

**Белорусский национальный технический университет**

**Энергетический факультет**

**Кафедра «Электротехника и электроника»**

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

для специальности

1-53 01 04 Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами

Составители: Бладыко Ю.В., Матвеевко И.П., Жуковская Т.Е.

## Перечень материалов

### Теоретический раздел

- тематический конспект лекций

### Практический раздел

- материалы лабораторных занятий;
- материалы практических занятий

### Контроль знаний

- экзаменационные вопросы;
- вопросы к тестам

### Вспомогательный раздел

- учебная программа;
- методическая карта дисциплины;
- рекомендуемая литература;
- словарь терминов

## Пояснительная записка

Цели данного ЭУМК – повышение эффективности организации учебного процесса с использованием дистанционных технологий; представление возможности студентам заниматься самообразованием, пользуясь комплектом учебно-методических материалов по курсу «Основы электроники».

ЭУМК содержит четыре раздела: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный раздел. В теоретическом разделе представлен лекционный материал в соответствии с основными разделами и темами учебной программы. Практический раздел включает лабораторный практикум и материалы для практических занятий. Раздел контроля знаний включает экзаменационные вопросы, а также вопросы к тестам для организации самостоятельной работы студента. Вспомогательный раздел содержит основные разделы учебной программы дисциплины, методическую карту дисциплины, список рекомендуемой литературы, словарь терминов и определений.

Материалы учебно-методического комплекса представлены в формате PDF. Учебные материалы структурированы по разделам. ЭУМК содержит перекрестные и гиперссылки, позволяющие оперативно найти необходимый материал, перейти к нужной теме. Предусматривается так же навигация по разделам через закладки PDF формата, что обеспечивающая возможность быстрого поиска требуемой информации и быстрый возврат к предыдущей информации

Открытие ЭУМК производится посредством запуска файла *Osnov\_Elektroniki.pdf*

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## Раздел 1 Элементная база электроники

- [Полупроводники и их свойства](#)
- [Полупроводниковые диоды](#)
- [Биполярные транзисторы](#)
- [Полевые транзисторы](#)
- [Тиристоры](#)
- [Интегральные микросхемы. Оптоэлектронные приборы](#)

## Раздел 2 Аналоговые устройства

- [Однофазные неуправляемые выпрямители](#)
- [Трехфазные выпрямители](#)
- [Стабилизаторы](#)
- [Управляемые выпрямители](#)
- [Инверторы. Импульсные источники питания](#)
- [Усилители переменного сигнала](#)
- [Обратные связи в усилителях](#)
- [Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов](#)
- [Усилители мощности](#)
- [Усилители постоянного тока. Операционный усилитель](#)
- [Избирательные усилители](#)
- [Генераторы гармонических колебаний](#)

## Раздел 3 Цифровые устройства

- [Представление информации в импульсной форме. Генераторы импульсов](#)
- [Логические элементы](#)
- [Триггеры](#)
- [Счетчики импульсов](#)
- [Регистры](#)
- [Комбинационные устройства](#)
- [Аналогово-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи](#)
- [Микропроцессорные системы и микропроцессоры](#)

## ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### Перечень лабораторных работ

[Л.Р. №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ»](#)  
[Л.Р. №2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО И БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»](#)  
[Л.Р. №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ](#)  
[Л.Р. №4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА](#)  
[Л.Р. №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ](#)  
[Л.Р. №6 ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ](#)  
[Л.Р. №7 КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ](#)  
[Л.Р. №8 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ](#)  
[Л.Р. №9 СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ](#)  
[Л.Р. №10 ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ](#)  
[Л.Р. №11 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ](#)  
[Л.Р. №12 УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ](#)  
[Л.Р. №13 ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ](#)  
[Л.Р. №14 ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА](#)  
[Л.Р. №15 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦАП И АЦП](#)  
[Л.Р. №16 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ](#)

### Перечень тем практических занятий

1. [Определение параметров полупроводниковых диодов, тиристоров.](#)
2. [Определение параметров биполярных и полевых транзисторов.](#)
3. [Расчет выпрямителей. Расчет сглаживающих фильтров.](#)
4. [Расчет усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах.](#)
5. [Расчет схем на операционных усилителях.](#)
6. [Реализация комбинационных устройств на логических элементах.](#)
7. [Триггеры: синтез RS-триггеров в базисе 2И–НЕ и 2ИЛИ–НЕ.](#)
8. [Цифровые счетчики и регистры: построение схем, временные диаграммы работы.](#)

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

[Экзаменационные вопросы](#)

[Вопросы к тестам](#)

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

[Содержание учебного материала](#)

[Учебно-методическая карта дисциплины](#)

[Список литературы](#)

[Словарь терминов](#)

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## Раздел 1 Элементная база электроники

### Введение

Электроника область науки, техники и производства изучающая принципы функционирования, разработку и применение устройств работа которых основана на протекании тока в твердом теле, вакууме и газе. Приборы электроники подразделяют на: *аналоговые*, обеспечивающие обработку непрерывного сигнала; и *импульсные*, в которых обрабатываемый сигнал представляет дискретную функцию.

По области применения различают энергетические и информационные устройства электроники. Энергетическая электроника включает устройства, обеспечивающие преобразование одного вида электрической энергии в другой и изменение параметров электрического сигнала. Информационная электроника занимается устройствами для приема, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Сфера применения электроники постоянно расширяется. В основе современной электроники лежит применение полупроводниковых приборов, что позволяет снижать потребление электрической мощности, уменьшать габариты, массу, современных устройств электроники. В информационной электронике применение полупроводниковых структур позволяет увеличивать объем обрабатываемой информации в единицу времени не снижая качества обработки информации.

### 1.1 Полупроводниковые приборы

#### *Основы теории электропроводности*

В теории электропроводности твердых тел указывается, что энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, которые называются *энергетическими уровнями*. Электроны, расположенные ближе к ядру атома, обладают меньшими энергиями, т.е. находятся на более низких энергетических уровнях, а удаленные от ядра электроны находятся на более высоких энергетических уровнях, т.е. обладают большей энергией.

Когда электрон переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, выделяется количество энергии (квант энергии или фотон), которую теряет атом. Если атом поглощает квант энергии, то электрон переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий. Такие электроны начинают свободно перемещаться в объеме и называются *свободными носителями зарядов*.

Свободная зона, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны, называется *зоной проводимости*. Зона, ближайшая к зоне проводимости, называется *валентной*. При изменении температуры происходит обмен носителями зарядов между валентной зоной и зоной проводимости (рисунок 1.1).

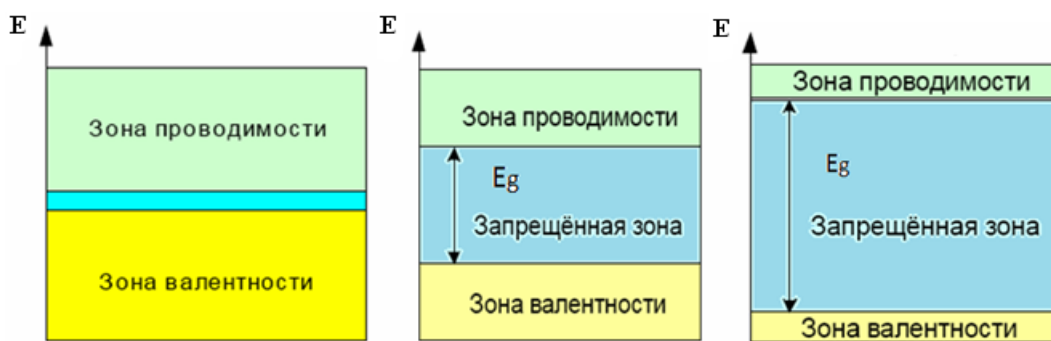


Рисунок 1.1. - Зонная диаграмма металла, полупроводника и диэлектрика

С возрастанием температуры электроны, получившие дополнительную тепловую энергию, разрывают такие ковалентные связи и становятся свободными носителями заряда. Таким образом, для перевода электронов в свободное состояние необходимо сообщить ему дополнительное количество энергии, которое обозначается  $E_g$ .

В диэлектриках величина дополнительной энергии  $E_g$ , необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, значительно больше, чем у полупроводников.

Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Такое вакантное энергетическое место носит название «дырка» и оно равносильно наличию в данном месте положительного заряда. В технической литературе дырки обозначают буквой **p**, а электроны буквой **n**.

### ***Электропроводность полупроводников***

Появление электронов в зоне проводимости означает, что полупроводник становится электропроводящим. Эта электропроводность является следствием нарушения валентных связей и называется *собственной электропроводностью*.

На электропроводность полупроводника существенное влияние оказывает наличие в нем атомов примесей. Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют электронной, а электропроводность, обусловленную движением дырок – дырочной.

#### *Примесная электропроводность полупроводников*

В зависимости от рода введенной примеси в полупроводниках преобладает либо электронная электропроводность (n-типа, от латинского negative – отрицательный) либо дырочная электропроводность (p-типа, от латинского positive – положительный). Примеси могут быть донорного и акцепторного типа.

Примесный атом, отдающий электрон, называют донорным. Донорные примеси образуются при введении в кристаллическую решётку полупроводника (обычно кремния Si или германия Ge, которые являются четырехвалентными) атомов фосфора P, мышьяка As или других веществ, которые имеют на внешней электронной оболочке пять валентных электронов. Он замещает один из атомов Ge

(Si) в кристаллической решетке, образуя двухвалентные связи с четырьмя атомами (рисунок 1.2, б).

Пятый валентный электрон атома фосфора, оказывающийся «лишним», образует электрон проводимости. При увеличении содержания атомов примеси возрастает число электронов в зоне проводимости, а число дырок не меняется. Ток переносится в основном электронами. В этом случае электроны являются основными носителями заряда, а дырки – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником n- типа.

Акцепторные примеси образуются введением в кристаллическую решетку полупроводника атомов бора В, индия In, галлия Ga или других трехвалентных элементов. Атом акцептора также занимает место в кристаллической решётке, но обменивается с соседними четырьмя атомами только тремя электронами (рисунок 1.2, в).

На образование связи с одним из соседних атомов Ge (Si) у атомов индия не хватает одного электрона, т. е. между этими двумя атомами возникает незаполненная валентная связь, или дырка. При увеличении акцепторной примеси возрастает концентрация дырок и они становятся основными носителями, а электроны – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником p-типа.

Кристаллические структуры таких полупроводников показаны на рис. 1.2.

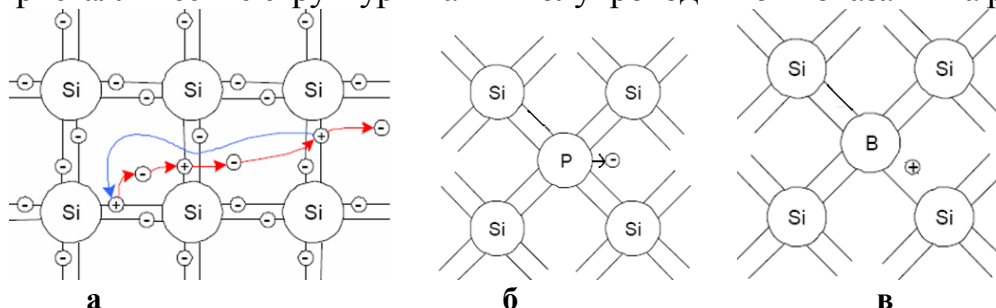


Рисунок 1.2. - Кристаллические структуры чистого полупроводника (а), полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

Процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости является обратимым, то есть электрон из зоны проводимости может перейти в валентную зону, теряя при этом энергию. При таком переходе электрон заполняет свободный уровень в валентной зоне. Этот процесс, обратный генерации, называется рекомбинацией.

#### *Дрейфовые и диффузионные токи в полупроводниках*

При приложении внешнего электрического поля в полупроводнике происходит дрейфовое движение электронов. В этом случае электроны и дырки начнут перемещаться вдоль электрического поля, то есть создают электрический ток. Плотности электронной и дырочной составляющих равны соответственно:

$$j_{n\text{др}} = qn\mu_n E, \quad (1.1)$$

$$j_{p\text{др}} = qr\mu_p E, \quad (1.2)$$

где  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок, которые определяют скорости перемещения носителей под действием электрического поля, при

этом:  $\mu_n = v_n/E$ ;  $\mu_p = v_p/E$ , где  $v_n$  и  $v_p$  – скорости перемещения электрона и дырки под действием электрического поля;

$E$  – напряженность электрического поля;

$n$ ,  $p$  – концентрация электронов и дырок;

$q$  – заряд.

Общая плотность дрейфовой составляющей тока будет равна

$$j_{др} = jn_{др} + jp_{др} = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (1.3)$$

Удельная проводимость будет определяться как:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p). \quad (1.4)$$

Наряду с дрейфовой возникает диффузионная составляющая тока, которая является следствием теплового движения электронов. При неравномерной концентрации электронов и дырок и при отсутствии внешнего поля они перемещаются по законам диффузии, переходя из области больших концентраций в область меньших концентраций. Это направленное перемещение электронов в результате хаотического теплового движения называется диффузией и образует диффузионную составляющую тока. В результате диффузии носители зарядов смещаются в направлении уменьшения их концентрации (градиент концентрации).

Градиент концентрации определяется как отношение изменения концентрации к расстоянию, на котором это изменение происходит:

$$\text{grad } n = \Delta n / \Delta x. \quad (1.5)$$

Плотность электронного диффузионного тока пропорциональна градиенту концентрации:

$j_{nD} = qD_n(dn/dx)$ , где  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов;  $dn/dx$  – градиент концентрации электронов.

Плотность дырочного диффузионного тока определяется из аналогичного выражения:

$j_{pD} = -qD_p(dp/dx)$ , где  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок;  $dp/dx$  – градиент концентрации дырок.

### *Полупроводниковые материалы*

К полупроводникам относятся кремний, германий, селен, теллур, большинство оксидов металлов и всё разнообразие руд и минералов, встречающихся в природе. Полупроводники по величине электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и изоляторами.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых приборов являются кремний (Si) и германий (Ge). Большая механическая прочность и химическая устойчивость этих материалов обеспечивают надёжность работы изготавливаемых полупроводниковых приборов, а также достаточно большой срок их службы.

### *Полупроводниковые резисторы*

Полупроводниковыми резисторами называют полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов.



**Терморезистор** – полупроводниковый прибор, сопротивление которого изменяется при изменении температуры (у *термистора* сопротивление уменьшается с ростом температуры, а у *позистора* - возрастает).

Температурная характеристика термистора показана на рисунке 1.3.

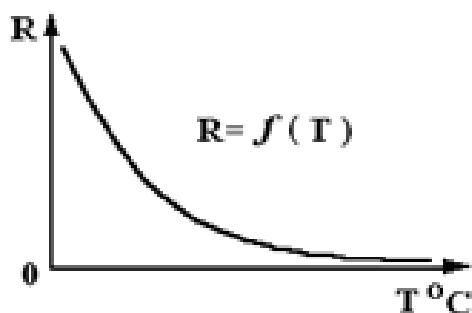


Рисунок 1.3. - Температурная характеристика термистора

Параметры терморезистора:

- 1) холодное сопротивление (при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ );
- 2) температурный коэффициент сопротивления (TKR) %;
- 3) рабочая температура ( $t^{\circ}_{\text{max}}$ );
- 4) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\text{max рас}}$ .

Применяют термисторы для измерения и регулирования температуры, а также термокомпенсации.

**Позисторы** – полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (титанат бария с примесями), у которых сопротивление увеличивается при увеличении  $t^{\circ}$ . Основная характеристика – температурная (рисунок 1.4). Параметры аналогичны параметрам термистора.

Применяют позисторы для автоматического регулирования температуры, термокомпенсации, в схемах ограничителей и стабилизаторов тока, для предохранительных приборов и устройств защиты от перегрева, в качестве бесконтактных переключающих элементов.

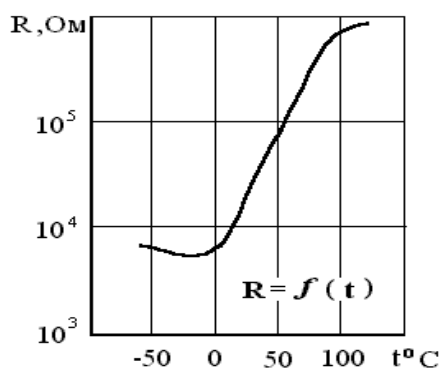


Рисунок 1.4 – Температурная характеристика позистора

Маркировка терморезисторов состоит из трех элементов:

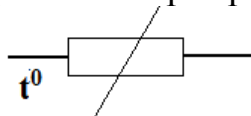
- первый элемент маркировки обозначает назначение (СТ – резисторы термочувствительные, Т и ТШ – резисторы измерительные, ТП – стабилизирующие, ТКП – регулируемые бесконтактные);

- второй элемент обозначает тип полупроводника (1 – кобальт-марганец, 2 – медно-марганцевые, 3 – медно-кобальт-марганцевые, 4 – кобальт-никель-марганец);

- третий элемент обозначает номер конструкции.

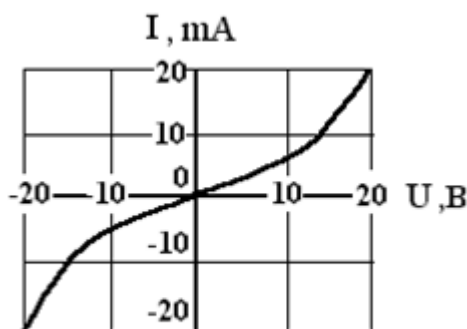
Примеры: СТ2 – 26, СТ4 – 5, ММТ – 6, ТШ – 2, ТКП – 450.

Условное графическое изображение терморезисторов:



**Варисторы** – полупроводниковые резисторы (на основе карбида Si) сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

Основная характеристика варистора – это вольтамперная характеристика (ВАХ)  $I = f(U)$  (рисунок 1.5).



$$I = f(U)$$

Рисунок 1.5. – ВАХ варистора

Параметры варистора:

- 1) статическое сопротивление при постоянных значениях тока и напряжения  $R_{ст} = U/I$ ;
- 2) динамическое сопротивление переменному току  $R_{д} = \Delta U / \Delta I$ ;
- 3) коэффициент нелинейности  $\beta = R_{ст} / R_{д}$ ;
- 4) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{max}$  расс.

Применяют варисторы для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений, для защиты элементов от перенапряжений.

Маркировка прибора состоит из 4 элементов:

- первый элемент обозначает назначение (СН – сопротивление нелинейное);

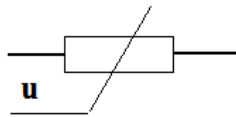
- второй элемент обозначает тип полупроводника;

- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;

- четвертый элемент обозначает длину токоведущего элемента.

Примеры: СН1 -1, СН -3.

Условное графическое изображение варистора:

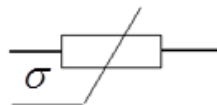


**Тензорезисторы** - полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от величины механической деформации.

Для характеристики изменения сопротивления при деформации используется коэффициент тензочувствительности **m**, который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении:

$$m = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

Условное графическое изображение тензорезистора:



**Фоторезисторы** – полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под действием светового потока.

Основой фоторезистора является светочувствительный элемент – прямоугольная или круглая таблетка, спрессованная из полупроводникового материала или тонкая пленка на стеклянной подложке с электродами с малым переходным сопротивлением (рисунок 1.6).

Принцип действия фоторезистора основан на использовании явления внутреннего фотоэффекта: при увеличении светового потока часть электронов проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов (возникает фототок проводимости).

При отсутствии тока через фоторезистор течет темновой ток:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H},$$

где  $R_T$  - темновое сопротивление фоторезистора.

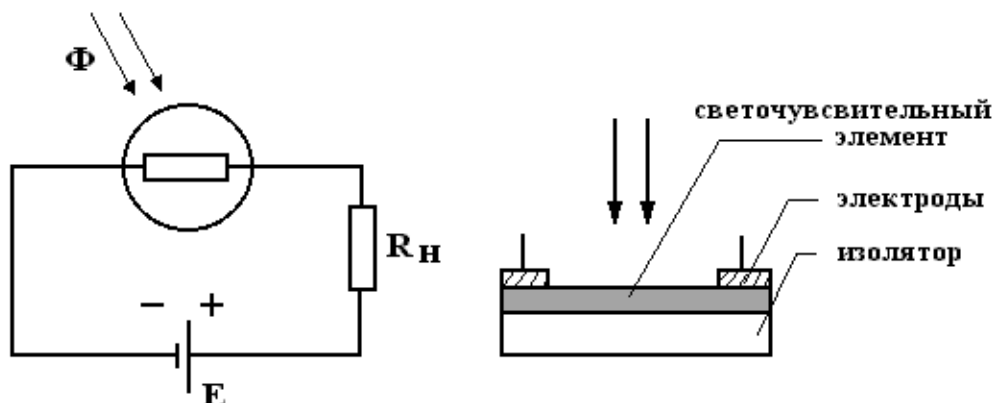


Рисунок 1.6. - Конструкция фоторезистора

При освещении фоторезистора через него протекает световой ток:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}.$$

Основные характеристики фоторезистора (рисунок 1.7):

1) вольтамперная характеристика – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке:

$I_{\phi} = f(U_{\phi})$  при  $\Phi = \text{const}$  (рисунок 1.7, а);

2) световая(энергетическая) – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава  $I_{\phi} = f(\Phi)$  при  $U = \text{const}$  (рисунок 1.7, б);

3) спектральная – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения (рисунок 1.7, в).

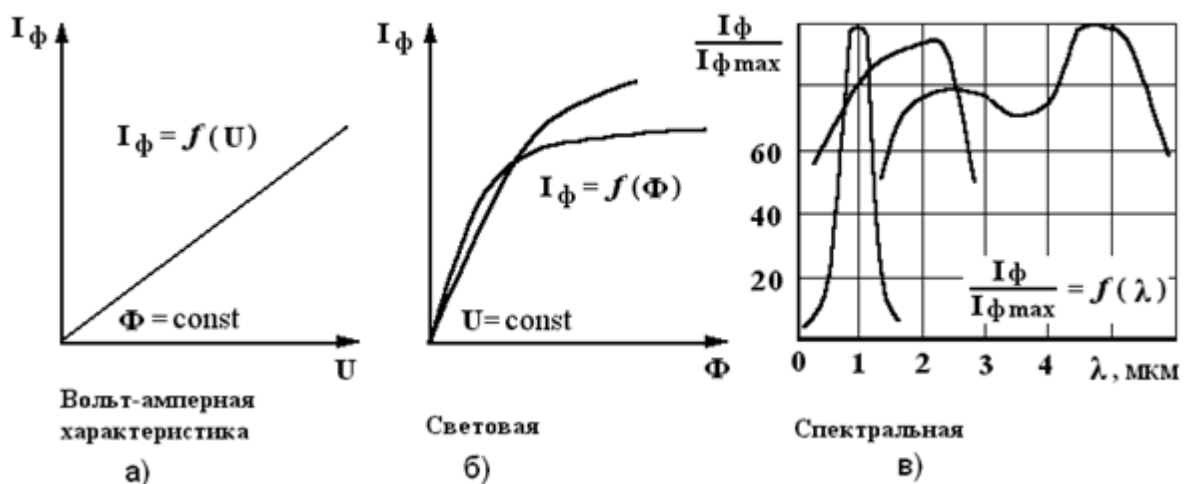


Рисунок 1.7 - Характеристики фоторезистора

Основные параметры фоторезистора:

1) темновое сопротивление  $R_T$ ;

2) темновой и фото- токи ( $I_T$ ,  $I_{\phi}$ );

3) удельная чувствительность  $S = \frac{I_{\phi}}{\Phi \cdot U}$ ;

4) рабочее напряжение;

5) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\text{max расс}}$ .

Маркировка фоторезистора состоит из трех элементов:

- первый элемент обозначает назначение (ФС - фотосопротивление);

- второй элемент обозначает тип полупроводника (К-кремний);

- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;

Примеры: ФСК -1, ФСК – 2, ФСА – 6.

Применение фоторезисторов: в промышленной электронике, телевидении, фототелеграфии, сигнализации и связи (в диапазоне инфракрасных волн), а также в схемах электронной автоматики.

## Тема 1.2. Полупроводниковые диоды

### Образование p-n- перехода

Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным или p-n-переходом. При соприкосновении двух полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок. Свободные электроны из зоны полупроводника n-типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p-типа. В результате, вблизи границы двух полупроводников образуется запирающий слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, который называют p-n-переходом (ширина запирающего слоя или p-n-перехода равна  $d$ ).

Кроме того, в n-области в приграничном слое образуется положительный объемный заряд, который создан «+» заряженными атомами донорной примеси (т.к. электроны ушли в полупроводник p-типа), а в p-области образуется «-» объемный заряд, который создан «-» заряженными атомами акцепторной примеси (т.к. дырки были заполнены электронами из полупроводника n-типа).

Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ . На диаграмме (рисунок 1.8) показано распределение потенциала вдоль оси  $x$ , перпендикулярной границе раздела полупроводников, за нулевой потенциал условно принят потенциал граничного слоя.

Возникшая разность потенциалов  $U_k$  создает в запирающем слое электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область, т.е. возникает потенциальный барьер.

При движении через p-n-переход неосновных носителей заряда возникает дрейфовый ток  $I_{др}$ . Движение небольшого количества основных носителей приводит к появлению диффузионного тока  $I_{диф}$  (ситуация рассмотрена при отсутствии внешнего напряжения).

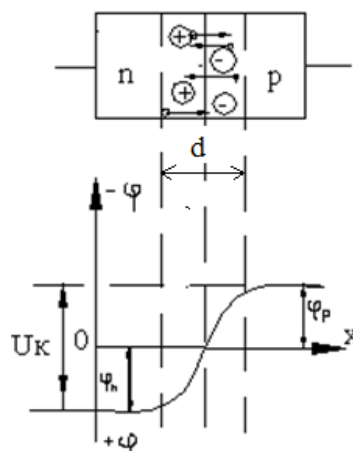


Рисунок 1.8 - Распределение потенциала вдоль оси  $x$ , перпендикулярной границе раздела при отсутствии внешнего источника напряжения

Если источник внешнего напряжения подключен «+» полюсом к полупроводнику р-типа и «-» полюсом к полупроводнику n-типа, то такое напряжение, у которого полярность совпадает с полярностью основных носителей, называется прямым (рисунок 1.9).

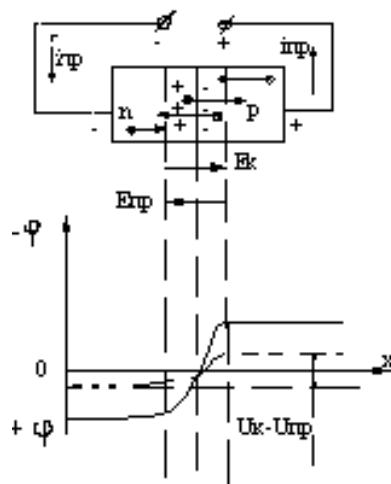


Рисунок 1.9 - Распределение потенциала при прямом включении источника

В этом случае внешнее электрическое поле направлено навстречу полю контактной разности потенциалов. В результате чего высота потенциального барьера понижается ( $U_k - U_{пр}$ ), возрастает  $I_{диф}$ , который называют прямым током, сопротивление р-n-перехода резко снижается, уменьшается также ширина запирающего слоя. При  $d = 0$  потенциальный барьер в р-n-переходе исчезает и сопротивление р-n-перехода определяется только сопротивлением полупроводника.

Пусть источник внешнего напряжения подключен «+» полюсом к n-области, а «-» полюсом к р-области. Такое включение называется обратным. Поле, создаваемое обратным напряжением  $U_{обр}$ , складывается с полем контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера увеличивается ( $U_k + U_{обр}$ ) (рисунок 1.10), а также расширяется толщина запирающего слоя, так как с увеличением  $U_{обр}$  основные носители заряда будут удаляться от р-n-перехода. При этом сопротивление р-n-перехода увеличивается, а ток через р-n-переход уменьшается.

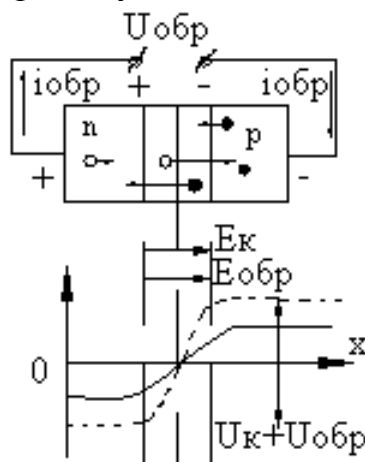


Рисунок 1.10 - Распределение потенциала при обратном включении источника

Такой р-п-переход обладает электрической емкостью, которая зависит от его площади, ширины и диэлектрической проницаемости запирающего слоя. Такая емкость называется «барьерной». При увеличении  $U_{обр}$  ширина р-п-перехода возрастает, а емкость  $C_{бар}$  уменьшается (рисунок 1.11). При этом

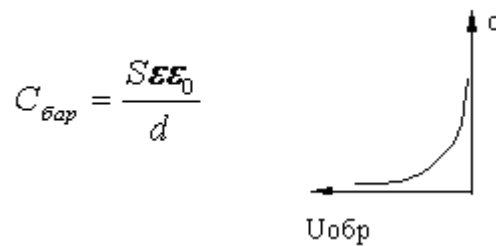


Рисунок 1.11 - Зависимость барьерной емкости  $C_{бар}$  от напряжения  $U_{обр}$

### ***Полупроводниковые диоды***

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами и одним р-п-переходом.

Диоды различают по технологии изготовления, конструктивному исполнению, материалу, функциональному назначению, мощности и частоте.

*В зависимости от технологии изготовления различают диоды:*

- точечные;
- сплавные;
- микросплавные;
- эпитаксиальные и др.

*По конструктивному исполнению:*

- плоскостные (площадь р-п-перехода больше его толщины);
- точечные (площадь р-п-перехода значительно меньше его толщины).

*По используемому материалу:*

- кремниевые;
- германиевые;
- арсенидгаллиевые.

*По функциональному назначению:*

- выпрямительные;
- стабилитроны;
- варикапы;
- фотодиоды;
- светодиоды;
- туннельные и др.

*По мощности:*

- маломощные (до 0,3 А);
- средней мощности (до 10 А);
- мощные (более 10 А).

*По частоте:*

- низкочастотные (до 1 кГц);
- высокочастотные (до 300 МГц);
- сверхвысокочастотные (СВЧ, более 300 МГц).

Условные графические изображения диодов приведены на рис. 1.12.

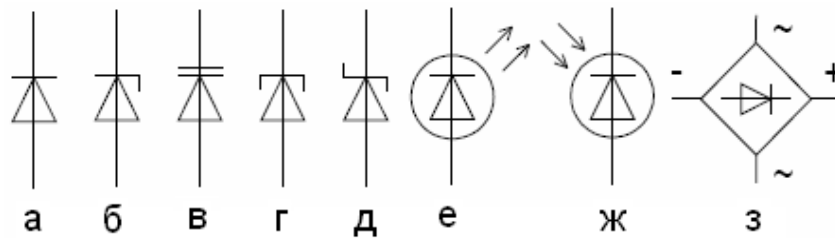


Рисунок 1.12 - Условные графические изображения диодов:

а - выпрямительные, импульсные, СВЧ; б – стабилитроны; в – варикапы; г – туннельные; д – диоды Шоттки; е– светодиоды; ж – фотодиоды; з – выпрямительные блоки

**Выпрямительные диоды** предназначены для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный. При этом используется главное свойство р-п-перехода: проводить ток в прямом направлении и практически не пропускать ток в обратном направлении. Основной характеристикой такого диода является вольт-амперная характеристика, которая соответствует ВАХ р-п-перехода (рис.1.13).

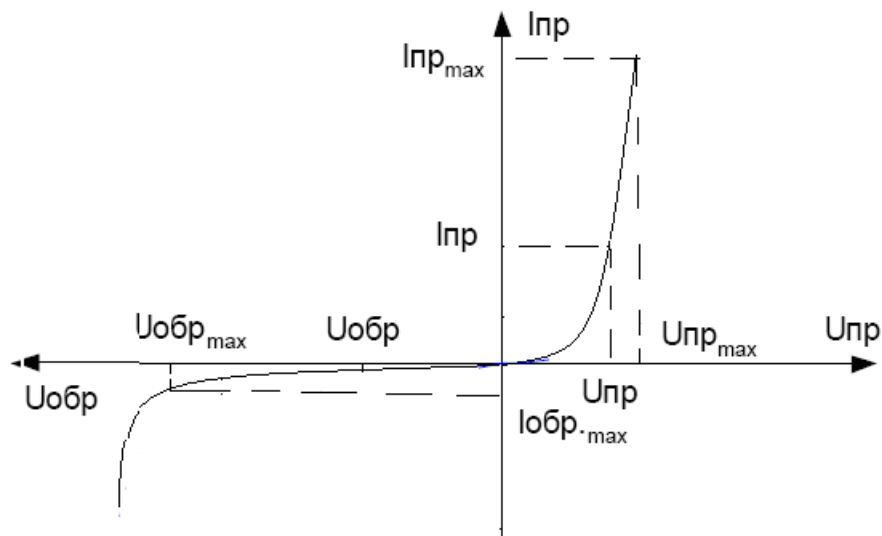


Рисунок 1.13 - ВАХ выпрямительного диода

**Основные параметры выпрямительных диодов:**

- прямое напряжение  $U_{пр}$  и соответствующий ему прямой ток  $I_{пр}$ ;
- обратное напряжение  $U_{обр}$  и соответствующий ему обратный ток  $I_{обр}$ ;
- максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.маx}$  и максимально допустимый прямой выпрямленный ток  $I_{пр\ max}$



- дифференциальное сопротивление  $r_{диф} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}$ ;
- мощность рассеяния  $P_{рас}$  – допустимое значение рассеиваемой мощности, при которой обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода.

*Стабилитрон* – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя сохраняется с определенной точностью при изменении проходящего через него тока в заданном диапазоне. Рабочим участком на ВАХ стабилитрона является участок электрического пробоя. На этом участке обратной ветви ВАХ при изменении тока в широких пределах напряжение практически не меняется (рисунок 1.14).

