На рис.8.18,б построена передаточная характеристика этого компаратора, для которой

$$U_{пр}' = U_{оп} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{вых.м} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{пр}'' = U_{оп} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{вых.м} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{г} = U_{пр}' - U_{пр}'' = 2U_{вых.м} \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

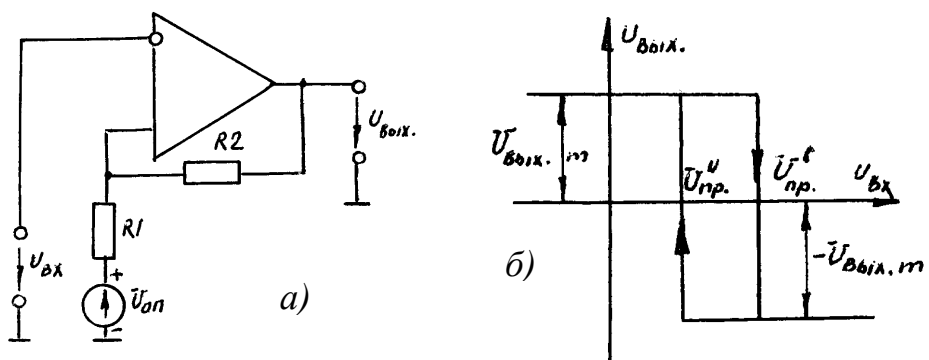


Рис.8.18

$U_{г}$  - ширина петли, определяемая соотношением сопротивлений делителя  $R_1$  и  $R_2$ .

## Предварительное задание к эксперименту

1. Для инвертирующего усилителя (рис.8.4)  $R_I=10$  кОм и  $R_{o.c.}=20, 100$  и  $270$  кОм рассчитать и построить амплитудную характеристику при изменении  $U_{вх}$  от 0 до 1000 мВ и ограничении  $U_{вых}=12$  В.

2. Рассчитать  $U_{вых}$  вычитателя-усилителя (рис.8.6) при  $R_I=R_2=R=10$  кОм и  $R_{o.c.}=10$  и  $20$  кОм при трех значениях  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.8.2.

3. Рассчитать  $U_{вых}$  инвертирующего сумматора (рис.8.7) при  $R_I=R_2=R=10$  кОм и  $R_{o.c.}=20, 50, 100$  кОм при трех различных наборах  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.8.2.

4. Определить постоянную времени  $\tau$  для интегратора ( $R_I=10$ кОм;  $C_{o.c.}=5$  и  $10$  нФ) и дифференциатора ( $R_{o.c.}=10$  и  $50$  кОм,  $C=10$  и  $5$ нФ).

5. Рассчитать резонансную частоту  $f_0$  и период  $T_0$  избирательного усилителя (рис.8.13) при  $R=24$  кОм и  $C=1,1$  нФ.

6. Рассчитать длительность импульсов ( $t_u$ ) и пауз ( $t_n$ ), а также период повторения импульсов ( $T_n$ ) выходного напряжения мультивибратора (рис.8.14) при  $C=6,8$  нФ и  $R_{o.c.}=16$  кОм.

7. Определить частоту и период выходного напряжения генератора гармонических колебаний (рис.8.15) при  $R=$  \_\_\_ кОм и  $C=$  \_\_\_ нФ.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

## Порядок выполнения эксперимента

1. При включенном стенде и отсутствии входного напряжения произвести балансировку усилителя потенциометром “установка 0”.

2. Для инвертирующего (рис.8.4) или неинвертирующего (рис.8.5) усилителя снять передаточные характеристики для заданных в предварительном задании значений  $R_{o.c.}$ . Входное напряжение снимается с источников опорного напряжения с полярностью “+” и “-”, устанавливаемой переключателями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Уровень входного напряжения меняется в диапазоне от 0 до 1000 мВ. Результаты измерений занести в табл.8.1.

Т а б л и ц а 8 . 1

$U_{вх},$ мВ	0	...	1000
$U'_{вых},$ В при $R_{o.c.}=20$ кОм	0	...	
$U''_{вых},$ В при $R_{o.c.}=100$ кОм	0	...	
$U'''_{вых},$ В при $R_{o.c.}=270$ кОм	0	...	

По результатам измерений построить передаточные характеристики. Недостающие характеристики в трех четвертях системы координат строятся по зеркальному отображению по отношению к снятым по табл.8.1. На построенных характеристиках нанести точки по предварительному расчету.

3. Собрать цепь вычитателя-усилителя согласно рис.8.6 и подать на входы от источников постоянного тока напряжения различные по уровню и знаку при различных значениях  $R_{o.c}$ . Значения входных и выходного напряжений занести в табл.8.2.

4. а) Для инвертирующего (рис.8.7) или неинвертирующего (рис.8.8) цифрового сумматора произвести измерения входных и выходного напряжений для различных по знаку и величине входных напряжений при двух значениях  $R_{o.c}$ . По п.п. 3,4 уровень входных напряжений брать в пределах  $\pm 1В$ . Результаты измерений занести в табл.8.2.

Т а б л и ц а 8 . 2

	$U_{вх 1}, мВ$	$U_{вх 2}, мВ$	$U_{вых}, мВ$	$R_{o.c}, кОм$	$U_{вых}, расч.мВ$
Вычита- тель				10	
				10	
				20	
Сумматор				20	
				50	
				100	

б) В геометрическом неинвертирующем сумматоре на входы подаются переменные напряжения: первое - с выхода симметричного мультивибратора стенда (включить источник питания 5В стенда), второе - с генератора низкочастотных сигналов (синусоидальный выход). Ослабление - 20. Частота 3-6 кГц.  $R_{o.c}$  сумматора 10 или 20 кОм. Снять осциллограммы входных  $U_{вх}(t)$  и выходного  $U_{вых}(t)$  напряжений, по которым определить параметры входных сигналов (амплитуду, частоту, период). Произвести графическое сложение входных сигналов с коэффициентом усиления  $k_U=2$ .

5. По рис.8.9 и 8.10 на входы дифференциатора и интегратора подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора стенда. Снять осциллограммы и определить параметры входных  $U_{вх}(t)$  импульсов (амплитуда, период, частота), а также снять осциллограммы выходных  $U_{вых}(t)$  напряжений при следующих номинальных данных устройств: для дифференциатора -  $C_{вх}=10$  и  $5$  нФ,  $R_{o.c}=20$  и  $30$  кОм,  $C_{o.c}=2$  нФ; для интегратора -  $R_{вх}=10$  кОм,  $C_{o.c}=10$  и  $5$  нФ,  $R_{o.c}=20$  кОм. По снятым осциллограммам определить графическим способом постоянную времени  $\tau$  и сравнить с результатами предварительного расчета.

6. Собрать схему линейного усилителя согласно рис.8.12 с подключением на вход генератора низкочастотных колебаний (синусоидальный вы-

ход). Снять амплитудную характеристику на частоте 1кГц в линейном режиме, который контролируется осциллографом на выходе усилителя, для значений  $R_{o.c}=91$  и 270 кОм. Результаты эксперимента свести в табл.8.3.

Т а б л и ц а 8 . 3

$R_{o.c}=91\text{кОм}$	$U_{\text{ВХ}},\text{мВ}$			
	$U_{\text{ВЫХ}},\text{В}$			
$R_{o.c}=270\text{кОм}$	$U_{\text{ВХ}},\text{мВ}$			
	$U_{\text{ВЫХ}},\text{В}$			

По результатам измерений построить соответствующую характеристику  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$ .

7. По рис.8.13 собрать схему избирательного усилителя. На вход подключается низкочастотный генератор сигналов на синусоидальном выходе с уровнем выходного напряжения 90 мВ (входное для усилителя). Снять амплитудно-частотную характеристику  $k_U(f)$  в диапазоне частот 4,5-7,5 кГц. Результаты эксперимента занести в табл.8.4.

Т а б л и ц а 8 . 4

$U_{\text{ВХ}}=90\text{мВ}$

$f, \text{кГц}$			
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$			
$K_U$			

По результатам табл.8.4 построить АЧХ, определить резонансную частоту, которую сравнить с результатами предварительного расчета. По АЧХ определить  $f_n, f_v$ , полосу пропускания.

8. Согласно рис.8.14 и 8.15 при включенном питании стенда снять осциллограммы выходных  $U_{\text{вых}}(t)$  напряжений мультивибратора и генератора гармонических колебаний, по которым определить параметры сигналов: амплитуду, частоту, период. Результаты эксперимента сравнить с результатами предварительного расчета.

9. На вход генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) по схеме рис.8.15 подать  $U_{\text{вх}}$  от несимметричного мультивибратора. По осциллограммам  $U_{\text{вх}}(t)$  и  $U_{\text{вых}}(t)$  определить: для  $U_{\text{вх}}$  - частоту, коэффициент заполнения, скважность импульсов, для  $U_{\text{вых}}$  - амплитуду, длительность прямого (рабочего) хода, длительность обратного хода.

10. На вход компаратора (рис.8.17) подать синусоидальное напряжение от генератора сигналов при ослаблении "0". Снять осциллограммы входного  $U_{\text{вх}}(t)$  и выходного  $U_{\text{вых}}(t)$  напряжений.

11. Для триггера Шмитта (рис.8.18) при подаче на вход напряжения (по п.10) снять передаточную характеристику  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  устройства.

Примечание: п.п.4б, 5, 9, 10, 11 выполнять, используя оба канала осциллографа (канал А - вход, канал Б - выход). **Внимание!** Перед включением осциллографа в схему обязательно проверьте положение входа “ $\perp$ ” (общая точка схемы).

## С о д е р ж а н и е   о т ч е т а

Цель работы, рабочие схемы исследуемых устройств, результаты предварительного расчета, характеристики, осциллограммы, рассчитанные параметры.

## К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. К какому классу усилителей относится ОУ? 2. Чем объясняется широкое использование ОУ? 3. Поясните структурную компоновку ОУ. 4. Что такое обратные связи в усилителях и как они используются при построении конкретных устройств на базе ОУ? 5. Какие основные характеристики ОУ и какой они имеют вид? 6. Где используют линейный и нелинейный режим усиления? 7. Поясните принцип построения инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ. 8. Как определяется их коэффициент усиления? 9. Поясните принцип построения вычитателя, сумматора, дифференциатора, интегратора. Запишите формулы выполняемых операций. 10. Что такое “избирательный усилитель”? Особенности АЧХ. Что такое и как определяется полоса пропускания? 11. Основные принципы построения самовозбуждающихся устройств на базе ОУ. 12. Что такое частотно-зависимые цепи и в каких устройствах они используются? 13. Принцип построения и использование ГЛИНа. 14. Что такое “пороговые устройства”? 15. Какое принципиальное отличие при построении компаратора и триггера Шмитта на ОУ? 16. Поясните, что такое “гистерезис” в электронных цепях?

## Лабораторная работа № 9

### ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение принципов построения серийных логических микросхем; исследование логических функций одного и двух переменных и их реализация; построение простых устройств автоматики на базе логических и цифро-импульсных устройств.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Л о г и ч е с к и е э л е м е н т ы (ЛЭ) широко применяются в автоматике, вычислительной технике и цифровых измерительных приборах. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, при котором уровни сигналов могут принимать только два значения. В положительной логике принято, что высокий уровень сигнала соответствует логической единице (1), а низкий – логическому нулю (0).

Все логические устройства можно разделить на две группы :

- 1) комбинационные, в которых выходные сигналы в данный момент однозначно определяются входными сигналами;
- 2) последовательностные, в которых выходные сигналы зависят не только от входных сигналов, но и от предыдущего состояния устройства.

Логическая функция выражает зависимость выходных логических переменных от входных и принимает значения 0 или 1. Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности), где записываются возможные комбинации аргументов и соответствующие им функции.

В общем случае число элементарных логических функций от  $n$  переменных равно  $2^{2^n}$ . Так, при одной переменной возможны четыре функции (табл.9.1). Здесь единичная и нулевая функции не зависят от значения аргумента и являются постоянными. Двум переменным соответствует 16 функций:  $2^{2^2}=16$ . В табл.9.2 приведены основные логические функции двух переменных.

Работу логических устройств анализируют с помощью алгебры логики (булевой алгебры), где переменная может принимать только два значения: 0 или 1.

Т а б л и ц а 9 . 1

Название функции	Обозначение функции	Значение $x$	
		0	1
Нулевая	$y_0$	0	0
Повторение	$y_1$	0	1
Инверсия	$y_2$	1	0
Единичная	$y_3$	1	1

Основными логическими операциями являются (см. табл.9.2):

- 1) логическое умножение :  $y=x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$  (читается “и  $x_1$ , и  $x_2, \dots$ , и  $x_n$ ”);
- 2) логическое сложение :  $y=x_1+x_2+\dots+x_n$  (читается “или  $x_1$ , или  $x_2, \dots$ , или  $x_n$ ”);
- 3) логическое отрицание :  $y = \bar{x}$  (читается “не  $x$ ”).

Как видно из табл. 9.2, выходной сигнал  $y$  элемента ИЛИ равен 1, если хотя бы один из его входов подан сигнал 1. Элемент И выдает 1, если на все входы поданы сигналы 1.

Все возможные логические функции  $n$  переменных можно образовать с помощью комбинации трех основных операций: И, ИЛИ, НЕ. Поэтому такой набор называют логическим базисом или функционально полным. Используя законы булевой алгебры (табл. 9.3), можно доказать, что таковыми являются наборы из одной функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

В базовых элементах одной серии использована одинаковая микросхемная реализация. Серия характеризуется общими электрическими, конструктивными и технологическими параметрами.

Интегральные микросхемы серии 155 представляют собой транзисторно-транзисторные логические (ТТЛ) элементы с 14 или 16 выводами. Базовым элементом серии является логический элемент И-НЕ, состоящий из многоэмиттерного транзистора  $V_{T1}$  и сложного усилителя-инвертора (рис.9.1).



Таблица 9.2

Тип Элемента	Логическая функция (операция)	Обозначение Логической Операции	Таблица истинности				Условное Изображение	
			$x_1$	0	0	1		1
			$x_2$	0	1	0		1
Элемент НЕ (инвертор)	Логическое Отрицание, Инверсия	$\bar{x}$	$x$	0		1		
		$\bar{1}x$	$\bar{x}$	1		0		
Элемент И (конъюнктор)	Логическое умножение, Конъюнкция	$x_1 \cdot x_2$ $x_1 x_2$ $x_1 \wedge x_2$ $x_1 \& x_2$	$x_1 \cdot x_2$	0	0	0	1	
Элемент ИЛИ (дизъюнктор)	Логическое сложение, Дизъюнкция	$x_1 + x_2$ $x_1 \vee x_2$	$x_1 + x_2$	0	1	1	1	
Элемент И-НЕ (элемент Шеффера)	Штрих Шеффера, Отрицание конъюнкции	$\overline{x_1 \cdot x_2}$ $x_1   x_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	1	1	1	0	
Элемент ИЛИ-НЕ (элемент Пирса)	Стрелка Пирса, функция Вебба, Отрицание дизъюнкции	$\overline{x_1 + x_2}$ $x_1 \downarrow x_2$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	0	0	
Запрет $x_2$	Запрет	$x_1 \cdot \overline{x_2}$	$x_1 \cdot \overline{x_2}$	0	0	1	0	
Импликация от $x_2$ к $x_1$	Импликация	$x_1 + \overline{x_2}$	$x_1 + \overline{x_2}$	1	0	1	1	
Исключающее ИЛИ (неравнозначность, сложение по модулю 2)	Исключающее ИЛИ	$x_1 \oplus x_2$ $\overline{x_1} x_2 + x_1 \overline{x_2}$	$x_1 \oplus x_2$	0	1	1	0	
Равнозначность (эквивалентность)	Равнозначность	$x_1 \sim x_2$ $x_1 x_2 + \overline{x_1} \overline{x_2}$	$x_1 \sim x_2$	1	0	0	1	

Т а б л и ц а 9 . 3

Аксиомы (тождества)	$1+x=1$ $0+x=x$ $x+x=x$ $x+\bar{x}=1$ $\overline{\bar{x}}=x$	$0 \cdot x=0$ $1 \cdot x=x$ $x \cdot x=x$ $x \cdot \bar{x}=0$
Законы коммутативности	$x_1+x_2=x_2+x_1$	$x_1 \cdot x_2=x_2 \cdot x_1$
Законы ассоциативности	$x_1+x_2+x_3=x_1+(x_2+x_3)$ $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3=x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$	
Законы дистрибутивности	$x_1 \cdot (x_2+x_3)=(x_1 \cdot x_2)+(x_1 \cdot x_3)$ $x_1+(x_2 \cdot x_3)=(x_1+x_2) \cdot (x_1+x_3)$	
Законы дуальности (теоремы де Моргана)	$\overline{x_1+x_2}=\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2}=\bar{x}_1+\bar{x}_2$
Законы поглощения	$x_1+x_1 \cdot x_2=x_1$	$x_1 \cdot (x_1+x_2)=x_1$

Если на входы ЛЭ поданы высокие положительные потенциалы  $U_{bx}^1 \geq 2.4$  В, то переходы база-эмиттер  $VT1$  закрываются, а через его открытый переход база-коллектор и резистор  $R1$  протекает ток базы транзистора  $VT2$ ,

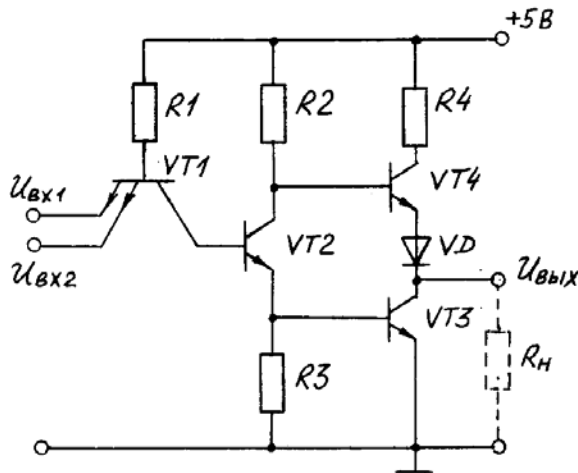


Рис.9.1

достаточный для его насыщения. При этом ток эмиттера  $VT2$  открывает транзистор  $VT3$  и подключает выход ЛЭ к общей шине. Вследствие падения напряжения на резисторе  $R2$ , а также за счет включения диода  $VD$  напряжение на переходе база-эмиттер транзистора  $VT4$  оказывается недостаточным для его открывания. Таким образом, напряжение на выходе ЛЭ не превышает напряжения насыщения транзистора  $VT3$  (примерно 0,2 ... 0,4 В), что соответствует логическому 0.

Если хотя бы на одном из входов ЛЭ оказывается низкий потенциал,  $U_{bx}^0 \leq 0,4$  В, то через открытый переход база-эмиттер  $VT1$  и резистор  $R1$  протекает входной ток  $I_{bx}^0 \leq 1,6$  мА, а в базу  $VT2$  попадает незначительный по величине обратный ток коллекторного перехода  $VT1$ . В этом случае транзисторы  $VT2$  и  $VT3$  заперты, а транзистор  $VT4$  открыт и насыщен, так как в его базу протекает ток через резистор

R2. Выход ЛЭ от шины питания +5 В получает высокий потенциал (логический уровень 1) через переходы  $VT4$ , диод  $VD4$  и резистор  $R4$ .

Данный ЛЭ производит логическое умножение двух входных сигналов с одновременным инвертированием выходной величины (2И-НЕ).

Если в базовом элементе (рис.9.1) отсоединить элементы  $R4$ ,  $VT4$ ,  $VD4$ , а в коллектор транзистора  $VT3$  включить нагрузку, то вместо инвертирования обеспечивается повторение выходного сигнала.

В настоящее время применяется несколько разновидностей серий микросхем с элементами ТТЛ: стандартные (серии 133; К155), высокого быстродействия (серии 130; К131), микромощные (серия 134), с диодами Шоттки (серии 530; К531) и микромощные с диодами Шоттки (серия К555). Кроме расширения номенклатуры элементов серий К531 и К555 сейчас активно развиваются наиболее перспективные серии ТТЛШ - микромощная К1533 и быстродействующая К1531, выполненные на основе последних достижений технологии изготовления ИС - ионной имплантации и прецизионной фотолитографии.

Наибольшим быстродействием обладают ЛЭ, выполненные по технологии ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с транзисторами Шоттки). Меньше потребляет мощности КМДПТЛ (комплементарная МДП-транзисторная логика). Она же лучшая по помехоустойчивости и нагрузочной способности. ЭСЛ и И<sup>2</sup>Л (интегральная инжекционная логика) меньше других генерируют помехи.

В последние годы получили развитие программируемые логические элементы, на которых с помощью программаторов можно построить многие цифровые устройства.

Любая сложная логическая функция может быть реализована с помощью ЛЭ, выполняющих элементарные функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пусть требуется составить комбинационную

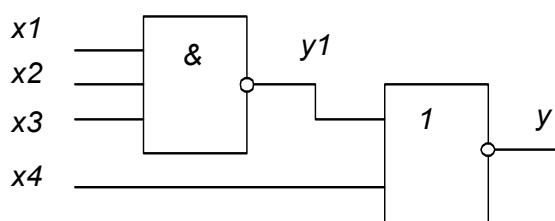


Рис.9.2

схему с четырьмя входами  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и одним выходом  $y$ . Высокий уровень напряжения должен появляться на выходе только при наличии высоких уровней на трех входах, т.е.  $y=1$  при  $x_1=x_2=x_3=1$  и  $x_4=0$ . Такую схему можно составить путем подбора элементов.

Например, элемент 3И-НЕ при подаче на его входы  $x_1=x_2=x_3=1$  дает на выходе сигнал  $y_1=0$ . Подавая его и  $x_4=0$  на вход элемента 2ИЛИ-НЕ, получаем  $y=1$ .

Другим способом является преобразование логической функции по правилам алгебры логики (см. табл. 9.3). Для данного примера  $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}$ . Используя тождество  $x = \overline{\overline{x}}$  и формулы де Моргана, эту функцию можно представить в виде:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}}} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot x_4} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3}} + x_4.$$

Полученной логической функции соответствует схема рис.9.2.

### Предварительное задание к эксперименту

Составить на логических элементах 2И-НЕ (3И-НЕ) и 2ИЛИ-НЕ комбинационную схему, на выходе которой высокий уровень напряжения (логическая 1) появляется только при значениях сигналов на входах, заданных табл. 9.4.

Т а б л и ц а 9 . 4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$x_1$	0	0	0	1	0	1	0	1
$x_2$	0	0	0	1	0	1	1	0
$x_3$	0	1	1	1	0	1	0	1
$x_4$	0	0	1	1	-	-	-	-

### П о р я д о к  в ы п о л н е н и я  э к с п е р и м е н т а

Изучить принцип работы логических элементов (табл.9.2).

Подавая сигналы с наборного поля на входы логических элементов и соединяя их выходы с элементами индикации, реализовать основные функции одного и двух аргументов. Привести таблицы истинности исследуемых элементов.

Собрать схему предварительного задания, проверить правильность работы, составить таблицу истинности.

Осуществить выборку с наборного поля следующих чисел (по указанию преподавателя):

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| а) всех четных                   | б) всех нечетных             |
| в) всех чисел $8 \leq N \leq 15$ | г) всех чисел $N \leq 7$     |
| д) всех чисел, кратных 4         | е) чисел 0, 1, 2, 3          |
| ж) чисел 4, 5, 6, 7              | з) чисел 8, 9, 10, 11        |
| и) 3, 7, 11, 15                  | к) 6, 7, 14, 15              |
| л) 4, 5, 12, 13                  | м) 2, 6, 10, 14              |
| н) 2, 3, 10, 11                  | о) 9, 11, 13, 15             |
| п) 8, 10, 12, 14                 | р) 1, 5, 9, 13               |
| с) 1, 3, 9, 11                   | т) 4, 6, 12, 14              |
| у) 10, 11, 14, 15                | ф) 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 |
| х) 0, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15     | ц) 0-3, 8-11.                |

5. Собрать схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

## С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; схема базового логического элемента; схема, составления в предварительном задании; таблицы истинности исследуемых логических элементов; схемы по пп. 4, 5.

## К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какие операции и тождества алгебры логики Вы знаете? 2. Перечислите логические функции одного и двух аргументов, покажите примеры реализации. 3. Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС? 4. Приведите примеры простейших цифровых устройств на основе логических элементов. 5. Реализуйте несколько функций, заданных таблицей истинности. 6. Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)? 7. Поясните работу базового логического элемента. 8. Как классифицируются ЛЭ по микросхемной реализации. 9. Объясните причины перспективности интегральных логических элементов.

## Лабораторная работа № 10

### КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Ц е л ь р а б о т ы : ознакомление с принципом действия и схемотехникой дешифраторов, мультиплексоров и сумматоров; изучение работы этих комбинационных логических схем; реализация на их основе простейших устройств автоматики.

#### О б щ и е с в е д е н и я

К о м б и н а ц и о н н ы м и называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов в тот же момент времени. Они используются в информационно-измерительных системах и ЭВМ, в системах автоматического управления, в устройствах промышленной автоматики и т.п.

П о с т р о е н и е к о м б и н а ц и о н н о г о л о г и ч е с к о г о у с т р о й с т в а осуществляется следующим образом. По требуемому алгоритму работы составляются таблица истинности и соответствующее ей логическое уравнение. Это уравнение минимизируется по правилам алгебры логики с целью упрощения и затем строится логическая схема на базе логических элементов (ЛЭ) И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Наряду с построением устройств промышленность изготавливает наиболее часто встречающиеся к о м б и н а ц и о н н ы е л о г и ч е с к и е с х е м ы (КЛС) в виде интегральных микросхем. Примерами КЛС являются шифраторы, дешифраторы, кодопреобразователи, устройства сравнения (компараторы), мультиплексоры, демultipлексоры, сумматоры, арифметико-логические устройства и др.

Д е ш и ф р а т о р (декодер) представляет собой комбинационное устройство, в котором при каждой комбинации входных переменных формируется сигнал высокого или низкого уровня только на одном выходе. Дешифратор называется полным, если число выходов  $n$  равно числу возможных наборов сигналов на  $m$  входах, т.е.  $n=2^m$ . Неполный дешифратор имеет меньшее число выходов. Дешифратор может иметь стробирующий (управляющий) вход. Сигнал на этом входе разрешает или запрещает выполнение операции дешифрования.

Исследуемая ИМС К155ИДЗ (рис.10.1) представляет собой дешифратор-демультиплексор с 4 на 16. Основу этой микросхемы составляют 16 ЛЭ 5И-НЕ и 8 инверторов. Работа дешифратора определяется таблицей истинности (табл. 10.1). Дешифратор реализует логические функции:

$$F_0 = \bar{A}_3\bar{A}_2\bar{A}_1\bar{A}_0; F_1 = \bar{A}_3\bar{A}_2\bar{A}_1A_0; F_2 = \bar{A}_3\bar{A}_2A_1\bar{A}_0; \dots; F_{15} = A_3A_2A_1A_0.$$

Он позволяет преобразовать четырехразрядный двоичный код, поступивший на входы  $A_0...A_3$ , в напряжение низкого уровня, появляющееся на

одном из шестнадцати выходов  $\bar{0}...1\bar{5}$ . Если входные переменные представить как двоичную запись чисел, то логический нуль формируется на том выходе, номер которого соответствует десятичной записи того же числа (см.табл.10.1). Кроме четырех входов  $A0...A3$  устройство имеет еще два входа  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  разрешения дешифрации. Они играют роль стробирующих входов, если на них подан низкий уровень напряжения. Если хотя бы на одном из входов  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  установить высокий уровень, то на всех выходах  $\bar{0}...1\bar{5}$  будет высокий уровень напряжения. Такой режим используется при наращивании числа разрядов дешифрируемого кода.

Т а б л и ц а 10.1

В х о д ы						В ы х о д ы						
$\bar{W}1$	$\bar{W}2$	$A3$	$A2$	$A1$	$A0$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	...	$\bar{13}$	$\bar{14}$	$\bar{15}$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	...	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	...	1	1	1
0	0	0	0	1	0	1	1	0	...	1	1	1
									...			
0	0	1	1	0	1	1	1	1	...	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	...	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	0
0	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	0	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1

Примечание: здесь и далее x — любое значение сигнала.