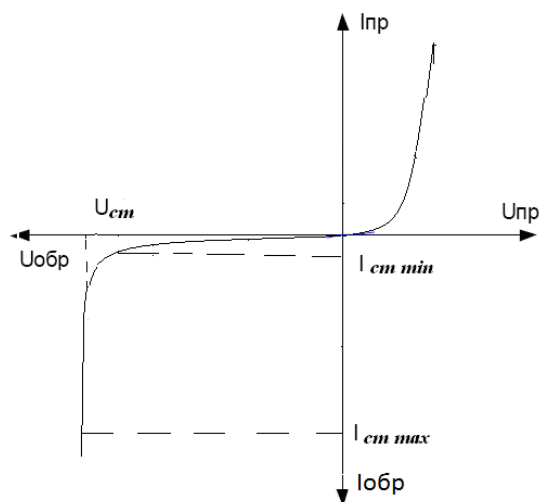


Рисунок 1.14 - ВАХ стабилитрона

Стабилитроны называют также опорными диодами, так как полученное от них стабильное напряжение иногда используется в качестве эталонного (например, в стабилизаторах напряжения). Простейшая схема включения стабилитрона показана на рисунке 1.15.

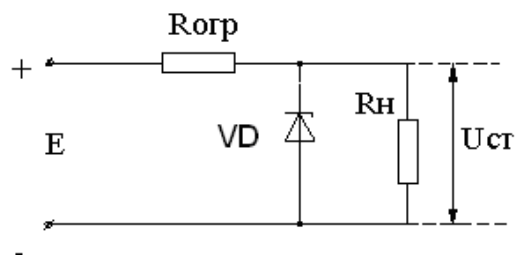


Рисунок 1.15 - Схема включения стабилитрона

Принцип стабилизации напряжения с использованием стабилитрона заключается в том, что при изменении входного напряжения  $U_{вх}$  ток стабилитрона изменяется от  $I_{см min}$  до  $I_{см max}$ , а напряжение на стабилитроне  $U_{ст}$  и сопротивлении нагрузки  $R_H$  почти не меняется.

**Основные параметры стабилитронов:**

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;

- диапазон изменения тока стабилизации ( $I_{\max} - I_{\min}$ );
- $P_{\max}$  – максимально допустимая мощность рассеивания;
- дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta I_{\text{см}}}$ ;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации  $\text{ТКНС} = \Delta U_{\text{ст}} / (U_{\text{ст}} \Delta T)$ .

**Варикапы** – это полупроводниковые диоды, действие которых основано на использовании зависимости барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения. При подаче обратного напряжения р-п-переход представляет собой конденсатор, диэлектриком которого служит высокоомный запирающий слой с низкой концентрацией носителей заряда, а обкладками – полупроводниковый материал по обе стороны от него, сохраняющий высокую проводимость.

Основная характеристика варикапа – вольт-фарадная  $U_{\text{обр}} = f(C_{\text{бар}})$  (рис. 1.11).

#### **Основные параметры варикапов:**

- минимальная емкость  $C_{\min}$  при заданном минимальном обратном напряжении;
- минимальная емкость  $C_{\max}$  при заданном максимальном обратном напряжении;
- коэффициент перекрытия по емкости  $K = C_{\max} / C_{\min}$  (от 2 до 18);
- добротность  $Q = X_c / R_{\text{пот}}$ , где  $X_c$  – реактивное сопротивление варикапа,  $R_{\text{пот}}$  – сопротивление потерь;
- температурный коэффициент емкости ТКЕ.

Применяются варикапы для генерации и усиления в СВЧ диапазоне, в качестве конденсаторов переменной емкости для электрической настройки колебательных контуров в радиоаппаратуре.

**Фотодиоды** – это полупроводниковые диоды, в которых используется явление внутреннего фотоэффекта.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном плоскости р-п-перехода, в результате поглощения фотонов в п-области возникают электронно-дырочные пары. При диффузии электронов и дырок в глубь п-области основная их доля не успевает рекомбинировать и доходит до границы р-п-перехода. Здесь они разделяются электрическим полем р-п-

перехода, причем дырки переходят в р-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы р-п-перехода и п-области.

Таким образом, ток через р-п-перехода обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется фототоком  $I_{\phi}$ . Дырки заряжают р-область положительно относительно п-области, а электроны – п-область отрицательно по отношению к р-области. Возникающая разность потенциалов называется фотоЭДС ( $E_{\phi}$ ). Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность.

Фотодиоды могут использоваться для получения электрической энергии. Солнечные батареи изготавливают на основе фотодиодов с большой площадью р-п-перехода.

Фотодиоды могут работать в режиме фотогенератора (без внешнего источника питания) и в режиме фотопреобразователя (с внешним источником питания, включенном в обратном направлении).

В режиме фотогенератора (рисунок 1.16, а) при освещении п- области в ней образуется пары - электрон и дырка. Образовавшиеся заряды диффундируют к переходу, полем которого дырки втягиваются в р- область. При разомкнутом ключе в р- области накапливается избыточный «+» заряд, а в п- области «-» заряд. На электродах фотодиода возникает разность потенциалов, понижающая потенциальный барьер. Это приводит к возникновению прямого тока ( $I_{пр.}$ ) через р-п – переход.

Если электроды замкнуты накоротко, то разность потенциалов на них не возникает и высота потенциального барьера при освещении не изменится. При включении сопротивления нагрузки  $R_n$  через неё протекает ток нагрузки  $I_n = I_{\phi} - I_{пр.}$

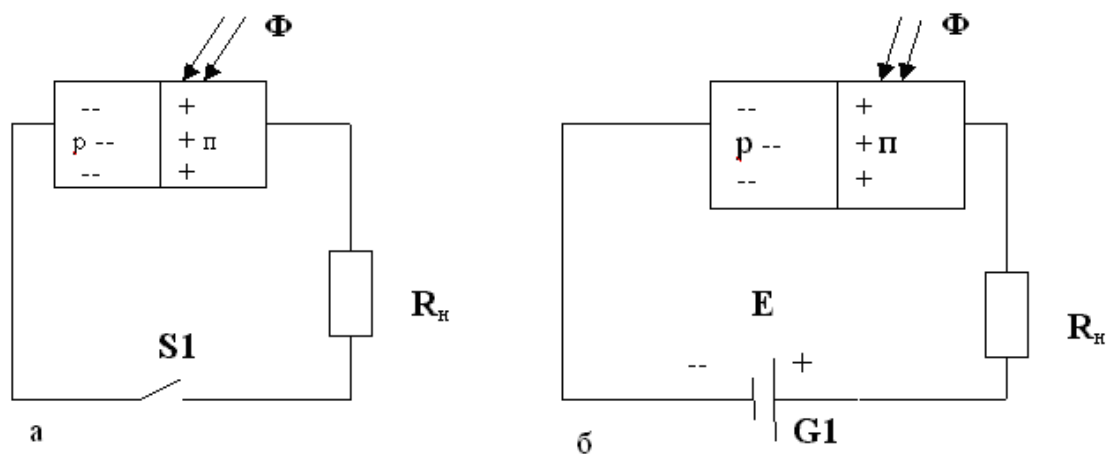


Рисунок 1.16 - Включение фотодиода в режиме фотогенератора (а) и в режиме фотопреобразователя (б)

В режиме фотопреобразователя (рисунок 1.16, б) к диоду прикладывается обратное напряжение. Так как приложенное напряжение значительно больше фото ЭДС, то при освещении р-п – перехода высота потенциального барьера практически не изменяется и все освобожденные светом и разделенные полем р-п – перехода заряды уходят во внешнюю цепь.

Прямой ток через p-n – переход, который возникает при работе в режиме фотогенератора и уменьшает ток в нагрузочном сопротивлении, в данном случае равен нулю [7, 12].

При отсутствии света через p-n – переход и  $R_n$  протекает обратный ток p- n – перехода  $I_{обр} = I_T$  ( где  $I_T$  темновой ток ). При освещении фотодиода через  $R_n$  протекает ток  $I_{общ} = I_\phi - I_T$ . Поскольку внутреннее сопротивление фотодиода в этом режиме велико, то ток не зависит от  $R_n$ .

#### **Основные параметры фотодиодов:**

- фототок  $I_\phi$ ;
- темновой ток  $I_0$  (ток в диоде при отсутствии освещения);
- величина фотопотока  $\Phi$ ;
- интегральная чувствительность.  $S_n = \frac{I_\phi}{\Phi}$ .

Основными характеристиками фотодиодов являются вольт-амперная ( $I = f(U)$ ), энергетическая ( $I_\phi = f(\Phi)$  – зависимость фототока  $I_\phi$  от величины светового потока  $\Phi$ ), спектральная ( $I_\phi = f(\lambda)$  – зависимость фототока  $I_\phi$  от длины волны светового потока  $\lambda$ ).

**Светодиоды** – это полупроводниковые приборы с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующие электрическую энергию в энергию светового излучения. Явление свечения в светодиоде называется инжекционной электролюминесценцией. Основой светодиода является p-n-переход, смещенный внешним источником напряжения в прямом направлении.

При прямом смещении потенциальный барьер p-n-перехода понижается и происходит инжекция электронов в p-область и дырок в n-область. В процессе рекомбинации неосновных носителей в p-n переходе энергия выделяется в виде фотонов, то есть процесс рекомбинации сопровождается световым излучением.

Светодиоды изготавливаются не на основе германия или кремния, как большинство полупроводниковых приборов, а на основе арсенида галлия или фосфида галлия, которые имеют достаточную ширину запрещенной зоны.

#### **Основные параметры светодиодов:**

- 1) сила света  $I_v$  – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (мКд);
- 2) яркость излучения равна отношению силы света к площади светящейся поверхности (Кд/см<sup>2</sup>);

- 3) постоянное прямое напряжение (2...4В);
- 4) цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
- 5) максимально допустимый постоянный прямой ток (мА);
- 6) максимально допустимое постоянное обратное напряжение (В);
- 7) быстродействие излучающего диода, определяемое временем переключения  $t_{пер.}$ ;
- 8) диапазон температур окружающей среды ( $t^0 = -60...+70^0C$ );
- 9) срок службы (10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> ч).

Основные характеристики представлены на рисунке 1.17.



Рисунок 1.17 - Характеристики светодиодов

Применяются светодиоды в устройствах визуального отображения информации, в фотореле, различных датчиках, при создании оптронов, а также в качестве осветительных приборов.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие такие пары «светодиод – фотодиод», называются оптронами. Они широко используются в электронной аппаратуре для гальванической развязки входных и выходных цепей.

**Туннельные диоды** основаны на туннельном эффекте. На прямой ветви ВАХ существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 1.18). Наличие такого участка позволяет использовать туннельные диоды для усиления и

генерации электрических колебаний, а также в переключающих схемах. Туннельные диоды работают в СВЧ - диапазоне.

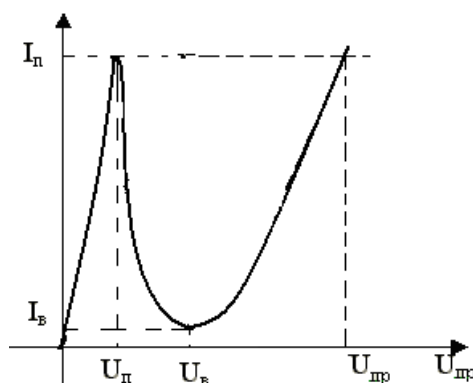


Рисунок 1.18 - ВАХ туннельного диода

### Основные параметры туннельных диодов:

- ток пика  $I_{п}$  – значение прямого тока в точке максимума ВАХ;
- напряжение пика  $U_{п}$  – значение прямого напряжения, соответствующего пиковому току;
- ток впадины  $I_{в}$  – значение прямого тока в точке минимума ВАХ;
- напряжение впадины  $U_{в}$  – значение прямого напряжения, соответствующего току впадины;
- отношение токов  $I_{п}/I_{в}$ ;
- прямое напряжение  $U_{пр}$ , большее  $U_{в}$  на второй восходящей ветви ВАХ, при котором ток равен пиковому.

Туннельные диоды применяют для усиления и генерации электрических колебаний в диапазоне СВЧ, в импульсных схемах переключателей, в запоминающих устройствах.

### Система обозначения полупроводниковых диодов

Полупроводниковые диоды маркируются буквенно-цифровым кодом.

Первый элемент (цифра или буква) кода обозначает исходный полупроводниковый материал, второй (буква) – подкласс приборов, третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора, четвертый и пятый – число, обозначающее порядковый номер разработки, шестой элемент – буква,

условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения *исходного полупроводникового материала* используются следующие символы (первый элемент обозначения):

- Г или 1 – германий или его соединения;
- К или 2 – кремний или его соединения;
- А или 3 – соединения галлия;
- И или 4 – соединения индия.

Для обозначения *подклассов диодов* используется одна из следующих букв (второй элемент обозначения):

- Д – диоды выпрямительные и импульсные;
- Ц – выпрямительные столбы и блоки;
- В – варикапы;
- И – туннельные диоды;
- А – сверхвысокочастотные диоды;
- С – стабилитроны;
- Л – излучающие оптоэлектронные приборы;
- О – оптоэлектронные пары.

Для обозначения *функциональных возможностей* используются цифры (третий элемент обозначения):

- 1 – маломощные выпрямительные диоды;
- 2 – выпрямительные диоды средне мощности;
- 3 – мощные выпрямительные диоды;
- 4 – диодные мосты;
- 5 – импульсные;
- 6 – диоды СВЧ и т.д.

Четвертый и пятый элементы обозначения – двузначное число, указывающее порядковый номер разработки (у стабилитронов – номинальное напряжение стабилизации).

Для обозначения порядкового номера разработки используется двухзначное число от 01 до 99. Если порядковый номер разработки превысит число 99, то применяется трехзначное число от 101 до 999.

Например, КД521А – кремниевый импульсный диод, номер разработки 21, группа А, общего применения.

### **Некоторые дополнительные типы диодов**

#### **1. Диоды Шоттки.**

Кроме полупроводниковых переходов существует также переход «металл-полупроводник», который обозначается как m-p и m-n, в зависимости от типа полупроводника.

Прямой ток в них создается основными носителями заряда. Накопление заряда в базе отсутствует, а барьерная емкость мала. За счет этого, предельная частота работы составляет 10 ГГц. Диоды Шоттки используют в качестве

быстродействующих логарифмических элементов. Диоды Шоттки являются СВЧ-диодами. Они используются в качестве смесительных и детекторных элементов, так как позволяют осуществлять операцию преобразования – переноса спектра СВЧ сигнала в область более низких частот. Также эти диоды используются в качестве переключающе-регулирующих элементов, позволяющих регулировать мощность сигналов СВЧ в волноводных линиях путем изменения внутреннего сопротивления.

## **2. Импульсные диоды.**

Они предназначены для работы в качестве ключа, который может иметь два состояния: открыт (когда  $R_d$  мало), закрыт (когда  $R_d$  велико). Время перехода из одного состояния в другое определяется быстродействием аппаратуры с этими диодами. Длительность процесса переключения определяется временем накопления необходимой концентрации неравновесных носителей в близких к р-п-переходу слоях за счет их диффузии через р-п переход. В результате прямое напряжение на диоде при его отпирании имеет большую величину, чем в установившемся режиме:

## **3. Диоды Ганна**

В некоторых полупроводниках (например, арсениде галлия GaAs) при воздействии очень сильного электрического поля ( $10^5 \dots 10^6$  В/м) протекающий через них ток становится прерывистым: происходит группирование электронов проводимости в своеобразные группы, которые движутся от катода к аноду со сравнительно небольшой скоростью – до 105 м/с. При этом пока в кристалле движется одна группа, другая не возникает. Таким образом, ток протекает не постоянно, а импульсами, следующими один за другим с очень высокой частотой (до десятков ГГц).

Диоды Ганна сравнительно маломощные (единицы ватт), вследствие малых размеров активных областей и трудностей отвода от них тепла.



## Тема 1.3. Биполярные транзисторы

### Типы биполярных транзисторов

Транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя р-п переходами, который имеет три или более электрода. По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые (униполярные).

Биполярный транзистор - это управляемый полупроводниковый прибор с двумя р-п- переходами и тремя выводами, работа которого основана на использовании носителей заряда обоих знаков, служит для усиления и переключения электрических сигналов. Плоскостной биполярный транзистор представляет собой пластинку германия (Ge), кремния (Si) или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводимостью: n-p-n или p-n-p. В первом случае средняя область имеет дырочную проводимость и две крайние – электронную (рисунок 3.1, а). Во втором случае наоборот (рисунок 1.19, б). Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область эмиттером, а другая – коллектором.

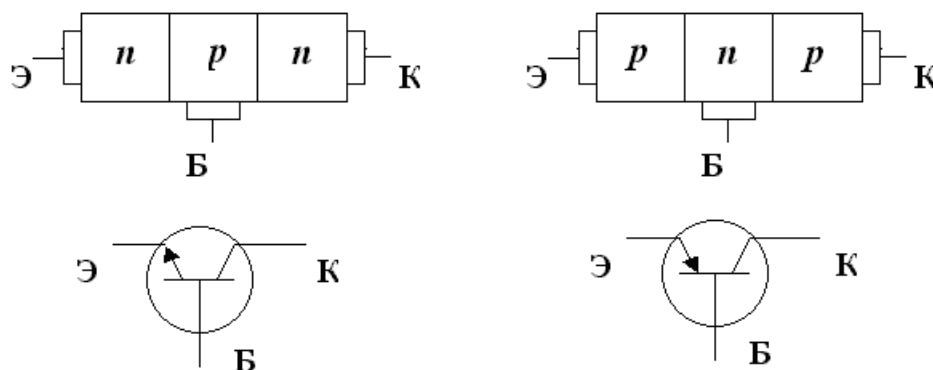


Рисунок 1.19 - Структура транзистора n-p-n-типа (а) и p-n-p-типа (б)

Таким образом, в транзисторе имеются два р-п- перехода: эмиттерный - между эмиттером и базой и коллекторный - между базой и коллектором. Функция эмиттерного перехода – инжектирование носителей заряда в базу (для транзистора n-p-n - это электроны, для транзистора p-n-p - это дырки); функция коллекторного перехода – сбор носителей заряда, прошедших через базу.

Чтобы носители заряда инжектировались эмиттером и, проходя через базу, полнее собирались коллектором, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода. Область базы делают очень тонкой. Кроме того, концентрацию примесей в базе делают значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере.

### Физические принципы работы транзистора

Различают три основных режима работы биполярного транзистора: активный, отсечки и насыщения. Рассмотрим работу транзистора p-n-p типа.

В активном режиме эмиттерный переход транзистора смещается в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Под действием прямого напряжения  $U_{эб}$  потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается и происходит инжекция дырок из эмиттера в базу. Попадая в базу, дырки становятся в ней неосновными носителями заряда и под действием сил

диффузии движутся к коллекторному р-п-переходу, образуя дырочную составляющую эмиттерного тока  $I_э$  (рис. 1.20).

Часть инжектированных в базу дырок рекомбинирует с имеющимися в ней свободными электронами, но ввиду малой ширины базы основная часть дырок достигает коллекторного р-п-перехода и его электрическим полем перебрасывается в коллектор, образуя составляющую коллекторного тока  $I_к$ . Из-за рекомбинации инжектированных дырок в базе  $I_к < I_э$ , т.е.  $I_к = h_{21} I_э$ .

Коэффициент пропорциональности  $h_{21}$  называется *статическим коэффициентом передачи тока эмиттера* (может обозначаться как  $\alpha = i_к / i_э = 0.95...0.99$ , т.е.  $I_к = \alpha I_э$ ).

Дырки, инжектированные в базу из эмиттера и прорекомбинировавшие в ней, сообщают базе положительный заряд. Для восстановления электрической нейтральности базы в нее из внешней цепи поступает такое же количество электронов, образующих рекомбинационный ток базы  $I_б$ . В активном режиме работы транзистора ток базы в десятки и сотни раз меньше токов коллектора и эмиттера:  $I_б = (1 - \alpha) i_э$ .

Поскольку сопротивление коллекторной цепи велико (коллекторный переход смещен в обратном направлении), то протекание по ней изменяющегося и значительного по величине тока  $i_к$  позволяет получить в усилителе на транзисторе усиление по напряжению и мощности.

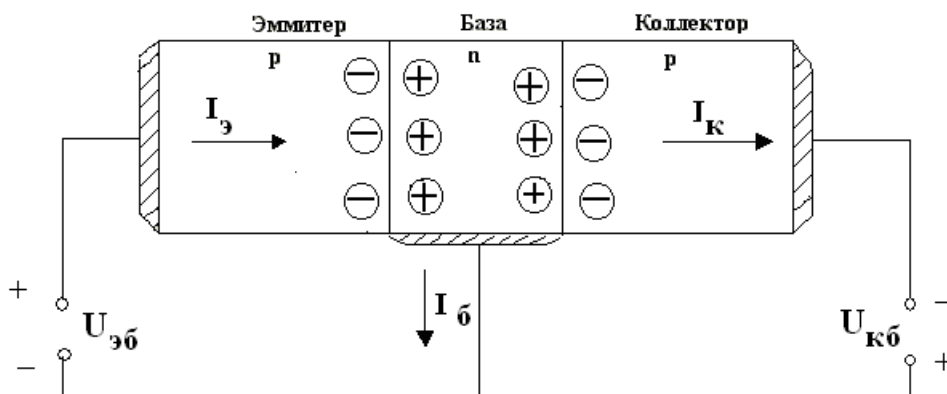


Рисунок 1.20 - Структура транзистора p-n-p типа

*Режим отсечки* транзистора получается в том случае, если под действием внешних напряжений эмиттерный и коллекторный р-п-переход смещены в обратном направлении. В этом случае через оба р-п-перехода протекают незначительные обратные токи эмиттера коллектора. Ток базы равен сумме этих токов.

В *режиме насыщения* оба р-п-перехода – эмиттерный и коллекторный – смещены в прямом направлении, и инжекция дырок в базу осуществляется, как из эмиттера, так и из коллектора. Поскольку в базе эти потоки неосновных носителей направлены навстречу друг другу, то суммарный ток в цепи коллектор - эмиттер определяется разностью этих токов.

В режимах отсечки и насыщения управление токами транзистора почти отсутствует. Эти режимы используются при работе транзисторов в импульсных

и ключевых устройствах. Для усиления сигналов применяется активный режим работы транзистора.

Работа транзистора n-p-n типа происходит аналогично работе транзистора p-n-p типа. В этом случае носителями тока являются электроны и полярность внешних источников напряжений меняется на противоположную.

### Схемы включения, характеристики и параметры транзистора

Имеются три способа включения транзистора в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей: схема с общей базой (ОБ), схема с общим эмиттером (ОЭ) и схема с общим коллектором (ОК). Схемы включения транзистора приведены на рисунке 1.21.

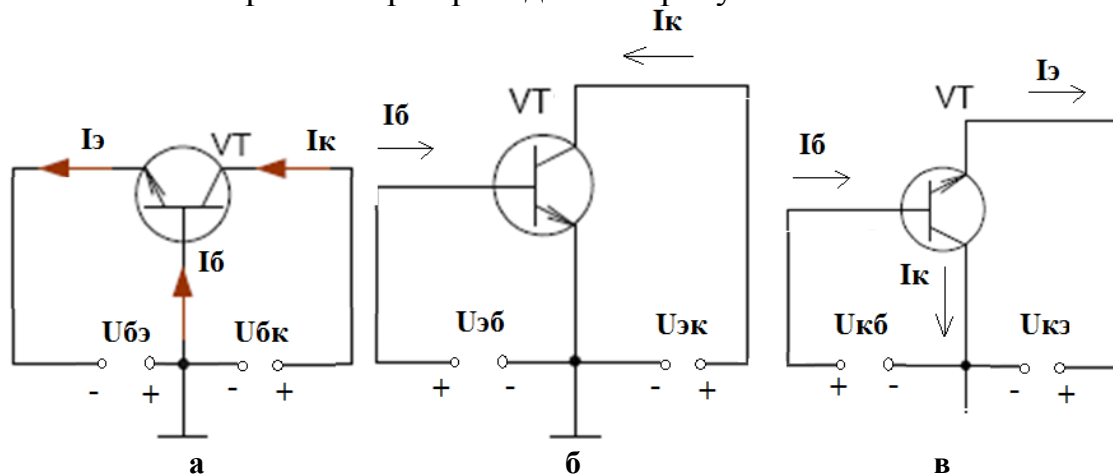


Рисунок 1.21. - Схемы включения транзистора: а – ОБ; б – ОЭ; в – ОК.

#### Схема с общей базой (ОБ)

Входной ток в схеме с ОБ – ток эмиттера  $i_э$ , а выходной – ток коллектора  $i_к$ . В схеме с ОБ  $I_э = I_к + I_б$ . Коэффициент усиления (передачи) тока представляет собой отношение тока коллектора к току эмиттера  $\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э$ , имеет величину меньше единицы, т.е. не обеспечивает усиления тока. Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей выходного напряжения  $U_{вых}$  значительно больше амплитуды входного напряжения  $U_{вх}$ , т.е. схема с ОБ усиливает напряжение и мощность.

#### Схема с общим эмиттером (ОЭ)

Входным током является ток базы  $i_б$ , а выходным – ток коллектора  $i_к$ . Коэффициент передачи по току  $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б$ , где  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ ,  $\beta \gg 1$  ( $\beta = 10 \dots 200$ ).

Так как  $i_{вых} \gg i_{вх}$ , а при достаточно большом сопротивлении  $R_н$ , амплитуда переменной составляющей выходного напряжения  $U_{вых}$  значительно больше амплитуды входного напряжения  $U_{вх}$ , следовательно схема обеспечивает усиление тока, напряжения и мощности. Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

#### Схема с общим коллектором (ОК)

Входная цепь – цепь базы, выходная – цепь эмиттера. В этой схеме коллектор является общим для входной и выходной цепей по переменному току. Коэффициент передачи тока в этой схеме:  $\beta = I_э / I_б = I_э / (I_э - I_к) = 1 / (1 - \alpha) =$

$\beta+1$ , т.е. схема с ОК имеет максимальный коэффициент усиления по току. Эта схема отличается от схем с ОБ и ОЭ тем, что она не переворачивает фазу входного сигнала.

Коэффициент усиления по напряжению  $K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} \leq 1$ . Поэтому усилительные каскады с общим коллектором называют эмиттерными повторителями. Схема усиливает ток, но не усиливает напряжение и отличается повышенным входным сопротивлением.

Сравнение трех схем включения транзисторов приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Сравнительная таблица основных параметров трех схем включения транзистора

Параметры	Схемы включения транзистора		
	ОБ	ОЭ	ОК
Входное сопротивление	Низкое ( $\leq 100 \text{ Ом}$ )	Среднее ( $\leq 2 \text{ КОм}$ )	Высокое ( $0.2..1 \text{ МОм}$ )
Выходное сопротивление	Высокое ( $0.5...1 \text{ МОм}$ )	Среднее ( $20...100 \text{ КОм}$ )	Низкое ( $50..500 \text{ Ом}$ )
Усиление по току	$< 1$	$\leq 200$	$10...200$
Усиление по напряжению	$\leq 500$	$\leq 500$	$\leq 1$

Обычно используют два вида вольтамперных характеристик: входные и выходные статические характеристики (рисунок 1.22).

Для схемы с ОЭ входной характеристикой называют зависимость входного тока или тока базы  $i_b$  от напряжения базы – эмиттер  $U_{бэ}$ . Выходной характеристикой называют зависимость  $i_k$  от  $U_{кэ}$  при фиксированных значениях  $i_b = \text{const}$ .

Для схемы с ОБ входной характеристикой является зависимость  $i_э = f(U_{эб})$ , а выходной  $i_k = f(U_{кб})$ .

Для схемы с ОК входной  $i_b = f(U_{кб})$ , а выходной характеристикой является  $i_э = f(U_{эк})$ .

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером. Поэтому рассмотрим характеристики биполярного транзистора с ОЭ (рисунок 3.4).

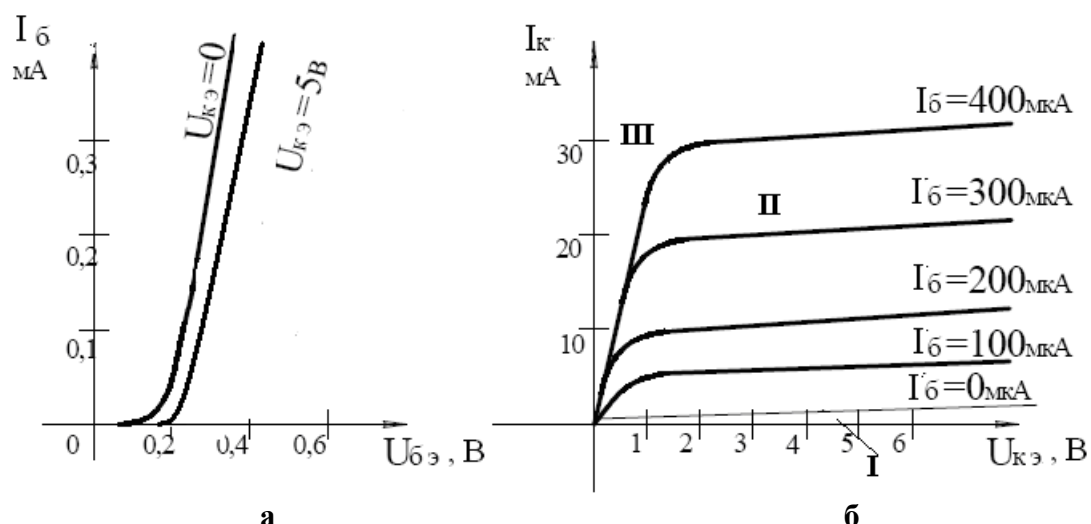


Рисунок 1.22 - Статические ВАХ биполярного транзистора:

**а** – входные; **б** – выходные

Входные статические характеристики представляют собой вольт-амперные характеристики эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении. Увеличение напряжения на этом переходе приводит к увеличению тока эмиттера и, следовательно, тока базы. Из-за внутренней обратной связи в транзисторе, осуществляемой через базу, коллекторное напряжение также оказывает влияние на входной ток. Однако это влияние сказывается при небольших напряжениях  $U_{кб}$  и  $U_{кэ}$ . При дальнейшем увеличении коллекторного напряжения входной ток почти не изменяется. Поэтому входные характеристики обычно представляются лишь двумя кривыми, снятыми при коллекторном напряжении, равном нулю, и некотором отрицательном (для транзисторов p-n-p типа) или положительном (для транзисторов n-p-n типа) напряжении.

*Выходные статические характеристики БТ* – это вольт-амперные характеристики коллекторного перехода, смещенного в обратном направлении. Их вид также зависит от способа включения транзистора и напряжения на эмиттерном переходе.

На выходных статических характеристиках схемы ОЭ крутой участок характеристик при малых напряжениях  $U_{кэ}$  соответствует режиму насыщения, при котором эмиттерный и коллекторный p-n-переходы смещены в прямом направлении. При увеличении напряжения  $U_{кэ}$  коллекторный переход запирается и характеристики становятся более пологими. С ростом тока базы увеличивается и ток коллектора.

Повышение температуры вызывает увеличение токов транзистора и приводит к смещению его характеристик. Особо сильно температура влияет на входные характеристики в схеме ОЭ.

На выходных характеристиках можно выделить три области, свойственные трем режимам работы транзисторов:

- область I – режим отсечки, когда эмиттерный и коллекторный переходы закрыты;

- область II – режим усиления, когда эмиттерный переход открыт, а коллекторный переход закрыт;
- область III – режим насыщения, когда эмиттерный и коллекторный переходы открыты.

### *Динамический и ключевой режимы работы биполярного транзистора*

Динамическим режимом работы транзистора называется такой режим, при котором в выходной цепи стоит нагрузочный резистор, за счет которого изменение входного тока или напряжения будет вызывать изменение выходного напряжения (рисунок 1.23).

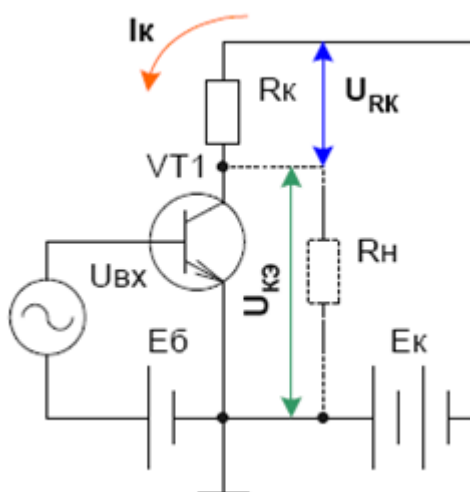


Рисунок 1.23 – Схема включения БТ с ОЭ, работающего в динамическом режиме

Из рисунка видно (по второму закону Кирхгофа), что  $E_k = U_{Rk} + U_{кэ}$ , т.к.  $U_{Rk} = I_k R_k$ , то  $E_k = I_k R_k + U_{кэ}$  – уравнение нагрузочной прямой. Откуда получаем уравнение динамического режима работы транзистора:

$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k.$$

Выбор рабочей точки осуществляется путем построения нагрузочной прямой (по уравнению нагрузочной прямой) на семействе выходных характеристик транзистора. При  $I_k = 0$ ,  $E_k = U_{кэ}$ ; при  $U_{кэ} = 0$ ,  $I_k = E_k / R_k$  (рис.1.24).