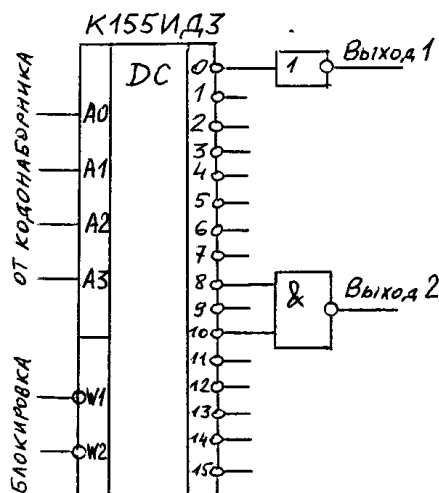


Рис.10.1

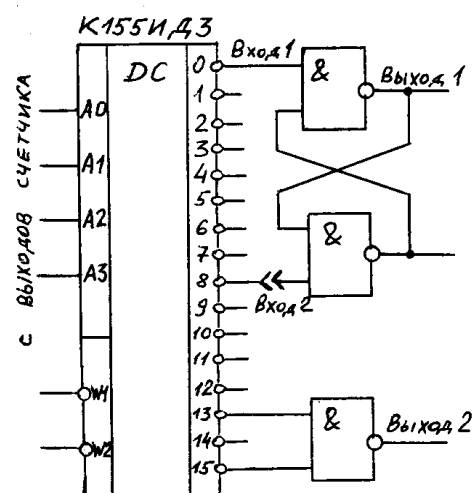


Рис.10.2

Входы  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  можно использовать как логические, тогда микросхема ИДЗ служит демультиплексором данных. Входы  $A0...A3$  в этом случае используются как адресные, чтобы направить поток данных, принимаемых

входами  $\overline{W}1$  или  $\overline{W}2$ , на один из выходов  $\overline{0}..1\overline{5}$ . Подобные задачи возникают при дистанционном управлении, в преобразователях последовательного кода в параллельный и т.п.

Принцип выбора "1 из  $n$ " используется для управления индикаторами в устройствах отображения информации, в различных схемах распределителей импульсов по нескольким каналам (в данном случае - до 16). Как видно из рис.10.1, на выходе 1 высокий логический уровень появится только при кодовом наборе 0000, на выходе 2 - при наборах 1000 или 1010.

Если в системах управления применяется генератор тактовых импульсов и четырехразрядный счетчик, то дешифратор можно использовать в качестве делителя частоты (см. рис.10.1) или формирователя импульсов (рис.10.2), благодаря цикличности "перемещения" логических уровней по выходам. Формирование конечной последовательности импульсов может осуществляться различными способами (см. рис.10.2). Например, на выходе 1 длительность сформированного импульса равна половине цикла, т.к. переключение  $\overline{RS}$ -триггера происходит при прохождении нулевого сигнала на выходах 0 и 8 дешифратора. При выборе других точек подключения входа 2 скважность ( $q=T_{\text{цикла}}/t_{\text{имп}}$ ) можно изменять в широких пределах (от 1,1 до 16). В другом примере на рис.10.2 показан простой способ получения пакета из двух импульсов на выходе одного ЛЭ. Аналогичная схемотехника используется и для формирования последовательности импульсов различной длительности.

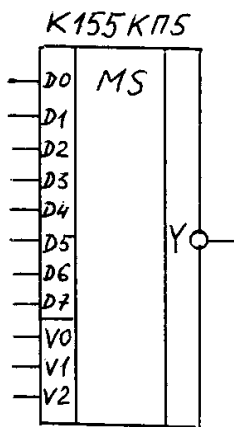


Рис.10.3

Мультиплексор (управляемый кодом переключатель) предназначен для коммутации одного из  $m$  входов на выход. Входы мультиплексора ( $m$  - информационных и  $k$  - управляющих) находятся в следующем соответствии:  $m=2^k$ . Выход обычно один, он может быть прямым или инверсным.

Микросхема K155KP5 представляет собой восьмиканальный мультиплексор без стробирования (рис.10.3). Основу его схемы составляет один ЛЭ 4И-8ИЛИ-НЕ и 6 простых инверторов. Он имеет 8 информационных входов  $D0..D7$ , 3 адресных входа  $V0..V2$  и выход  $\overline{Y}$ .

Логическое уравнение имеет вид:

$$Y = D_0\overline{V}_2\overline{V}_1\overline{V}_0 + D_1\overline{V}_2\overline{V}_1V_0 + D_2\overline{V}_2V_1\overline{V}_0 + D_3\overline{V}_2V_1V_0 + D_4V_2\overline{V}_1\overline{V}_0 + D_5V_2\overline{V}_1V_0 + D_6V_2V_1\overline{V}_0 + D_7V_2V_1V_0.$$

Состояние мультиплексора определяется таблицей истинности (табл. 10.2). Как видно из таблицы, мультиплексор выполняет функции простого инвертора только по тому каналу, номер которого соответствует двоичному коду адресных входов. Поэтому мультиплексор нашел широкое применение в качестве преобразователя параллельного кода в последовательный, для пе-



редачи информации по линиям связи и для последовательного опроса (контроля) при большом числе каналов или устройств.

Т а б л и ц а 10.2

Адресные входы			Информационные входы								Выход
<i>V2</i>	<i>V1</i>	<i>V0</i>	<i>D0</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>	<i>D6</i>	<i>D7</i>	$\bar{Y}$
0	0	0	0	x	x	x	0	x	x	x	1
0	0	0	1	x	x	x	1	x	x	x	0
0	0	1	x	0	x	x	x	x	x	x	1
0	0	1	x	1	x	x	x	x	x	x	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	0	1
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	1	0

Т а б л и ц а 10.3

Входы			Выходы	
<i>A<sub>i</sub></i>	<i>B<sub>i</sub></i>	<i>P<sub>i</sub></i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>P<sub>i+1</sub></i>
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

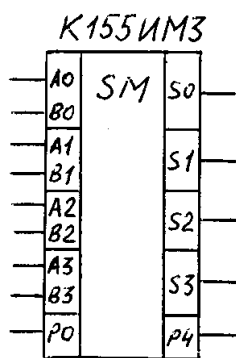


Рис.10.4

С у м м а т о р предназначен для сложения двух чисел, заданных в двоичном коде. Число входов и выходов сумматора определяется разрядностью слагаемых. Одноразрядный двоичный сумматор характеризуется таблицей истинности (табл.10.3). Такой сумматор называется полным, т.к. обрабатывает сигнал переноса с предыдущего разряда  $P_i$  и выдает сигнал переноса на последующий разряд  $P_{i+1}$ . Схемотехника сумматоров строится на ЛЭ "исключающее ИЛИ" (функция "неравнозначность") для суммирования и ЛЭ И-НЕ для переноса:

$$P_{i+1} = A_i B_i + (A_i \oplus B_i) P_i; \quad S_i = (A_i \oplus B_i) \oplus P_i.$$

Микросхема К155ИМ3 (рис.10.4) представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным поразрядным сложением и последовательным формированием сигнала переноса. Он имеет два четырехразрядных числа по входам данных  $A0...A3$  и  $B0...B3$ , а по входу  $P0$  - сигнал переноса с предыдущего разряда. Сумма разрядов входных чисел появляется на выходах  $S0...S3$ . На выходе  $P4$  выделяется сигнал переноса на последующий разряд.

Суммирование происходит по уравнению:

$$P_0 + 2^0(A_0 + B_0) + 2^1(A_1 + B_1) + 2^2(A_2 + B_2) + 2^3(A_3 + B_3) = 2^0S_0 + 2^1S_1 + 2^2S_2 + 2^3S_3 + 2^4P_4.$$

Сумматор можно использовать для вычитания чисел. Для этого вычитаемое представляют в дополнительном коде, который образуется из обратного (инверсного) кода добавлением к нему единицы. Так, четырехразрядное число  $B$ , записанное в прямом коде  $B_{np} = B_3B_2B_1B_0$ , может быть представлено в обратном коде  $B_{обр} = \bar{B}_3\bar{B}_2\bar{B}_1\bar{B}_0$  и в дополнительном коде  $B_{дон} = B_{обр} + 1$ .

Операцию вычитания можно представить в виде

$$A_{np} - B_{np} = A_{np} + B_{дон} - 10000.$$

Сумматор может работать и как компаратор чисел. Для этого второе сравниваемое число подают в обратном коде (например, через инверторы). Тогда при  $A=B$  на выходах  $S_0=S_1=S_2=S_3=1, P_4=0$ ; при  $A>B - P_4=1$ .

### Предварительное задание к эксперименту

Т а б л и ц а 10.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Число каналов	4	5	6	7	8	4	5	6
Количество импульсов в пакете	1	2	3	4	5	6	1	3
Длительность одиночного импульса, с	3	2	1	1	1	1	4	1
Период повторения пакета, с	8	16	8	16	16	16	16	16
$A$	3	5	7	9	10	12	13	15
$B$	15	14	13	12	7	10	8	4

1. Изучить принцип работы дешифратора К155ИДЗ, мультиплексора К155КП5 и сумматора К155ИМЗ.

2. Используя микросхемы К155ЛА3 (4 ЛЭ 2И-НЕ), К155ЛА4 (3 ЛЭ 3И-НЕ), К155ЛН1 (6 ЛЭ НЕ), К155ЛР1 (2 ЛЭ 2И-2ИЛИ-НЕ) составить схему включения дешифратора:

1) в режиме распределения импульсов по каналам, число которых задано табл.10.4;

2) в качестве формирователя пакета импульсов с параметрами, заданными табл.10.4. Частота переключения генератора тактовых импульсов равна 1 Гц.

3. Перевести в двоичный код и сложить два числа  $A$  и  $B$ , заданных табл.10.4.

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

1. Исследовать работу дешифратора в качестве преобразователя кодов. Проверить таблицу соответствия между логическими уровнями на выходах и кодовыми наборами на входах (табл. 10.1).
2. Собрать схемы включения дешифратора, составленные в предварительном задании и проверить их работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.
3. Исследовать работу мультиплексора, для этого подать сигналы на информационные входы  $D0...D7$  с выходов дешифратора  $\bar{0}...7$ , а адресные входы  $V0...V2$  соединить с шинами наборного поля. Проверить таблицу состояний (табл.10.2).
4. Исследовать работу сумматора, набрав на входах двоичные числа  $A$  и  $B$ . Проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании.
5. Факультативно. Использовать сумматор в качестве вычитателя и компаратора чисел  $A$  и  $B$ . Пояснить результаты.
6. Собрать схему сигнализации нулевого результата сложения ( $S0=S1=S2=S3=0$ ), используя имеющиеся на лабораторном стенде ЛЭ и один элемент индикации.

## С о д е р ж а н и е   о т ч е т а

Цель работы; таблицы истинности дешифратора и мультиплексора; составленные в предварительном задании схемы включения дешифратора с временными диаграммами; результаты сложения вычитания и сравнения заданных чисел  $A$  и  $B$ ; схема сигнализации нулевого результата сумматора.

## К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Чем отличаются КЛС от ЛЭ? Дайте сравнительный анализ на конкретных примерах.
2. Объясните назначение и области применения дешифратора.
3. Каков принцип работы исследуемого дешифратора?
4. Каким образом с помощью мультиплексора можно обеспечить постоянный обегаящий контроль 6 различных каналов или выходов ЛЭ?
5. Равноценны ли по своему функциональному назначению управляющие входы дешифратора и адресные входы мультиплексора?
6. Объясните принцип действия сумматора.
7. Как реализуется вычитание двоичных чисел?

# Лабораторная работа № 11

## ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Ц е л ь р а б о т ы: изучить принцип действия регистров и АЛУ; освоить методику вычислений и простейшие математические операции.

### О б щ и е с в е д е н и я

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является основным функциональным узлом микропроцессора, предназначенным для обработки данных. АЛУ представляет собой комбинационную логическую схему, выполняющую логические и арифметические действия.

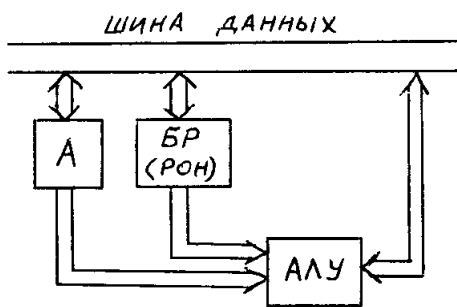


Рис.11.1

Для ввода, вывода и оперативного хранения информации, а также ее пошаговой загрузки по тактовому импульсу в АЛУ предназначен блок регистров: аккумулятор (А), буферные регистры (БР) или регистры общего назначения (РОН) (рис.11.1).

Совместная работа АЛУ и аккумулятора позволяет реализовать ряд арифметических и логических операций, в том числе сложение, вычитание, инверсию, сравнение, положительное или отрицательное приращение, сдвиг влево или вправо, логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п. Из перечисленных элементарных операций набираются сложные задачи современной микропроцессорной техники.

Для изучения возможностей и имитации работы простого микропроцессора предназначена группа интегральных схем повышенной степени интеграции, входящих в состав лабораторного стенда.

Универсальная микросхема К155ИПЗ (рис.11.2) представляет собой четырехразрядное АЛУ. Основу этой микросхемы составляют 30 простых логических элементов типа И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ, исключающие ИЛИ и инверторов.

АЛУ может формировать 16 логических операций и выполнять 16 арифметических действий, включая суммирование и вычитание, увеличение и уменьшение, удвоение и инверсию. Все операции производятся над четырехразрядными числами в двоичных кодах, причем одно из чисел подается на

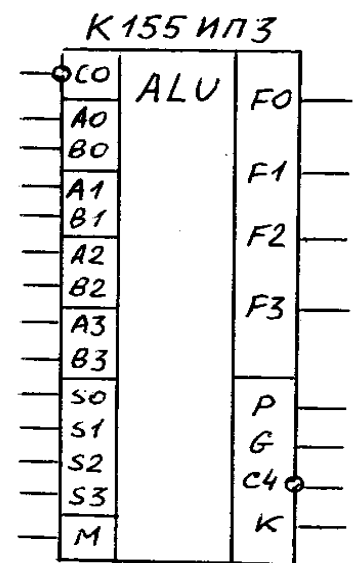


Рис.11.2

входы  $A3...A0$ , второе - на входы  $B3...B0$ , а результат вычислений появляется на выходах  $F3...F0$ . Характер операций АЛУ зависит от уровня сигнала на входе режима  $M$ : при  $M=0$  выполняются арифметические, а при  $M=1$  - логические операции. Причем последние выполняются поразрядно. Вид выполняемых операций зависит от кода операции, подаваемого на управляющие входы  $S3...S0$ , в соответствии с табл.11.1.

Ряд арифметических операций можно использовать либо для загрузки операндов (например,  $F=A$  или  $F=B$  для  $A=0$  при  $S=0000$  или  $S=1001$  соответственно), либо для сложения в прямом коде  $F=A+B$ , или вычитания в дополнительном коде  $F=A-B$ , либо для более сложных действий.

При выполнении арифметических операций учитывается признак переноса с предыдущего разряда, подаваемый на вход  $\overline{C0}$ . При этом формируется признак переноса четвертого разряда  $\overline{C4}$ . Для удобства наращивания разрядности АЛУ при объединении нескольких микросхем вход и выход признаков переноса выполнены инверсными. При выполнении логических операций (логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п.) с использованием прямых или инверсных кодов состояние входа переноса  $\overline{C0}$  не влияет на полученные результаты.