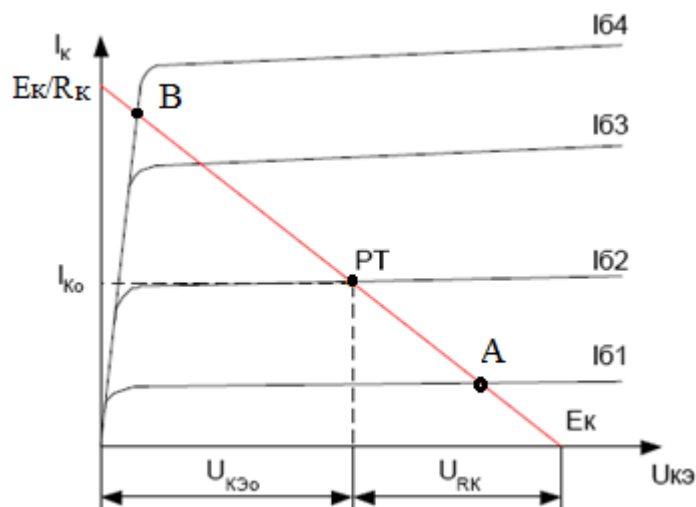


Рисунок 1.24 – Построение нагрузочной прямой на семействе выходных характеристик транзистора о определение рабочей точки

Отрезок АВ – рабочий участок нагрузочной прямой. Рабочую точку (РТ) выбирают посередине рабочего участка нагрузочной прямой АВ, но на пересечении с характеристикой транзистора.

Точка А соответствует точке отсечки, а точка В соответствует точке насыщения транзистора. Ключевым режимом называется такой режим, при котором рабочая точка скачком переходит из режима насыщения в режим отсечки (из точки В в точку А) и, наоборот, (из точки А в точку В), минуя линейный режим (рисунок 1.25). В этом случае, транзистор будет работать как ключ, т.е. иметь два состояния: открытое и закрытое. Ключевой режим позволяет получить на выходе транзистора импульсный сигнал.

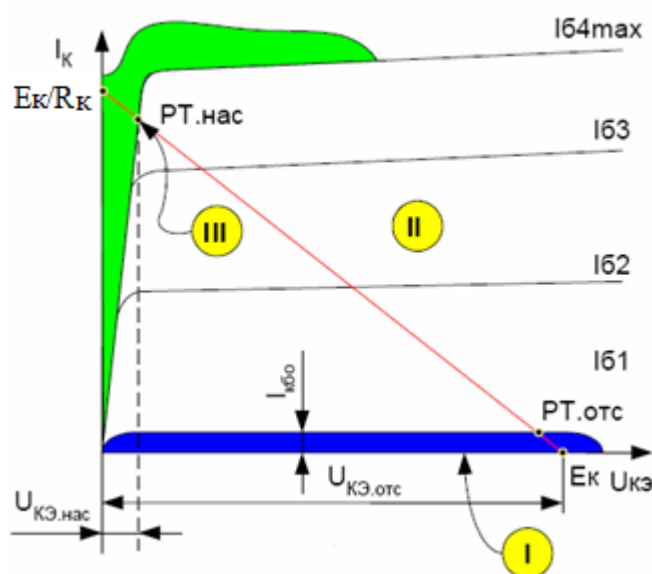


Рисунок 1.25 – Ключевой режим работы БТ

### ***h* - параметры биполярного транзистора**

При работе транзистора в усилительных схемах важную роль играют переменные сигналы с малыми амплитудами. Свойства транзистора в этом случае определяются так называемыми малосигнальными параметрами, или *h*-параметрами.

Кроме *h*-параметров используются также *y*-параметры и *z*-параметры. Все *y*-параметры имеют размерность проводимости, а все *z*-параметры – размерность сопротивлений. Однако их измерение сопряжено со значительными практическими трудностями, в то время как *h*-параметры измеряются сравнительно легко.

Если рассмотреть транзистор как четырехполюсник (рисунок 1.26), то связь между входными ( $U_1, I_1$ ) и выходными ( $U_2, I_2$ ) напряжениями и токами четырехполюсника выражается двумя уравнениями.

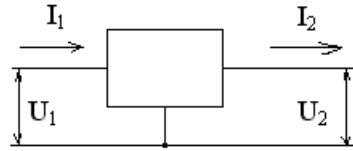


Рисунок 1.26 - Транзистор как четырехполюсник

$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2$$

Параметры, входящие в эти уравнения, определяются с использованием двух режимов:

1) режим короткого замыкания для переменного тока на выходе, т. е. при отсутствии нагрузки в выходной цепи. При этом  $U_2 = \text{const}$ .

2) режим холостого хода, т. е. при разомкнутой для переменного тока цепи, когда во входной цепи имеется только постоянный ток,  $I_1 = \text{const}$ .

Эти режимы, или эти условия, легко осуществить на практике при измерении  $h$  – параметров.

В систему  $h$  – параметров входят следующие величины:

1)  $h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$  (при  $U_2 = \text{const}$ ) – входное сопротивление транзистора при отсутствии переменного напряжения. При таком условии изменение входного тока  $\Delta I_1$  является результатом изменения входного напряжения  $\Delta U_1$ .

2)  $h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$  (при  $I_1 = \text{const}$ ) – коэффициент обратной связи по напряжению, показывает, какая доля выходного напряжения передается на вход транзистора вследствие наличия в нем внутренней обратной связи.

3)  $h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$  (при  $U_2 = \text{const}$ ) – коэффициент передачи (усиления) по току, показывает, что изменение выходного тока  $\Delta I_2$  зависит только от изменения входного тока  $\Delta I_1$ .

4)  $h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$  (при  $I_1 = \text{const}$ ) – выходная проводимость для переменного тока на выходе транзистора.

Значения  $h$ -параметров зависят от схемы включения БТ в электрическую цепь и могут быть измерены как непосредственно, так и определены по входной и выходной характеристикам транзистора.

Биполярный транзистор можно представить схемой замещения в  $h$ -параметрах (рисунок 1.27).

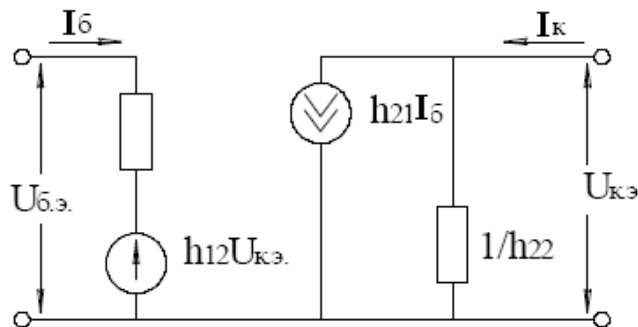


Рисунок 1.27 – Схема замещения биполярного транзистора в  $h$ -параметрах



## Тема 1.4. Полевые транзисторы

Полевым транзистором (ПТ) называется транзистор, в котором между двумя электродами образуется *проводящий канал*, по которому протекает ток. Ток канала управляется электрическим полем, создаваемым третьим электродом, который называется *затвором* (З). Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называется *истоком* (И), а электрод, к которому они движутся – *стоком* (С). Полевые транзисторы называют также униполярными, так как принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака.

### **Классификация и условное обозначение полевых транзисторов**

Полевые транзисторы по типу электропроводности подразделяются на n-канальные и p-канальные; каждый тип транзистора в свою очередь бывает с управляющим p-n-переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы и МОП-транзисторы) (рисунок 1.28). МДП (МОП)-транзисторы делятся на транзисторы со встроенным каналом (обедненного типа) и с индуцированным каналом (обогащенного типа).

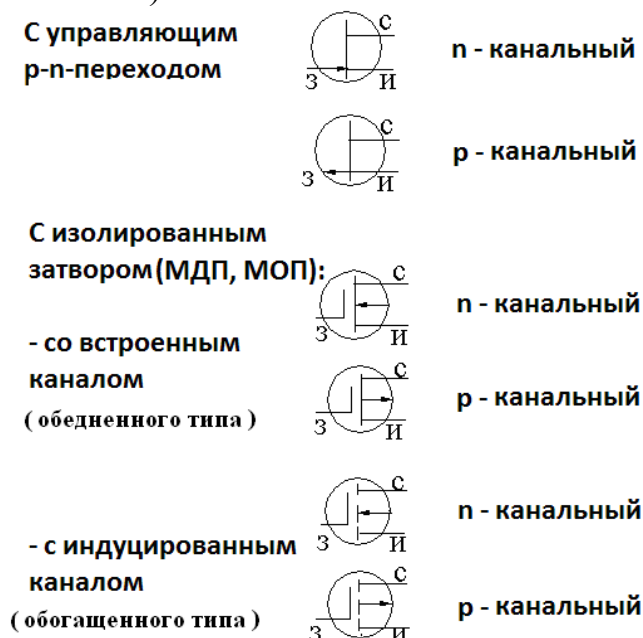


Рисунок 1.28 - Классификация и условное обозначение полевых транзисторов

### **Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом**

Рассмотрим транзистор с управляющим p-n-переходом, n-канальный. Конструктивно такой транзистор представляет собой пластинку полупроводника n-типа с двумя p-n-переходами и тремя выводами (рисунок 1.29).

#### **Конструкция**

Оба p-слоя электрически связаны между собой и имеют общий электрод, называемый затвором (З). Между p-n-переходами располагается канал, в данном случае n-типа. Управляющее (или входное) напряжение подается между затвором З и истоком И. Напряжение  $U_{зи}$  является обратным для обоих p-n-

переходов. В выходную цепь, в которую входит канал транзистора, подключается напряжение  $U_{си}$  положительным полюсом к стоку.

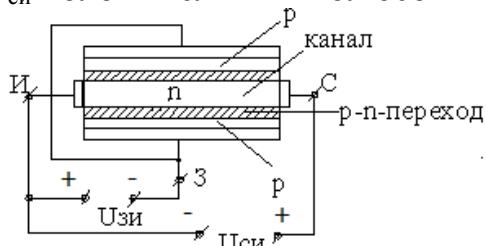


Рисунок 1.29 - Конструкция транзистора с управляющим р-п-переходом (п-канального)

### *Принцип работы*

Если к электродам подключить напряжение питания, то между истоком и стоком будет протекать ток, величина которого зависит от напряжения на затворе. То есть принцип работы сводится к тому, что при изменении напряжения  $U_{зи}$  изменяется ширина р-п-переходов, которые представляют собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Так как р-слой имеет большую концентрацию примесей, чем п-слой, то изменение ширины переходов происходит в основном за счет более высокоомного п-слоя, тем самым изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, следовательно, и выходной ток  $I_c$ . Максимальный ток стока  $I_c$  будет при нулевом напряжении на затворе.

На проводимость канала полевого транзистора оказывает влияние как управляющее напряжение  $U_{зи}$ , так и напряжение  $U_{си}$ .

Напряжение на затворе, при котором ток стока минимален, называется напряжением отсечки  $U_{зи\text{отс}}$ .

*Характеристики полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом:*

- стоковые (или выходные) (рисунок 1.30, а):

$$I_c = f(U_{си}) / U_{зи} = \text{const.}$$

- стоко-затворные (или переходные) (рисунок 1.30, б):

$$I_c = f(U_{зи}) / U_{си} = \text{const.}$$

Характеристики представлены для п-канального транзистора. Для р-канального транзистора полярность приложенных напряжений будет обратной и, соответственно, характеристики будут лежать в других координатных плоскостях.

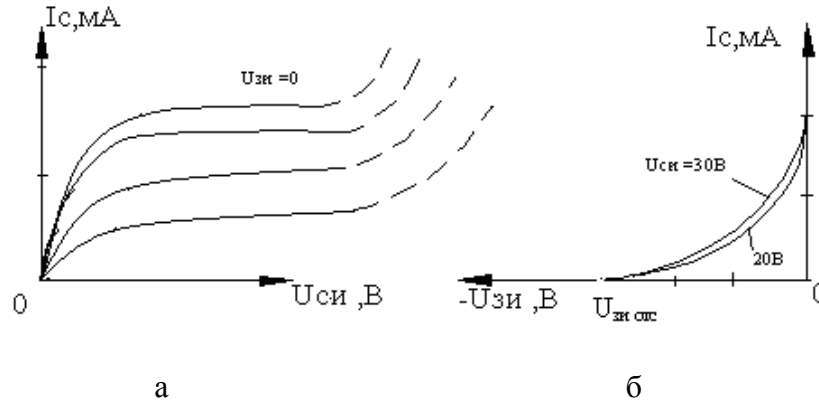


Рисунок 1.30 - Характеристики полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом: а –стоковая; б – стоко-затворная

Явление насыщения объясняется тем, что при повышении напряжения  $U_{си}$  ток  $I_c$  должен увеличиваться, но так как одновременно повышается обратное напряжение на р-п-переходе, то запирающий слой расширяется, а канал сужается, т.е. его сопротивление возрастает, и ток  $I_c$  должен уменьшаться. То есть имеют место два взаимно противоположных воздействия на ток, который в результате остается почти постоянным. При увеличении отрицательного напряжения  $U_{зи}$  (для рассматриваемого п-канального транзистора) ток стока  $I_c$  уменьшается.

Свойства ПТ характеризуются дифференциальными параметрами.

*Параметры полевых транзисторов:*

- крутизна  $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{си} = const}$ ;
- внутреннее (выходное) сопротивление  $R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \Big|_{U_{зи} = const}$ ;
- статический коэффициент усиления  $\mu = -\frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \Big|_{I_c = const}$ .

Коэффициент усиления выражается отношением таких изменений напряжений, которые компенсируют друг друга по действию на ток  $I_c$ . Для такой компенсации напряжения должны иметь разные знаки, отсюда знак минус. Этот коэффициент может быть определен как  $\mu = S \cdot R_i$ ;

- входные сопротивления  $R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} \Big|_{U_{си} = const}$ ;
- межэлектродные барьерные емкости:
- $C_{зи}$  – входная емкость;

–  $C_{зс}$  – проходная емкость между З и С;

–  $C_{св}$  – выходная емкость.

### ***Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП и МОП)***

В отличие от полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с областью токопроводящего канала, в МДП-транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика. Название МДП-транзистор пошло от его структуры: металл – диэлектрик – полупроводник или металл – окисел – полупроводник.

### ***МДП-транзисторы со встроенным каналом***

#### *Конструкция*

МДП – транзисторы со встроенным каналом n-типа создается в полупроводнике с электропроводностью р-типа (рис. 1.31), в котором имеются две области с повышенной проводимостью  $n^+$  - типа. Эти области являются стоком и истоком. Между ними имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n-типа.

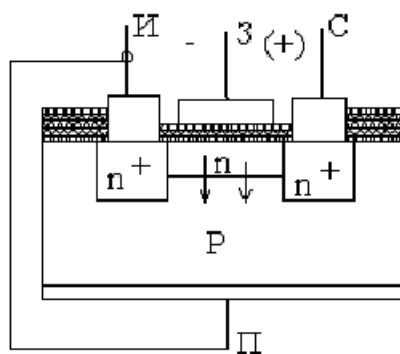


Рисунок 1.31 - Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n-типа

Толщина диэлектрического слоя составляет примерно 3...5 нм. Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. В МДП-транзисторе обычно делают четвертый электрод, которым является подложка (т.е. пластина р-типа).

#### *Принцип работы*

Если при напряжении  $U_{зи} = 0$  приложить напряжение между стоком и истоком  $U_{св}$ , то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов.

При подаче напряжения  $U_{зи} < 0$  в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, ток  $I_c$  уменьшается. Чем больше напряжение  $U_{зи}$ , тем меньше ток стока  $I_c$ . Такой режим транзистора называют режимом обеднения.

Если напряжение  $U_{зи} > 0$ , то под действием поля, созданного этим напряжением, из кристалла в канал будут приходить электроны, проводимость канала увеличится и ток стока  $I_c$  возрастет. Этот режим называют режимом обогащения.

Все эти физические процессы наглядно выражаются выходной (стоковой) характеристикой (рису 1.32, а).

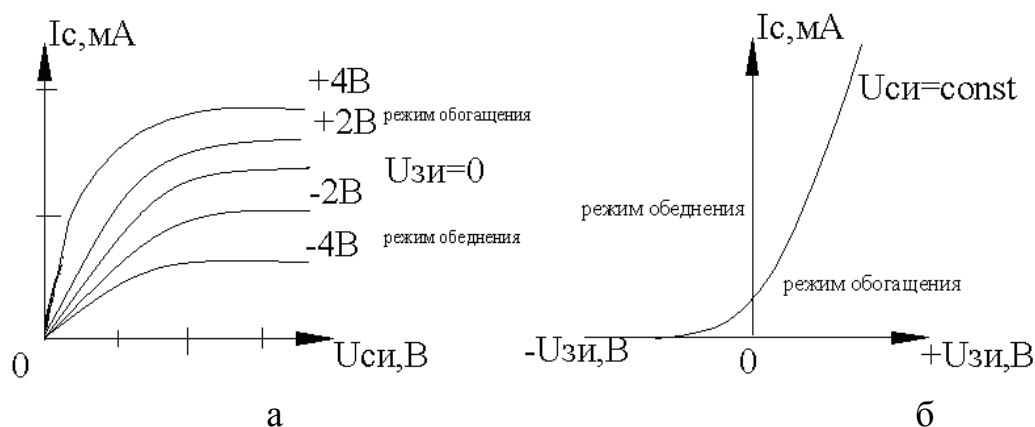


Рисунок 1.32 - Выходная (а) и стоко-затворная характеристики (б) МДП-транзистора со встроенным каналом n-типа

По выходной характеристике можно построить стоко-затворную (переходную) характеристику (рис. 1.32, б).

### **МДП-транзистор с индуцированным (инверсным) каналом**

*Конструкция* такого транзистора отличается от конструкции транзистора с встроенным каналом тем, что канал проводимости здесь специально не создается, а возникает (индуцируется) только при подаче на затвор напряжения определенной полярности (рис. 1.33). При отсутствии этого напряжения канала нет, между истоком и стоком  $n^+$ -типа есть только кристалл  $p$ -типа, и на одном из  $p$ - $n^+$ -переходов получается обратное напряжение.

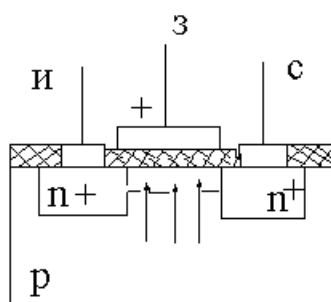


Рисунок 1.33 - Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

### **Принцип работы**

Сопротивление между истоком и стоком велико, транзистор заперт. Но если подать на затвор в данном случае положительное напряжение, то под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока, истока и кристалла к затвору. Когда напряжение  $U_{зи}$  превысит некоторое отпирающее или пороговое напряжение  $U_{пор}$ , то в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличится, что превысит

концентрацию дырок, произойдет инверсия типа электропроводности, т.е. образуется канал n -типа и транзистор начнет проводить ток.

Чем больше положительное напряжение  $U_{зи}$ , тем больше проводимость канала и ток стока. То есть такой транзистор может работать только в режиме обогащения, что показывают его выходные характеристики и переходная характеристика (рис. 1.34).

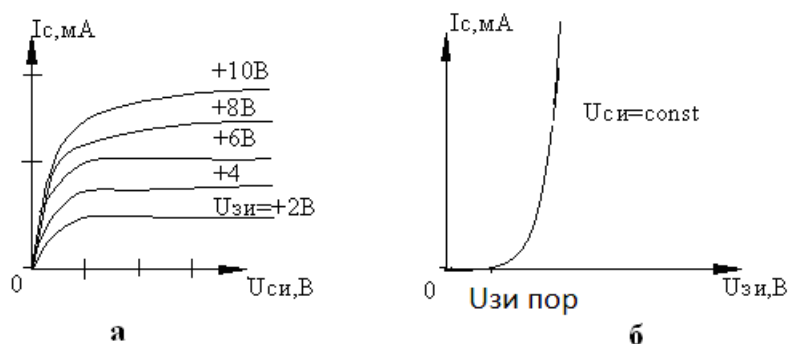


Рисунок 1.34- Выходная (а) и стоко- атворная (б) характеристики МДП-транзистра с индуцированным каналом n-типа

### **Схемы включения ПТ и их особенности**

Полевые транзисторы по аналогии с биполярными имеют три схемы включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ).

**Схема с общим истоком** (рис. 1.35) аналогична схеме с ОЭ. Она дает большое усиление по току и по мощности и, так же как схема с ОЭ, переворачивает фазу напряжения при усилении.

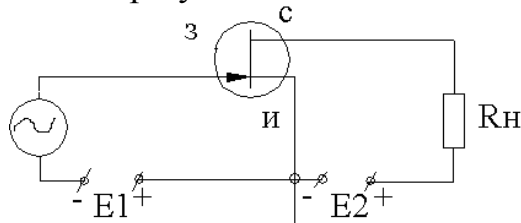


Рисунок 1.35- Схема с ОИ

**Схема с общим затвором** (рис. 1.36) аналогична схеме с общей базой (ОБ).

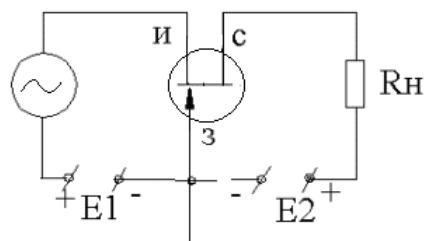


Рисунок 1.36- Схема с ОЗ

Она не дает усиления по току, поэтому усиление по мощности в ней во много раз меньше, чем в схеме с ОИ. Входное сопротивление  $R_{вх}$  мало, так как входным током является ток стока (в реальных схемах используется редко).

**Схема с общим стоком** (рис. 1.37) подобна схеме с ОК (эмиттерному повторителю) и может быть названа истоковым повторителем с  $K_u \approx 1$ .

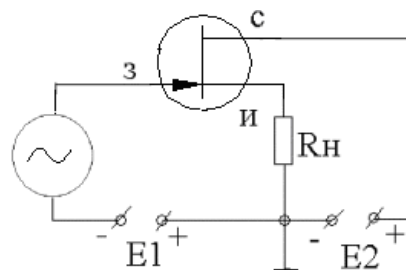


Рисунок 1.37- Схема с ОС

Выходное напряжение по величине и фазе повторяет входное. Для такой схемы характерны небольшое выходное сопротивление и повышенное входное сопротивление.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах и другой радиоэлектронной аппаратуре. Они являются основой для разработки современных средств вычислительной техники, включая микропроцессоры, микроконтроллеры, полупроводниковую память.

**Маркировка транзисторов:**

- 1 – буква или цифра: Г(1), К(2), А(3) – материал: германий, кремний, арсенид галлия;
- 2 – буква: П – полевой, Т – биполярный;
- 3 – цифра, указывающая диапазон основных параметров (мощность и частотные свойства, указаны в таблице 4.1.);
- 4 и 5 – двузначное число, указывающее порядковый номер разработки;
- 6 – буква, обозначающая параметрическую группу прибора.

Таблица 4.1

К определению третьего символа в маркировке транзистора

P \ f	НЧ < 3 МГц	Ср 3...30 МГц	ВЧ и СВЧ > 30 МГц
ММ < 0,3 Вт	1	2	3
СрМ 0,3...3 Вт	4	5	6
М > 3Вт	7	8	9

Например, КТ315А – транзистор биполярный высокочастотный, малой мощности, широкого применения, номер разработки 15, группа А; КП302А – транзистор полевой высокочастотный, малой мощности, широкого применения, номер разработки 02, группа А.

**Преимущества полевых транзисторов перед биполярными:**

- 1. Высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2. Малый уровень собственных шумов, так как перенос тока осуществляют только основные носители заряда;
- 3. Высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4. Высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных схем.

### **Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)**

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors) - полностью управляемый полупроводниковый прибор, основой которого является трёхслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рисунке 1.38 приведено условное обозначение биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT) [12].

Данные приборы IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET-Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рисунке 1.39. Прибор введён в силовую цепь выводами биполярного транзистора E (эмиттер) и C (коллектор), а в цепь управления - выводом G (затвор).

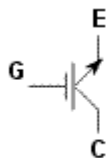


Рисунок 1.38 - Условное обозначение IGBT

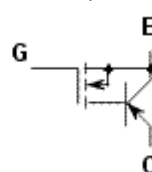


Рисунок 1.39 - Схема соединения транзисторов в единой структуре IGBT

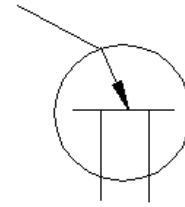
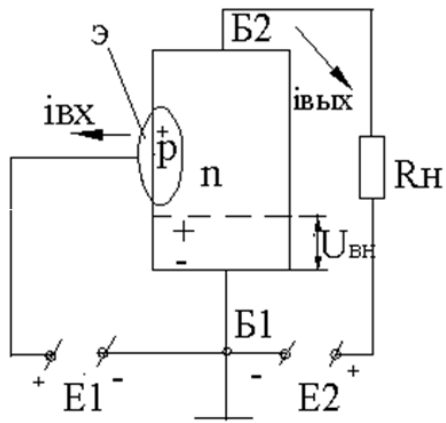
Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

Современные IGBT-модули находят широкое применение при создании неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов для питания электродвигателей постоянного и переменного тока средней мощности, преобразователей индукционного нагрева, сварочных аппаратов, источников бесперебойного питания и бытовой техники.

#### **Однопереходный транзистор**

В однопереходном транзисторе (рис. 1.40, а) ЭП смещен в обратном направлении. Когда напряжение  $U_{эб1}$  станет больше внутреннего напряжения  $U_{вн}$ , то результирующее напряжение на переходе станет прямым, дырки будут двигаться по направлению к выводу B1, образуя эмиттерный ток. Переход откроется, что приведет к дальнейшему нарастанию тока эмиттера (получается лавинообразный процесс нарастания тока эмиттера). При этом сопротивление эмиттерного перехода снижается, а напряжение  $U_э$  уменьшается. Это соответствует отрицательному дифференциальному сопротивлению, как у туннельного диода. Поэтому такой транзистор используется для построения переключающих схем.





а

б

Рисунок 1.40 - Схема (а) и условное графическое изображение (б) однопереходного транзистора

Однопереходные транзисторы применяются также для усиления, генерации, в импульсных схемах, являются низкочастотными приборами.

## Тема 1.5. Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый переключающий прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями: низкой проводимости (тиристор закрыт) и высокой проводимости (тиристор открыт). Они применяются как мощные электронные ключи, имеют три и более р-п-переходов. Тиристоры нашли применение в силовой электронике, где требуется формирование мощных питающих напряжений постоянного или переменного тока. На основе тиристоров разрабатываются, например, устройства регулирования частотой вращения электродвигателей.

Тиристоры подразделяются на три основных типа:

- динисторы (с двумя электродами);
- тринисторы (с тремя электродами);
- симисторы (симметричные тиристоры).

### Диодный тиристор (динистор)

Диодный тиристор состоит из четырех областей полупроводника с чередующимися типами электропроводности, между которыми образуются три р-п-перехода. Крайнюю область р-типа называют анодом, а крайнюю область п-типа – катодом (рис. 1.41, а). При подключении источника питания плюсом к аноду динистора, а минусом к катоду переходы П1 и П3 окажутся смещенными в прямом направлении (будут открыты), а средний П2 – в обратном направлении (будет закрыт). То есть переходы П1 и П3 являются эмиттерными, а переход П2 – коллекторным.

Такую структуру можно представить в виде двух транзисторов с разным типом электропроводности (п-р-п и р-п-р), соединенных между собой (рис. 1.41, б). Через переход П1 будут инжектироваться электроны в базовую р-область, а через переход П3 – дырки в базовую п-область.

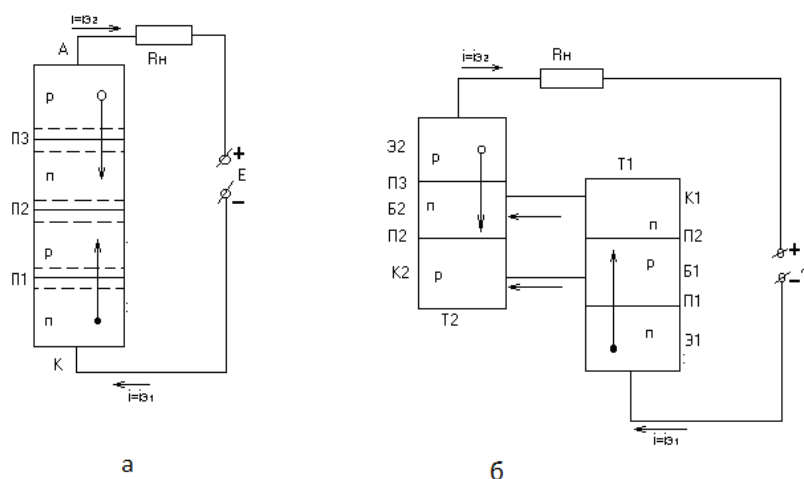


Рисунок 1.41 - Структура диодного тиристора  
На рисунке 1.42 представлена ВАХ диодного тиристора.

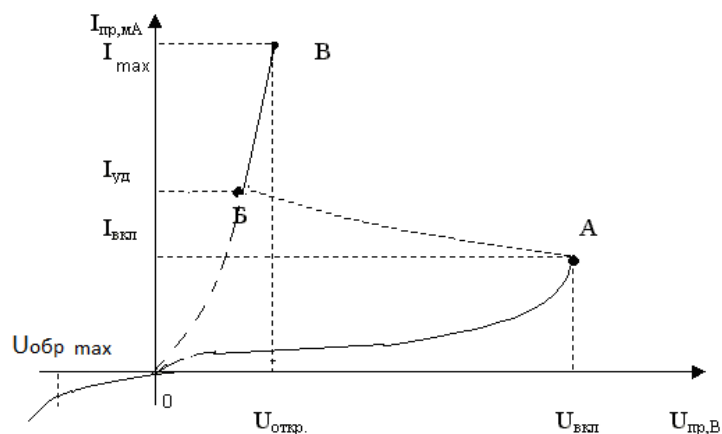


Рисунок 1.42. - ВАХ диодного тиристора

При увеличении прямого напряжения  $U_{пр}$ , ток невелик и его величина растет медленно, что соответствует участку  $OA$ . В этом режиме тиристор можно считать закрытым, так как все напряжение будет падать на закрытом коллекторном переходе. На переходах П1 и П3 окажется очень незначительное прямое напряжение, инжекция носителей заряда из эмиттеров в базы будет невелика, и через динистор будет протекать небольшой прямой ток.

При некотором значении прямого напряжения, называемого напряжением включения  $U_{вкл}$ , энергия носителей заряда, проходящих через коллекторный переход, увеличивается настолько, что они начинают ионизировать атомы этого перехода. Лавинообразное увеличение носителей заряда приводит к резкому уменьшению сопротивления перехода П2, ток при этом резко возрастает (участок  $AB$  с отрицательным дифференциальным сопротивлением на рисунке 1.42). То есть возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора.

После переключения динистора в открытое состояние его ВАХ аналогична прямой ветви выпрямительного диода. В открытом состоянии динистор находится до тех пор, пока через него протекает ток, не меньший тока удержания  $I_{уд}$  (участок  $BB$  на рисунке 1.42). Ток в этом режиме, когда тиристор открыт, определяется главным образом сопротивлением нагрузки  $R_n$ , включенным последовательно с тиристором.

Если изменить полярность подключения внешнего источника напряжения на противоположную (минус к аноду, а плюс к катоду), то эмиттерные переходы П1 и П3 окажутся смещенными в обратном направлении, и через динистор будет протекать маленький обратный ток.

#### Параметры динистора:

- 1)  $I_{мах}$  — максимальное значение прямого тока;
- 2)  $U_{откр}$  — напряжение в открытом состоянии тиристора;
- 3)  $I_{уд}$  — ток удержания, минимальное значение анодного тока, который удерживает тиристор в открытом состоянии;
- 4)  $t_{вкл}$  и  $t_{выкл}$  — время выключения и время включения тиристора;

5)  $U_{обр.маx}$  – обратное максимальное напряжение, при котором обеспечивается заданная надежность.

### Триодный тиристор (тринистор)

Если от одной из базовых областей динистора сделать вывод, который называется управляющим электродом, то получается управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором. Подавая через этот вывод напряжение от внешнего источника, можно регулировать значение напряжения включения  $U_{вкл.}$ . Чем больший ток течет через такой управляющий переход  $I_y$ , тем ниже  $U_{вкл.}$ . Вольтамперная характеристика (ВАХ) триодного тиристора для различных токов управляющего электрода  $I_y$  представлена на рис. 1.43.

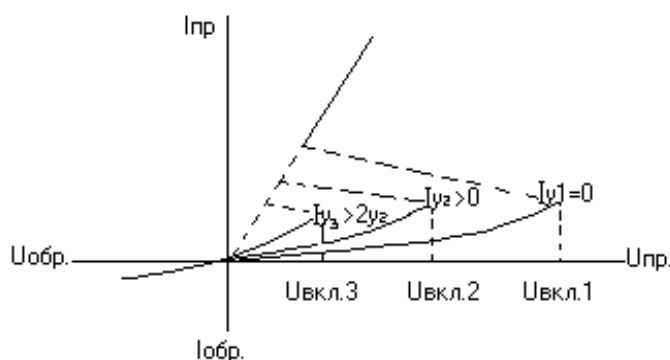


Рисунок 1.43 - ВАХ триодного тиристора

Чем больше ток  $I_y$ , тем больше инжекция носителей зарядов от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу П2 и тем меньше требуется напряжение на тиристоре для того, чтобы начался процесс отпирания.

Наиболее высокое значение напряжения  $U_{вкл.}$  получается при отсутствии тока  $I_y$ , когда триодный тиристор превращается в диодный. И наоборот, при значительном  $I_y$  напряжение включения  $U_{вкл.}$  минимально.

Для запираания тиристора необходимо уменьшить его анодный ток до значения меньше тока удержания  $I_{уд.}$ . Такие тиристоры называют *незапираемыми*. У *запираемых* тиристоров необходимо подать на управляющий электрод напряжение противоположной полярности.

Простейшая схема включения триодного тиристора показана на рисунке 1.44. Такой тиристор называют тиристором с управлением по катоду, поскольку управляющим электродом является базовая область, ближайшая к катоду (к n-области).

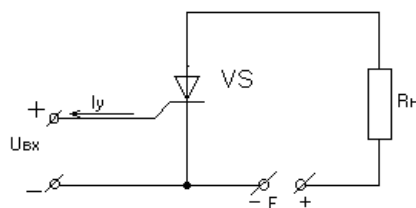


Рисунок 1.44 - Схема включения триодного тиристора

Параметры у тиристоров такие же, как и у динисторов. К этим параметрам лишь добавляются величины, характеризующие управляющую цепь: управляющий ток  $I_y$ , управляющее напряжение  $U_y$ .