Для расширения функциональных возможностей АЛУ предусмотрены выходы образования переноса  $G$  и распространения переноса  $P$ : первый переключается при достижении  $1111_2=15_{10}$ , а второй - при появлении переноса в любом из четырех разрядов.

Т а б л и ц а 11.1

Код операции				Вид операции	
$S3$	$S2$	$S1$	$S0$	Арифметические ( $M=0$ )	Логические ( $M=1$ )
0	0	0	0	$F=A+C_0$	$F=\overline{A}$
0	0	0	1	$F=A \vee B+C_0$	$F=\overline{A \vee B}$
0	0	1	0	$F=A \vee \overline{B}+C_0$	$F=\overline{A} \cdot B$
0	0	1	1	$F=-I+C_0$	$F=0$
0	1	0	0	$F=A+A \cdot \overline{B} +C_0$	$F=\overline{A} \cdot B$
0	1	0	1	$F=A \cdot \overline{B} +(A \vee B)+C_0$	$F=\overline{B}$
0	1	1	0	$F=A-B-I+C_0$	$F=A \oplus B$
0	1	1	1	$F=A \cdot \overline{B}-I+C_0$	$F=A \cdot \overline{B}$
1	0	0	0	$F=A+A \cdot B+C_0$	$F=\overline{A \vee B}$
1	0	0	1	$F=A+B+C_0$	$F=\overline{A \oplus B}$

1	0	1	0	$F = A \cdot B + (A \vee \bar{B}) + C_0$	$F = B$
1	0	1	1	$F = A \cdot B - I + C_0$	$F = A \cdot B$
1	1	0	0	$F = A + A + C_0$	$F = 1$
1	1	0	1	$F = A + (A \vee B) + C_0$	$F = A \vee \bar{B}$
1	1	1	0	$F = A + (A \vee \bar{B}) + C_0$	$F = A \vee B$
1	1	1	1	$F = A - I + C_0$	$F = A$

Обозначения:  $\vee$  - логическое сложение;  $\cdot$  - логическое умножение;

$\oplus$  - сложение по модулю 2 (исключающее ИЛИ);  $+$  - арифметическое сложение;  $-$  - арифметическое вычитание;  $F = A + A$  - сдвиг влево на один разряд.

В схеме АЛУ предусмотрена также возможность сравнения операндов: если  $A = B$ , то на выходе  $K$  появляется уровень логической единицы.

Микросхема К155ИР11 (рис.11.3) представляет собой восьмиразрядный сдвигающий регистр, предназначенный для записи информации в параллельном или последовательном коде, ее хранения или сдвига влево и вправо. Основу этой микросхемы составляет 8 синхронизируемых триггеров в сочетании с логическими элементами И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и инверторами.

Схема имеет восемь входов  $D7...D0$  параллельной записи, два входа последовательной записи  $DL$  - со сдвигом влево и  $DR$  - со сдвигом вправо, управляющие входы  $S0$  и  $S1$  для выбора режима работы, тактовый вход  $C$  и установочный вход  $\bar{R}$ , а также восемь выходов  $Q7...Q0$ .

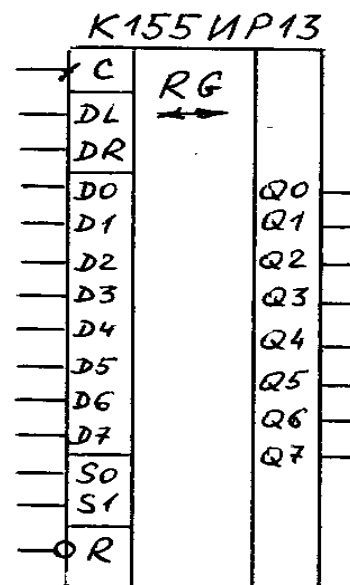


Рис.11. 3

В зависимости от состояний установочного входа и управляющих входов  $S0$  и  $S1$  схема может работать в различных режимах (см. табл.11.2).

Т а б л и ц а 11.2

Режим работы	Состояние входов					
	уст. $\bar{R}$	код режима		посл. зап.		Такт $C$
		$S1$	$S0$	$DL$	$DR$	
Установка в "0" (сброс)	0	х	х	х	х	х
Параллельная запись	1	1	1	0	0	┌
Последовательная запись со сдвигом влево	1	1	0	0/1	0	┌
Последовательная запись со сдвигом вправо	1	0	1	0	0/1	┌
Хранение	1	0	0	0	0	┌

Как видно из табл.11.2, параллельная запись информации осуществляется через входы  $D7...D0$  при  $S0=S1=1$ , и ее появление на выходах  $Q7...Q0$  обеспечивается синхронно по положительному фронту тактового импульса.

Примечание: при переключении регистра сдвига в режим «хранение» необходимо кнопку «такт» держать в нажатом состоянии.

Если сигнал подавать на вход  $DL$ , то при  $S1=1$  и  $S0=0$  каждый тактовый импульс будет осуществлять ее последовательную запись с одновременным сдвигом влево. Как известно, такая операция эквивалентна умножению двоичного числа на два. При  $S1=0$  и  $S0=1$  по входу осуществляется последовательная запись со сдвигом вправо, что эквивалентно делению двоичного числа на два.

Естественно, что при отсутствии тактового импульса записанная информация будет храниться в регистре до прихода нового импульса, точнее перепада 0/1. Вместе с тем, режим хранения обеспечивается и при установке  $S2=S1=0$  как результат запрета на переключение триггеров.

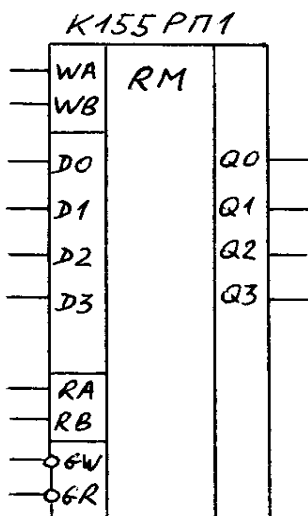


Рис.11.4

Микросхема К155РП1 (рис.11.4), представляет собой четырехразрядный регистр памяти, предназначенный для записи и хранения информации емкостью 16 бит, и обычно используется в качестве оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) или буферного регистра (БР). Основу схемы составляют 16 триггеров  $DV$ -типа, управляемых с помощью логических элементов И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ. В структурном отношении регистровая память состоит из матрицы 4x4 элемента, коммутируемой с помощью входного дешифратора и 4 выходных мультиплексоров.

Схема имеет четыре информационных входа  $D3...D0$ , по два адресных входа записи  $WB, WA$  и счи-

тывания  $RB$ ,  $RA$  соответственно, отдельные стробирующие входы  $\overline{GW}$  и  $\overline{GR}$ , а также четыре выхода  $Q3...Q0$ .

Если на вход  $\overline{GR}$  подать стробирующий импульс  $\overline{GR}=0$ , то, в зависимости от выбранного кода адреса  $00...11$  на входах  $WB$  и  $WA$ , производится одновременная запись информации со входов  $D3...D0$  только в четыре "вертикальные" ячейки матрицы, соответственно от №№ 1,5,9,11 до №№ 4,8,12,16. При этом каждый триггер в своей ячейке может переключиться при условии  $V=1$ , которое выполняется только при определенной комбинации сигналов на адресных входах.

Считывание записанной информации из соответствующих "вертикальных" ячеек производится при условии установки необходимого адреса и разрешается стробом  $\overline{GR}=0$ . Поскольку выходные логические элементы этой микросхемы выполняются с открытым коллектором, то возможно наращивание емкости памяти при объединении выходов с помощью "Монтажного ИЛИ".

При считывании информации из ячеек памяти не происходит ее разрушения, даже при многократном обращении к памяти.

### Предварительное задание к эксперименту

Выполнить арифметические и логические операции (табл.11.1) над данными в табл.11.3 числами, переведя их в двоичный код.

Т а б л и ц а 11.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$A$	9	10	11	12	11	14	5	6
$B$	6	5	4	3	2	1	11	10
$C_0$	0	0	1	1	0	0	1	1

### Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться со схмотехникой исследуемых ИС и органов управления на лабораторном стенде.

Коды режима, операции и адреса на соответствующих входах исследуемых ИС задаются с помощью микротумблеров на передней панели стенда (в нижнем положении - уровень логического нуля, в верхнем - уровень логической единицы). Получить разрешение преподавателя на включение питания.

2. Для исследования сдвигающего регистра К155ИР11 необходимо подавать на информационные входы его младших и старших разрядов сигналы с наборного поля И-ИЛИ константы с гнезд "лог.0" и "лог.1", а состояние выходов определять с помощью светодиодных индикаторов.



Устанавливая различные коды режима в соответствии с табл.11.2 и манипулируя кнопками "набор", "такт" и "сброс", реализовать последовательную и параллельную запись, а также сдвиг вправо и влево нескольких слов данных. Одно из слов сохранить в регистре для последующего использования.

3. Для исследования регистра К155РП1 задать поочередно коды адреса 00...11 и записать с наборного поля в регистровую память четыре слова данных, а затем, подав  $\overline{GR}=0$ , прочитать их с помощью светодиодных индикаторов. Отметить эти результаты в таблице истинности.

4. При исследовании АЛУ К155ИПЗ выполнить все операции табл. 11.1 согласно предварительному заданию. При этом на информационные входы А3...А0 и В3...В0 необходимо подавать отдельно различные сигналы с наборного поля и с выхода любого регистра; результат операций также отметить в отчете.

5. Используя регистр сдвига и АЛУ по своему прямому назначению, а регистр памяти - в качестве ОЗУ, запишите в последнем результаты ваших вычислений.

6. Используя регистр памяти в качестве буферного регистра, а регистр сдвига - в качестве аккумулятора, подготовить схему соединений ИС для реализации простой программы микропроцессора: очистка; загрузка; сложение (вычитание); хранение.

При выполнении этой программы необходимо:

- записать один операнд в аккумулятор,
- запомнить второй операнд в буферном регистре,
- получить результат их сложения (вычитания) в АЛУ,
- переслать сумму (разность) в аккумулятор и сохранить ее.

7. В предыдущей схеме реализовать следующие операции:

- приращение на единицу;
- инвертирование (дополнение до 1);
- запись в память.

8. Факультативно. Проверить результаты сложения функций  $S = A + \bar{A}$  и  $F = A + D$ , где  $D = \bar{A} + 0001$ ; и объяснить их. Доказать, что эти результаты будут всегда постоянными.

9. Факультативно. Подготовить схему соединений регистров и АЛУ для умножения двух операндов (по заданию преподавателя).

Для реализации этой задачи (по аналогии с умножением десятичных чисел) необходимо разместить множимое в регистре сдвига, а множитель - в регистре памяти, а с помощью АЛУ обеспечить сложение частичных произведений.

## С о д е р ж а н и е   о т ч е т а

Цель работы; условное изображение исследуемых микросхем (рис.11.2-11.4); рассчитанная в предварительном задании табл.11.1 с результатами операций по п.4; таблица истинности по п.3; структурная схема соединений по п.6 и п.7.

## К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Поясните смысл используемых в работе терминов: операнд, слово данных, аккумулятор, запись в память, код операции и т.д. 2.Объясните назначение и перечислите функциональные возможности каждой из исследуемых микросхем. 3. Какие основные задачи выполняют регистры и АЛУ в микропроцессорных системах? 4. Чем отличается дополнительный код от прямого и инверсного? 5. С какой целью в микропроцессорах предусматриваются операции инкремента и декремента? 6. Для каких целей в АЛУ предусматриваются выходы образования и распространения переноса? Какая информация появляется на выходе сравнения АЛУ? 7. Каким образом и с какой целью используется проверка содержимого АЛУ на нуль? 8. Предложите методику и способ вычисления задач типа  $F=2(A+B)$ ;  $F=A+B+1$  (или других по заданию преподавателя). 9. Предложите схемную реализацию устройства для сравнения двух операндов, если  $A=const$ , а  $B=var$ . 10. Выделите на принципиальных электрических схемах АЛУ и регистров шины данных, адреса и управления. Дайте необходимые пояснения. 11. Почему аккумуляторы многих микропроцессоров выполняются двойной длины? 12. Какое минимальное число разрядов должен иметь аккумулятор у четырехразрядного микропроцессора?

## Лабораторная работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучение схем и функциональных возможностей основных типов триггеров; экспериментальное изучение триггеров и схем управления.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Т р и г г е р а м и называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Каждому состоянию триггера соответствует определенный (высокий или низкий) уровень выходного напряжения, который может сохраняться как угодно долго. Поэтому триггеры относятся к цифровым автоматам с памятью. В настоящее время триггеры выполняются на основе логических элементов в виде интегральных микросхем (ИМС). Они включены почти во все серии ИМС.

Триггеры применяются как переключающие элементы самостоятельно или входят в состав более сложных цифровых устройств, таких как счетчики, делители частоты, регистры и др.

В общем случае триггер имеет два выхода: прямой ( $Q$ ) и инверсный ( $\bar{Q}$ ), сигналы на которых противоположны по уровню. Количество входов триггера зависит от его типа. Входы делятся на информационные и командные.

По способу записи информации триггеры делятся на а с и н х р о н н ы е, у которых информационные и командные входы совмещены, и с и н х р о н н ы е или т а к т и р у е м ы е. Последние срабатывают только при поступлении на один из командных входов (синхровход) разрешающего импульса.

По числу ступеней триггеры делятся на о д н о т а к т н ы е и д в у т а к т н ы е. В одноктактных информация на выходах появляется практически одновременно с приходом информационного или синхроимпульса. Такие схемы срабатывают по перепаду сигнала 0-1 (по фронту синхроимпульса). В двухтактных триггерах переключение элементов происходит в два приема и сигнал на выходе появляется с задержкой. Они срабатывают по перепаду сигнала 1-0 (по спаду импульса).

В зависимости от логической структуры схемы управления различают  $RS$ -,  $D$ -,  $T$ -,  $JK$ -триггеры и др.

Работа триггера может быть описана логическим уравнением, связывающим состояние входов и выходов триггера до его срабатывания ( $t$ ) и по-

сле срабатывания ( $t+1$ ). Состояние триггера можно задать таблицей переходов или временной диаграммой его работы.

А синхронный  $RS$ -триггер имеет два установочных входа  $R$  и  $S$ . Схема триггера на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ и его условное обозначение показаны на рис.12.1. При  $S=R=0$  схема устойчива. Это режим хранения информации.

Если  $Q=1$ , то на входах  $DD2$  оказываются 1 и 0, при которых  $\bar{Q}=0$ .