### Симисторы

Симметричные тиристоры или симисторы имеют структуру n-p-n-p-n или p-n-p-n-p. Они отпираются при любой полярности напряжения и проводят ток в обоих направлениях. Структура симистора представлена на рисунке 1.45.

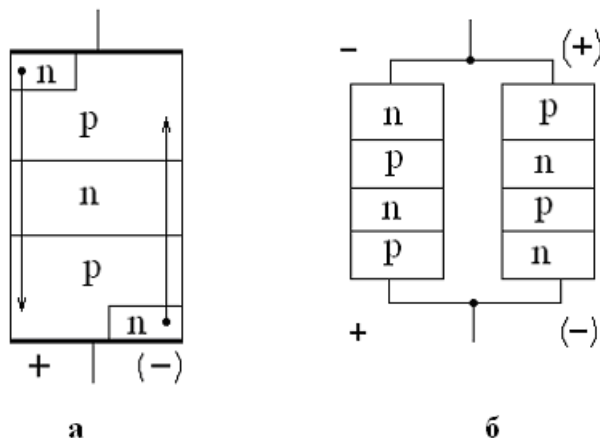


Рисунок 1.45 - Структура (а) и схема замещения (б) симистора

При одной полярности работает левая половина прибора, при другой (противоположной) – правая половина прибора. Роль симистора могут выполнять два диодных тиристора, включенных параллельно. Вольтамперная характеристика (ВАХ) симистора показана на рисунке 1.46.

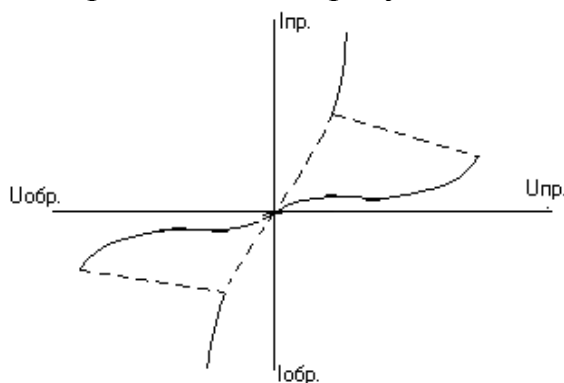


Рисунок 1.46 - ВАХ симистора

Условные графические изображения различных тиристоров представлены на рисунке 1.47 (ГОСТ 2.730-73):

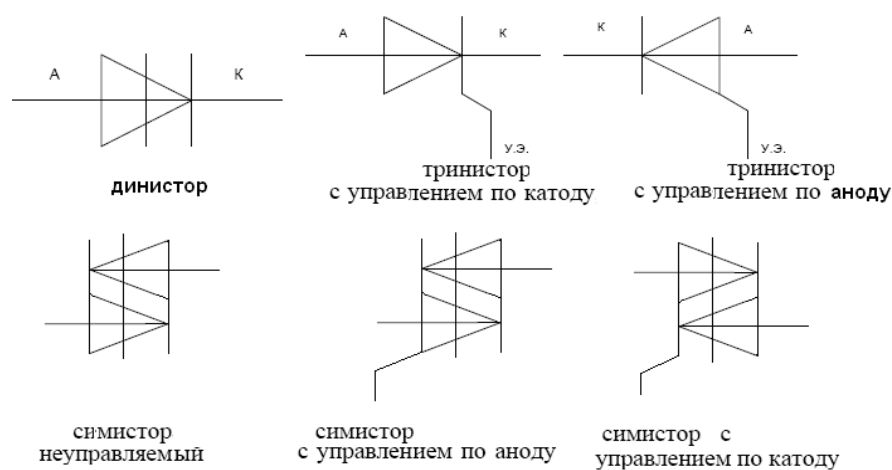


Рисунок 1.47 - Условные графические изображения различных тиристоров

### Маркировка тиристоров

Для импульсных тиристоров и тиристоров, предназначенных для систем автоматики, условные обозначения в различные периоды регламентировались ГОСТ 10862 – 64 и ГОСТ 10862 – 72.

Первый элемент – буква или цифра, обозначающая исходный материал: К или 2 – кремний.

Второй элемент – буква, указывающая вид прибора: Н – динисторы (диодные тиристоры); У – тринисторы (триодные тиристоры).

Третий элемент – число, указывающее назначение или электрические свойства прибора:

- малой мощности – от 101 до 199;
- средней мощности – от 201 до 299;
- большой мощности – от 301 до 399.

Четвертый элемент – буквы А, Б, В и т. д., указывающие разновидности приборов с определенным сочетанием основных параметров. Например, КН102Б – кремниевый динистор, малой мощности, группа Б.

Пример маркировки по ГОСТ 20859-75(79) (рисунок 1.48):

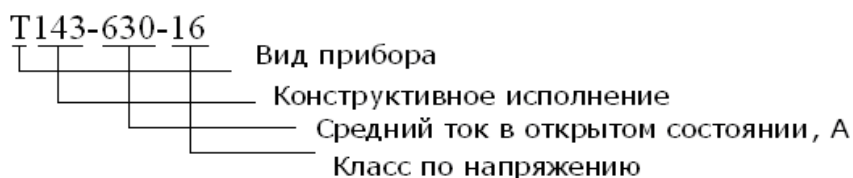


Рисунок 1.48 - Пример маркировки тиристора

Полная маркировка может содержать дополнительные элементы (всего 9 элементов), тогда расшифровка будет следующей:

Первый элемент – буква или буквы, обозначающие вид прибора: Т – тиристор; ТЛ – лавинный тиристор; ТС – симметричный тиристор (симмистор); ТО – фототиристор; ТЗ – запираемый по управляющему электроду.

Второй элемент – буква, обозначающая подвид тиристора по коммутационным характеристикам: Ч – высокочастотный тиристор; Б – быстродействующий; И – импульсный.

Третий элемент – цифра (от 1 до 9), обозначающая порядковый номер модификации (разработки).

Четвертый элемент – цифра (от 1 до 9), обозначающая классификационный размер корпуса прибора.

Пятый элемент – цифра (от 0 до 5), обозначающая конструктивное исполнение.

Шестой элемент – число, равное значению максимально допустимого среднего тока в открытом состоянии для тиристорov.

Седьмой элемент – буква X для приборов с обратной полярностью (основание корпуса – катод).

Восьмой элемент – число, обозначающее класс по повторяющемуся импульсному напряжению в закрытом состоянии.

Девятый элемент – группа цифр, обозначающая сочетание классификационных параметров.

Тиристоры применяются чаще всего в качестве мощных переключателей, в автогенераторах, мультивибраторах, устройствах защиты, для управления электродвигателями переменного тока, в выпрямителях и инверторах, в Какие процессы происходят в тиристорной структуре при подключении внешнего источника напряжения?

## Тема 1.6. Интегральные микросхемы. Оптоэлектронные приборы

Интегральная микроэлектроника – направление в электронике, представляющее собой комплекс физических, технологических, конструктивных и схемотехнических методов построения электронных функциональных элементов и узлов повышенной надежности, минимального объема и малого потребления энергии источников питания. Это достигается изготовлением в едином интегральном технологическом цикле всей совокупности активных и пассивных компонентов электронной схемы и соединительных проводников между ними. Полученный таким способом интегральный микроэлектронный функциональный элемент (называемый также интегральной микросхемой) предназначен для выполнения заданных операций.

### Технологические процессы:

- а) наращивание полупроводникового материала на кремниевой подложке;
- б) термическое окисление кремния для получения слоя окисла  $\text{SiO}_2$ , защищающего поверхность кристалла от внешней среды;
- в) фотолитография, обеспечивающая требуемые конфигурации пленок ( $\text{SiO}_2$ , металл и т.п.) на поверхности подложки;
- г) локальная диффузия – перенос примесных атомов в ограниченные области полупроводника (в настоящее время – ионная имплантация легирующего вещества);
- д) напыление тонких (до 1 мкм) пленок;
- е) нанесение толстых (более 1 мкм) пленок путем использования специальных паст с их последующим вжиганием.

ИС изготавливаются методами интегральной технологии, имеющей следующие отличительные особенности:

1. Элементы, однотипные по способу изготовления, представляют собой или полупроводниковые р-п структуры с несколькими областями, различающиеся концентрацией примесей или пленочные структуры из проводящих, резистивных и диэлектрических пленок.

2. Одновременно в едином технологическом цикле изготавливается большое количество одинаковых функциональных узлов, каждый из которых, в свою очередь, может содержать до сотен тысяч и более элементов.

3. Сокращается количество технологических операций (сборка, монтаж элементов) на несколько порядков по сравнению с традиционными методами производства аппаратуры на дискретных элементах.

4. Размеры элементов и соединений между ними уменьшаются до технологически возможных пределов.

5. Низконадежные соединения элементов, выполненные с помощью пайки, исключаются и заменяются высоконадежными соединениями (путем металлизации).

Интегральные микросхемы (ИМС) принято классифицировать по способам изготовления на полупроводниковые, пленочные и гибридные схемы.



*Полупроводниковыми* называют микросхемы, все компоненты которых выполнены в объеме или в приповерхностном слое полупроводниковой пластинки.

*Пленочная* – микросхема, в которой все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде пленок проводящих и диэлектрических материалов. Различают тонкопленочные и толстопленочные ИС.

*Гибридная* – микросхема, в которой пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) выполнены в виде пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку, а активные элементы являются навесными. В качестве активных элементов обычно используют бескорпусные диоды или транзисторы.

В зависимости от функционального назначения интегральные микросхемы делятся на *аналоговые* и *цифровые*. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки аналоговых сигналов, т. е. сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки дискретных сигналов.

В зависимости от числа элементов и компонентов различают ИМС:

- малой степени интеграции (МИС) — до 50 элементов;
- средней степени интеграции (СИС) — до 500 элементов;
- большой степени интеграции (БИС) — до 10 000 элементов;
- сверхбольшой степени интеграции (СБИС) — более 10 000 элементов.

Интегральные микросхемы помещаются в корпус. Наибольшее распространение получили металлокерамический, металлокерамический, стеклокерамический и пластмассовый корпуса. Корпуса имеют от четырех до нескольких сотен выводов.

*Основными параметрами* ИМС являются:

1. Степень интеграции – количество элементов, входящих в состав ИМС (характеризует сложность ИМС);
2. Плотность упаковки – параметр ИМС, который характеризует количество элементов ИМС в единице объема.

Технология производства полупроводниковых интегральных микросхем преимущественно планарная и основана на поочередном легировании (обогащении) отдельных участков полупроводниковой пластинки донорными и акцепторными примесями, которое осуществляется при помощи специально наносимой на поверхность полупроводника маски технологические отверстия («окна») путем диффузии при высоких температурах из твердых, жидких или газообразных соединений, содержащих атомы заданной примеси.

Часто используется ионная имплантация, при которой ионы примеси разгоняются в специальных ускорителях до больших скоростей, позволяющих при попадании на поверхность полупроводника внедряться в него на заданную глубину и таким образом образовывать зоны с заданной проводимостью. На рисунке 1.49 приведены основные пассивные (конденсатор, резистор) и

активные (биполярный транзистор) элементы интегральных полупроводниковых микросхем.

Полупроводниковые резисторы выполняются в объеме полупроводника путем локальной диффузии (диффузионные резисторы), что позволяет изготавливать их одновременно с другими элементами ИМС. Диффузионным резистором может служить эмиттерная, базовая или коллекторная область структуры биполярного транзистора (БТ) (рисунок 1.49).

В полупроводниковых ИМС используют два типа конденсаторов: диффузионные (на основе p-n-перехода) и оксидные.

Диффузионные конденсаторы выполняют на основе эмиттерного и коллекторного переходов транзисторной структуры, что не требует дополнительных технологических операций. В оксидных конденсаторах в качестве одной обкладки используют слой n<sup>+</sup>-типа, в качестве диэлектрика – слой диоксида кремния, в качестве второй обкладки – пленку алюминия (рис. 1.49).

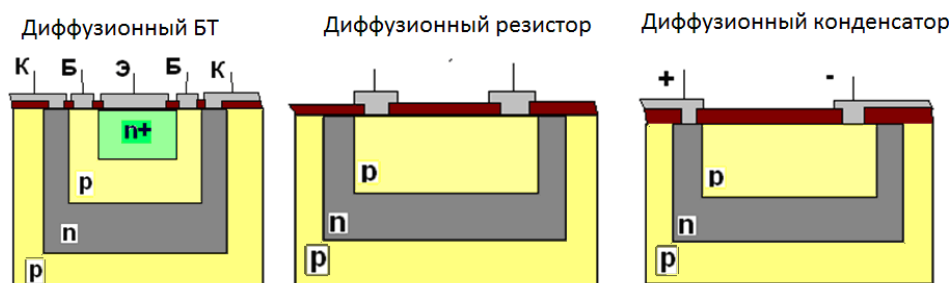


Рисунок 1.49 - Пассивные и активные элементы полупроводниковых ИМС

Наряду с биполярными транзисторами в полупроводниковых ИМС применяют МДП-транзисторы. На рисунке 1.50 показаны структуры МДП-транзистора с индуцированным n-каналом, МДП-резистора и МДП-конденсатора, которые могут создаваться в едином технологическом процессе.

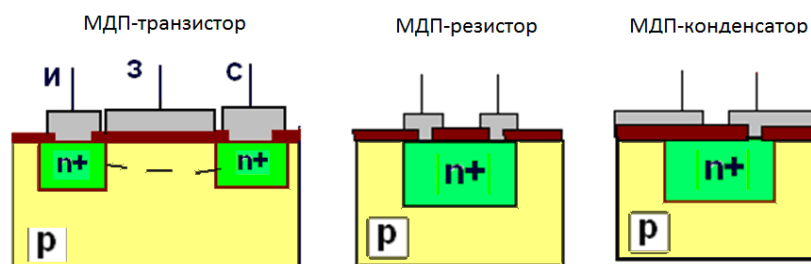


Рисунок 1.50 - Структура МДП-транзистора в интегральном исполнении

Области стока и истока формируют локальной диффузией легирующих примесей в кремниевую подложку с противоположным типом электропроводности. Изоляция затвора от полупроводника осуществляется пленкой диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>), расположенной на поверхности подложки между областями стока и истока. Затвор и выводы электродов выполняют путем металлизации.

Изоляция элементов ИМС осуществляется с помощью p-n-переходов, диэлектрической пленки SiO<sub>2</sub> и с помощью диэлектрической подложки.

Пленочные ИМС подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные. К тонкопленочным относятся ИМС, толщина пленок

которых не превышает 1 мкм. Пленки толщиной более 1 мкм называют *толстыми*.

Элементы тонкопленочных ИМС наносятся методом термовакuumного осаждения или катодного распыления. При термовакuumном осаждении подложка с маской располагаются в вакуумной камере, в которой помещен испаряемый материал и нагреватель. При нагревании материал испаряется и осаждается на подложку через «окна» в маске в виде тонкой пленки.

При катодном распылении в разреженной газовой среде размещаются холодный катод из распыляемого металла, анод и между ними подложка. Между анодом и катодом прикладывается высокое напряжение, вызывающее ионизацию газа. Положительные ионы движутся к катоду и выбивают из него атомы металла, которые осаждаются на подложке, образуя тонкую пленку.

Толстые пленки получают методом шелкографии, заключающемся в продавливании пасты, изготовленной из материалов, образующих пленки, через специальные сетки-трафареты, имеющие шелковую основу.

На рисунке 1.60 приведена структура таких пленочных элементов (вид сверху).

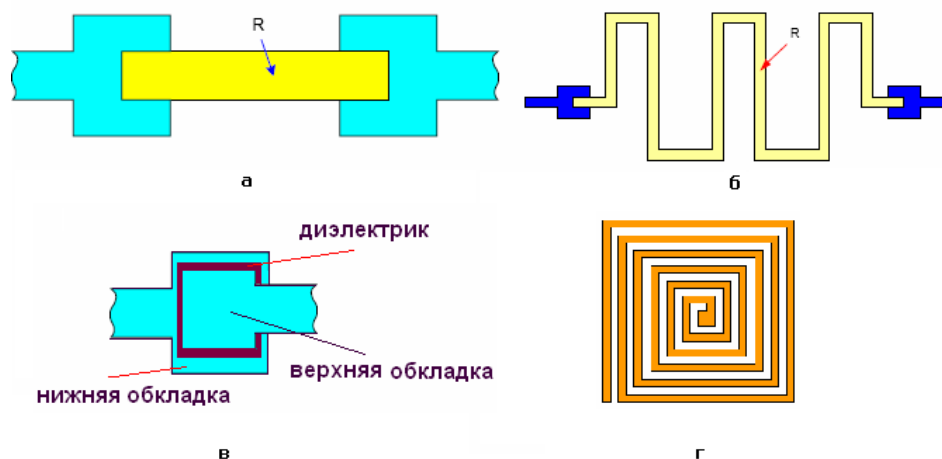


Рисунок 1.60 - Структура пленочных элементов: а – резистор, б – резистор в виде меандра, в – конденсатор, г – индуктивность

В пленочных микросхемах для создания катушки индуктивности используется плоская металлическая спираль, нанесенная на изолирующее основание. Однако в полупроводниковых микросхемах обычно имитируется эффект отставания тока от напряжения, как это имеет место в реальной индуктивности. Это отставание может быть достигнуто за счет замедленного движения носителей заряда в некотором объеме полупроводника.

Если необходимо, чтобы в состав микросхемы входили помимо пассивных элементов и активные (биполярные и полевые транзисторы, тиристоры и т. д.), то последние выполняют в виде отдельных дискретных микроминиатюрных компонентов и подсоединяют к микросхеме. Пример части гибридной микросхемы приведен на рисунке 1.61. Гибридные интегральные микросхемы обычно используются для изготовления малосерийной или опытной аппаратуры, применяемой для выполнения каких-либо нестандартных операций над сигналами.

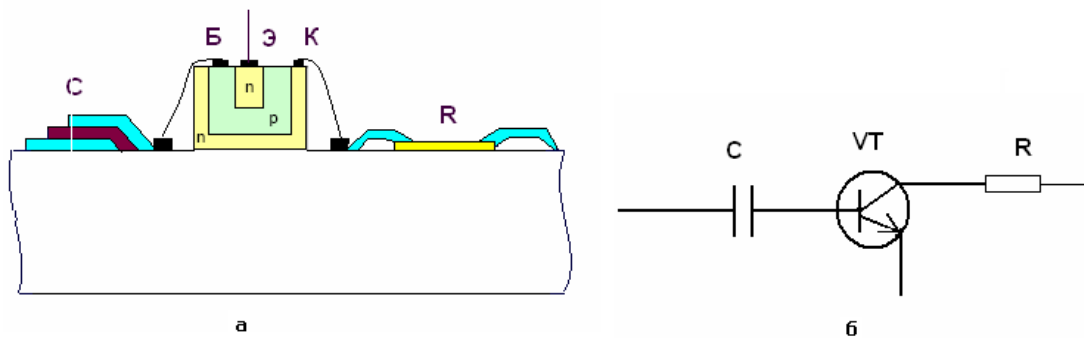
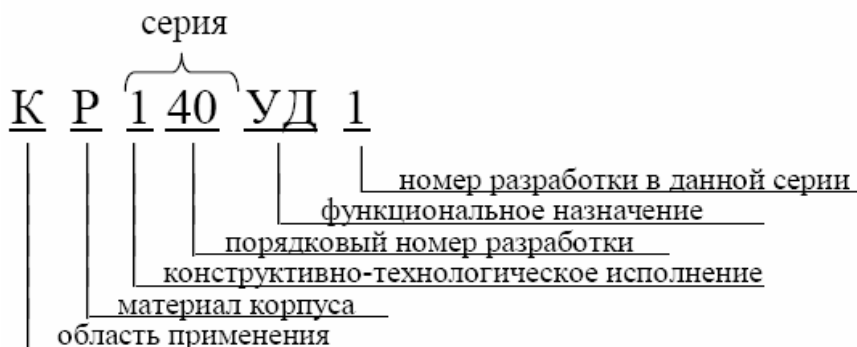


Рисунок 1.61 - Гибридная ИМС (а) и ее принципиальная электрическая схема (б)

Если в интегральной микросхеме активные элементы выполнены в приповерхностном слое полупроводника, поверх которого нанесены пассивные компоненты, то такая микросхема называется совмещенной.

Интегральные микросхемы выпускаются в виде серий. Каждая серия содержит несколько микросхем, выполняющих определенные функции, однако они имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.

Маркировка ИМС состоит из нескольких элементов и включает буквы и цифры. Например,



Первый элемент – буква К означает, что ИМС общего применения. Отсутствие буквы К означает, что ИМС специального применения;

Второй элемент – буква означает материал и тип корпуса: Р – пластмассовый, М – керамический типа 2, А – пластмассовый типа 4;

Третий и четвертый символы – три или четыре цифры – серия. Первая цифра в серии означает конструктивно-технологическое исполнение:

- 1, 5, 7 – полупроводниковые (7 – полупроводниковые бескорпусные),
- 2, 4, 6, 8 – гибридные, 3 – прочие;

Пятый и шестой символы – функциональное назначение схемы:

- УД – операционный усилитель,
- ЛА – логический элемент И–НЕ,
- ИР – регистр,
- ИЕ – счетчик,
- ИД – дешифратор,

ЕН – стабилизатор напряжения и т.д. Последние цифры – номер разработки в данной серии.

Применение ИМС вместо дискретных элементов в качестве электронной базы электронных устройств дает значительные преимущества по надежности, габаритам, стоимости и другим показателям. Это связано с тем, что при использовании ИМС резко уменьшается количество паяных соединений – основного фактора ненадежности, значительно сокращаются габаритные размеры и масса проектируемых электронных устройств, существенно снижается их стоимость, прежде всего за счет небольшой стоимости ИМС, снижения трудоемкости изготовления аппаратуры и использования автоматизированных систем проектирования.

### **Оптоэлектронные приборы**

Оптрон – это полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь. В источнике излучения электрические сигналы преобразуются в световые, которые воздействуют на фотоприемник и создают в нем снова электрические сигналы.

Прием и преобразование световых («фотонных») сигналов в электрические осуществляется *фотоэлектронными приборами*. Преобразование электрических сигналов в световые производится *электросветовыми (излучающими) приборами*.

В качестве *излучающих приборов* используются или микроминиатюрные лампочки накаливания или (чаще всего) светодиоды.

*Фотоэлектронные приборы* разделяются на четыре класса:

1) фотоэмиссионные приборы, основанные на фотоэлектронной эмиссии с поверхности фотокатодов, помещенных в вакуум или разреженный газ;

2) фоторезистивные приборы, основанные на увеличении проводимости полупроводников под воздействием света;

3) фотогальванические приборы, в которых при воздействии света генерируется фото-ЭДС;

4) фотомагнитные приборы, в которых при одновременном воздействии магнитного поля и света генерируется фотомагнитная ЭДС.

Простейшими фотоэмиссионными приборами являются двухэлектродные вакуумные или газонаполненные фотоэлементы.

К фоторезистивным приборам относятся полупроводниковые фоторезисторы (приборы без р-п-перехода).

К фотогальваническим элементам относятся фотоэлементы с запорным слоем (вентильные фотоэлементы), фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и солнечные батареи. Фототранзисторы конструктивно отличаются от обычных биполярных и полевых транзисторов лишь тем, что у них в корпусе имеется окно, пропускающее световой поток и фокусирующее его в области п-р-перехода (рис. 1.62, а и рис.1.62, б). Фототиристоры (рисунок 1.62, в) отличаются от обычных тиристоров тем, что в их корпусах также имеется прозрачное для света окно, вследствие чего их можно включать (а некоторые их виды и выключать), воздействуя световым сигналом.

Фотогальванические приборы являются преобразователями световой энергии в электрическую энергию с КПД до 25 %. Это позволяет применять фотогальванические приборы для преобразования световых сигналов в электрические, а также создавать на основе этих приборов преобразователи солнечной энергии в электрическую ( $1\text{ м}^2$  земной поверхности, освещаемой Солнцем, получает световую энергию мощностью до 500-1000 Вт). В настоящее время для этих целей наиболее широко применяют кремниевые солнечные батареи.

Элемент солнечной батареи устроен следующим образом. На пластинке п-кремния диффузионным способом получают тонкий полупрозрачный слой р-кремния, в результате чего образуется плоский п-р-переход (рис. 1.62, г). При освещении солнечным светом п-р-перехода появляется фото-ЭДС, равная 0,5-0,6 В. В режиме короткого замыкания солнечные батареи создают ток до 40 мА на  $1\text{ см}^2$  площади п-р-перехода.

#### ***Фотоэлектрические преобразователи световых изображений на основе полупроводниковых приборов с зарядовой связью.***

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) конструктивно напоминают МОП-транзисторы с изолированным затвором (рис. 1.62, д, е) на поверхности основания («подложки») из сверхчистого кремния с дырочной проводимостью создается тонкий слой (порядка 0,1 микронметра) диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), поверх которого наносятся тончайшие (практически прозрачные) металлические полоски, выполняющие роль затворов. Если на затвор подается плюс от внешнего источника, а на основание — минус, то непосредственно под затвором, в основании с р-проводимостью, возникает область без носителей заряда (т.е. своеобразная «потенциальная яма»). Все дырки вытесняются из этой зоны вглубь основания (как это схематически показано пунктирной линией на рисунке 1.62, д). При этом электроны, которые бы могли войти в эту зону и изменить ее потенциал, в нормальных условиях в основании практически отсутствуют, поскольку оно выполняется из сверхчистого кремния, в который при создании были введены только акцепторные примеси.

Таким образом, под затвором создается «потенциальная яма», в которой нет неосновных носителей заряда - электронов, но в которую их можно ввести и они смогут находиться («храниться») в ней достаточно долго, так как дырок, с которыми они могли бы рекомбинировать, поблизости нет. Электроны в «потенциальной яме» могут образоваться под действием света: но для этого все элементы прибора должны быть выполнены столь тонкими (десятые доли микронметра), чтобы быть прозрачными для световых потоков. В этом случае, фотоны проникают в подзатворную область, где и отдают свою энергию, вызывая генерацию носителей заряда (электронов и дырок). Дырки полем затвора оттесняются вглубь основания, а электроны остаются в подзатворной области и создают в потенциальной яме «зарядовый пакет».

При этом, чем более интенсивный световой поток попадает в подзатворную область, тем больше электронов в ней появляется. Если из подобных микроэлементов создать линейку ПЗС (рис. 1.62, е), расположив их

как можно ближе друг к другу, или матрицу ПЗС, разместив микроэлементы геометрически равномерно по площади, «строка» за «строкой», то, проецируя на образованную таким образом фотоматрицу световое изображение, можно получить мозаичное, состоящее из множества отдельных зарядовых пакетов, электронное изображение. Это объясняется тем, что под каждым затвором будет иметься заряд, величина которого будет прямо пропорционально зависеть от степени освещенности области, где располагается данный конкретный затвор.

Полученное электронное изображение затем преобразуется в электрический сигнал (для этого надо измерить («считать») заряд, имеющийся под каждым элементарным затвором). Следует отметить, что приборы с зарядовой связью обладают одной особенностью: заряд, имеющийся, например, под затвором 1 (рисунок 1.62, д) легко может быть перемещен под затвор 2 рядом с ним расположенный. Для этого надо подать на затвор 2 напряжение большее, чем на затворе 1. Тогда электроны из-под затвора 1 переместятся под затвор 2, откуда они могут быть перемещены подобным же способом под затвор 3, затем затвор 4 (рисунок 1.62, е) и т.д., пока пакет электронов не достигнет стока и не уйдет в источник питания, создав на сопротивлении нагрузки падение напряжения. Так можно последовательно (или последовательно-параллельно) считать все образованное электронное изображение: элемент за элементом и строка за строкой.

Таким образом, на основе фотоматрицы из приборов с зарядовой связью может быть создан мозаичный преобразователь светового изображения в электронное, которое затем может быть преобразовано в электрический сигнал, несущий информацию о степени освещенности каждого участка исходного светового изображения. Фотоэлектрические преобразователи на основе ПЗС широко используются в электронике: в современном телевидении, цифровых фотоаппаратах, цифровых видеокамерах и сканерах.

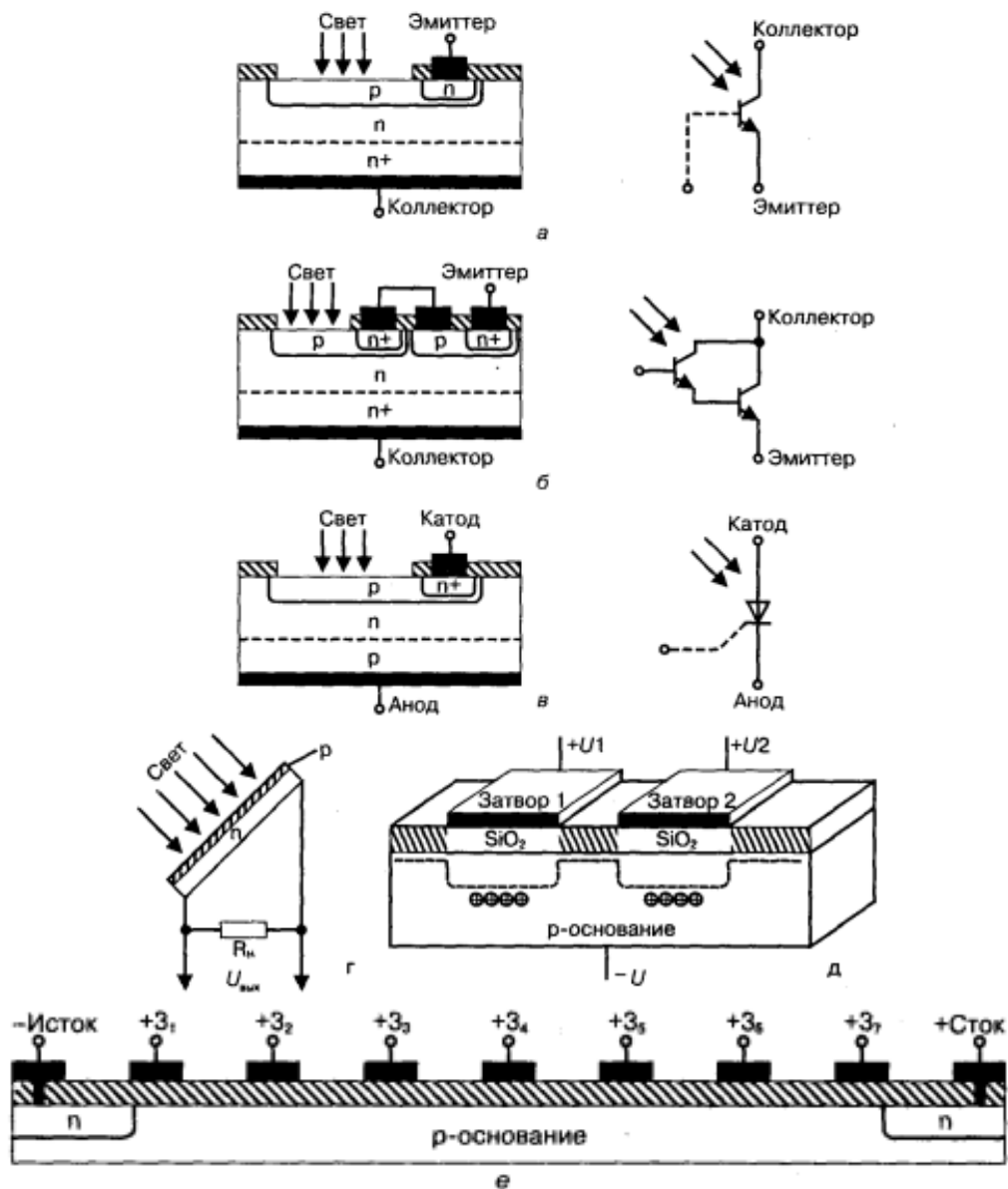


Рисунок 1.62 - Фототранзистор (а), составной фототранзистор (б), фототиристор (в), солнечная батарея (г) и устройство фотоэлектрического преобразователя на основе прибора с зарядовой связью (д, е)

Если оптрон имеет один излучатель и один приемник излучения, то его называют оптопарой.

### Оптроны

#### Конструкция

- 1) Оптроны с закрытым оптическим каналом (рисунок 1.63).

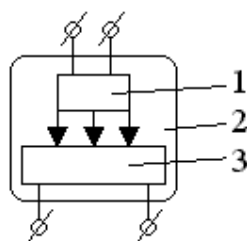




Рисунок 1.63 - Оптрон с закрытым оптическим каналом: 1 – излучатель; 2 – оптически прозрачный клей; 3 – фотоприемник.

Излучатель и фотоприемник помещают в корпус и заливают оптически прозрачным клеем.

2) Оптроны с открытым оптическим каналом.

Оптрон с воздушным зазором между излучателем и фотоприемником изображен на рисунке 1.64.

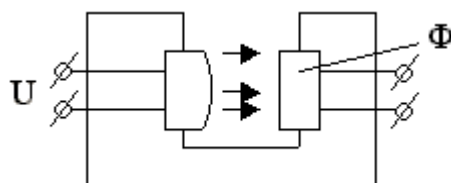


Рисунок 1.64 - Оптрон с воздушным зазором

Оптрон с внешним объектом, при котором световой поток излучателя попадает в фотоприемник, отражаясь от какого-либо внешнего объекта изображен на рисунке 1.65.

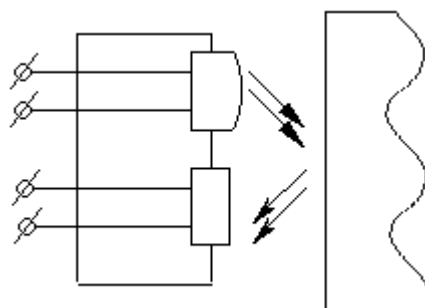


Рисунок 1.65 - Оптрон с внешним объектом

### **Типы оптопар, их параметры и характеристики**

**1. Резисторные оптопары.** Они имеют в качестве излучателя сверхмощную лампочку накаливания или светодиод. Приемником излучения является фоторезистор, который может работать как на постоянном, так и на переменном токе. Условное обозначение и схема включения резисторной оптопары показаны на рисунке 1.66.

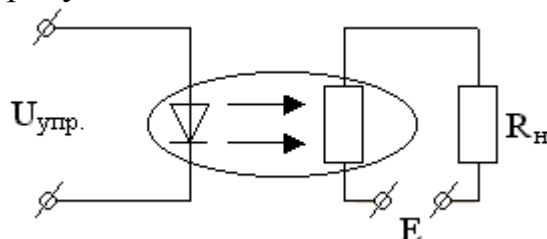


Рисунок 1.66 - Условное обозначение и схема включения резисторной оптопары

*Параметры резисторных оптопар:*

1) максимальные токи ( $I_{\text{вхmax}}$ ,  $I_{\text{выхmax}}$ ) и напряжения на входе и на выходе ( $U_{\text{вхmax}}$ ,  $U_{\text{выхmax}}$ );

2) выходное сопротивление при нормальной работе ( $R_{\text{вых}}$ ) и темновое выходное сопротивление ( $R_{\text{твых}}$ );

- 3) сопротивление изоляции ( $R_{\text{изол}}$ );
- 4) время включения ( $t_{\text{вкл}}$ ) и выключения ( $t_{\text{выкл}}$ ).

*Характеристики:*

- 1) входные ВАХ;
- 2) передаточная ( $R_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ ).

Резисторные оптопары применяются: для коммутации, для автоматического регулирования усиления, для связи между каскадами усилителя, для управления бесконтактными делителями напряжения и т.д.

## 2. Диодные оптопары.

Они содержат обычно кремниевый фотодиод и арсенид-галлиевый светодиод (рис. 1.67).

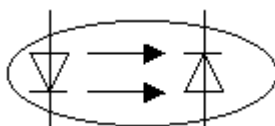


Рисунок 1.67 - Условное обозначение и схема включения диодной оптопары

*Параметры диодных оптопар:*

- 1) входные и выходные напряжения и токи;
- 2) коэффициент передачи тока (т.е.  $I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$ );
- 3) время нарастания и время спада выходного сигнала.

Диодные оптопары применяются для:

- создания импульсных трансформаторов, не имеющих обмоток;
- передачи сигналов между блоками РЭА;
- управления работой микросхем.

## 3. Транзисторные оптопары.

Транзисторные оптопары имеют в качестве излучателя светодиод, а в качестве приемника излучения – биполярный кремниевый фототранзистор (рис. 1.68).

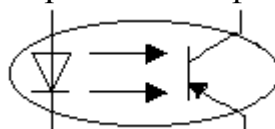


Рисунок 1.68 - Условное обозначение и схема включения транзисторной оптопары

В качестве приемника может также использоваться однопереходный и полевой транзисторы.

*Основные параметры* транзисторных оптопар аналогичны параметрам резисторных оптопар. Оптопары этого типа работают обычно в ключевом режиме и применяются в коммутаторных схемах, в устройствах связи различных датчиков с измерительными блоками, а также в качестве реле.

## 4. Тиристорные оптопары.

Они имеют в качестве фотоприемника кремниевый фототиристор (рис. 1.69).

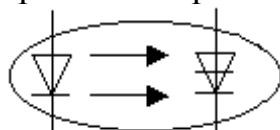


Рисунок 1.69 - Условное обозначение и схема включения тиристорной оптопары

Тиристорные оптроны применяются в схемах для формирования мощных импульсов, управления и коммутации различных устройств с мощными нагрузками.

*Параметры:*

- 1) входные и выходные токи и напряжения;
- 2) время включения и выключения;
- 3) параметры изоляции между входной и выходной цепями.

**Достоинства оптронов:**

- 1) отсутствие электрической связи между входом и выходом и обратной связи между фотоприемником и излучателем из-за высокого сопротивления изоляции;
- 2) широкая полоса частот колебаний пропускаемых оптроном;
- 3) высокая помехозащищенность оптического сигнала, т.е. его невосприимчивость к воздействию внешних электромагнитных полей;
- 4) возможность управления выходными сигналами путем воздействия на оптическую часть прибора.

**Недостатки оптронов:**

- 1) значительная потребляемая мощность (из-за того, что дважды происходит преобразование энергии);
- 2) большое влияние температуры и радиации на свойства оптронов;
- 3) заметное «старение», т.е. ухудшение параметров с течением времени;
- 4) высокий уровень собственных шумов.

## Раздел 2 Аналоговые устройства

### Тема 2.1. Однофазные неуправляемые выпрямители

#### Структура, классификация и основные параметры выпрямителей

Для получения электрической энергии нужного вида часто приходится преобразовывать энергию переменного тока в энергию постоянного тока (процесс выпрямления), либо энергию постоянного тока в энергию переменного тока (процесс инвертирования). Устройства, с помощью которых осуществляются такие преобразования, называются соответственно выпрямителями и инверторами. Выпрямители и инверторы являются вторичными источниками электропитания (ИВЭ).

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

Выпрямители классифицируются по нескольким признакам:

- 1) по возможности управления:
  - а) неуправляемые;
  - б) управляемые;
- 2) по числу фаз первичного источника питания:
  - а) однофазные (выпрямители малой и средней мощности);
  - б) многофазные, обычно 3-х фазные (выпрямители большой мощности);
- 3) по форме выпрямленного напряжения:
  - а) однополупериодные;
  - б) двухполупериодные.

#### ПАРАМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

- 1) средние значения выпрямленного тока и напряжения  $I_{н ср}$  и  $U_{н ср}$ ;
- 2) мощность нагрузочного устройства  $P_{н ср} = U_{н ср} \cdot I_{н ср}$ ;
- 3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{осн.м.}$ ;
- 4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения  $p = U_{осн.м.} / U_{н ср}$ ;
- 5) КПД выпрямителя:

$$\eta = P_{н ср} / (P_{н ср} + P_{тр} + P_{д}),$$

где  $P_{тр}$  – потери в трансформаторе;

$P_{д}$  – потери в диодах.

Рассмотрим структурную схему однофазного выпрямителя (рис. 2.1).

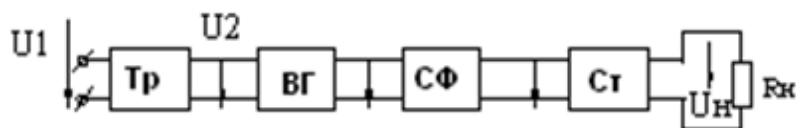


Рисунок 2.1 – Структурная схема однофазного выпрямителя

В структурную схему входят следующие блоки: трансформатор  $Tр$ , вентильная группа  $ВГ$ , сглаживающий фильтр  $СФ$ , стабилизатор  $Ст$ , который поддерживает неизменным напряжение на нагрузке  $R_{н}$ .

Для выпрямления однофазного переменного напряжения применяют 3 основных типа выпрямителей:

- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

#### **Однополупериодный выпрямитель.**

Однополупериодный выпрямитель состоит из трансформатора, к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены диод VD и нагрузочный резистор  $R_H$ . (рис. 2.2). Для упрощения анализа работы выпрямителей транзистор и диод считают идеальными.

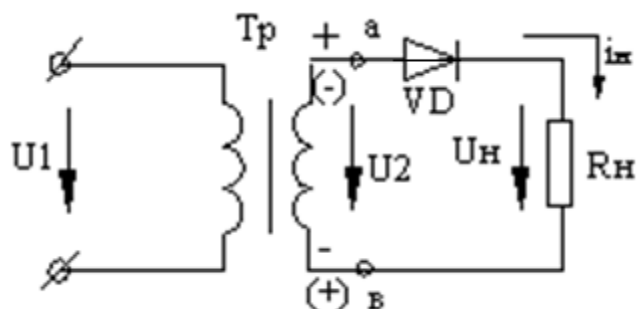


Рисунок 2.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы выпрямителя показаны на рисунке 2.3. В первый полупериод от 0 до  $T/2$  диод открыт, т.к. потенциал точки «а», выше потенциала точки «в», и через нагрузку протекает ток  $i_H$ . В интервале времени  $T/2 - T$  диод закрыт, т.к. потенциал точки «в» выше потенциала точки «а», т.е. к диоду прикладывается обратное напряжение  $U_2$ . Ток в нагрузке отсутствует и коэффициент пульсаций будет равен  $\rho=1,57$ .

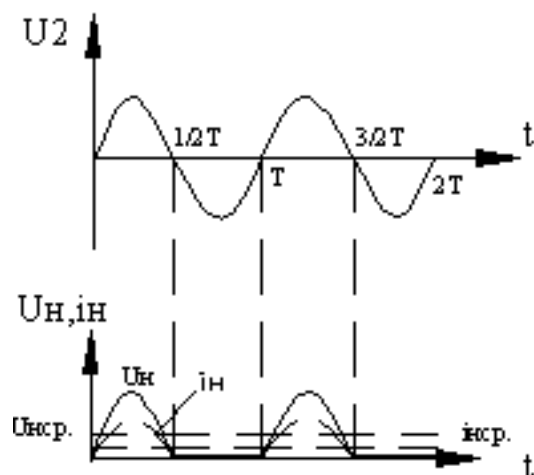


Рисунок 2.3 – Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

#### **Двухполупериодный мостовой выпрямитель**

Он состоит из трансформатора (Тр) и четырех диодов (VD1-VD4), подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме

(рисунок 2.4). Каждая пара диодов VD1, VD3 и VD2, VD4 работает поочередно. Временные диаграммы работы этого выпрямителя показаны на рисунке 2.5.

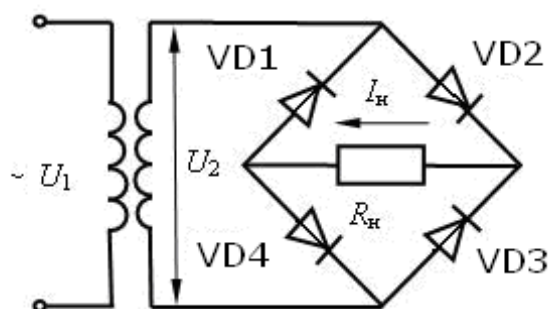


Рисунок 2.4 – Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

В первый полупериод (0-T/2) открыты VD1 и VD3, когда потенциал точки «а» выше потенциала точки «b». При этом в нагрузочном резисторе  $R_n$  появляется ток  $I_n$ . В этом интервале диоды VD2 и VD4 закрыты. В следующий полупериод (T/2-T) потенциал точки «b» выше потенциала точки «а», тогда диоды VD2, VD4 открыты, а VD1 и VD3 закрыты. В оба полупериода ток через  $R_n$  имеет одно и то же направление. Коэффициент пульсаций  $p=0,67$ .

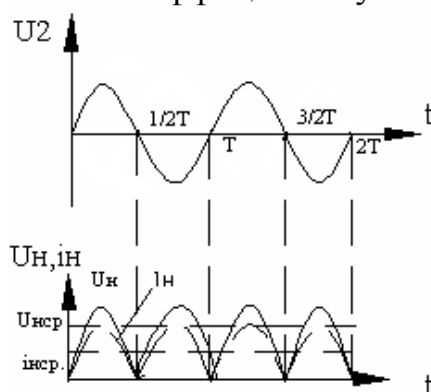


Рисунок 2.5 – Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

***Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.***

Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на один и тот же нагрузочный резистор (рисунок 2.6). В каждый из полупериодов напряжение на вторичной обмотке трансформатора работает либо верхняя, либо нижняя часть выпрямителя.

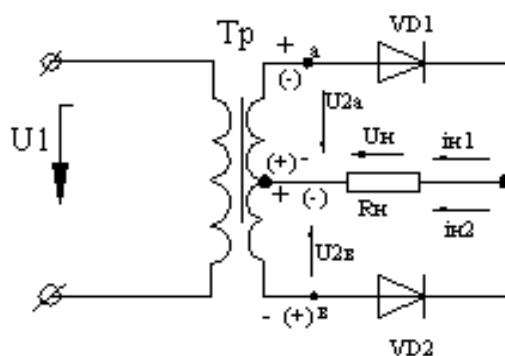


Рисунок 2.6 - Схема двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Временные диаграммы данного выпрямителя показаны на рисунке 2.7.

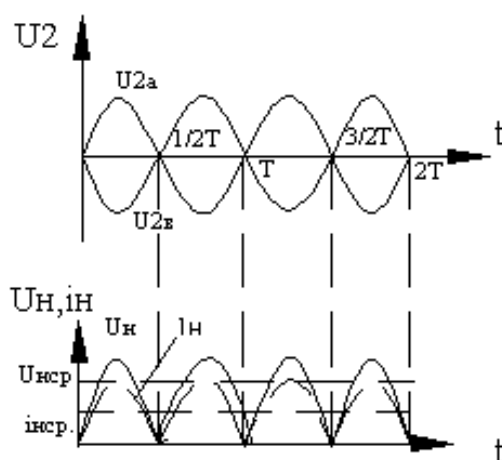


Рисунок 2.7 –  
двухполупериодного

Временные диаграммы  
выпрямителя

Двухполупериодные выпрямители применяют для питания нагрузочных устройств малой и средней мощностей.

К выпрямителям большой и средней мощности относятся трехфазные выпрямители с нейтральным выводом и мостовые [1, 2].

## Тема 2.2. Трехфазные выпрямители

### *Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом*

В состав трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом входят: трехфазный трансформатор, обмотки которого соединены звездой; 3 диода, включенные в каждую из фаз трансформатора; сопротивление  $R_n$  (рис. 2.8).

Диоды работают поочередно, каждый в течение трети периода, когда потенциал начала одной из фазных обмоток (например, а) более положителен, чем двух других (b и c). Выпрямленный ток в резисторе  $R_n$  создается токами каждого диода, имеет одинаковое направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз:  $i_n = i_a + i_b + i_c$ . Коэффициент пульсаций  $p=0,25$ .

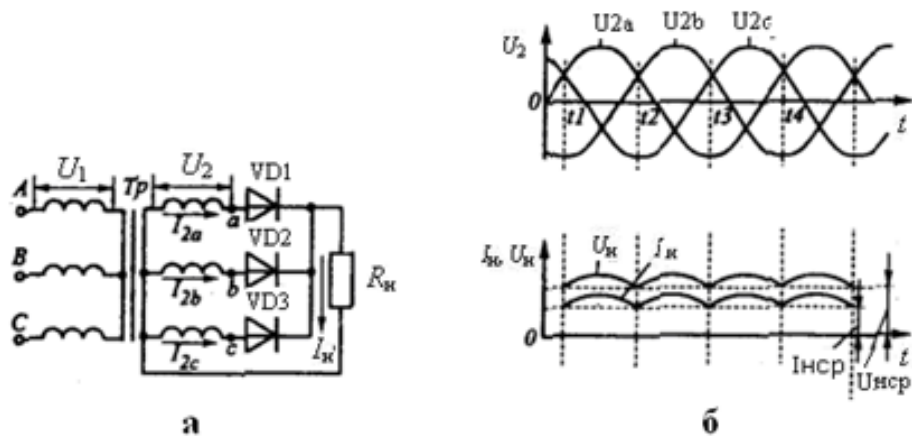


Рисунок 2.8 – Схема (а) и временные диаграммы (б) трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом

### Трехфазный мостовой выпрямитель

Трехфазный мостовой выпрямитель содержит мост из 6 диодов. Диоды VD1, VD3, VD5 – образуют одну группу, а VD2, VD4, VD6 – другую. Общая точка первой группы диодов образует положительный полюс на нагрузочном резисторе  $R_n$ , а общая точка второй группы – отрицательный полюс (рисунок 2.9).

В каждый момент времени ток в резисторе  $R_n$  и двух диодах появляется тогда, когда к этим диодам приложено наибольшее напряжение. Например, в интервале времени  $t_1$ - $t_2$  ток возникает в цепи VD1- $R_n$ -VD4, т.к. в данный интервал времени к этим диодам приложено напряжение  $U_{ab}$ , которое больше других линейных напряжений. Временные диаграммы показаны на рисунке 2.9. В такой схеме коэффициент пульсаций  $p=0,057$ .

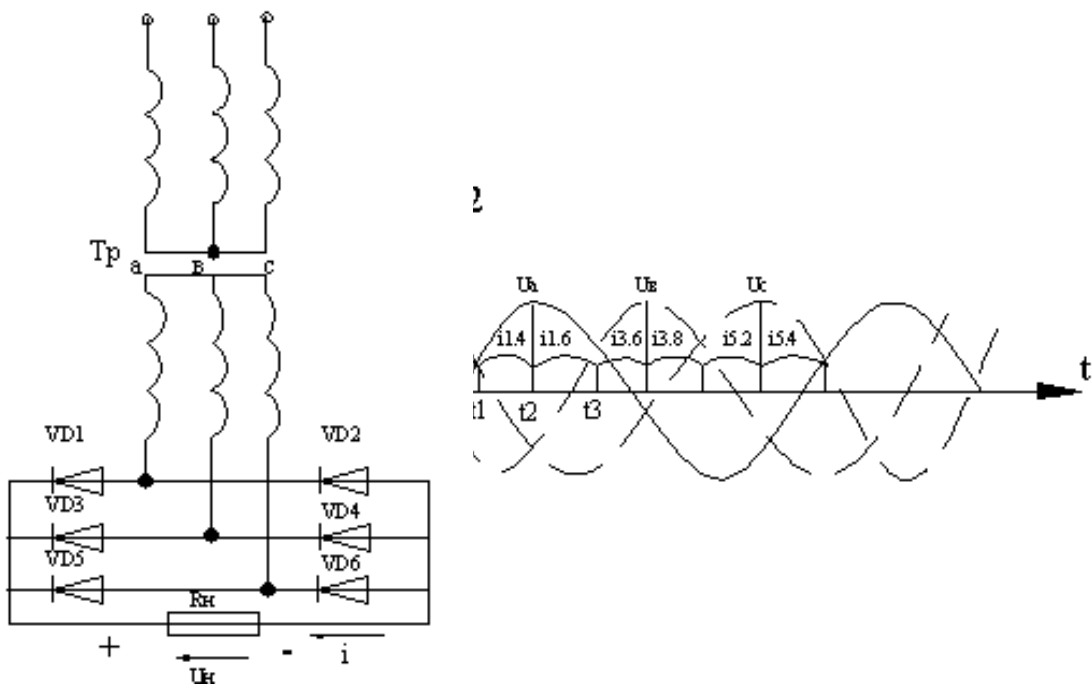


Рисунок 2.9 – Схема и временные диаграммы трехфазного мостового выпрямителя



### **Сглаживающие фильтры**

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания  $q = r_{вх} / r_{вых}$ , где  $r_{вх}$  – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя без фильтра), а  $r_{вых}$  – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Сглаживающие фильтры различаются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от типа фильтрующего элемента:
  - а) емкостные;
  - б) индуктивные;
  - в) электронные фильтры.
- 2) по количеству фильтрующих звеньев:
  - а) однозвенные;
  - б) многозвенные.

#### **Емкостные фильтры**

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору  $R_H$ . Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром показана на рисунке 2.10.

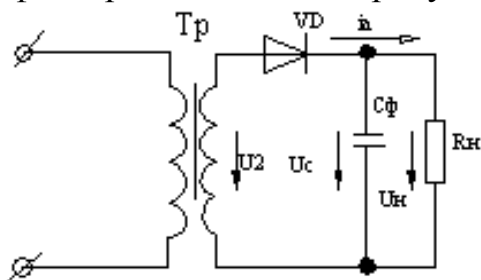


Рисунок 2.10 - Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

На временных диаграммах (рисунок 2.11) видно, что в интервале  $t_1-t_2$ , конденсатор через открытый диод заряжается до амплитудного значения  $U_2$ , так как в этот период  $U_2 > U_c$ . Когда  $U_2 < U_c$ , конденсатор разряжается на нагрузочный резистор  $R_H$ , заполняя разрядным током паузу в нагрузочном токе  $i_H$ , которая имеется в однополупериодном выпрямителе без фильтра.

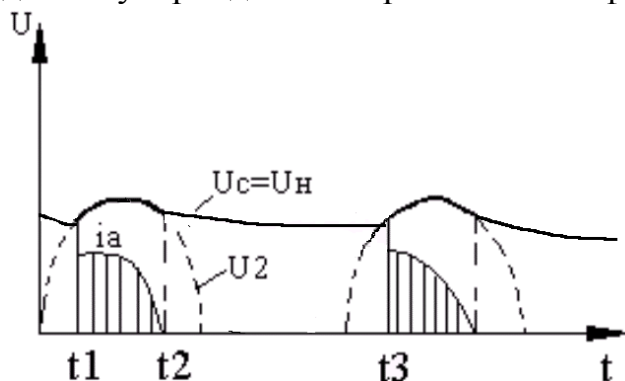


Рисунок 2.11 - Временные диаграммы выпрямителя с емкостным фильтром

После этого диод вновь открывается, СФ заряжается и процессы зарядки и разрядки СФ повторяются. Подобные СФ применяются с высокоомным сопротивлением  $R_H$ .

### Индуктивные фильтры

Они состоят из дросселя  $L_\phi$ , который включают последовательно с нагрузкой  $R_H$  (рисунок 2.12). Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне  $U_2$ , зависит от постоянной времени  $\tau = L_\phi / R_H$ , то длительность импульса увеличивается с ростом  $\tau$ , что видно на временных диаграммах (рисунок 2.13).

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами.

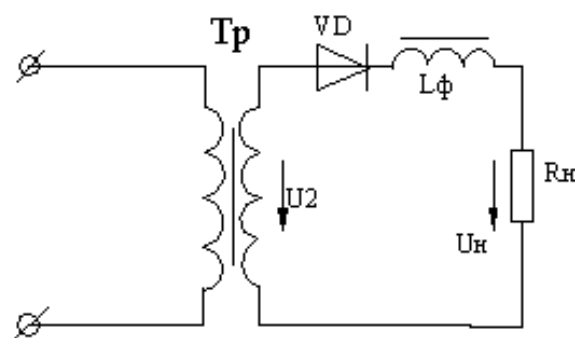


Рисунок 2.12 - Схема включения индуктивного фильтра

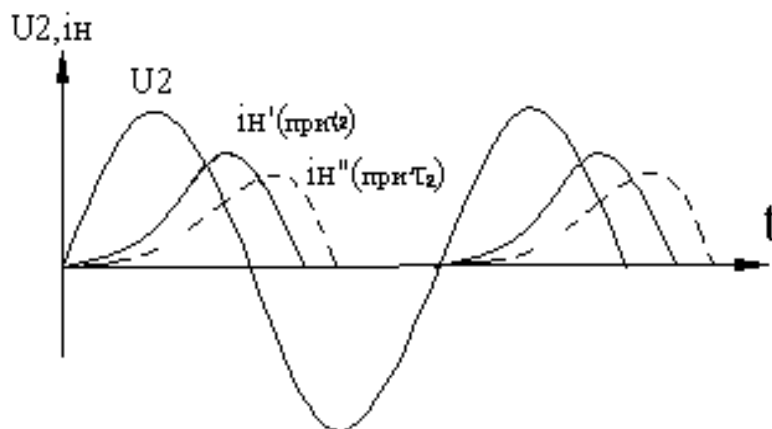


Рисунок 2.13 - Временные диаграммы выпрямителя с индуктивным фильтром

К многозвенным фильтрам относятся  $LC$  или  $RC$  – фильтры, которые обеспечивают большее уменьшение  $r$  и включены Г-образно или П-образно (рисунки 2.14 и 2.15).



Рисунок 2.14 - Г-образные  $LC$  и  $RC$  – фильтры

Коэффициент сглаживания  $LC$ - фильтра:  $q = \omega_{осн}^2 L_{\phi} C_{\phi} - 1$ .

В маломощных усилителях, где сопротивление  $R_n$  составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор  $R_{\phi}$ , что уменьшает массу, габариты и стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, определяемый как  $q = (0,5 \div 0,9)\omega_{осн} R_{\phi} C_{\phi}$ , будет меньше, чем у  $LC$ - фильтра.

В  $\Pi$  – образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев ( $q_n = q_c q_r$ ).

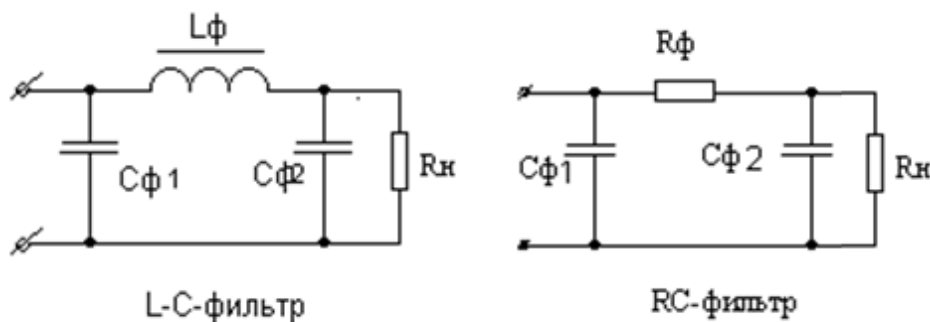


Рисунок 2.15 -  $\Pi$ -образные  $LC$ - фильтр и  $RC$  – фильтр

### Электронные фильтры

Электронные фильтры (ЭФ) – это фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы, что позволяет избавиться от переходных процессов и уменьшить габариты и массу выпрямителей.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока [3, 4].

Из выходной характеристики транзистора (рисунок 2.16) видно, что сопротивление  $R_{к0}$  постоянному току (статическое сопротивление)  $R_{ст} = U_{к0} / I_{к0}$  на 2-3 порядка меньше сопротивления переменному току (динамическое сопротивление)  $R_{дин} = \Delta U_k / \Delta I_k$ . Электронные фильтры снижают пульсации в 3-5 раз.

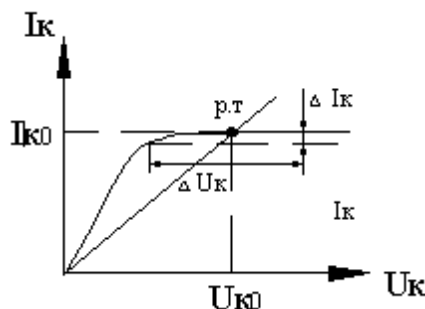


Рисунок 2.16 – Выходная характеристика транзистора

### Тема 2.3. Стабилизаторы напряжения и тока

Стабилизатор напряжения (или тока) – это устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

#### **Классификация стабилизаторов.**

Стабилизаторы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по стабилизируемой величине:
  - а) стабилизаторы напряжения;
  - б) стабилизаторы тока;
- 2) по способу стабилизации:
  - а) параметрические (ПС);
  - б) компенсационные (КС).

#### **Основные параметры стабилизаторов**

1. Коэффициент стабилизации по напряжению для стабилизаторов напряжения:

$$K_{cm.U} = \frac{\Delta U_{ex} / U_{ex}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}},$$

где  $\Delta U_{ex}$ ,  $\Delta U_{вых}$  - приращения напряжений,  $U_{ex}$ ,  $U_{вых}$  - номинальные значения.

2. Коэффициент стабилизации тока для стабилизаторов тока:

$$K_{cm.I} = \frac{\Delta U_{ex} / U_{ex}}{\Delta I_n / I_n},$$

где  $I_n$  – номинальный ток, а  $\Delta I_n$  – приращение тока;

3. Внутреннее сопротивление стабилизатора  $R_{ст}$ ;
4. Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{ст} = P_n / (P_n + P_{п}),$$

где  $P_n$  – полезная мощность в нагрузочном устройстве;  $P_{п}$  – мощность потерь.

#### **Параметрические стабилизаторы (ПС)**

В данных стабилизаторах используется полупроводниковый стабилитрон VD, который включают параллельно  $R_n$ . Последовательно со стабилитроном включают балластный резистор  $R_b$  для создания требуемого режима работы (рисунок 2.17).

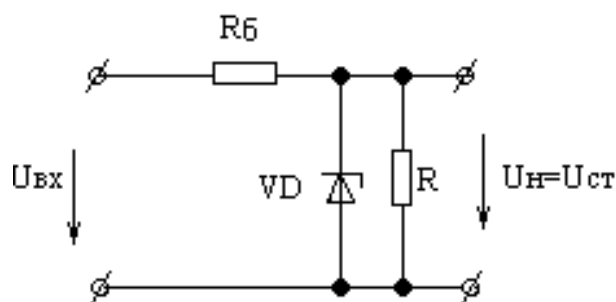


Рисунок 2.17 - Параметрический стабилизатор напряжения

При изменении напряжения  $U_{вх}$  под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки  $R_{н}$ , напряжение  $U_{н}$  изменяется незначительно, т.к. оно определяется напряжением  $U_{ст.}$  стабилитрона, которое мало изменяется при изменении протекающего через него тока, что видно на ВАХ стабилитрона (рисунок 2.18).

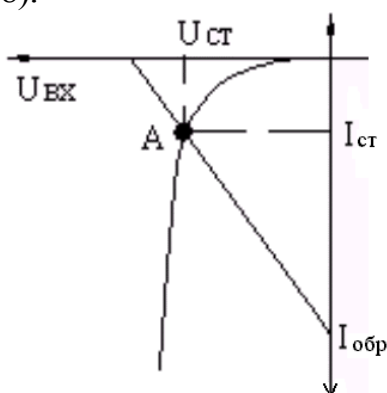


Рисунок 2.18 - Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

В параметрическом стабилизаторе тока используется нелинейный элемент (это может быть полевой или биполярный транзистор), который включают последовательно с нагрузочным устройством (рисунок 2.19).

ВАХ нелинейного элемента показывает, что при изменении напряжения от  $U_{вх1}$  до  $U_{вх2}$  напряжение на нагрузочном элементе изменяется от  $U_{нэ1}$  до  $U_{нэ2}$ , а нагрузочный ток  $I_{н}$  практически не меняется.

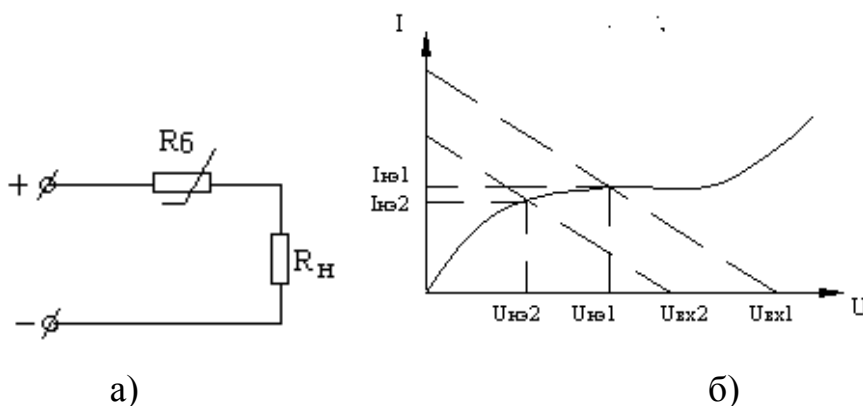


Рисунок 2.19 - Схема параметрического стабилизатора тока (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

### Компенсационные стабилизаторы (КС)

Компенсационные стабилизаторы (КС) постоянных  $U$  и  $I$ , являются системами автоматического регулирования, в которых благодаря наличию отрицательной обратной связи обеспечивается постоянство напряжения  $U$  и тока  $I$  на нагрузочном устройстве с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы непрерывного действия и импульсные.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия представлена на рисунке 2.20.

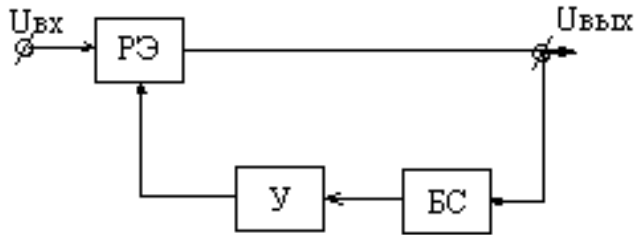


Рисунок 2.20 - Структурная схема КС напряжения непрерывного действия:

БС – блок сравнения; У – усилитель постоянного тока; РЭ – регулирующий элемент

В блок сравнения (БС) входят источник опорного напряжения (параметрический стабилизатор, образованный элементами  $VD$ ,  $R_6$ , и резистивный делитель ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) (рисунок 2.21).

Усилитель постоянного тока (У) образован маломощным транзистором  $VT_2$  и  $R_k$ .

Регулирующий элемент (РЭ) - мощный транзистор  $VT_1$ .

В данном КС происходит непрерывное сравнение  $U_n$  с опорным напряжением  $U_{оп}$ .

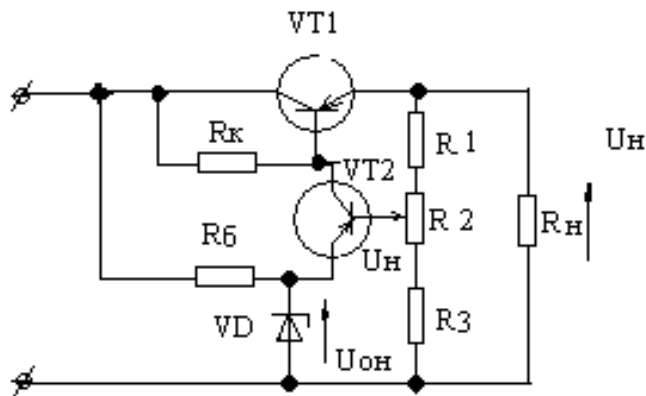


Рисунок 2.21 - Принципиальная электрическая схема КС напряжения непрерывного действия

Схема компенсационного стабилизатора тока почти аналогична схеме КС напряжения, отличие заключается в том, что вместо резистивного делителя, включают переменный резистор  $R_{рег}$  последовательно с сопротивлением  $R_n$ . Сигнал обратной связи, снимаемый с  $R_{рег}$  и пропорциональный изменениям тока  $I_n$ , сравнивается с напряжением  $U_{оп}$  и подается на вход усилителя.

Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения (ИСПН) имеют высокий КПД (0,8...0,85), меньшие габариты и массу. Как и КС непрерывного действия, ИСПН является устройством, в котором применяется отрицательная обратная связь, ослабляющая изменение напряжения  $U_{\text{вых}}$  или тока  $I_{\text{н}}$ .