Таблица 12.1

$R$	$S$	$Q^{t+1}$
1	0	0
0	1	1
0	0	$Q^t$
1	1	X

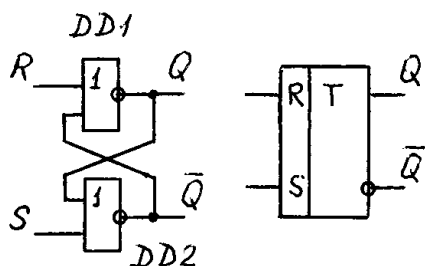


Рис.12.1

На входах  $DD1$  - 0,0, что сохраняет этот элемент с состоянием  $Q=1$ . Для изменения состояния триггера на его входы надо подать комбинацию сигналов  $R=1, S=0$ . Тогда на входах  $DD1$  появятся высокие уровни и этот элемент перейдет в состояние  $Q=0$ . На входах  $DD2$  установятся сигналы 0, 0 и логический элемент перейдет в состояние  $Q=1$ . Комбинация  $S=1, R=0$  возвратит триггер в состояние  $Q=1, \bar{Q}=0$ . При комбинации  $S=1, R=1$  состояние триггера неопределенно, эта комбинация запрещена. Работа триггера иллюстрируется таблицей переключений (табл.12.1). Триггер с таким же законом работы можно выполнить на логических элементах 2И-НЕ.

Синхронные  $RS$ -триггеры имеют два информационных входа

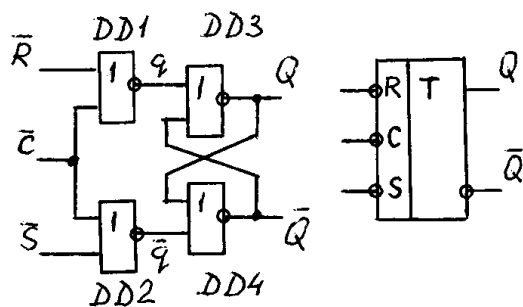


Рис.12.2

входа  $R$  и  $S$  и синхровход  $C$ . Схема триггера и его условное обозначение показаны на рис.12.2. Асинхронный  $RS$ -триггер дополнен схемой управления на ЛЭ  $DD1-2$ , которая формирует сигналы  $q$  и  $\bar{q}$ , поступающие на его установочные входы. Управление осуществляется низким уровнем сигнала (0), поэтому на входах показан знак инверсии. При  $\bar{C}=1$  любая комбинация  $\bar{R}$  и  $\bar{S}$

дает на выходах  $q=\bar{q}=0$ , и асинхронный триггер на элементах  $DD3-4$  находится в режиме хранения информации. Схема управления сработает только при поступлении низкого уровня на синхровход ( $\bar{C}=0$ ). Тогда  $\bar{R}=1$  и  $\bar{S}=0$  приведет к  $q=0$  и  $\bar{q}=1$ . Триггер перейдет с состояния  $Q=1$ , а при  $\bar{R}=0, \bar{S}=1$  - в состояние  $Q=0$ . Комбинация  $\bar{R}=\bar{C}=\bar{S}=0$  запрещена. Так как при  $\bar{C}=1$  любое изменение сигналов на входах  $\bar{R}$  и  $\bar{S}$  игнорируется, синхронные триггеры защищены от воздействия помех.

Синхронный  $D$ -триггер состоит из асинхронного  $RS$ -триггера и схемы управления на ЛЭ.

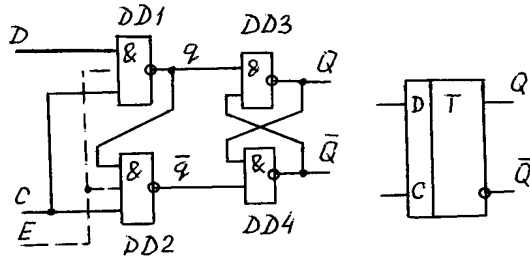


Рис.12.3

Он имеет информационный вход  $D$  и синхровход  $C$ . Его схема и условное обозначение показаны на рис.12.3. ЛЭ  $DD3-4$  представляют собой  $RS$ -триггер, управляемый инверсными сигналами. Его устойчивое состояние обеспечивается комбинацией  $q = \bar{q} = 1$ . При  $C=0$  выходах обоих ЛЭ И-НЕ  $DD1-2$  независимо от значения сигнала на входе  $D$

будут поддерживаться высокие уровни и триггер сохраняет предыдущее состояние. С приходом синхроимпульса  $C=1$ , при  $D=1$   $q=0$ , а  $\bar{q}=1$ , и  $RS$ -триггер оказывается в состоянии  $Q=1$ . При  $D=0$   $q=1$ ,  $\bar{q}=0$ , и триггер переходит в состояние  $Q=0$ . Это значение не может измениться до прихода следующего синхроимпульса. Поэтому  $D$ -триггеры называют триггерами задержки - они задерживают информацию на такт. На схеме пунктиром показан вход  $E$ , объединяющий два дополнительных И-входа. Этот вход расширяет возможности схемы. Его называют разрешающим. При  $E=1$  триггер работает в нормальном режиме,  $E=0$  дает возможность сохранить информацию при изменении сигналов на  $D$ - и  $C$ -входах. Такой триггер называют  $DV$ -триггером с разрешающим входом.

Широкое применение получили двухтактные  $D$ -триггеры. Схема и условное обозначение приведены на рис.12.4а,б. Он состоит из  $D$ -триггера и синхронного  $RS$ -триггера с объединенными через инвертор  $C$ -входами. Принцип работы триггера можно проследить по временной диа-

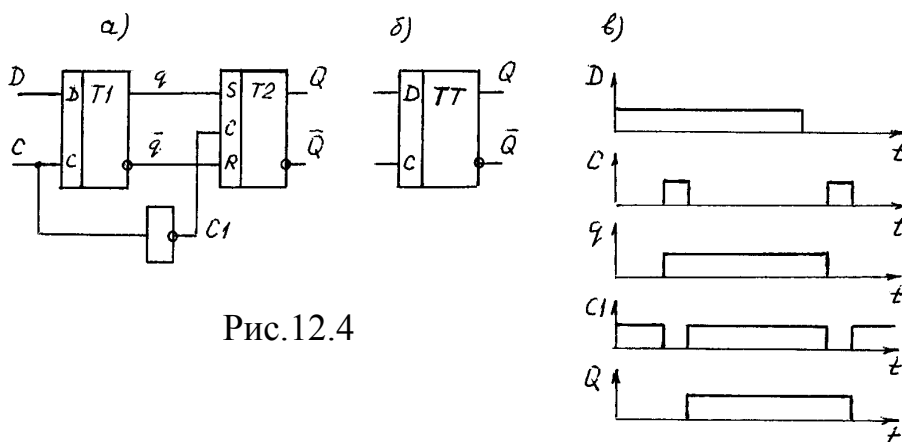


Рис.12.4

грамме (рис.12.4в). Сигнал со входа  $D$  записывается в  $T1$  по фронту синхроимпульса. При этом  $C1=0$  и  $T2$  сохраняет прежнюю информацию. После окончания синхроимпульса  $C=0$ , и  $T1$  отключается от  $D$ -входа,  $C1=1$  и  $T2$  переписывает информацию из  $T1$ .

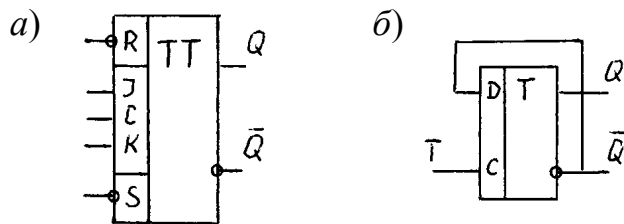


Рис.12.5

*JK* - триггер является универсальным. Его условное обозначение приведено на рис.12.5а. Он имеет два установочных входа *R* и *S*, информационные входы *J* и *K* и синхровход *C*.

Установочные входы обладают приоритетом над другими. С их помощью триггер устанавливают в состояние  $Q=1$  или  $Q=0$  независимо от сигналов на всех других входах.

*J*- и *K*-входы работают по разрешающему импульсу на *C*-входе. При комбинации  $J=1$  и  $K=0$  на выходе  $Q=1$ . При  $J=0$  и  $K=1$  триггер переходит в состояние  $Q=0$ , а если  $J=K=1$ , то с приходом каждого синхроимпульса он меняет состояние. Работу триггера можно описать логическим уравнением

$$Q_{i+1} = J_i \cdot \bar{Q}_i + \bar{K}_i \cdot Q_i$$

На основе *JK*-триггера можно построить любой другой тип триггера. Поэтому они массово производятся практически во всех сериях ИМС.

*T* - триггер или счетный триггер имеет один информационный вход *T*. Каждый импульс на этом входе переводит его в новое состояние. Его логическое уравнение  $Q_{i+1} = Q_i \cdot \bar{T}_i + \bar{Q}_i \cdot T_i$ . Оно соответствует уравнению *JK*-триггера при  $K=J=1$ .

Такой же триггер можно получить на основе *D*-триггера (рис.12.5б). Поэтому производить *T*-триггеры в виде самостоятельных изделий нет смысла и их нет в сериях ИМС.

*T*-триггеры используются как делители частоты на 2 или счетчики по модулю 2.

Триггер типа *TV* имеет, кроме информационного входа *T*, разрешающий вход *E*, уровень напряжения на котором запрещает или разрешает его работу.

### Предварительное задание к эксперименту

Т а б л и ц а 12.2

Вариант	1	2	3	4
Тип Триггера	Синхронный RS	Однотактный D	Двухтактный D	Двухтактный D
Тип ИМС	K155ЛА3	K155ЛА3	K155ЛА3 K155ТМ2	K155ТВ1
Вариант	5	6	7	8
Тип Триггера	T	TV	TV	Асинхронный RS

Тип ИМС	K155ТВ1	K155ЛА3 K155ТМ2	K155ЛА3 K155ТВ1	K155ЛА3
---------	---------	--------------------	--------------------	---------

Составить схему триггера, заполнить таблицу переключений, начертить временную диаграмму его работы. Тип триггера и ИМС, которые можно использовать, приведены в табл.12.2

### П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

1. Используя логические элементы К155ЛА3, собрать схему асинхронного *RS*-триггера. Подать с наборного поля сигналы на его входы, выходы подключить к светодиодам. Перебирая комбинации сигналов на входах, заполнить таблицу переключений.

2. Проверить работу *D*-триггера на ИМС К155ТМ2. Информационный вход *D* включить к наборному полю, а синхровход *C* к источнику импульсов (переключатель режима работы в положении «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив момент переключения триггера (0-1 или 1-0).

3. Проверить работу *JK*-триггера на ИМС К155ТВ1. Подключить установочные входы *R*, *S* и информационные *J*, *K* к наборному полю, а синхровход *C* к генератору импульсов (переключатель режима работы в положении - «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив моменты переключения триггера (0-1 или 1-0).

4. Собрать схему триггера согласно предварительного задания и проверить его работу. Сравнить с результатами, полученными в предварительном задании.

5. Исследовать работу триггера К155ТМ2 в режиме *T*-триггера. На информационный вход подать сигнал от генератора импульсов (переключатель режима работы в положении 1000 Гц). Включить осциллограф и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. Определить период входных и выходных импульсов и частоту их следования  $f_1$  и  $f_2$ .

6. Включить последовательно два *T*-триггера на ИМС К155ТМ2. Определить частоту следования выходных импульсов  $f_3$ . Проверить соотношения  $f_1/f_2$  и  $f_1/f_3$ .

### С о д е р ж а н и е   о т ч е т а

Цель работы; схема триггера, составленная по предварительному заданию, временные диаграммы, таблицы переходов; схема соединений входов и выходов *D*-триггера для получения *T*-триггера; схема соединений входов *JK*-триггера для получения *D*- и *T*-триггера; осциллограммы импульсов на входе и выходе *T*-триггера и делителя частоты с указанием масштаба напряжения и времени.

## К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы

1. Что называют триггером? 2. Как классифицируются триггеры по способу записи информации и по функциям? 3. Как работают *RS*-триггеры? 4. Чем отличаются *D*- и *DV*-триггеры? 5. Зачем нужен разрешающий вход *E*? 6. Почему *JK*-триггеры называют универсальными? 7. Для чего используют *T*-триггеры? 8. Как получить *T*-триггер на основе *D*- или *JK*-триггеров? 9. Начертите схему делителя частоты на 8. Поясните его работу на временной диаграмме.



## Лабораторная работа № 13

### СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение устройства и работы счетчиков импульсов и регистров.

#### О б щ и е с в е д е н и я

**С ч е т ч и к** – это последовательностное устройство, которое может иметь не более чем  $2^n$  внутренних состояний, где  $n$  - число триггеров, входящих в состав счетчика. Счетчики используются для подсчета числа двоичных импульсов. В ЭВМ они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов и т.д.

Основным параметром счетчика является коэффициент или модуль счета  $K$  - это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равное максимальному числу внутренних состояний  $2^n$ . В зависимости от модуля счета различают двоичные ( $K=2^n$ , где  $n$  - число триггеров), декадные или десятичные ( $K=10^m$ , где  $m$  - число десятичных разрядов), с произвольным постоянным и с переменным модулем.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на суммирующее, вычитающее и реверсивные. У суммирующего счетчика выходной код увеличивается на единицу для каждого нового состояния, а у вычитающего - уменьшается на единицу. Реверсивный счетчик может работать в обоих режимах.

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на асинхронные (последовательные) и синхронные (параллельные).

В асинхронных счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех JK-триггерах (рис.13.1,а). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.13.1) или временная диаграмма (рис.13.1,б).