Отличием ИСПН от компенсационного стабилизатора является работа РЭ – транзистора, который работает в режиме ключа, что дает возможность получить с его выхода однополярные импульсы прямоугольной формы  $U_{\text{кп}}$  (рисунок 2.22).

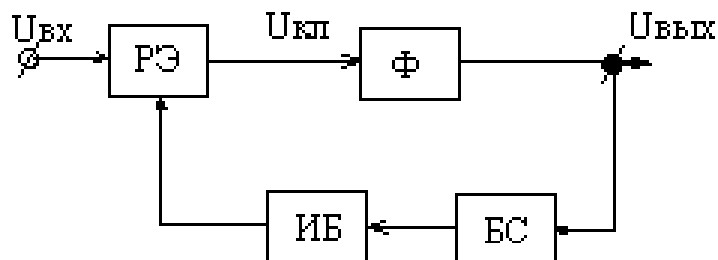


Рисунок 2.22 - Структурная схема ИСПН:

Ф – сглаживающий фильтр; РЭ – регулирующий элемент; БС – блок сравнения;  
ИБ – импульсный блок.

В БС напряжение  $U_{\text{вых}}$  сравнивается с опорным, получающееся при этом разностное напряжение воздействует на ИБ, который вырабатывает управляющие импульсы разной длительности и частоты следования, которые управляют работой РЭ.

#### Тема 2.4. Управляемые выпрямители одно- и трехфазного тока

Управляемые выпрямители – это устройства, которые позволяют плавно изменять значения выпрямленного напряжения [5, 6].

Схема простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя на [тиристор](#) показана на рисунке 2.23.

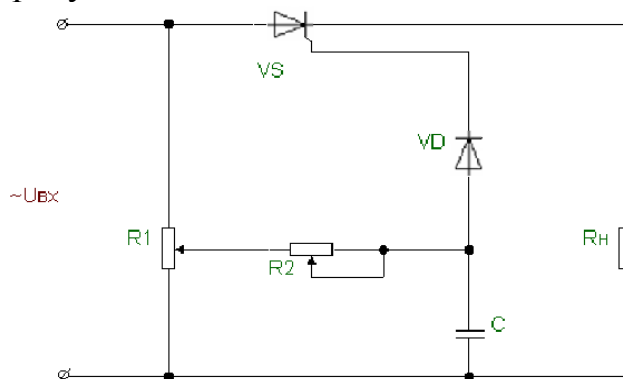


Рисунок 2.23 - Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре

Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают  $\alpha$ , а способ управления называют фазовым (рисунок 2.24).

Управление величиной  $\alpha$  осуществляют с помощью фазовращающей  $R2C$ -цепи. Резистором  $R1$  изменяют напряжение, подаваемое на управляющий электрод тиристора. Диод  $VD1$  обеспечивает подачу на управляющий электрод положительных импульсов.

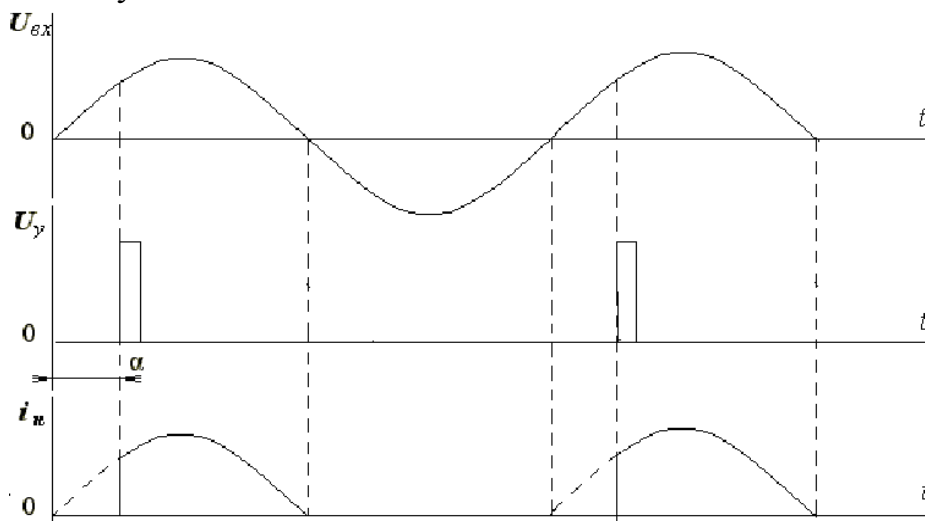


Рисунок 2.24 - Временные диаграммы входного напряжения  $U_{вх}$ , напряжения управления  $U_y$  и тока на нагрузке  $i_n$  для однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

Оптимальной формой управляющих сигналов является короткий импульс с крутым фронтом, который обеспечивает четкое отпирание тиристора. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени используются импульсно-фазовые системы управления.

Однофазный двухполупериодный выпрямитель представлен на рисунке 2.25. В такой схеме тиристоры работают поочередно, на управляющие электроды тиристорov сигналы управления подаются от импульсно-фазового блока управления.

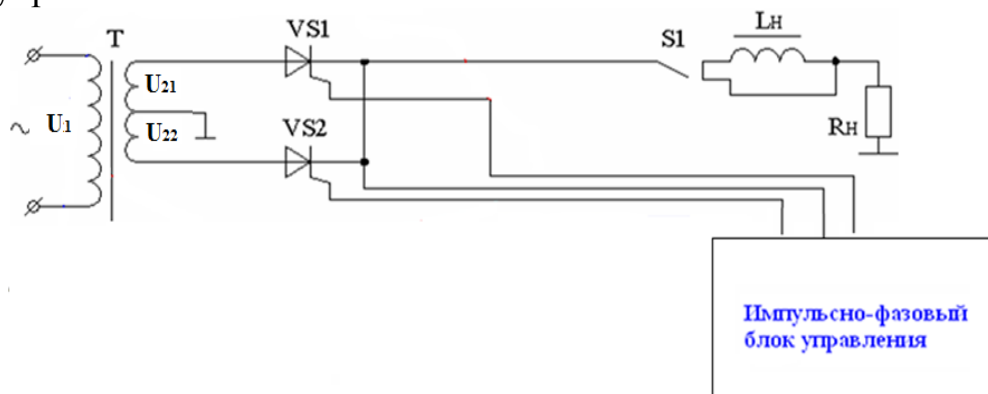


Рисунок 2.25 – Схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя  
Временные диаграммы представлены на рисунке 3.26.



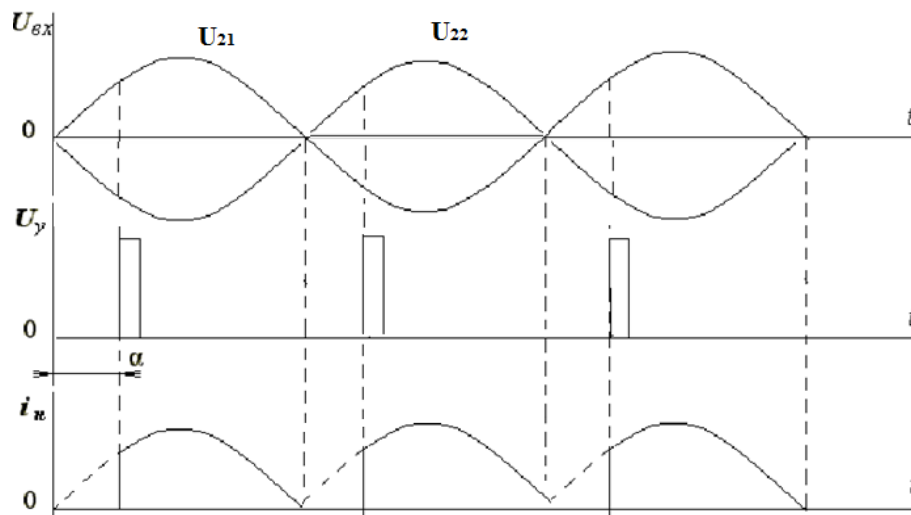


Рисунок 2.26 - Временные диаграммы входного напряжения  $U_{вх}$ , напряжения управления  $U_{\gamma}$  и тока на нагрузке  $i_{н}$  для однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

Основными характеристиками управляемого выпрямителя являются:

а) характеристика управления, которая выражает зависимость выпрямленного напряжения от угла управления  $U_{н}=f(\alpha)$  (рисунок 2.27);

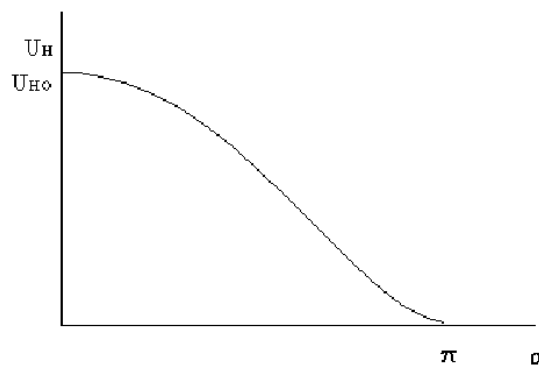


Рисунок 2.27 - Характеристика управления

б) внешние характеристики, которые определяют зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при фиксированных значениях угла  $\alpha$  (рисунок 2.28).

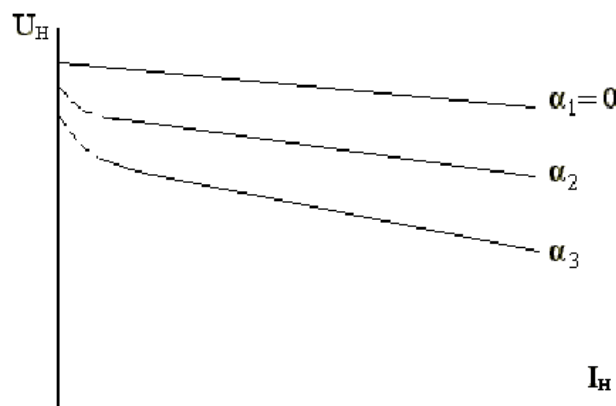


Рисунок 2.28 - Внешние характеристики

Трехфазные управляемые выпрямители [1, 12] являются выпрямителями средней и большой мощности. Различают схему трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом и схему трехфазного мостового выпрямителя.

Трехфазный выпрямитель с нулевым (или нейтральным) выводом (рисунок 2.29) обычно работает на активно-индуктивную нагрузку. Длительность работы тиристоров определяется углом управления  $\alpha$ , значение которого задается импульсно-фазовым блоком управления (ИФБУ). Изменение угла  $\alpha$  приводит к изменению средних значений выпрямленного напряжения  $U_{нср}$  и  $I_{нср}$  тока. Это видно на временных диаграммах при индуктивной нагрузке  $L_n \neq 0$  (рисунок 2.30).

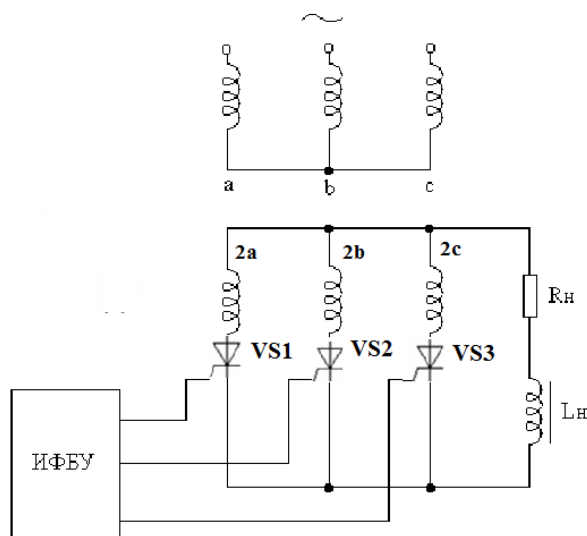


Рисунок 2.29 - Схема трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом

При угле управления  $\alpha < \pi/6$  выпрямленный ток  $i_n$  имеет непрерывный характер и каждый тиристор открыт в течение времени, соответствующего углу  $2/3\pi$ . При угле управления  $\alpha > \pi/6$  в выпрямленном токе  $i_n$  появляются паузы.

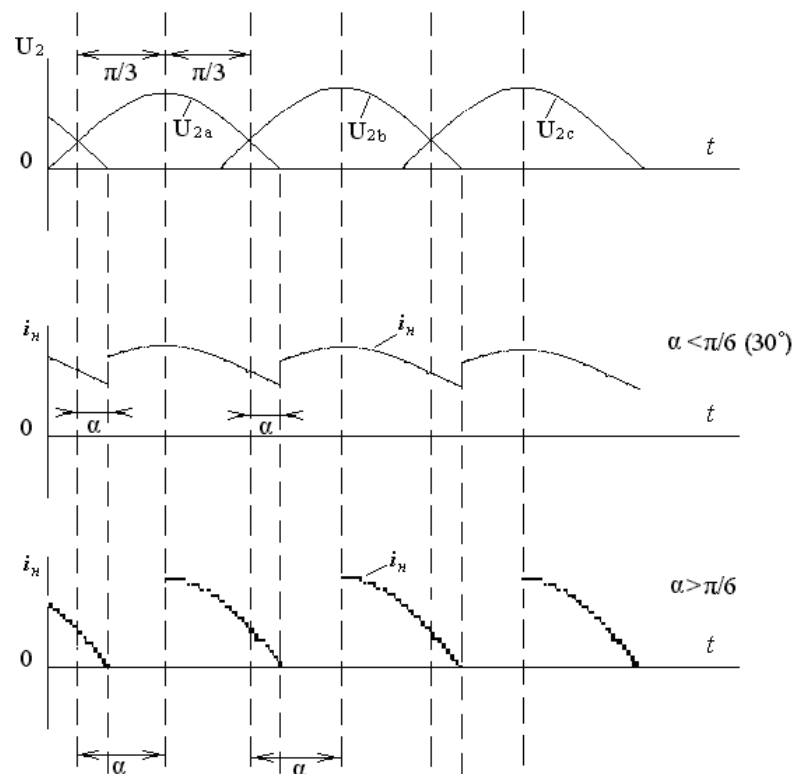


Рисунок 2.30 - Временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

Характеристика управления трехфазного выпрямителя показана на рисунке 2.31, откуда видно, что при  $L_n = 0$  напряжение  $U_{нср}$  равно нулю при  $\alpha = 150^\circ$ . При  $L_n = \infty$ , напряжение на нагрузочном устройстве становится равным нулю при угле управления  $\alpha = 90^\circ$ . Характеристики управления при  $L_n \neq 0$  и  $L_n \neq \infty$  располагаются между этими двумя предельными характеристиками. Нагрузочный ток  $i_n$  при  $L_n = \infty$  будет сглаживаться и иметь непрерывный характер при  $\alpha > \pi/6$ .

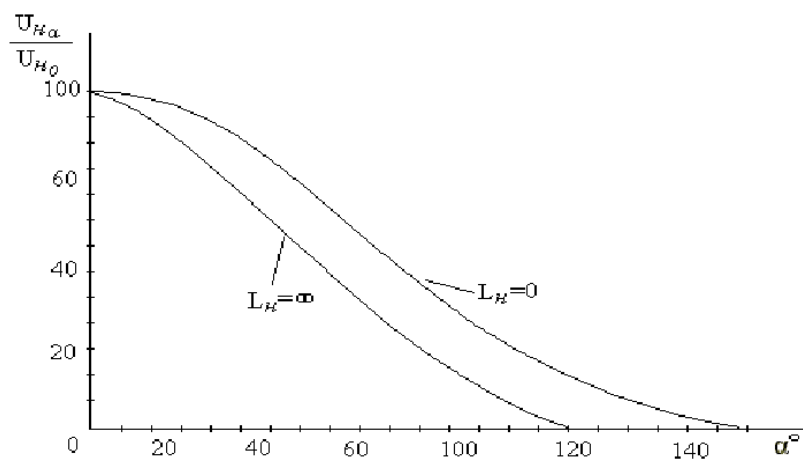


Рисунок 2.31 - Характеристика управления трехфазного выпрямителя

В схему трехфазного мостового управляемого выпрямителя входят шесть тиристоров (рисунок 2.32). Тиристоры  $VS1, VS2, VS3$  объединены в катодную группу, а тиристоры  $VS4, VS5, VS6$  – в анодную группу.

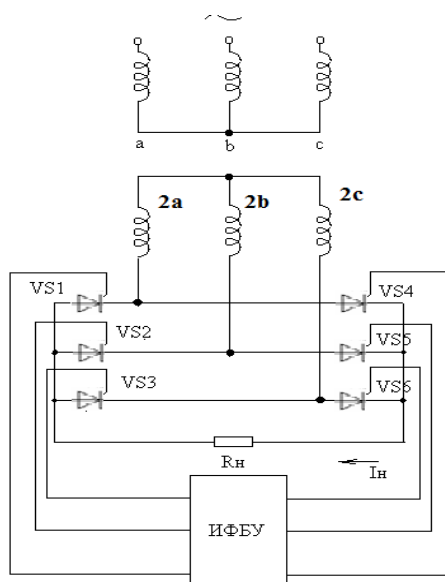


Рисунок 2.32 - Схема трехфазного мостового выпрямителя

Также, как и в неуправляемом выпрямителе здесь одновременно работают два тиристора: один из анодной группы, другой – из катодной. При этом управляющий сигнал, подаваемый на тиристор катодной группы, опережает на  $180^0$  сигнал, поступающий на тиристор анодной группы.

Характеристики управления выглядят так же, как для выпрямителя с нулевым выводом. Отличие лишь в том, что предельным углом управления, при котором  $U_{нсп}=0$ , является угол  $\alpha=120^0$ . Внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей имеют такой же вид, как внешние характеристики неуправляемых выпрямителей.

## Тема 2.5. Инверторы. Импульсные источники питания

Источники вторичного электропитания, которые преобразуют постоянное напряжение в переменное напряжение, называют инверторами [7].

Классификация инверторов проводится по следующим признакам:

- 1) по типу коммутирующих приборов:
  - а) тиристорные;
  - б) транзисторные;
- 2) по принципу коммутации;
  - а) ведомые сетью;
  - б) автономные;
- 3) по роду преобразуемой величины:
  - а) инверторы тока;
  - б) инверторы напряжения;
- 4) по числу фаз:
  - а) однофазные;
  - б) трехфазные.

### 2.4.1 Инверторы, ведомые сетью

Схема тиристорного инвертора представляет собой однофазный двухполупериодный инвертор с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рисунок 2.33).

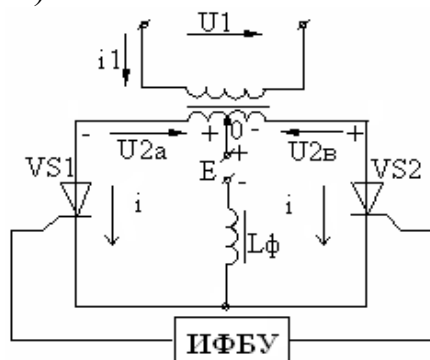


Рисунок 2.33 - Схема тиристорного инвертора

Запирание и отпирание тиристорov происходит под воздействием напряжения вторичной обмотки трансформатора, которое создается сетью переменного тока. Поэтому такой инвертор называют инвертором, ведомым сетью.

Для передачи электроэнергии, вырабатываемой источником  $E$ , в сеть переменного тока необходимо, чтобы ток  $i_1$ , потребляемый от сети, и напряжение  $U_1$  находились в противофазе. Подобный сдвиг возможен в том случае, когда тиристоры будут открываться поочередно при отрицательной полярности напряжений  $U_{2a}$  и  $U_{2b}$  (рисунок 2.34). При этом происходит поочередное подключение вторичных обмоток трансформатора к источнику  $E$ .

$$\alpha=180^0$$

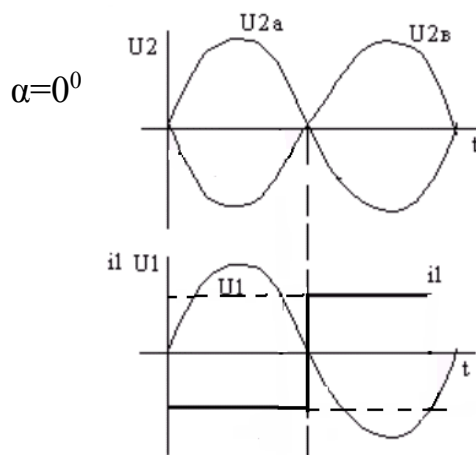


Рисунок 2.34 - Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью

Следует отметить, что, если один тиристор будет отпираться точно при угле управления  $\alpha=180^0$ , то другой тиристор не успеет закрыться. В этом случае запирающийся тиристор создаст короткое замыкание по цепи: вторичная обмотка трансформатора – источник  $E$ . Это явление называют срывом инвертирования или опрокидыванием инвертора. Чтобы исключить этот процесс, необходимо сделать угол  $\alpha < 180^0$  на угол  $\beta$ , который называется углом опережения отпирания (рисунок 2.35).

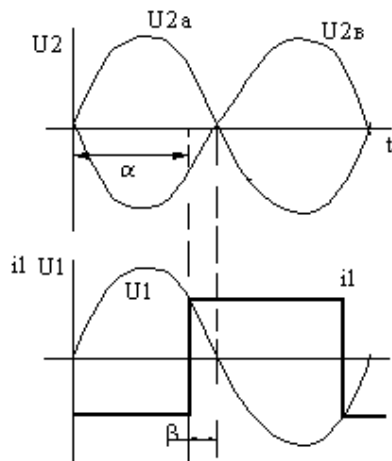


Рисунок 2.35 - Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью при  $\alpha < 180^\circ$  на угол  $\beta$

### **Автономные инверторы**

Автономные инверторы (АИ) осуществляют преобразование постоянного тока в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работают на автономную нагрузку.

АИ подразделяются на следующие виды:

- автономные инверторы тока (АИТ);
- автономные инверторы напряжения (АИН);
- автономные резонансные инверторы (АРИ).

В АИТ источник питания работает в режиме источника тока, что достигается включением в цепь дросселя  $L_0$  (рисунок 2.36).

Тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  открываются поочередно запускающими импульсами, поступающими от ИФБУ с входов «Вх1» и «Вх2».

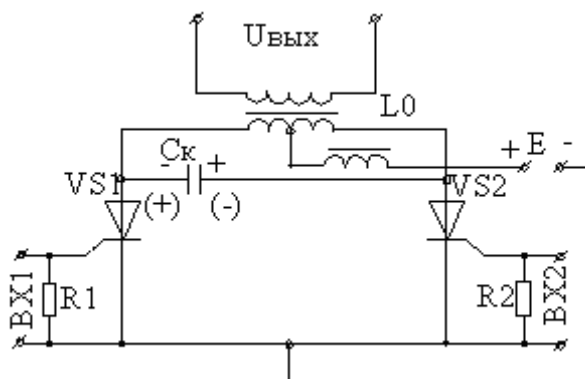


Рисунок 2.36 - Схема автономного инвертора тока

### **Импульсные источники питания**

Импульсные, или ключевые источники электропитания в настоящее время получили широкое распространение. Их основными достоинствами являются:

- высокий коэффициент полезного действия;

- малые габариты и масса;
- высокая удельная мощность.

Все перечисленные свойства эти источники питания получили благодаря применению ключевого режима при работе силовых элементов, когда потери в транзисторе оказываются достаточно малыми. Это приводит к тому, что средняя мощность, рассеиваемая в ключевом транзисторе, оказывается намного меньше, чем в линейном регуляторе.

Улучшение массогабаритных характеристик источника питания обусловлено прежде всего тем, что из схемы источника питания исключается силовой трансформатор, работающий на частоте 50 Гц. Вместо него в схему вводится высокочастотный трансформатор или дроссель, габариты и масса которых намного меньше низкочастотного силового трансформатора.

К недостаткам импульсных источников электропитания обычно относят:

- сложность схемы;
- наличие высокочастотных шумов и помех;
- увеличенные пульсации выходного напряжения;
- большое время выхода на рабочий режим.

Обобщенная структурная схема импульсного источника питания приведена на рисунке 2.37. Она состоит из четырех основных блоков:

- сетевого выпрямителя с емкостным фильтром;
- высокочастотного инвертора выпрямленного напряжения сети;
- устройства управления высокочастотным инвертором (обычно это специализированная микросхема управления);
- выходного высокочастотного выпрямителя с емкостным фильтром.

Высокочастотный инвертор и устройство управления совместно образуют импульсный преобразователь, который может быть индуктивным и емкостным.

Рассмотрим работу ключевого источника питания, пользуясь обобщенной структурной схемой, приведенной на рисунке 2.37.

Гармоническое напряжение сети (50 или 60 Гц) выпрямляется сетевым выпрямителем и заряжает конденсатор фильтра, имеющий достаточно большую емкость, что обеспечивает низкие пульсации выпрямленного напряжения.



Рисунок 2.37 - Структурная схема импульсного источника питания

Это напряжение поступает на вход импульсного преобразователя, который преобразует его в высокочастотные импульсы прямоугольной формы. Частота импульсного напряжения обычно лежит в пределах от 20 до 100 кГц. С увеличением частоты преобразования увеличивается удельная мощность, но одновременно растут потери в элементах преобразователя, что приводит к снижению КПД.

С выхода преобразователя напряжение поступает на высокочастотный выпрямитель с емкостным фильтром.

В большинстве случаев высокочастотный инвертор работает на фиксированной частоте, а регулирование выходного напряжения обеспечивается с помощью широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов. Широтно-импульсное регулирование выполняется при помощи схемы управления, на вход которой подается выходное напряжение. Для обеспечения гальванического разделения выхода от силовой сети в трансформаторных схемах инверторов обычно используются различные типы устройств гальванической развязки: оптроны, трансформаторы, изолирующие усилители и др.

Выпрямители и инверторы используются также для создания устройств для бесперебойного питания аппаратуры (рисунок 2.38).





Рисунок 2.38 - Функциональная схема устройства для бесперебойного питания аппаратуры

## Тема 2.6. Усилители переменного сигнала

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров входного электрического сигнала (напряжения, тока или мощности) за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала (рисунок 2.39).

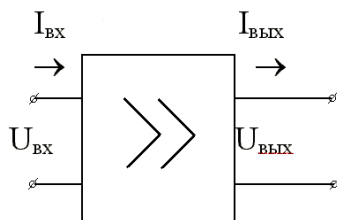


Рисунок 2.39 - К определению параметров усилителя

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: с линейным режимом работы и нелинейным режимом работы.

Усилитель *с линейным режимом работы* обеспечивает на выходе сигнал, близкий по форме к входному. Многие усилители состоят из нескольких ступеней, которые осуществляют последовательное усиление сигнала и называются *каскадами*.

В усилителях *с нелинейным режимом работы* отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями входного и выходного токов  $I$  и напряжения  $U$ . После достижения некоторой величины напряжения входного сигнала напряжение на выходе остается неизменным, т.е. ограничивается на некотором уровне. Такие усилители нашли применение в устройствах для преобразования синусоидального сигнала в импульсный.

Усилители *с линейным режимом работы* классифицируются:

1) в зависимости от параметра, который необходимо усилить:

- усилители напряжения,
- усилители тока,
- усилители мощности;

2) по элементной базе:

- ламповые усилители,
- усилители на биполярных транзисторах,
- усилители на полевых транзисторах.

3) по диапазону усиливаемых частот:

- усилители постоянного тока (УПТ),
- усилители переменного тока: усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ, УЗЧ); усилители высокой частоты (УВЧ); широкополосные усилители (ШПУ); избирательные усилители (ИУ).

4) по способу соединения каскадов между собой в многокаскадном усилителе:

- усилители с непосредственной (гальванической) или резистивной связью (используется в УПТ),
- усилители с резистивно-емкостной связью (используется в усилителях переменного напряжения: УНЧ, УВЧ, ШПУ),
- усилители с трансформаторной связью (используется в усилителях мощности).

*Основные параметры усилителя:*

- 1) коэффициент усиления по напряжению:  $K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$ ;
- 2) коэффициент усиления по току:  $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$ ;
- 3) коэффициент усиления по мощности:  $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_u K_I$ ;
- 4) входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$ ;
- 5) выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$ ;
- 6) полоса пропускания усилителя  $\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}}$ , где  $f_{\text{В}}$  и  $f_{\text{Н}}$  верхняя и нижняя граничные частоты, которые определяются на уровне 0,707 от  $K_{u\text{cp}}$  (т.е. коэффициент усиления на  $f_{\text{В}}$  и  $f_{\text{Н}}$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз).

*Основные характеристики усилителя:*

- 1) амплитудная характеристика (АХ), выражает зависимость выходного напряжения от входного  $U_{\text{ВЫХ},m} = f(U_{\text{ВХ},m})$  (рисунок 2.40, а);
- 2) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $K_u = f(f)$ , отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты (рисунок 2.40, б);
- 3) фазо-частотная характеристика (ФЧХ)  $\varphi = f(f)$ , отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала (рисунок 2.40, в).



Рисунок 2.40. - Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная; в – фазо-частотная

Амплитудная характеристика имеет линейный участок, где наблюдается пропорциональная зависимость между  $U_{\text{ВХ},m}$  и  $U_{\text{ВЫХ},m}$ . Шумы в усилителе и другие помехи приводят к тому, что при  $U_{\text{ВХ}}=0$  на выходе усилителя имеется некоторое напряжение. При  $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ},\text{макс}}$  пропорциональность между входным и выходным напряжениями нарушается из-за нелинейности ВАХ транзистора, что приводит к ограничению амплитуды выходного сигнала и искажению его формы. Такие искажения называются нелинейными.

Таким образом, АХ условно можно разделить на два участка:

- линейный, где наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала;
- нелинейный, где пропорциональная зависимость нарушается.

Такие искажения выходного сигнала, которые возникают ввиду нелинейности входных и выходных ВАХ транзисторов, называют нелинейными и оцениваются коэффициентом нелинейных искажений [6]:

$$k = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} \cdot 100\%$$

где

$P_1$  – мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения;

$P_2, P_3, P_4, \dots$  - мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-ой, 3-ей, 4-ой и т.д. гармонических составляющих напряжения.

Частотные искажения сигнала на АЧХ обусловлены наличием в схеме усилительного каскада частотно-зависимых элементов (емкостей). Уменьшение  $K_u$  в области нижних и верхних частот (на частотах меньше  $f_n$  и больше  $f_v$ ) определяется частотными искажениями сигнала. Количественно эти искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M_n = M_v = K_{u\text{ ср}} / K_{u\text{ н(в)}} \approx \sqrt{2},$$

где  $K_{u\text{ ср}}$  – коэффициент усиления в области средних частот.

Появление фазового сдвига на ФЧХ объясняется задержкой сигнала в усилителе. ФЧХ усилителя показывает, что в области нижних частот выходное напряжение опережает по фазе входное, а в области верхних частот отстает от него. В предельных случаях при  $f \rightarrow 0$  и  $f \rightarrow \infty$  угол сдвига фаз стремится к  $\pi/2$  и  $-\pi/2$  соответственно. Фазовые и частотные искажения сигнала, вносимые усилителем, называют линейными искажениями, так как обусловлены линейными элементами схемы и не приводят к искажению формы выходного сигнала.

### Принцип построения усилительных каскадов

Рассмотрим структурную схему [3, 5] (рисунок 2.41).

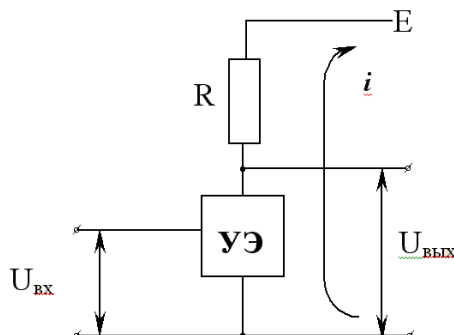


Рисунок 2.41 - Структурная схема усилителя

Основными элементами каскада являются усилительный элемент УЭ, которым является биполярный или полевой транзистор (или лампа), резистор  $R$  и источник питания  $E$  [2].

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения  $E$  в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, который задается входным сигналом.

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов является каскад с общим эмиттером ОЭ (рисунок 2.42).

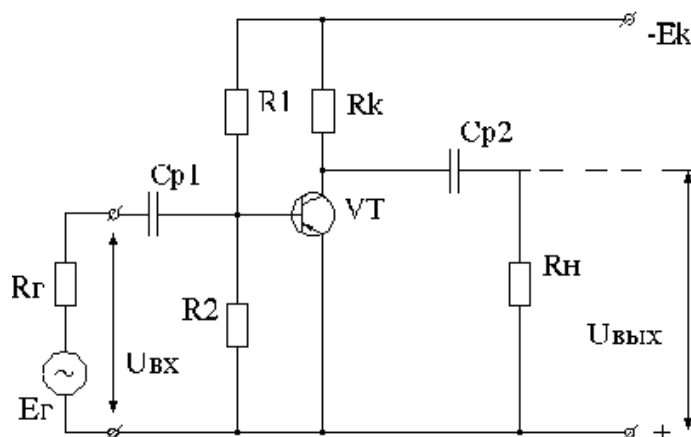


Рисунок 2.42 - Схема усилительного каскада с ОЭ

**Основные элементы схемы:**

- источник питания  $E_K$  («+»  $E_K$  для  $n-p-n$ , «-»  $E_K$  для  $p-n-p$ );
- биполярный транзистор  $n-p-n$  типа ( $VT$ );
- сопротивление в цепи коллектора  $R_K$ , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор  $C_{P1}$ , который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор  $C_{P2}$ , не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения  $R1/R2$ , включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т.е. в отсутствие входного сигнала.

**Особенности многокаскадных усилителей**

В многокаскадных усилителях число каскадов зависит от требуемых значений коэффициентов усиления  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_P$ . Чем больше необходимо получить коэффициент усиления, тем больше количество каскадов последовательно соединенных между собой. Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рисунке 2.43.