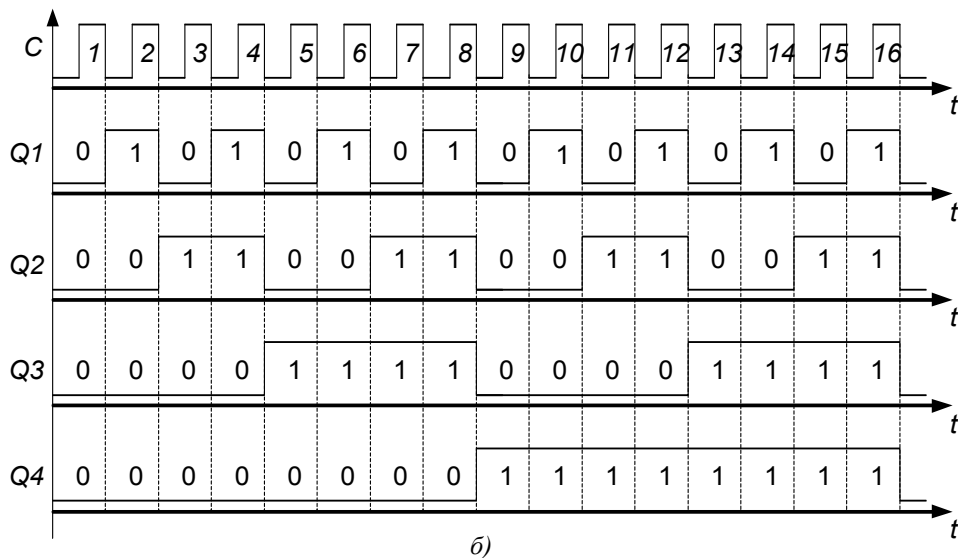
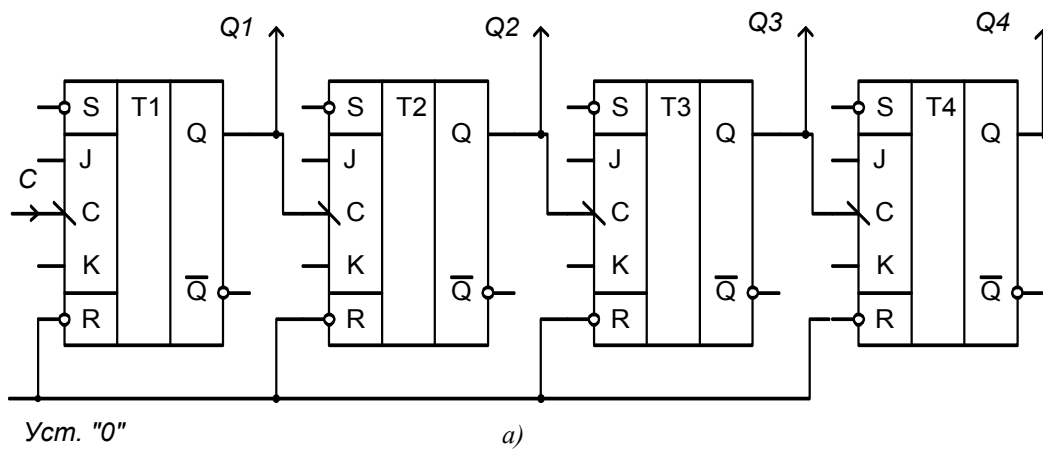


Рис.13.1

В исходном состоянии на объединенные входы  $R$  всех триггеров подается низкий уровень сигнала ( $R=0$ ) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля:  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$ .

Таблица 13.1

Число импульсов	Состояние прямых выходов			
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
...	...	...	...	...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера  $T1$ . Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной  $Q_i$  соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде  $Q_{i-1}$  переходит из состояния "1" в "0" (см. Табл.13.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика  $JK$ -триггеры в схеме работают в режиме  $T$ -триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота вы-

ходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. Рис.13.1,б). Счетчик на выходах формирует нарастающие кодовые наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ( $K=2^4=16$ ).

Если в качестве выходов счетчика использовать прямые выходы триггеров, а на синхровходы последующих триггеров подавать сигналы с инверсных выходов предыдущих триггеров, получим вычитающий счетчик. Перед началом счета должна быть предусмотрена установка всех его триггеров в исходное состояние "1". При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

В синхронных (параллельных) счетчиках счетные импульсы

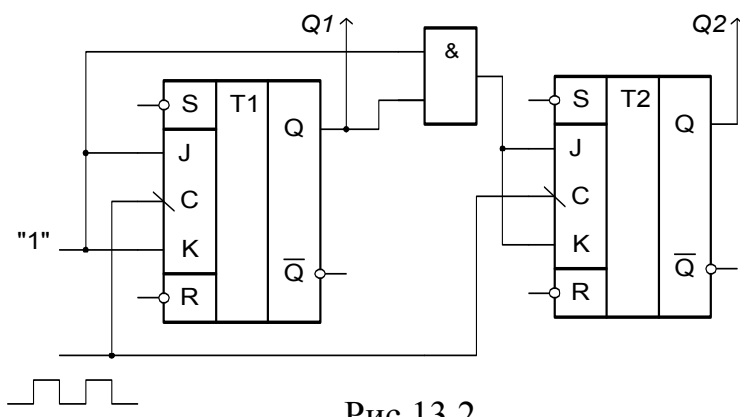


Рис.13.2

поступают одновременно на входы синхронизации всех триггеров (рис.13.2). Значение  $Q_i$  изменится при поступлении очередного счетного импульса в том случае, если переменные во всех младших разрядах  $Q_{i-1}, \dots, Q_1$  находятся в состоянии "1" (см. Табл.13.1).

Счетчики изготавливаются в виде готовых микросхем. Например, микросхема К155ИЕ2 - это двоично-десятичный счетчик, микросхема К155ИЕ4 имеет модуль счета 13, а К155ИЕ6 - реверсивный счетчик с предустановкой.

В тех случаях, когда требуется счетчик с модулем счета, меньшим, чем  $2^n$  состояний, избыточные состояния исключаются с помощью комбинационной

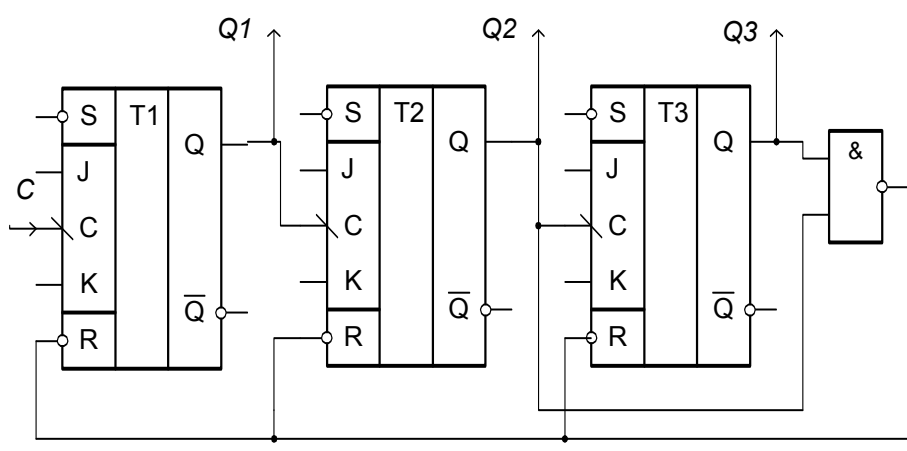


Рис.13.3

ной схемы. На рис.13.3 показана схема суммирующего счетчика с  $K=6$ . После шестого импульса сигналы с выходов  $Q_2=1$  и  $Q_3=1$  вызовут появления «0» на выходе элемента 2И-НЕ, что в свою очередь приведет к обнулению всех

триггеров. Логический элемент 2И-НЕ в данном случае играет роль комбинационной схемы, выявляющей значение выходного кода, при котором счетчик должен устанавливаться в начальное состояние.

Микросхема К155ИЕ7 представляет собой двоичный четырехразрядный реверсивный счетчик широкого применения. Его основу составляют четыре *JK*-триггера, а вспомогательные операции выполняются 18 логическими элементами. Счетчик имеет управляющий вход *V*, два счетных входа (прямого счета *C1* и обратного счета *C2*), четыре информационных входа предустановки *D3*, *D2*, *D1*, *D0*, соответствующие выходы *Q3*, *Q2*, *Q1*, *Q0*, а также два инверсных выхода переноса *B* и *P*. Условное обозначение приведено на рис.13.4.

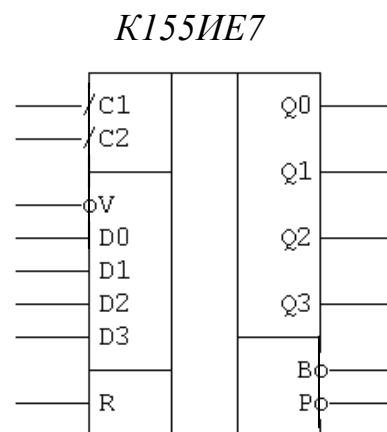


Рис.13.4

В зависимости от состояний входов возможны три режима работы счетчика:

- режим счета реализуется, когда  $V=1$ : при подаче счетных импульсов на вход *C1* происходит увеличение двоичного выходного кода, при подаче импульсов на вход *C2* – уменьшение;

- режим параллельной записи обеспечивается, когда  $V=0$ , при этом кодовые наборы, установленные на информационных входах, повторяются на выходах соответствующих разрядов, независимо от состояния счетных входов;

- сброс счетчика осуществляется подачей высокого уровня напряжения на вход *R*, что приведет к отключению всех других входов и запрещению записи.

Регистры широко используются для передачи, хранения и преобразования двоичных кодов. В зависимости от функционального назначения различают регистры сдвига (последовательные) и регистры памяти (параллельные).

В четырехразрядном регистре сдвига, выполненном на *JK*-триггерах (рис.13.5), с приходом каждого тактового импульса на входы *C* происходит последовательная запись сигналов с прямых и инверсных выходов на информационные входы каждого последующего триггера, от младшего разряда к старшему.

Если на информационных входах триггера  $T1$   $J=0$ ,  $K=1$ , то в исходном состоянии на выходах  $Q1=0, \bar{Q}2=1$ . Эти же уровни сигналов последовательно передаются каждому триггеру после прихода тактовых импульсов, но не изменяют их состояния. Если же на входе первого триггера  $J=1$ ,  $K=0$ , то после первого тактового импульса на его выходах установятся новые логические уровни,  $Q1=1, \bar{Q}1=0$ ; вторым тактовым импульсом переключится второй

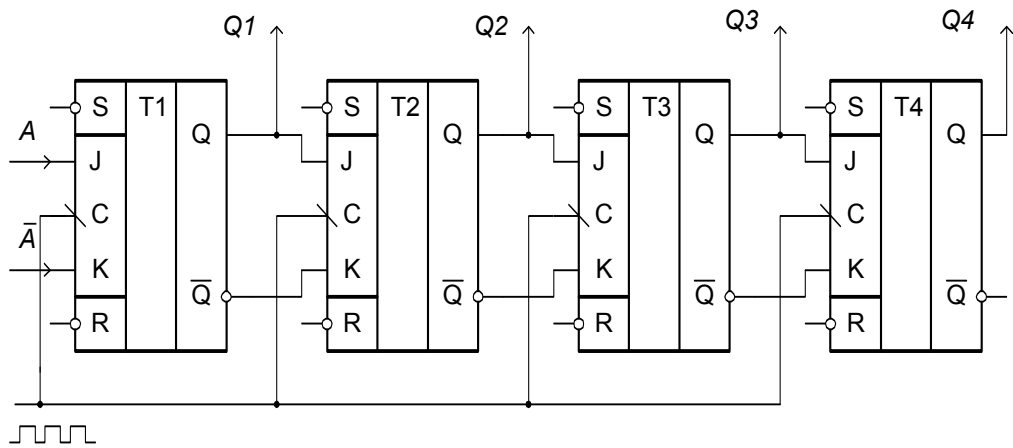


Рис.13.5

триггер и т.д. (рис.13.6). Очевидно, что четвертый тактовый импульс сдвинет уровень логической 1 в четвертый триггер, и на выходах регистра появится кодовый набор 1111. В этом случае можно считать, что регистр работает в режиме преобразователя, с последовательным вводом и параллельным выводом информации объемом 4 бита.

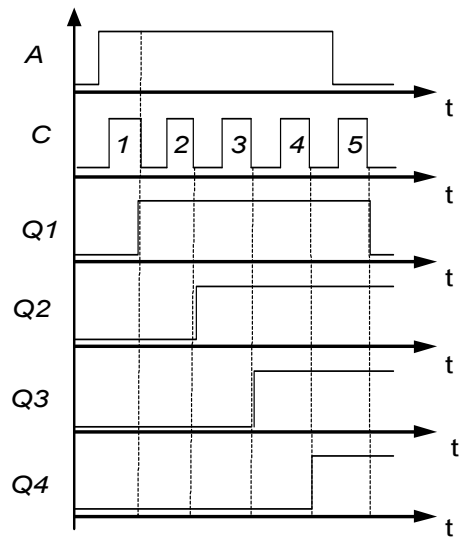


Рис.13.6

Микросхема

K155ИР1

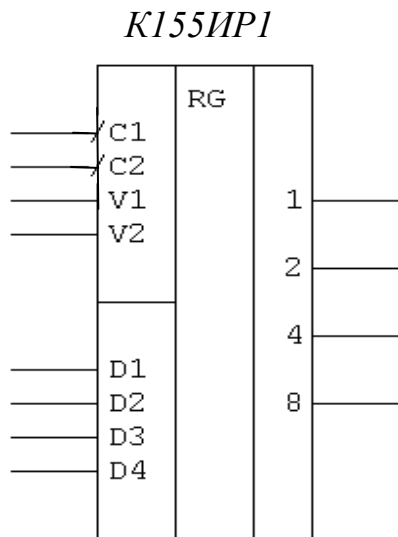


Рис.13.7

(рис.13.7) является универсальным четырехразрядным регистром сдвига. Основу этой ИС составляют четыре

триггера и одиннадцать логических элементов. Регистр имеет тактовый вход сдвига  $C1$  и информационный вход  $V1$  для записи последовательных сигналов, четыре информационных входа  $D1, D2, D3, D4$  параллельной записи, тактовый вход  $C2$  ввода этой информации, а также вход  $V2$  выбора режима работы и выходы 1-2-4-8 всех четырех разрядов. Два основных режима работы “Сдвиг” и “Запись” выбираются по уровню сигнала на входе

$V2$ .

Если на вход  $V2$  подается логический 0, то регистр работает в режиме сдвига информации от младшего разряда к старшему. Любой последователь-

ный кодовый набор на входе  $V1$  перемещается на выходы 1-2-4-8 отрицательными перепадами четырех тактовых импульсов по входу  $C1$ .

Если на вход  $V2$  подается сигнал 1, то обеспечивается режим параллельной записи в регистр любого кодового набора со входов  $D1, D2, D3, D4$  по срезу тактового импульса на входе  $C2$ .

Регистры памяти обычно выполняются на двухступенчатых  $D$ -триггерах и предназначаются для приема, хранения и передачи двоичной информации в виде параллельного кода. Входная информация одновременно подается на входы регистра и при поступлении синхронизирующего импульса записывается и хранится в разрядах регистра.

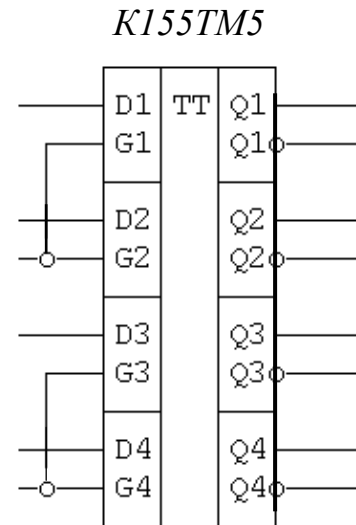


Рис.13.8

Микросхема  $K155TM5$  (рис.13.8) представляет собой четырехразрядный регистр памяти. В одном корпусе этой ИС находится четыре независимых  $D$ -триггера, с информационными входами  $D4...D1$  и прямыми выходами  $Q4...Q1$ . Управление работой ИС осуществляется по объединенным попарно входам синхронизации  $G1-G2$  и  $G3-G4$ .