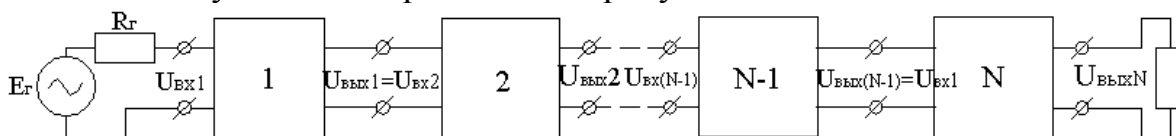


Рисунок 2.43 - Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_H}{E_T} = \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{E_T} \cdot \frac{U_{\text{ВХ2}}}{U_{\text{ВХ1}}} \cdot \frac{U_{\text{ВХ3}}}{U_{\text{ВХ2}}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{\text{ВХN}}}{U_{\text{ВХN-1}}}$$

Следует отметить, что с увеличением числа каскадов коэффициент частотных искажений увеличивается:  $M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n$  и, как следствие,  $\Delta f$  усилителя уменьшается.

Угол фазового сдвига в многокаскадном усилителе равен сумме углов фазовых сдвигов, создаваемых всеми конденсаторами в схеме:  
 $\varphi_H = \varphi_{\text{HP1}} + \varphi_{\text{HP2}} + \dots + \varphi_{\text{HPn}}$

## Тема 2.7. Обратные связи в усилителях

Обратной связью (ОС) в усилителях называют подачу части (или всего) выходного сигнала усилителя на его вход. Цепь, по которой осуществляется такая передача энергии, называется *цепью обратной связи*.

Виды обратных связей (ОС):

1. Специально созданные ОС, которые применяются для улучшения характеристик усилителя.
2. Паразитные ОС, которые возникают самопроизвольно и ухудшают характеристики усилителя.
3. По принципу действия:
  - ОС по напряжению:  $U_{\text{OC}} = \beta U_{\text{ВЫХ}}$ ;
  - ОС по току:  $U_{\text{OC}} = R_{\text{OC}} i_{\text{ВЫХ}}$ ;
  - комбинированная ОС (как по току, так и по напряжению).
4. В зависимости от способа подачи ОС на вход усилителя:
  - последовательная ОС (рисунок 2.6, а);
  - параллельная ОС (рисунок 2.6, б).
5. В зависимости от воздействия ОС:
  - положительная ОС (ПОС), когда  $U_{\text{ВХ}}$  складывается с  $U_{\text{OC}}$ , в результате чего на усилитель подается увеличенное напряжение  $U_y$ ;
  - отрицательная ОС (ООС), когда из  $U_{\text{ВХ}}$  вычитается  $U_{\text{OC}}$ , в результате чего напряжения на входе  $U_y$  и выходе  $U_{\text{ВЫХ}}$  усилителя уменьшаются.

Структурная схема усилителя с ОС состоит из 2-х блоков: непосредственно усилителя с коэффициентом усиления  $K_u$  и звена ОС, которое характеризуется коэффициентом передачи  $\beta$  (рисунок 2.44).

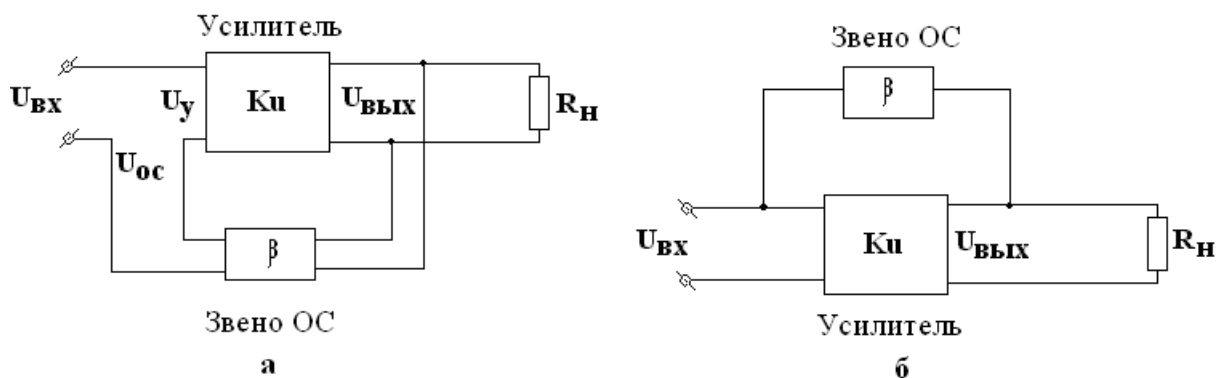


Рисунок 2.44 - Структурная схема усилительного каскада с последовательной ОС (а) и с параллельной ОС (б)

Наиболее часто в усилителях применяют отрицательную ОС. Влияние ООС (последовательной по напряжению) на коэффициент усиления усилителя определяется следующим образом. В соответствии со структурной схемой (рис. 2.44, а):

$$U_y = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}},$$

так как  $U_{\text{ос}} = \beta \cdot U_{\text{вых}}$ ,

$$\text{то } U_{\text{вх}} = U_{\text{ос}} + U_y = U_y + \beta \cdot U_{\text{вх}}.$$

Для усилителя без ОС:

$$U_{\text{вх}} = U_y, \text{ а } K_u = U_{\text{вых}}/U_y.$$

Для усилителя с ОС:

$$K_{\text{ос}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} / (U_y + \beta \cdot U_{\text{вых}}).$$

Разделив числитель и знаменатель на напряжение  $U_y$ , получим:

$$K_{\text{ос}} = K_u / (1 + \beta \cdot K_u),$$

т.е. коэффициент усиления по напряжению усилителя с отрицательной обратной связью (ООС) уменьшается. Несмотря на снижение коэффициента  $K_u$ , ООС улучшает свойства усилителя:

1) увеличивается входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  и уменьшается выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  усилителя:

$$R_{\text{вхос}} = R_{\text{вх}}(1 + \beta \cdot K_u),$$

$$R_{\text{выхос}} = R_{\text{вых}} / (1 + \beta \cdot K_u).$$

2) расширяется полоса пропускания усилителя  $\Delta f$  (рисунок 2.45)

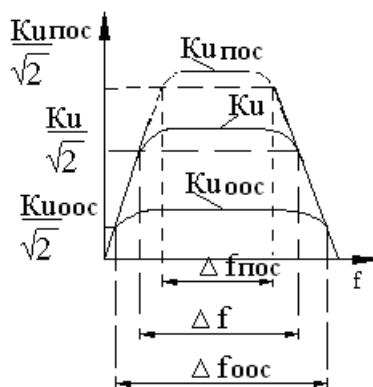


Рисунок - 2.45 - АЧХ усилительного каскада с различными видами ОС

3) снижается уровень нелинейных искажений;

4) повышается стабильность коэффициента усиления усилителя при изменениях параметров транзисторов.

Параллельная ООС приводит к увеличению входного тока  $I_{вх}$ , в связи с чем уменьшается сопротивление  $R_{вхОС}$  усилителя и сопротивление  $R_{выхОС}$ :

$$R_{вхОС} = (U_{вх} - U_y) / I_{вх},$$

$$R_{выхОС} = R_{вых} / (1 + \beta \cdot K_u).$$

Положительная обратная связь (ПОС) в усилителях обычно нежелательна, однако она может возникать произвольно, например, через общие цепи питания усилительных каскадов.

## Тема 2.8. Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. При повышении температуры транзистора за счет возрастания числа неосновных носителей заряда в полупроводнике увеличивается  $I_k$ . Это приводит к изменению коллекторных характеристик транзистора. При увеличении тока  $I_k$  на величину  $\Delta I_k$  коллекторное напряжения уменьшается на  $\Delta U_k = R_k \Delta I_k$  (рисунок 2.46).

Это вызывает смещение рабочей точки на коллекторной и переходной характеристиках (из П1 в П2). В некоторых случаях повышение температуры может вывести рабочую точку за пределы линейного участка переходной характеристики и нормальная работа усилителя нарушится.

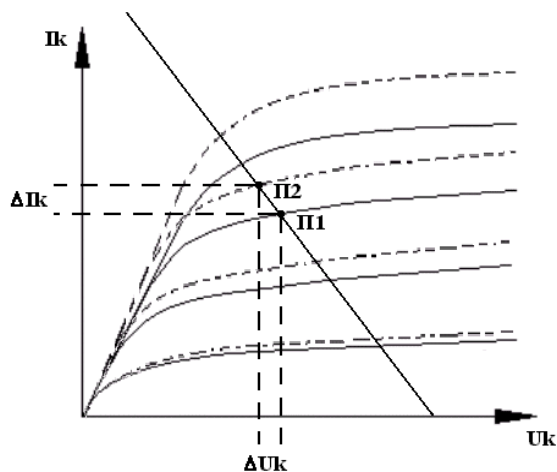


Рисунок 2.46 - Зависимость характеристик транзистора от температуры

Поэтому для температурной стабилизации усилителей используются специальные способы:

- а) эмиттерная стабилизация;
- б) коллекторная стабилизация.

### Эмиттерная температурная стабилизация

Для уменьшения влияния температуры на характеристику усилительного каскада с ОЭ в цепь эмиттера включают резистор  $R_э$ , шунтированный конденсатором (рис. 2.47).



Напряжение  $U_{бэ}$  зависит от сопротивления резисторов и определяется уравнением:

$$U_{бэ} = E_k R_2 / (R_1 + R_2) - R_3 I_3$$

где

первый член уравнения есть потенциал базы, а второй - потенциал эмиттера.

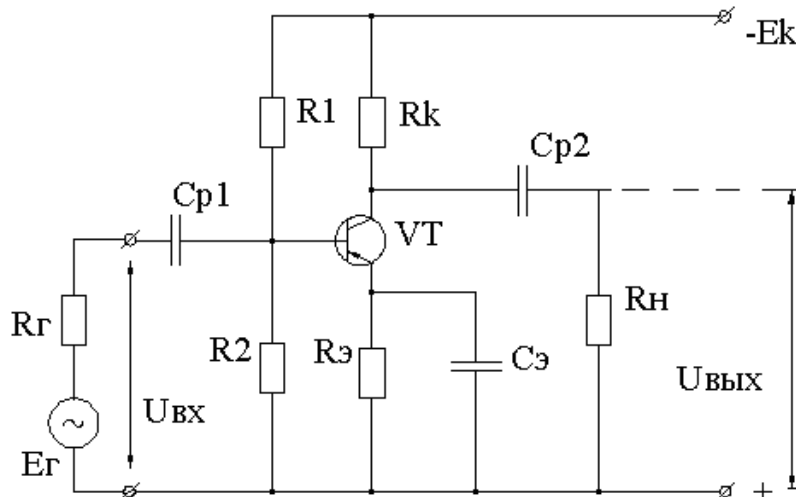


Рисунок 2.47 - Схема УК с эмиттерной температурной стабилизацией

При наличии  $R_3$  увеличение эмиттерного тока  $I_3 = I_б + I_к$  из-за повышения температуры приводит к возрастанию падения напряжения на сопротивлении  $R_3$ . Это вызывает снижение потенциала базы по отношению к потенциалу эмиттера, т.е. напряжение  $U_{бэ}$  уменьшается, а, следовательно, уменьшаются токи  $I_3$  и  $I_к$ .

Однако введение сопротивления  $R_3$  изменяет работу усилительного каскада. Переменная составляющая эмиттерного тока  $i_3$  создает на резисторе дополнительное падение напряжения  $U_3 = R_3 i_3$ , которое уменьшает усиливаемое напряжение, подводимое к транзистору:

$$U_{бэ} = U_{ввых} - R_3 i_3$$

Коэффициент усиления усилительного каскада при этом будет уменьшаться. Это явление называется отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС параллельно сопротивлению  $R_3$  включают емкость  $C_3$ , сопротивление которой намного меньше  $R_3$ .

Недостатком эмиттерной стабилизации является необходимость повышения напряжения питания коллекторной цепи, т.к. при включении сопротивления  $R_3$  напряжение  $U_к$  уменьшается за счет падения напряжения на сопротивлении  $R_3$ .

### Коллекторная температурная стабилизация

При этом способе стабилизации напряжение обратной связи подается из коллекторной цепи в цепь базы с помощью резистора  $R_б$  (рисунок 2.48).

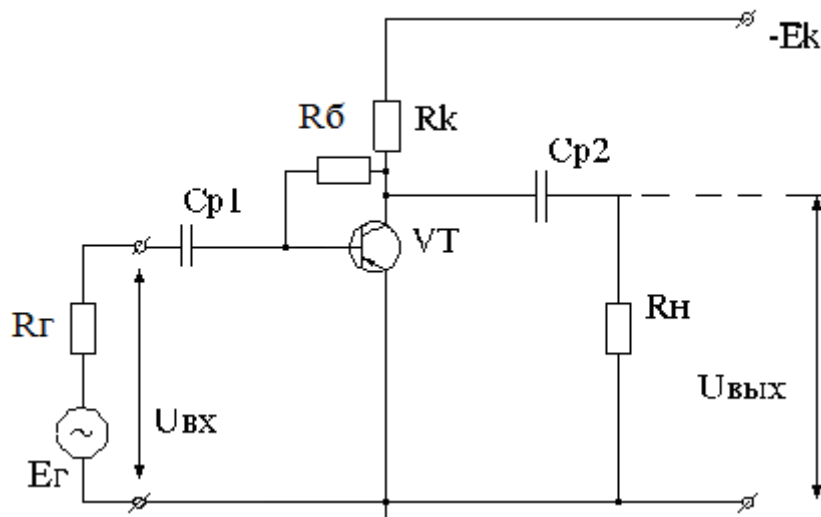


Рисунок 2.48 - Схема УК с коллекторной температурной стабилизацией

При повышении температуры ток  $I_k$  увеличивается, а напряжение  $U_k$  уменьшается. Это приводит к снижению потенциала базы, и, как следствие, к уменьшению токов  $I_b$  и  $I_k$ , который стремится к своему первоначальному значению. В результате ток  $I_k$  и напряжение  $U_k$  изменяются незначительно:

$$U_{кэ} = U_{R_6} + U_{бэ};$$

$$U_{бэ} \downarrow = U_{кэ} \downarrow - U_{R_6}$$

так как  $U_{R_6} = \text{Const}$ ;

Усилитель с коллекторной стабилизацией обладает меньшей стабильностью, чем усилитель с эмиттерной стабилизацией, но он не требует повышения напряжения питания коллекторной цепи [1].

### Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления)

В зависимости от положения рабочей точки в режиме покоя на характеристиках транзисторов, а также значения усиливаемого напряжения различают 3 основных режима работы усилительных каскадов (или классов усиления: **A, B, C**) [2, 4].

Основными характеристиками этих режимов являются:

- а) нелинейные искажения;
- б) коэффициент полезного действия (КПД).

Режим **A** характеризуется тем, что рабочую точку  $\Pi$  в режиме покоя выбирают на линейном участке (обычно посередине) входной и переходной характеристик и, соответственно, посередине линии нагрузки на семействе выходных характеристик (рисунок 2.49). В этом случае нелинейные искажения усиливаемого напряжения будут минимальными. Благодаря этому режим **A** широко применяют в усилителях напряжения. Однако он имеет и существенный недостаток – очень низкий КПД.

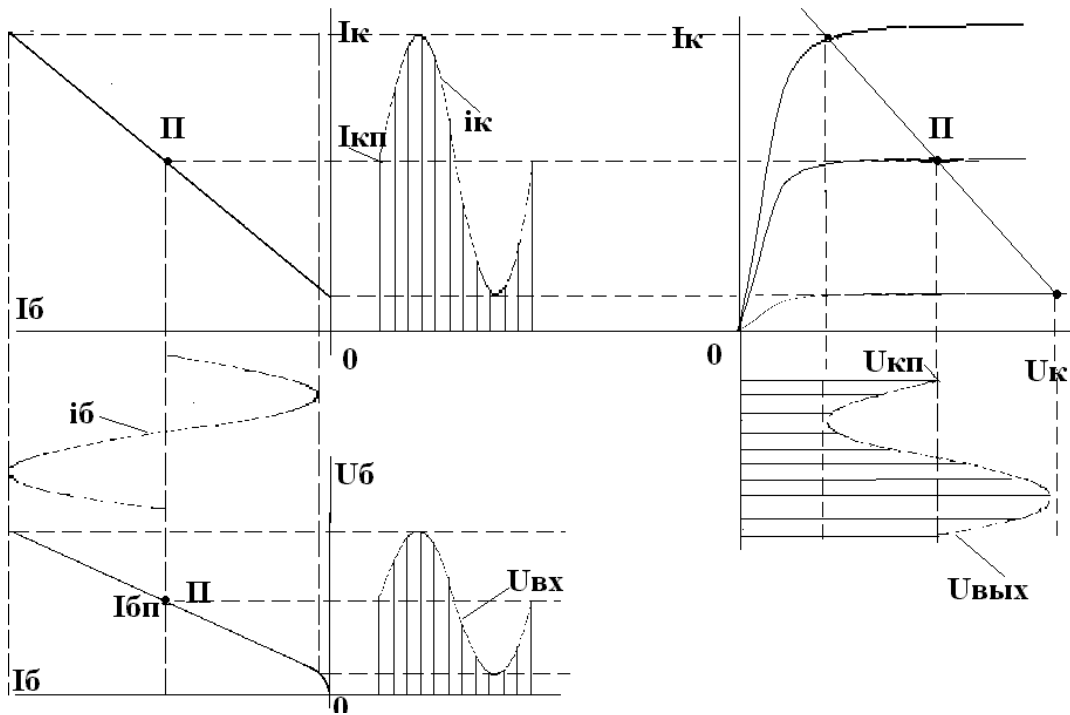


Рисунок 2.49 - Положение рабочей точки в режиме А на характеристиках УК

Значение КПД усилительного каскада в режиме А всегда меньше 0,5 (обычно оно редко превышает 0,3). Используется такой режим в усилителях напряжения.

Режим В характеризуется тем, что рабочую точку П1 выбирают в начале переходной характеристики (точка отсечки П1 на рисунке 2.50).

В режиме В переменные составляющие тока I и напряжения U транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения, т.е. появляются большие нелинейные искажения. Режим В характеризуется значительно более высоким КПД усилителя по сравнению с режимом А, т.к.  $I_{кп} \gg I_0$ . КПД усилителя в режиме В может достигать 80%. Поэтому режим В используется обычно в усилителях мощности [2].

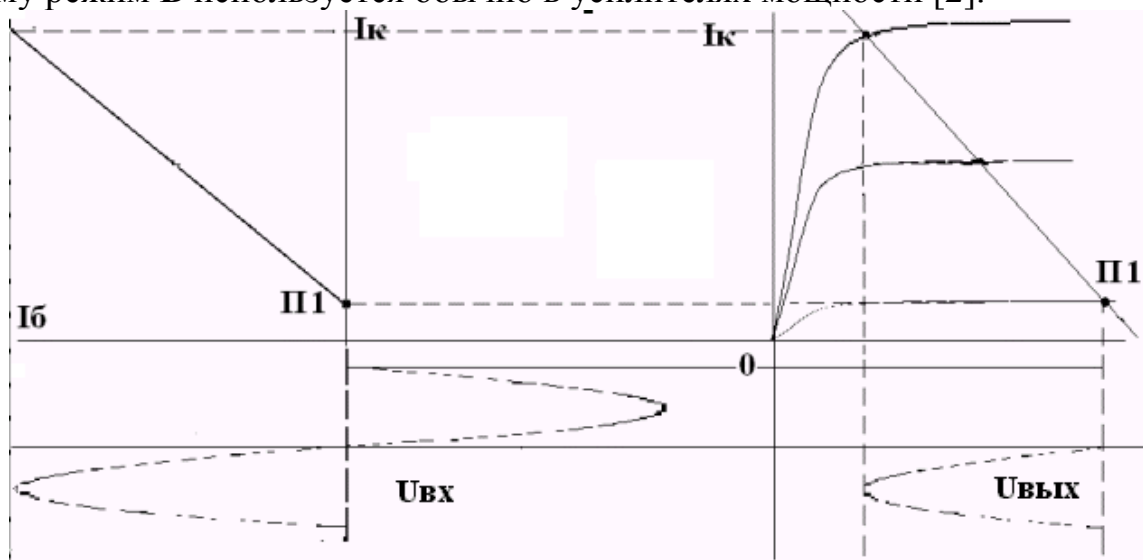


Рисунок 2.50 - Положение рабочей точки в режиме В на характеристиках УК

Режим С характеризуется тем, что рабочую точку П2 выбирают за точкой отсечки и ток в транзисторе возникает только в некоторой части положительного полупериода входного напряжения (рисунок 2.51).

Этот режим сопровождается большими искажениями усиливаемого напряжения, но значение КПД может быть очень высоким и приближаться к единице. Режим С применяют в избирательных усилителях и автогенераторах [3, 6].

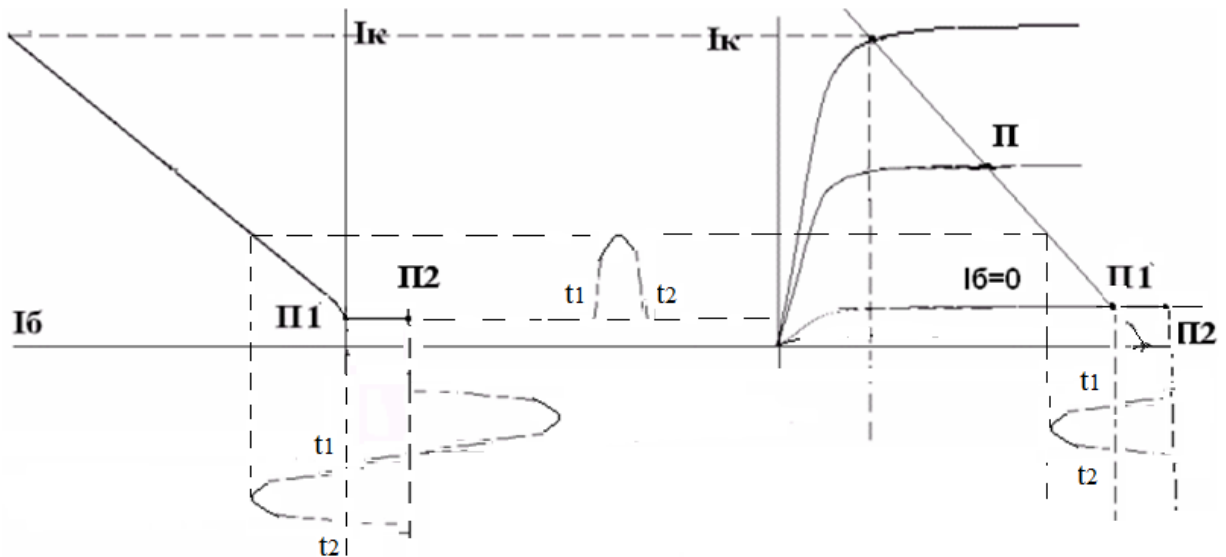


Рисунок 2.51 - Положение рабочей точки в режиме С на характеристиках УК

## Тема 2.9. Усилители мощности

Усилительные каскады, обеспечивающие получение максимальной мощности в нагрузочном устройстве, называются усилителями мощности

### Особенности и классификация усилителей мощности

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

1. По элементной базе:
  - УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме ОЭ, ОК, ОБ;
  - УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.
2. По используемому классу усиления:
  - однотактные (используют режим А);
  - двухтактные (используют режим В или АВ).
3. По способу подключения нагрузки:
  - трансформаторные;
  - бестрансформаторные: с двумя источниками питания и с одним источником питания.

### Основные параметры УМ:

- 1) коэффициент усиления по мощности  $K_p$ ;
- 2) выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ , для получения максимальной мощности в нагрузочном устройстве  $R_{\text{вых}}=R_{\text{н}}$ ;
- 3) КПД (зависит от класса усиления).

Расчет основных величин, характеризующих показатели работы УМ, проводят обычно графоаналитическим методом, с помощью характеристик транзистора. В УМ нашли применение три класса усиления А, АВ, В, отличающиеся положением точки покоя на линии нагрузки [7]. На рисунке 2.52 приведен пример коллекторных характеристик транзистора с ОЭ, на которые нанесены рабочие точки в режимах А и В.

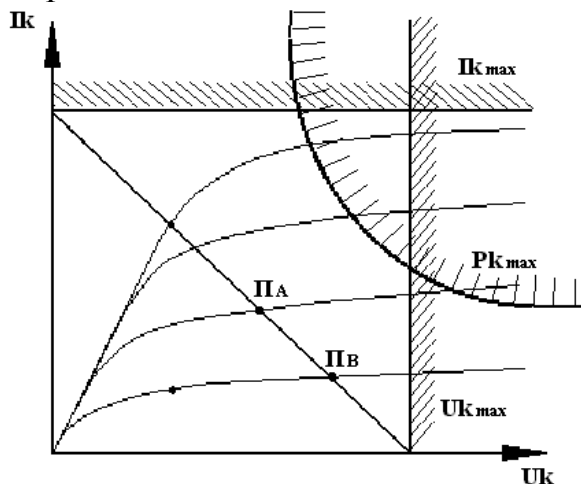


Рисунок 2.52 - Для расчета параметров УМ

В режиме класса А точка покоя ПА будет находиться на нагрузочной прямой ( $U_k = E_k$ ;  $I_k = E_k/R_k$ ;  $U_k = 0$ ) и соответствовать середине линейного участка переходной характеристики, где можно получить оптимальные значения тока базы и напряжения между базой и эмиттером.

В режиме класса В точка покоя ПВ располагается в крайней правой части линии нагрузки при напряжении  $U_{бэ} = 0$ . При наличии входного сигнала ток  $I_k$  транзистора протекает только в положительный полупериод. Т.к. чаще всего в УМ используют УК с общим эмиттером, то на семейство коллекторных характеристик можно нанести линии, соответствующие предельными режимами работы, которые, в свою очередь, определяются предельными эксплуатационными величинами (рисунок 2.52):

- максимальная мощность  $P_{max} = P_{kmax}$ ;
- максимальное напряжение  $U_{кэmax}$ ;
- максимальный ток коллектора  $I_{kmax}$ .

Площадь треугольника  $MQN$ , образованного линией нагрузки и линиями, параллельными осям координат и проведенными из точек  $M$  и  $N$ , будет пропорциональна мощности  $P_{max}$ , которую можно получить от транзистора в заданных условиях.

Коэффициент усиления по мощности находят по формуле:

$$K_p = P_k / P_b,$$

где  $P_b = 0,5 U_{бм} I_{бм}$ , а  $P_k = 0,5 U_{кэmax} I_{кmax}$ .

Если в результате расчета окажется, что получаемая в нагрузочном резисторе мощность меньше требуемой, то необходимо использовать более мощный транзистор.

## Однотактный трансформаторный усилитель мощности

Однотактный УМ используется для получения небольших мощностей (рисунок 2.53).

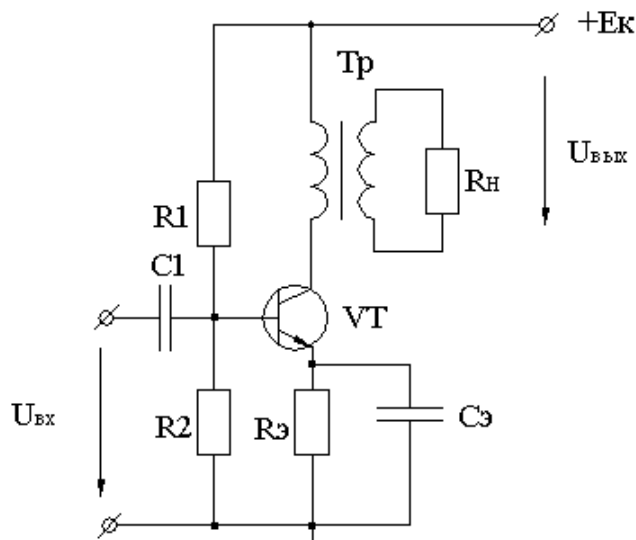


Рисунок 2.53 - Однотактный трансформаторный УМ

### Назначение элементов

1) понижающий трансформатор ставят для согласования сопротивлений  $R_H$  и  $R_{\text{вых}}$  усилителя мощности с коэффициентом  $n=w_1/w_2=\sqrt{R_{\text{вых}}/R_H}$ , где  $w_1$  и  $w_2$  - число витков первичной и вторичной обмоток. Это значит, что при определенном  $n$  можно добиться равенства  $R_{\text{вых}}=R_H$ , т.е. выполнить условие получения  $P_{\text{max}}$  в нагрузочном устройстве;

2) делитель  $R1/R2$  фиксирует по постоянному току потенциал базы;

3) сопротивление  $R_э$  - элемент эмиттерной температурной стабилизации;

4) разделительный конденсатор  $C_p$ , который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току.

Однотактный УМ работает в режиме усиления класса А и усиление входного сигнала происходит за один такт работы транзистора.

## Двухтактный трансформаторный усилитель мощности

Двухтактный УМ состоит из двух симметричных «плеч» (рисунок 2.54). Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , которые подбирают с максимально близкими характеристиками, работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе «плеч» УМ является противофазность токов и напряжений в цепях баз транзисторов.

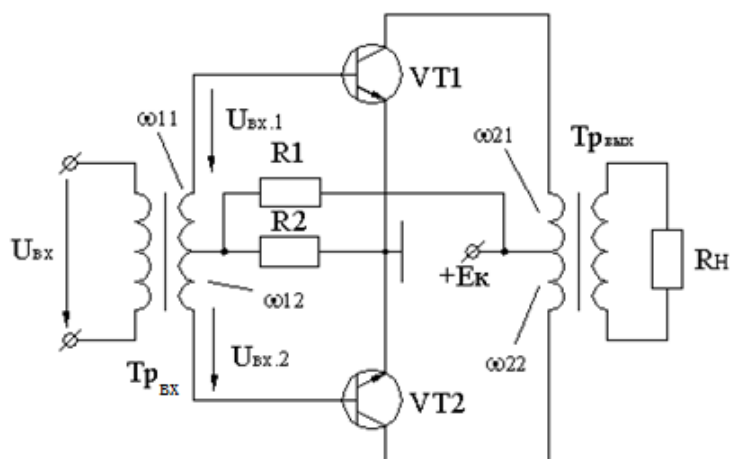


Рисунок 2.54 - Двухтактный трансформаторный УМ

Назначение элементов двухтактного УМ аналогично назначению соответствующих элементов однократного УМ с учетом того, что они обслуживают два транзистора. Входной трансформатор  $Tr_{вх}$  обеспечивает получение двух одинаковых по модулю, но противофазных напряжений  $U_{вх.1}$  и  $U_{вх.2}$ . Выходной трансформатор  $Tr_{вых}$  суммирует переменные выходные тока и напряжения транзисторов. К вторичной обмотке  $Tr_{вых}$  подключен нагрузочный резистор. Преимущества двухтактных усилителей наиболее ощутимы при использовании режима В.

При подаче входного сигнала начинающегося с положительной полуволны, на вторичной обмотке  $\omega_{11}$  за счет самоиндукции  $Tr_{вх}$  действует отрицательная полуволна относительно общей точки обмоток, а на вторичной обмотке  $\omega_{12}$  действует положительная полуволна. В результате  $VT2$  остается закрытым, а  $VT1$  открывается и через него течет коллекторный ток  $i_{к1}$ . В обмотке  $\omega_{21}$   $Tr_{вых}$  создается напряжение  $U_{21}$ , на нагрузке опять же за счет самоиндукции действует положительная полуволна.

При поступлении на вход каскада отрицательной полуволны напряжения, полярность напряжений на вторичных обмотках  $Tr_{вх}$  изменяется на обратную. Теперь закрытым остается транзистор  $VT1$ , а в усилении сигнала будет участвовать  $VT2$ . На обмотке  $\omega_{22}$   $Tr_{вых}$  от протекания  $i_{к2}$  от  $VT2$  создается напряжение той же величины, которое будет трансформироваться в нагрузочную обмотку  $\omega_{н}$  с обратной полярностью. На нагрузке получим отрицательную полуволну напряжения.

Таким образом, процесс усиления входного сигнала осуществляется в два такта работы схемы. Первый такт сопровождается усилением одной полуволны с участием одного транзистора, а второй такт – усилением другой полуволны с участием другого транзистора [3].

### Бестрансформаторные усилители мощности

Двухтактные каскады усиления мощности выполняют и без использования трансформаторов, что обусловлено необходимостью уменьшения массы, габаритов и стоимости УМ.

Собирают такой УМ из транзисторов разных типов (рисунок 2.55), где транзистор  $VT1$ -типа  $p-n-p$ , а транзистор  $VT2$ -типа  $n-p-n$ .

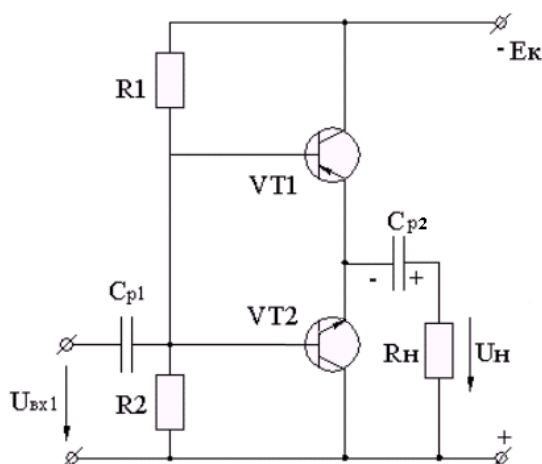


Рисунок 2.55 - Бестрансформаторный УМ

Конденсатор  $C_{p1}$  разделяет по постоянному току источник сигнала и входную цепь усилителя мощности. Конденсатор  $C_{p2}$  разделяется по току нагрузочный резистор и эмиттерные цепи транзисторов. На базы транзисторов действует одно и то же переменное напряжение  $U_{вх}$ . Однако, в силу различной структуры транзисторов токи в цепях противофазные. Нагрузочный резистор подключен к общей точке транзисторов, поэтому переменные токи в нем имеют одинаковое направление, а результирующий ток в два раза превышает переменный ток одного транзистора.

Существуют схемы бестрансформаторных усилителей мощности, где на входе используются два противофазных сигнала, которые создаются с помощью предвыходного фазоинверсного каскада. Эти схемы различаются двумя способами подключения нагрузки к выходу каскада и, соответственно, двумя способами осуществления питания схемы [1].