Использование двухступенчатых триггеров задержки обуславливает различные режимы работы данной схемы: запись в первую ступень и хранение информации производится непрерывно, однако передача сигнала во вторую ступень на выходы запрещается уровнем логического нуля на входах синхронизации. Если же на входы синхронизации поступают короткие стробирующие импульсы, то текущее значение входного сигнала передается во вторую ступень и сохраняется на выходах до прихода следующего импульса (режим ступенчатой передачи). При уровне логической 1 на входах синхронизации осуществляется сквозная передача информации по всем четырем каналам.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе  $JK$ -триггеров с модулем счета, заданным в табл. 13.2. Для исключения избыточных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Модуль счета	3	5	7	9	10	11	12	14

## 2. Составить таблицу переключений счетчика.

### П о р я д о к в ы п о л н е н и я э к с п е р и м е н т а

Ознакомиться с лабораторным стендом: найти на стенде источники логических сигналов(0 и 1) и импульсов (0-1, 1-0) индикаторы состояния выходов триггеров. Для получения параллельного четырехразрядного двоичного кода можно воспользоваться наборным полем на стенде «Логические элементы и комбинационные схемы»

Собрать схему четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на *JK*-триггерах ИС К155ТВ1 (рис.13.1,а). Для индикации состояний триггеров выходы  $Q_4, Q_3, Q_2, Q_1$  подключить к светодиодам. Установить счетчик в исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$ , подав с наборного поля на  $\bar{K}$ -входы сигнал нуля. От источника импульсов подать на вход счетчика 15 импульсов и составить таблицу переключений.

Собрать схему вычитающего счетчика, подключив прямые выходы триггеров к индикаторам, а инверсные выходы триггеров младших разрядов – на синхровходы триггеров последующих старших разрядов. Предусмотреть установку всех триггеров счетчика в исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=1$ . Проверить работу схемы, составить таблицу переключений вычитающего счетчика.

Собрать схему счетчика с заданным в предварительном задании модулем счета. Проверить работоспособность схемы и соответствие таблицы переключений.

Собрать схему двухразрядного параллельного счетчика на триггерах К155ТВ1 и ЛЭ К155ЛА4 (рис.13.2). Проверить его работу.

Собрать схему четырехразрядного регистра сдвига на триггерах К155ТВ1 (рис.13.5). Подать на *J*-вход прямой, на *K*-вход инверсный логические сигналы. На синхровходы *C* подать сигналы от источника импульсов. Исследовать работу регистра. Начертить временную диаграмму.

Проверить работу счетчика К155ИЕ7. В режиме счета на суммирование или вычитание импульсы подавать на соответствующий вход счетчика от источника импульсов. В режиме предустановки параллельный код на информационные входы  $D_3, D_2, D_1, D_0$  подать с наборного поля лабораторного стенда «Логические элементы и комбинационные схемы».

Ознакомиться с работой регистра памяти К155ТМ5. С шин наборного поля подать информацию (любое число в двоичном коде) на информационные входы *D*, а на разрешающие входы  $C1-C2$  и  $C3-C4$  подать «1». На выходы

регистра подключить светодиоды. Изменяя информацию на *D*-входах, убедитесь, что эта информация передается на выходы регистра. Поочередно подавая «0» на входы *C1-C2* и *C3-C4* определить, как будет работать регистр при изменении информации на *D*-входах.

Ознакомиться с работой регистра сдвига К155ИР1. В режиме параллельной записи ( $V2=1$ ) подать с наборного поля на параллельные входы двоичный код 1010. Убедиться, что по срезу тактового импульса на входе *C2* информация с параллельных входов запишется в регистр и появится на его выходах.

Установить режим последовательного сдвига информации в регистре К155ИР1 ( $V2=0$ ). На последовательный вход *V1* подать «1», на вход *C1* подать нужное количество импульсов, чтобы в регистре записался код «1111». На вход *V1* подать «0», и подать один импульс на вход *C1*. На выходе регистра должен появиться код «1110». Подать «1» на вход *V1* и три импульса на вход *C1*. Записать какой код появится на выходе регистра?

## С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; схема счетчика с заданным табл.13.1 модулем счета и таблица переключений его триггеров; схема четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на *JK*-триггерах (рис.13.1,а) и таблица его переключений; схема двухразрядного параллельного счетчика (рис.13.2); схема четырехразрядного регистра сдвига (рис.13.5) и временные диаграммы его работы; временные диаграммы работы регистра памяти К155ТМ5 и регистра сдвига К155ИР1 в режиме последовательно-параллельного преобразователя.

## К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какие типы счетчиков Вы знаете? 2. Поясните работу суммирующего и вычитающего счетчиков. 3. Что такое реверсивный счетчик? 4. Как строятся параллельные счетчики? 5. Приведите примеры использования двоичных и декадных счетчиков. 6. Объясните принцип действия регистра памяти. 7. Какие способы используются для увеличения числа разрядов счетчиков и регистров?



## Лабораторная работа № 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучение принципа действия аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей; практическое исследование преобразования напряжений в цифровой код методом поразрядного уравнивания на основе параллельного цифро-аналогового преобразователя с матрицей на весовых резисторах.

#### О б щ и е с в е д е н и я

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) преобразуют аналоговые величины в цифровой код и обеспечивают связь различных аналоговых измерителей с цифровыми устройствами. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) осуществляют преобразование цифровых величин в аналоговые.

Из многообразия серийно выпускаемых промышленностью преобразователей по быстродействию, точности и надежности выделяются параллельный ЦАП (рис.14.1) и АЦП поразрядного уравнивания (рис.14.2).

Основным элементом параллельного ЦАП с матрицей на резисторах

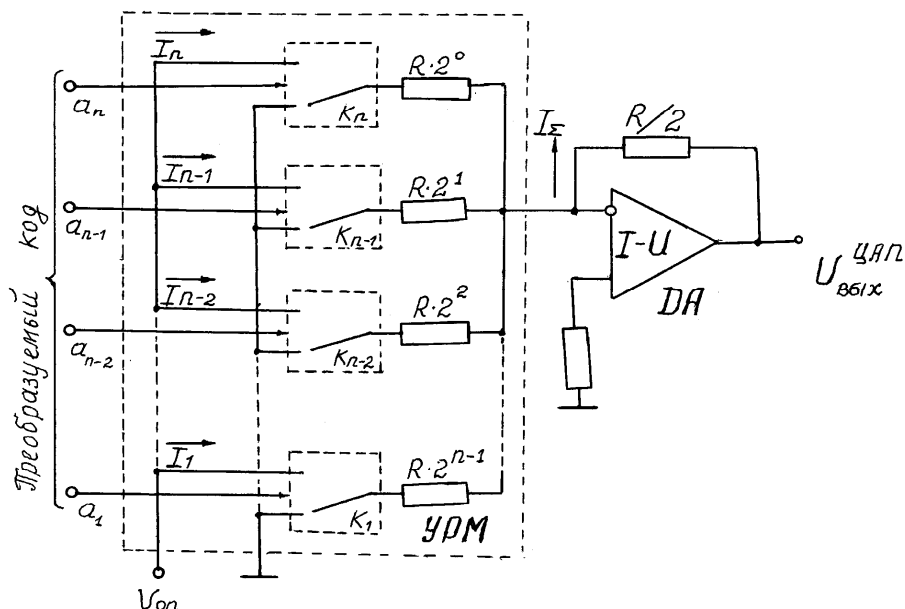


Рис.14.1

является операционный усилитель (ОУ) *DA*, работающий в режиме суммирования входных токов  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ , количество которых равно числу разрядов кода (рис.14.1).

Преобразуемый код поступает на входы ключей  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ , и в зависимости от цифры в данном разряде  $a_i$  (0 или 1), резисторы подключаются либо к шине “земля”, либо к источнику опорного напряжения  $U_{оп}$ . Сопротивления резисторов управляемой резистивной матрицы (УРМ) набираются по двоичному коду  $R_i = 2^{n-i} \cdot R$ . При таких условиях ток младшего разряда  $I_1 = U_{оп} / (R \cdot 2^{n-1})$ , а суммарный ток усилителя равен сумме всех токов, протекающих от источника  $U_{оп}$  через ветви с замкнутыми ключами  $I_{\Sigma} = (2^{n-1} a_n + 2^{n-2} a_{n-1} + \dots + 2^1 a_2 + 2^0 a_1) I_1$ . Ток  $I_{\Sigma}$  и информационная составляющая выходного напряжения ЦАП на выходе преобразователя  $DA$  «ток – напряжение» ( $I-U$ ) пропорциональны входному коду

$$U_{ВЫХ}^{ЦАП} = I_{\Sigma} \cdot R / 2 = \left( \frac{U_{оп}}{2} a_n + \frac{U_{оп}}{4} a_{n-1} + \dots + \frac{U_{оп}}{2^{n-1}} a_2 + \frac{U_{оп}}{2^n} a_1 \right). \quad (1)$$

При этом, если все значения разрядов кода  $a_1, a_2, \dots, a_n$  равны единицам, то  $U_{ВЫХ}^{ЦАП} = U_{оп} = U_{пред}$ . Приняв  $U_{оп} = 10,24$  В при  $n = 12$ , величина минимального уровня квантования или шага будет равна цене деления цифрового измерительного прибора  $\Delta U = U_{оп} / 2^n = 2,5$  мВ. В этом случае при единичных значениях всех 12 разрядов кода набор образцовых напряжений в соответствии с (1) составит:

$$U_{ВЫХ}^{ЦАП} = U_{оп} = U_{пр} = 5120 мВ + 2560 мВ + 1280 мВ + 640 мВ + 320 мВ + 160 мВ + 80 мВ + 40 мВ + 20 мВ + 10 мВ + 5 мВ + 2,5 мВ = 10,24 В.$$

С позиций оптимального сочетания быстродействия, точности и надежности для построения АЦП может быть использован метод поразрядного уравнивания. Структура АЦП с поразрядным уравниванием представлена на рис.14.2.

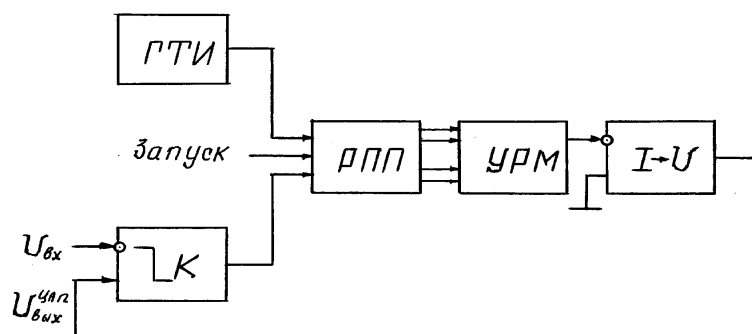


Рис.14.2

После запуска АЦП под действием сигналов генератора тактовых импульсов (ГТИ) в регистре последовательного приближения (РПП) вырабатывается испытательный код, который, начиная от старшего 12-го разряда и кончая первым младшим разрядом, с помощью УРМ и преобразователя  $I-U$  преобразуется в уровни испытательного напряжения  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ . Входное напряжение  $U_{вх}$  сравнивается с испытательным напряжением  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  компаратором

$K$ , и в зависимости от результата сравнения соответствующее значение (0 или 1) разряда заносится в РПП и учитывается при последующих тактах сравнения. Выходной код РПП является цифровым аналогом  $U_{\text{ВХ}}$ .

Очевидно, что набор образцовых напряжений не может быть осуществлен с большей точностью, чем шаг дискретизации  $\Delta U$ . Поэтому значение  $\Delta U$  определяет основную методическую составляющую погрешность АЦП, и после преобразования (завершения всех 12-ти тактов при  $n=12$ ) установится приближительное равенство двух сравниваемых напряжений  $U_{\text{ВХ}} \approx U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ .

Т а б л и ц а 14.1

№ такта	№ разряда	$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ , мВ	$a_i$
1	12	2720	5120	0
2	11	2720	2560	1
3	10	2720	2560+1280	0
4	9	2720	2560+640	0
5	8	2720	2560+320	0
6	7	2720	2560+160	1
7	6	2720	2560+160+80	0
8	5	2720	2560+160+40	0
9	4	2720	2560+160+20	0
10	3	2720	2560+160+10	0
11	2	2720	2560+160+5	0
12	1	2720	2560+160+2,5	0

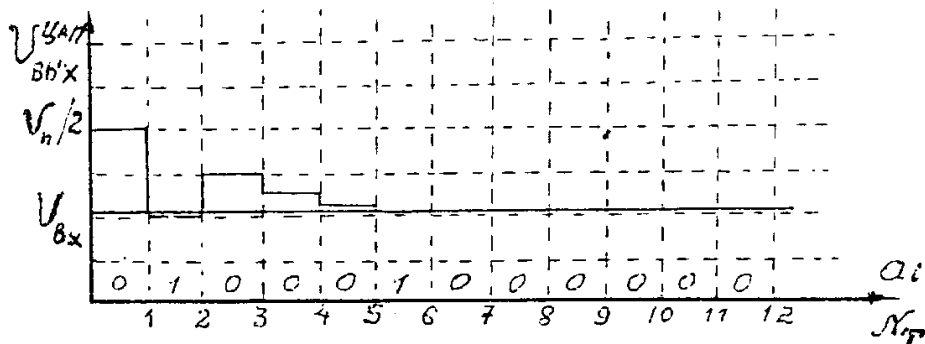


Рис.14.3

Рассмотрим численный пример. Пусть  $U_{\text{ВХ}}=2720$  мВ. Так как уровень напряжения старшего разряда равен  $U_n/2=10240/2=5120$  мВ, то значение  $a_i=a_{12}$  старшего  $n$ -го разряда, зарегистрированное компаратором, будет равно «0» ( $U_{\text{ВХ}}=2720 < U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}=5120$  мВ). Поэтому для первого такта уравнивания будет получено значение  $a_i=a_{12}=0$  (см. табл.14.1). Уровень  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  следующего  $n-1$  разряда будет в два раза меньше старшего  $n$ -го разряда, и компаратор зарегистрирует значение  $a_{11}=1$  ( $U_{\text{ВХ}}=2720 > U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}=2560$ ). На третьем такте уравни-



выполняющую функции РПП и УРМ; ОУ  $DA2$  типа КР544УД1А (преобразователь  $I-U$ ); компаратор  $DA3$  типа К554СА3; источник опорного напряжения ИОН; одновибратор ОВ на ИС К561ЛА7; ГТИ; счетчик циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании на ИС  $DD1$  типа К155ИЕ5; дешифратор количества импульсов циклов уравнивания на ИС  $DD3$  типа К155ИД3 и инверторе  $DD2$ ; переключатель количества циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании  $SA4$ ; регулятор входного напряжения  $U_{вх}$  на резисторе  $R1$ ; переключатели  $SA1$ ,  $SA2$  для перевода работы схемы из непрерывного в ждущий; переключатель длительности тактовых импульсов (2 сек - 2 мс)  $SA3$ ; кнопку запуска в ждущем режиме  $SB1$  “запуск”;  $R-S$  триггер  $DD6$  конца цикла преобразования; согласующие инверторы  $DD4$ ,  $DD5$ ; светодиоды  $HL1... HL12$  для отображения двоичного выходного кода АЦП; светодиод  $HL13$ , индицирующий конец цикла преобразования АЦП; диоды  $VD1$ ,  $VD2$  для защиты микросхемы от неправильного подключения питающих напряжений; диод  $VD3$  для защиты  $DA1$  при пробое ОУ  $DA2$ ; клеммы для измерения входного  $U_{вх}$  и выходного  $U_{вых} = U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  напряжений АЦП.

Изучаемый АЦП может работать в трех режимах преобразования:

1. *Ждущий с регулировкой переключателем  $SA4$  количества разрядов и одноразовым запуском цикла преобразования кнопкой  $SB1$ .* Переключатели  $SA1$  и  $SA2$  должны быть выключены (в нижнем положении).
2. *Непрерывный или периодический с регулировкой количества разрядов  $n$  переключателем  $SA4$  и периодическим автозапуском после каждого преобразования.* Переключатель  $SA1$  находится в безразличном положении (включен или выключен), а  $SA2$  включен (в верхнем положении).
3. *Непрерывный или периодический без регулирования количества  $n$  разрядов ( $n=12$ ).* Переключатель  $SA1$  включен,  $SA2$  выключен.

В одноразовом, ждущем режиме запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ, поступающим на вход 23  $DA1$  при каждом нажатии кнопки  $SB1$  после загорания светодиода  $HL13$ . Преобразование в каждом цикле (поразрядное) осуществляется под действием выходных импульсов ГТИ, поступающих на вход 21  $DA1$  (на один разряд используется два импульса ГТИ). Период повторения ГТИ (2 с или 2 мс) изменяется переключателем  $SA3$  при всех режимах работы. С выхода 38  $DA1$  выходной ток управляемой матрицы поступает в преобразователь  $DA2$  «ток – напряжение» ( $I-U$ ), преобразуется в напряжение и поступает на вход компаратора  $DA3$ . В компараторе это напряжение ( $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ ) сравнивается с входным  $U_{вх}$ . Информация результата сравнения (0 или 1) поступает на вход 19  $DA1$  и запоминается в РПП. После квантования 12 разрядов и сброса всех элементов в исходное состояние включается новый цикл преобразования кнопкой  $SB1$ . Информация каждого цикла преобразования выводится через согласующие каскады  $DD4$ ,

DD5 на светодиоды HL1...HL12. Светодиод HL13 служит для индикации конца цикла преобразования.

Так как уравнивание осуществляется от старшего разряда к младшему, то и нумерация светодиодов HL для индикации значений  $a_i$  разрядов осуществляется от старшего разряда к младшему (HL1 - старший, 12-й разряд, а HL12 - младший).

При режиме *непрерывной работы с регулировкой количества  $n$  разрядов*, независимо от положения переключателя SA1, запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ по входу “запуск” (23 ножка DA1). При этом ОВ запускается через замкнутый переключатель SA2 перепадом напряжения с выхода инвертора DD2 блока ограничения количества разрядов в цикле преобразования (DD1, DD2, DD3). Количество  $n$  разрядов в каждом цикле преобразования при этом определяется положением переключателя SA4. Ограничиваются младшие, начиная с первого, разряды.

Режим *непрерывной работы без ограничения разрядности* обеспечивается за счет запуска АЦП после окончания преобразования всех 12-ти разрядов цикла и подачи импульсов с 18-го вывода микросхемы DA1 «Выход Цикла» через замкнутый переключатель SA1 на 24-й вывод “Вход цикла”. Так как на преобразование одного разряда используется 2 импульса ГТИ, то при периоде повторения  $T$  напряжения ГТИ для всех 12-ти разрядов с учетом потери такта “конец цикла” и такта на восстановление исходного состояния время полного преобразования (быстродействие АЦП) составит  $T_n = 26T$ .

Основными параметрами ЦАП и АЦП являются разрешающая способность, точность и быстродействие (время одного преобразования). Разрешающая способность ЦАП и АЦП равна шагу квантования  $\Delta U$ . Точность АЦП, в основном, определяется погрешностями ЦАП и компаратора. Погрешность АЦП состоит из методической и инструментальной. Методическая погрешность определяется величиной шага  $\Delta U$  и численно ее значения не выходят за пределы  $\pm \Delta U/2$ . Инструментальная погрешность содержит: основную составляющую - погрешность дрейфа нуля (аддитивную составляющую), и погрешность нестабильности чувствительности или нестабильности коэффициента передачи элементов АЦП, в основном, УРМ (мультипликативную составляющую). В большинстве случаев инструментальная погрешность цифровых измерителей значительно меньше методической, и поэтому точность цифровых измерителей часто оценивается величиной относительной приведенной методической погрешности  $\gamma \approx 1/2^n$ .

Точность ЦАП оценивается погрешностью преобразования входного кода при единичных значениях все разрядных коэффициентов в аналог

$$\gamma_{\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} 100\%.$$

При экспериментальном исследовании погрешность АЦП определяется из выражения

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} 100\%,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при  $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ПР}}$ . Очевидно, экспериментальное значение  $\gamma_{\text{АЦП}} > \gamma = 1/2^n$ , так как оно содержит также и другие составляющие инструментальной погрешности.

Погрешность преобразования входных напряжений  $U_{\text{вх}}$  в код АЦП (погрешность преобразования  $U_{\text{вх}}$ ) определяется по формуле

$$\gamma_{n\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ВХ.Э}}}{U_{\text{ВХ.Э}}} 100\%,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ ;  $U_{\text{вх.э}}$  – напряжение  $U_{\text{вх}}$ , измеренное эталонным вольтметром.

Аналогично определяется и погрешность преобразования входного кода  $U_{\text{вх}}$  в аналог ЦАП:

$$\gamma_{n\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}}{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}} 100\%,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  – выходное напряжение ЦАП, соответствующее входному коду от исследуемого напряжения  $U_{\text{вх}}$ ;  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по коду АЦП (входному коду ЦАП) и выражению (1) при исследуемом напряжении  $U_{\text{вх}}$ .

Как отмечалось, быстродействие АЦП определяется временем одного преобразования  $U_{\text{вх}}$  в цифровой код.

## Предварительное задание к эксперименту

Изучить метод поразрядного уравнивания.

Построить зависимость выходного напряжения ЦАП  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  и разрядных коэффициентов  $a_i$  в функции от номера такта  $N_T$  (разряда) уравнивания  $U_{\text{вх}}$  при  $U_{\text{вх}} = 0$  и  $U_{\text{вх}} \geq U_{\text{нр}} = 10,24$  В для двух значений разрядов преобразования  $n_1$  и  $n_2$ , указанных в табл. 14.2. Результаты расчетов свести в таблицу 14.3.

Определить для заданных в табл. 14.2 двух значений разрядов основную приведенную методическую погрешность измерения  $\gamma$ .

Для тех же двух значений разрядов определить разрешающую способность АЦП  $\Delta U = \frac{U_{\text{ПР}}}{2^n}$ .

Т а б л и ц а 14.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$n_1$	5	6	7	8	5	6	7	5
$n_2$	12	11	10	12	11	10	12	10

Т а б л и ц а 1 4 . 3

$U_{ex}=0$					$U_{ex}\geq 10,24$ В				
№ такта	№ разр.	$U_{BbIX}^{II,API}$		$a_i$	№ такта	№ разр.	$U_{BbIX}^{II,API}$		$a_i$
1	12				1	12			
2	11				2	11			
...	...				...	...			
...	...				...	...			
12	1				12	1			

## П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   э к с п е р и м е н т а

Подключить к клеммам стенда  $U_{ex}$  и  $U_{BbIX}^{II,API}$  цифровые вольтметры, к контрольной точке  $K_2$  - вход осциллографа. Установить ждущий режим работы (переключатели  $SA1$  и  $SA2$  выключены, в нижнем положении). Включить тумблеры напряжения сети макета, осциллографа и вольтметров в положении “Вкл.”.

После 5 минутного прогрева установить потенциометр  $R1$  в крайнее левое положение ( $U_{ex}=0$ ) и при  $n=12$  ( $SA4$  в положение “12”) и длительности такта ГТИ 2 с (переключатель  $SA3$  в положении “2 сек”), после неоднократного нажатия кнопки  $SB1$  “запуск” цикла преобразования по повторяемости выходного кода убедиться в стабильности работы АЦП.

Включить непрерывный режим без регулирования количества  $n$  разрядов (при  $n=12$ , включенном  $SA1$  и выключенном  $SA2$ ) и проанализировать работу АЦП по осциллограммам  $U_{BbIX}^{II,API}$  для напряжений  $U_{ex}=0$  и  $U_{ex}\geq 10,24$  В при периоде тактовой частоты ГТИ 2 мс ( $SA3$  в положении 2 мс). Зарисовать осциллограммы  $U_{BbIX}^{II,API}$  с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни  $U_{ex}=0$  и  $U_{ex}\geq 10,24$  В.

В непрерывном режиме с регулировкой количества  $n$  разрядов переключателем  $SA4$  ( $SA1$  - в безразличном, включенном или выключенном положении,  $SA2$  - включен, в верхнем положении) для двух значений  $U_{ex}=0$  и  $U_{ex}\geq 10,24$  В, двух заданных значений разрядов и при длительности такта ГТИ 2 мс ( $SA3$  в положении 2 мс) зарисовать осциллограммы  $U_{BbIX}^{II,API}$  с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни  $U_{ex}=0$  и  $U_{ex}\geq 10,24$  В. Сравнить полученные осциллограммы с расчетными для  $U_{ex}=0$  и  $U_{ex}\geq 10,24$  мВ и с осциллограммами п.3.

В ждущем режиме (переключатели  $SA1$  и  $SA2$  выключены) при заданных в предварительном задании двух значениях разрядов  $n_1$  и  $n_2$  и длительности такта ГТИ 2 с определить значения кодов при  $U_{ex}=0$ ,  $U_{ex}\geq 10,24$  В, а также при трех промежуточных значениях  $U_{ex}$ , находящихся, соответственно, в пределах: (0 ... 3) В; (3 ... 7) В; (7 ... 10,24) В. Проследить на осциллографе за из-



менениями уровня  $U_{ВЫХ}^{ЦАП} = U_{вых}$  в процессе уравнивания всех значений  $U_{вх}$ , записав при этом в табл.14.4 значения  $U_{вх.э}$ , код при разрядности  $n_1$ , код при разрядности  $n_2$  и  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  после уравнивания, зарегистрированные цифровым вольтметром.

Т а б л и ц а 1 4 . 4

Измерено				Вычислено			
$U_{вх.э}$ , В	код $U_{вх.э}$ при $n_1$	код $U_{вх.э}$ при $n_2$	$U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ , В	$\gamma_{nАЦП}$		$\gamma_{nЦАП}$	
				$n_1=$	$n_2=$	$n_1=$	$n_2=$
0							
10,24							
$U_1$							
$U_2$							
$U_3$							

По полученным в п. 5 результатам определить расчетным путем для каждого из входных напряжений  $U_{вх.э}$  (кроме  $U_{вх.э}=0$  и  $U_{вх.э} \geq 10,24$  В) при заданной разрядности  $n_1$  и  $n_2$  погрешность  $\gamma_{nАЦП}$  преобразования  $U_{вх.э}$  в код и погрешность  $\gamma_{nЦАП}$  преобразования кода напряжений  $U_{вх.э}$  в аналог ЦАП. Результаты расчетов внести в табл.14.4. Как изменяются погрешности  $\gamma_{nАЦП}$  и  $\gamma_{nЦАП}$  с изменением значений  $U_{вх.э}$  и разрядности преобразования  $n$ ?

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; Схема лабораторной установки (рис.14.4); таблица результатов измерений и расчетов; расчетные и снятые экспериментально осциллограммы зависимости  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  в функции от тактов уравнивания напряжений  $U_{вх}=0$  и  $U_{вх} \geq 10,24$  В при  $n_1$  и  $n_2$  разрядах преобразования.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

Для каких целей применяется ЦАП и АЦП? 2. Какие функции выполняет РПП? 3. Как осуществляется процесс поразрядного уравнивания? 4. Как работает ЦАП параллельного преобразования? 5. Какие причины ограничивают разрядность ЦАП? 6. Почему в АЦП используется двоичная система счисления? 7. Как оценивается точность и разрешающая способность АЦП и ЦАП? 8. Как оценивается точность преобразования напряжений в код АЦП и точность преобразования входного кода в аналог ЦАП?

## Л и т е р а т у р а :

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/ Под ред. В.А.Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1988.-320с., ил.
2. Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем./ Под ред. В.А.Лабунцова.-М.: Энергоатомиздат, 1987-464с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб.пособие для приборостроит. спец.вузов.-2-е изд., перераб. и доп.-М.: Высш.шк. 1991.-622с., ил.
4. Микроэлектронные устройства в автоматике: Учеб. пособие для вузов/ А.А.Сазонов, А.Ю.Лукичев,В.Т.Николаев и др.;Под ред. А.А.Сазонова.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-384с., ил.
5. Фурунжиев Р.И., Бохан Н.И. Микропроцессорная техника в автоматике: Учеб.пособие.-Мн.: Ураджай, 1991.-280с., ил.
6. Токхейм Р. Основы цифровой электроники: Пер. с англ. М.: Мир, 1988.-392с., ил.
- Жеребцов И.П. Основы электроники. - Л.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. - М.: Высшая школа, 1982.

## Содержание:

Работа № 1 . ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ .....	3
Работа № 2 . ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ .....	10
Работа № 3 . ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ..	18
Работа № 4 . ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ .....	28
Работа № 5 . УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ....	38
Работа № 6 . ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА .....	46
Работа № 7 . ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ .....	51
Работа № 8 . ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ .....	55
Работа № 9 . ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ .....	67
Работа № 10 КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ .....	73
Работа № 11 . ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА.....	80
Работа № 12 . ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ .	87
Работа № 13 . СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ	93
Работа № 14 . ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	101
Л и т е р а т у р а : .....	111