При первом способе каскад питают от двух источников  $E_{к1}$  и  $E_{к2}$ , имеющих общую точку, а нагрузку подключают между точкой соединения эмиттера и коллектора транзисторов и общей точкой источников питания (рисунок 2.56).

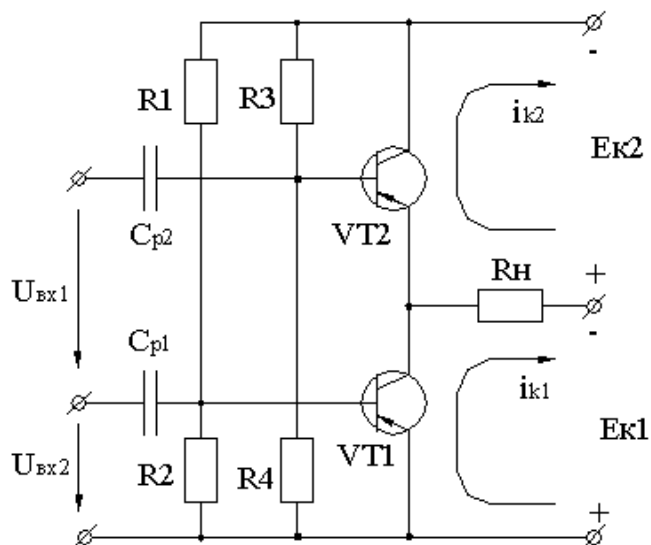


Рисунок 2.56 - Бестрансформаторный УМ с двумя источниками питания



При втором способе питание каскада осуществляется от одного общего источника, а нагрузку подключают через конденсатор большой емкости (рисунок 2.57) [2].

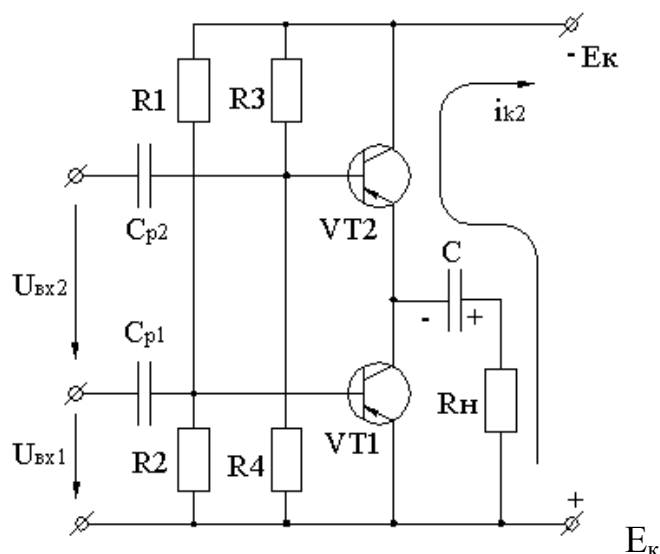


Рисунок 2.57 - Бестрансформаторный УМ с одним источником питания

В отсутствии сигналов на входе  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  конденсатор  $C$  заряжен до напряжения  $0,5E_k$ . В такте работы транзистора  $VT1$ ,  $VT2$  закрыт и конденсатор выполняет функцию источника питания нагрузки. В такте работы  $VT2$  ток нагрузки протекает через источник питания  $E_k$ . При этом ток  $i_{к2}$ , протекающий через конденсатор  $C$ , наполняет его энергией, компенсируя тем самым отданную в нагрузку энергию в предыдущем такте.  $VT1$  и  $VT2$  в схемах с двумя противофазными входными сигналами имеют различные способы включения:  $VT1$ -по схеме ОЭ,  $VT2$ - по схеме ОК, а это значит, что коэффициенты усиления по напряжению различны и должны быть приняты меры по выравниванию коэффициентов усиления для обеих полувольт входного сигнала. Эту задачу решают обеспечением соответствующих коэффициентов усиления по двум входам фазоинверсного каскада.

## Тема 2.10. Усилители постоянного тока (УПТ)

### Особенности УПТ

Часто при проведении измерений в электронных устройствах необходимо усиливать сигналы очень низкой частот - порядка долей Гц. Для этого требуется усилители, имеющие равномерную амплитудно-частотную характеристику до самых низких частот. Такие усилители называют усилителями постоянного тока (УПТ). Приведем для сравнения АЧХ УПТ и усилителя с  $RC$ -связью (рисунок 2.58).

В области низких и средних частот АЧХ УПТ равномерна. В области высоких частот в УПТ, так же как и в усилителях с  $RC$ -связью, появляются фазовые сдвиги и частотные искажения, что приводит к уменьшению  $K_u$ .

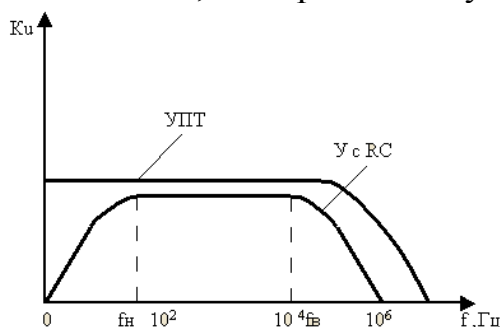


Рисунок 2.58. - АЧХ УПТ

В УПТ возникают трудности, связанные с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих  $U$  и  $I$ , которые необходимы для работы транзисторов усилительных каскадов.

Как и в усилителях с  $RC$ -связью, характеристики УПТ должны отвечать ряду требований:

1. В отсутствие входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал;
2. При изменении знака входного сигнала должен изменять знак и выходной сигнал;
3. Напряжение на нагрузочном устройстве должно быть пропорционально входному напряжению.

### ***УПТ с одним источником питания и двумя источниками питания***

Схема УПТ с одним источником питания представлена на рисунке 2.59).

Простейший УПТ с одним источником питания состоит из обычного усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенным по схеме с ОЭ (выделен штриховыми линиями), у которого отсутствует конденсатор  $C$  в цепях эмиттера, что приводит к снижению коэффициента усиления из-за возникновения отрицательной обратной связи, но обеспечивает большую полосу пропускания.

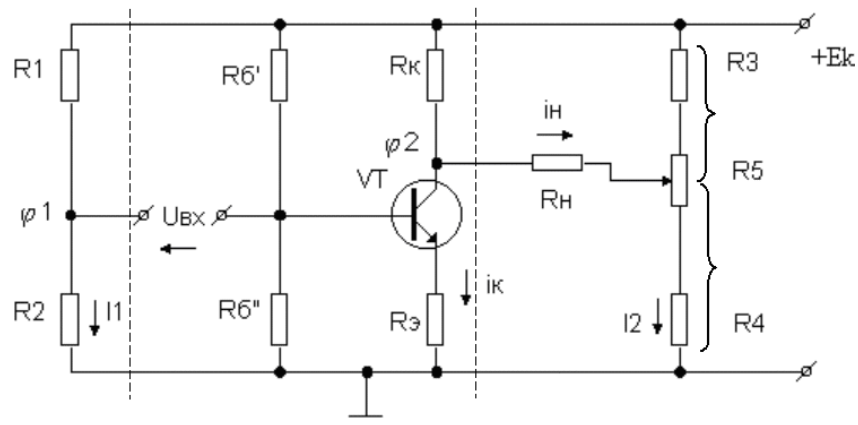


Рисунок 2.59 - Схема УПТ с одним источником питания

Если рассмотреть временную диаграмму работы схемы, то видно, что потенциалы средних точек делителей таковы, что при  $U_{вх}=0$ ,  $\varphi_6=\varphi_1$ ,  $\varphi_k=\varphi_2$ , вследствие чего отсутствует ток во входной цепи и в нагрузочном резисторе  $i_н=0$ . Для точной подстройки режима в выходной цепи ставится переменный резистор  $R5$ . При подаче входного сигнала появляется ток во входной цепи, изменяются базовый и коллекторные токи, что приводит к изменению напряжения на коллекторе и появлению тока в нагрузке  $i_н$ .

Потенциальная диаграмма (рис. 2.60) показывает, что при отсутствии входного напряжения  $U_{вх}=0$  ( $0 \leq t \leq t_1$ ),  $U_{вых}=0$ , в интервале времени  $t_1 < t < t_2$  при  $U_{вх} < 0$ ,  $U_{вых} > 0$ , а в интервале  $t > t_2$ ,  $U_{вх} > 0$ ,  $U_{вых} < 0$ . Таким образом, компенсируется постоянная составляющая коллекторного тока.

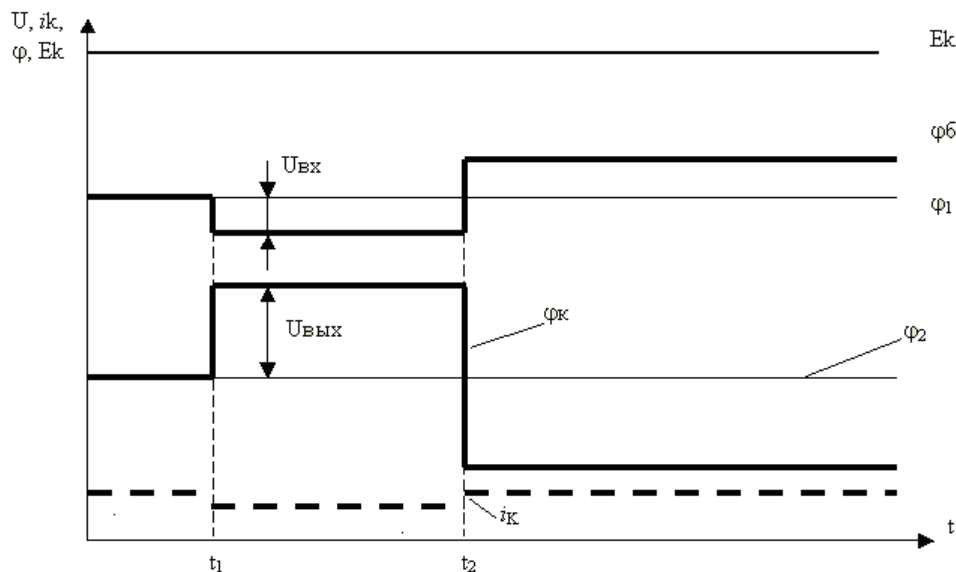


Рисунок 2.60 - Потенциальная диаграмма работы УПТ с одним источником питания

В схеме УПТ с двумя источниками питания (рисунок 2.61) источники  $+E_1$  и  $-E_2$  создают положительное и отрицательное напряжения относительно общей точки, имеющей нулевой потенциал («земля»). Входной сигнал подается непосредственно на базу транзистора.

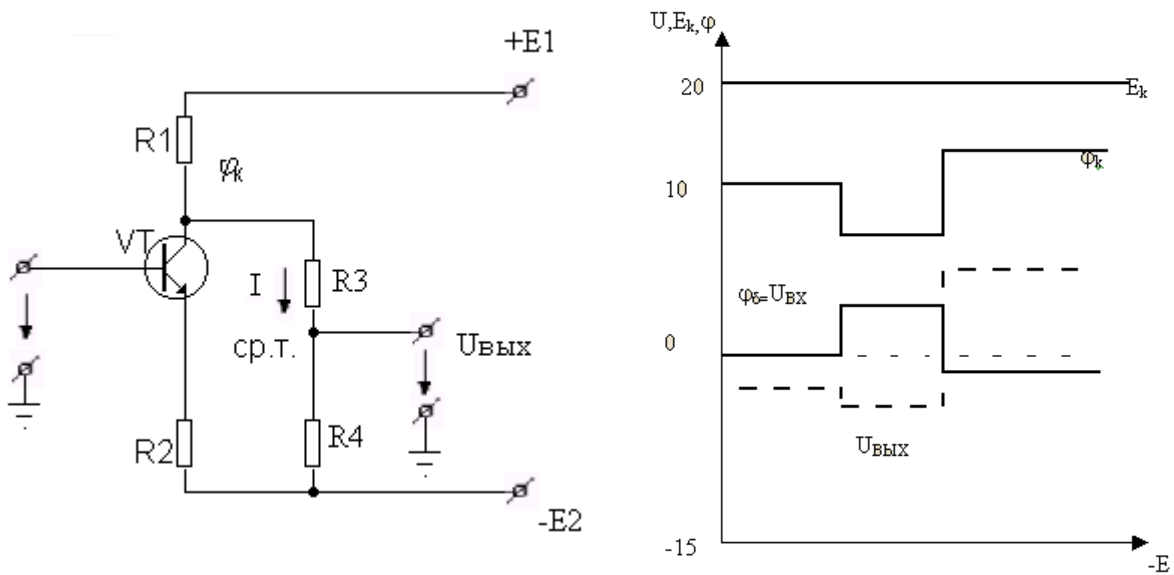


Рисунок 2.61- УПТ с двумя источниками питания и его потенциальная диаграмма

При напряжении  $U_{вх}=0$ , потенциал базы  $\phi_б=0$ . К делителю  $R3/R4$ , в отсутствии входного сигнала, приложено напряжение  $\phi_{R3} + \phi_{R4} = \phi_к - (-E_2) = \phi_к + E_2$ , при этом потенциал средней точки делителя должен быть равен нулю, т.е. напряжение на выходе равно 0, при этом падение напряжения на плечах делителя соответственно равны  $U_{R3} = \phi_к$ ,  $U_{R4} = E_2$ .

При подаче входного напряжения (положительной полярности) возрастает ток базы транзистора  $I_б$ , что приводит к увеличению коллекторного тока  $I_к$ . При этом увеличивается падение напряжения на  $R1$  и снижается потенциал верхнего вывода делителя  $R3/R4$ , снижается потенциал средней точки делителя и на выходе появляется напряжение отрицательной полярности. Таким образом, делитель  $R3/R4$  компенсирует постоянную составляющую напряжения и передает с некоторым уменьшением усиленное напряжение с коллектора транзистора на выход усилителя.

### Дрейф нуля в УПТ

УПТ имеют недостаток, затрудняющий усиление очень малых постоянных напряжений и токов. В УПТ существует так называемый дрейф нуля, который определяет нижний предел усиливаемых напряжений. Дрейф нуля заключается в следующем. С течением времени изменяются токи транзисторов и напряжения на их электродах. При этом нарушается компенсация постоянной составляющей напряжения и на выходе усилителя появляется напряжение в отсутствие входного сигнала. Поскольку УПТ должен усиливать напряжения вплоть до самых низких частот, всякое изменение постоянных составляющих напряжения  $U_{к0}$ ,  $U_{б0}$  (из-за нестабильности источников питания; старения транзисторов; изменения температуры окружающей среды и т.д.) принципиально не отличается от полезного сигнала.

Для борьбы с дрейфом нуля принимают целый ряд мер:

- стабилизацию напряжения источников питания;

- стабилизацию температурного режима и тренировку транзисторов;
- использование дифференциальных (или балансных) схем УПТ;
- преобразование усиливаемого напряжения.

Дифференциальные или балансные схемы построены по принципу четырехплечевого моста (рисунок 2.62).

Если мост сбалансирован, т.е.  $R1/R2=R4/R3$ , то при изменении напряжения источника питания  $+E_k$  баланс не нарушается и в нагрузочном резисторе  $R_n$  ток равен нулю. С другой стороны, при пропорциональном изменении сопротивлений резисторов  $R1, R2$  или  $R3, R4$  баланс моста тоже не нарушается. Если заменить резисторы  $R2, R3$  транзисторами, то получается дифференциальная схема, часто применяемая в УПТ (рисунок 2.63).

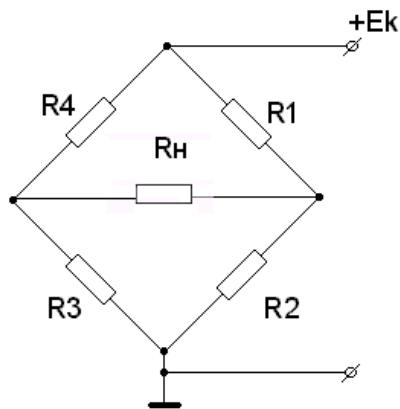


Рисунок 2.62 - Схема четырехплечевого моста

В дифференциальном усилителе сопротивления резисторов  $R2, R3$  в коллекторных цепях транзисторов выбирают равными и режимы обоих транзисторов устанавливают одинаковыми. Пары транзисторов подбирают с идентичными характеристиками.

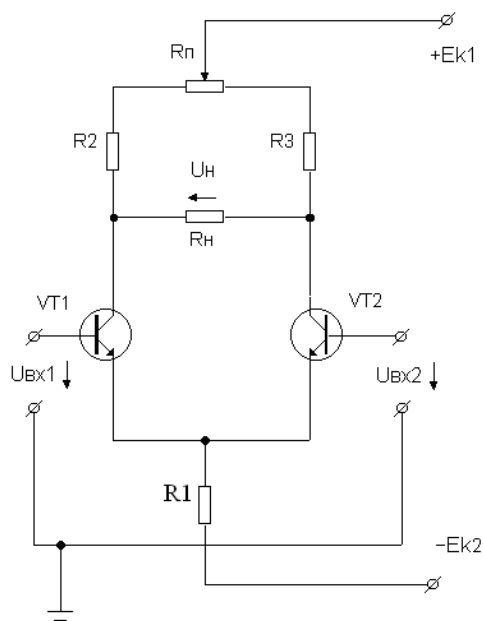


Рисунок 2.63 - Дифференциальная схема в УПТ

В этой схеме резистор  $R_1$  стабилизирует ток транзисторов, а переменный резистор  $R_n$  служит для установки нуля.

Выражение для коэффициента усиления дифференциального каскада аналогично выражению для  $K_u$  обычного однокаскадного усилителя с коллекторной нагрузкой:

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх.}}$$

При подаче входного сигнала на базу транзистора  $VT1$ , увеличивается ток базы транзистора  $VT1$  и уменьшится ток базы транзистора  $VT2$ . При этом токи  $I_{\text{э}1}$ ,  $I_{\text{к}1}$  увеличиваются, а токи  $I_{\text{э}2}$ ,  $I_{\text{к}2}$  уменьшаются. Изменение токов происходит на одну и ту же величину. Напряжение  $U_{\text{к}1} = E_{\text{к}1} - I_{\text{к}1}R_{\text{к}1}$  уменьшается, что вызывает приращение напряжения  $-\Delta U_{\text{к}1}$ , противоположное по знаку (т.е. проинвертированное)  $U_{\text{вх.}}$ . Напряжение  $U_{\text{к}2} = E_{\text{к}2} - I_{\text{к}2}R_{\text{к}2}$  возрастает, что создает приращение напряжения того же знака  $+\Delta U_{\text{к}2}$  (т.е. непроинвертированное), что и напряжение входного сигнала. Таким образом, в данном случае выход каскада со стороны коллектора транзистора  $VT1$  является инвертирующим, а со стороны коллектора транзистора  $VT2$ -неинвертирующим. Если подается сигнал на вход  $VT2$ , то коллектор транзистора  $VT2$  будет инвертирующим выходом, а коллектор  $VT1$ -неинвертирующим.

### Операционные усилители (ОУ)

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление или ослабление, сложение или вычитание, интегрирование или дифференцирование и т.д. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности и другие электронные элементы.

ОУ относится к усилителям постоянного тока (УПТ) с большим коэффициентом усиления, имеющим дифференциальный вход (два входных вывода) и один общий выход. В электронных схемах ОУ обозначается следующим образом (рисунок 2.64):

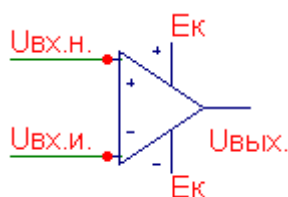


Рисунок 2.64 - Условное изображение ОУ

Идеальный ОУ имеет коэффициент усиления  $K_u$ , стремящийся к бесконечности (у реальных ОУ он обычно превышает  $10^5$ ), обладает большим входным ( $10^6$  Ом) и малым выходным сопротивлением (доли Ом).

Один вход ОУ ( $U_{\text{вх.н.}}$ , «+») называется неинвертирующим, а второй ( $U_{\text{вх.и.}}$ , «-») - инвертирующим.

Структурная схема ОУ представлена на рисунке 2.65.



Рисунок 2.65 – Структурная схема ОУ

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад [4], который используется в качестве входного каскада усилителя.

Выходным каскадом ОУ обычно является эмиттерный повторитель (ЭП), который обеспечивает нагрузочную способность всей схемы. Т.к.  $K_u$  (ЭП)=1, то необходимое значение  $K_u$  ОУ обеспечивается подключением дополнительных каскадов между дифференциальным каскадом и ЭП. В зависимости от количества используемых каскадов, ОУ подразделяются на двух- и трехкаскадные. В трехкаскадных ОУ входной дифференциальный каскад обычно выполняют с резистивными нагрузками, а в 2-х каскадных - с динамическими нагрузками.

### Характеристики ОУ

Важнейшими характеристиками ОУ являются его амплитудные (или передаточные) характеристики и амплитудно-частотные характеристики. Их представляют в виде двух кривых по инвертирующему и неинвертирующему входам, соответственно. Эти характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов при нулевом сигнале на другом (рисунок 2.66).

Здесь горизонтальные участки кривых соответствуют режиму транзистора ЭП (эмиттерного повторителя) (транзистор полностью открыт).

При изменении напряжения входного сигнала на этих участках  $U_{вых.}$  остается без изменения и определяется  $U_{вых.маx}^+$  и  $U_{вых.маx}^-$ , которые близки к напряжению источников питания  $E_k$ .

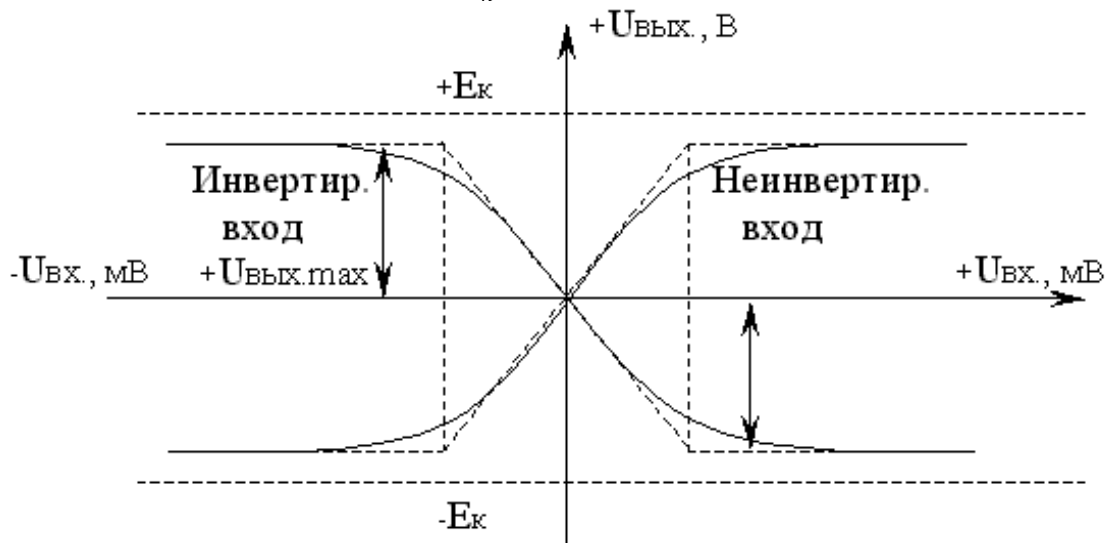


Рисунок 2.66 - Амплитудные (или передаточные) характеристики ОУ

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость напряжения  $U_{\text{вых.}}$  от напряжения  $U_{\text{вх.}}$ . Угол наклона определяется коэффициентом усиления  $K_{\text{иоу}} = \Delta U_{\text{вых.}} / \Delta U_{\text{вх.}}$ . Значение  $K_{\text{иоу}}$  зависит от типа ОУ и может принимать значение от нескольких сотен до сотен тысяч.

Когда кривые проходят через 0, это соответствует напряжениям  $U_{\text{вых.}} = 0$  и  $U_{\text{вх.}} = 0$ . Такое состояние называется балансом ОУ. Однако для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается разбаланс). При напряжении  $U_{\text{вх.}} = 0$ ,  $U_{\text{вых.}}$  может быть чуть больше или чуть меньше нуля. Напряжение, при котором  $U_{\text{вых.}} = 0$ , называется входным напряжением смещения нуля  $U_{\text{см0}}$ . Оно определяет значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса. Основной причиной разбаланса является разброс параметров дифференциального усилительного каскада (обычно транзисторов).

Другой важной характеристикой ОУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рисунок 2.67).

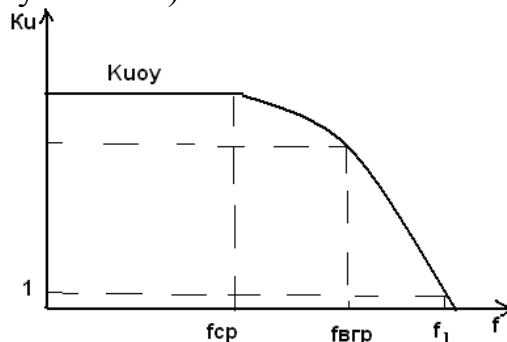


Рисунок 2.67 - Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя

### Параметры ОУ

1. Входные параметры:
  - а) входное сопротивление  $R_{\text{вх.}}$ ;
  - б) входные токи смещения;
  - в) разность и дрейф токов смещения.
2. Выходные параметры:
  - а) выходное сопротивление  $R_{\text{вых.}}$ ;
  - б) максимальное выходное напряжение  $U_{\text{max вых.}}$ ;
  - в) выходной ток  $I_{\text{вых.}}$ .
3. Энергетические параметры:
  - а) максимальные потребляемые токи от обоих источников питания;
  - б) суммарная потребляемая мощность.
4. Частотные параметры (определяют по АЧХ ОУ, рисунок 2.32):
  - а) частота среза  $f_{\text{ср}}$ , начиная с которой АЧХ имеет спадающий характер
  - б) частота единичного усилителя  $f_1$ , при которой  $K_{\text{иоу}} = 1$ .
  - в) граничная частота  $f_{\text{гр}}$ , которой соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в  $\sqrt{2}$  раз.
5. Скоростные (динамические) параметры:
  - а) скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика);



б) время установления выходного напряжения.

Большинство ОУ изготавливается в виде интегральных микросхем по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К740 и др.), некоторые – по гибридной (серии 284, 286).

Примеры интегральных ОУ: К140УД21, К140УД24 (высокоточные); К157УД1, К1408УД1 (мощные и высоковольтные); К140УД10, К544УД2 (быстродействующие).

Аналоговая схемотехника на основе операционных усилителей позволяет создавать различные вычислительные схемы. На основе операционных усилителей могут быть реализованы операции сложения и вычитания, дифференцирования и интегрирования. Недостатком этих вычислительных схем является невысокая точность вычислений. Однако этой точности в целом ряде случаев бывает вполне достаточно.

## Вычислительные схемы на ОУ

### 1. Инвертирующий усилитель (рисунок 2.68).

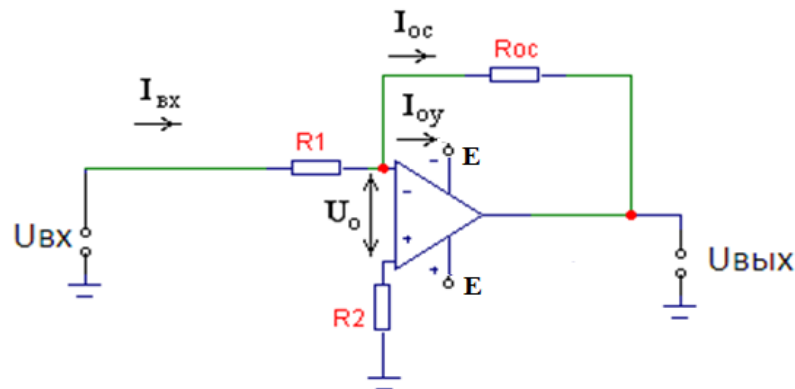


Рисунок 2.68 - Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного и создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора  $R_{oc}$  отрицательной обратной связи по напряжению. Неинвертирующий вход заземляется. На инвертирующий вход через резистор  $R1$  подается входной сигнал. Если принять значение  $R_{вхОУ} = \infty$  и входной ток ОУ  $I_{ou} = 0$ , то ток  $I_{вх} = I_{oc}$ , и тогда  $U_{вх} - U_0 / R1 = U_{вых} - U_0 / R_{oc}$ .

При  $K_{ou} \rightarrow \infty$  напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{вых} / K_{ou} \rightarrow 0$ , и тогда  $U_{вх} / R1 = -U_{вых} / R_{oc}$ .

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью  $K_{Уи} = U_{вых} / U_{вх} = -R_{oc} / R1$ , т.е. определяется параметрами только пассивной части схемы.

### 2. Неинвертирующий усилитель (рисунок 2.69).

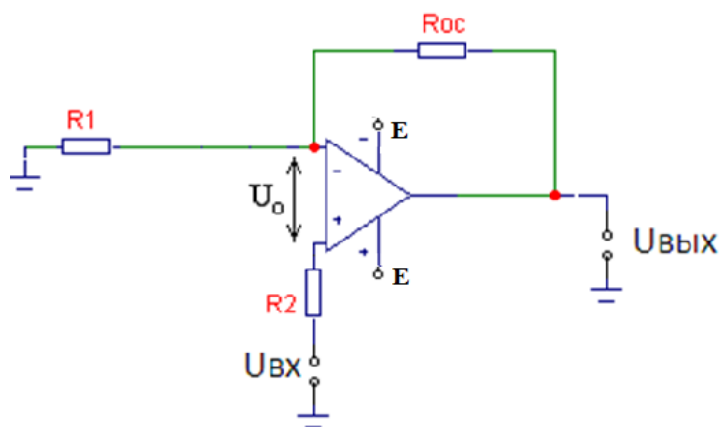


Рисунок 2.69 - Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Полагая, что напряжение  $U_0=0$  и ток  $I_{OY}=0$  получим  $U_{\text{вых}}=U_{\text{вх}} \cdot (R_1+R_{oc})/R_1$ . Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя  $K_{Uн}=1+R_{oc}/R_1$ .  $R_{\text{вх}}$  неинвертирующего усилителя велико, а  $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$ .

Неинвертирующий и инвертирующий усилители широко используют в качестве высокостабильных усилителей различного назначения [5].

### 3. Сумматоры

Для суммирования нескольких напряжений используют схемы, построенные на основе операционных усилителей в инвертирующем и неинвертирующем включении, которые называют сумматорами.

Сумматоры делятся на инвертирующие и неинвертирующие. Неинвертирующий сумматор (рисунок 2.70, а) реализуется на основе схемы неинвертирующего усилителя путем добавления к входу параллельных ветвей, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения. Входные напряжения через резисторы  $R$  подаются на неинвертирующий вход усилителя, который в этой схеме является суммирующей точкой.

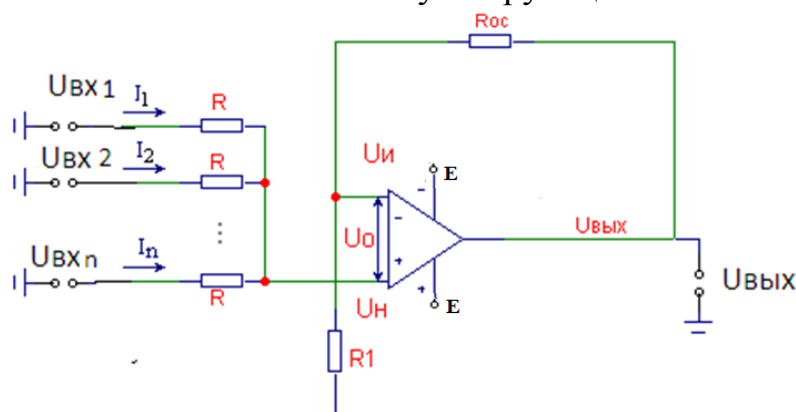


Рисунок 2.70, а - Неинвертирующий сумматор

При напряжении  $U_0=0$ ,  $U_{\text{н}}=U_{\text{и}}=[R_1/(R_1+R_{oc})] U_{\text{вых}}$ .

Тогда  $U_1 - U_{\text{н}}/R + U_2 - U_{\text{н}}/R + \dots + U_n - U_{\text{н}}/R = 0$ .

Исходя из этого, для неинвертирующего усилителя выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{вых}} = [(R_1 + R_{\text{oc}}) / n \cdot R_1] (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Инвертирующий сумматор (рисунок 2.70, б) выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на входе, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

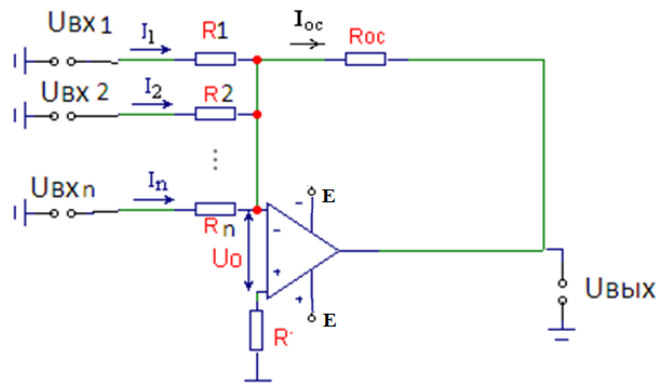


Рисунок 2.70, б - Инвертирующий сумматор

Для инвертирующего сумматора сопротивления резисторов будут равны

$$R_{\text{oc}} = R_1 = R_2 = \dots = R_n.$$

При входном токе  $I_{\text{вх ОУ}} = 0$  получаем

$$I_{\text{oc}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Тогда выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{вых}} = -(R_{\text{oc}}/R_1) U_1 + (R_{\text{oc}}/R_2) U_2 + \dots + (R_{\text{oc}}/R_n) U_n.$$

#### 4. Вычитатель (рисунок 2.71)

Для вычитания входных напряжений используется схема вычитателя на ОУ. Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{\text{oc}} = R$ , то  $U_{\text{вых}} = R_{\text{oc}}/R_1 (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1})$

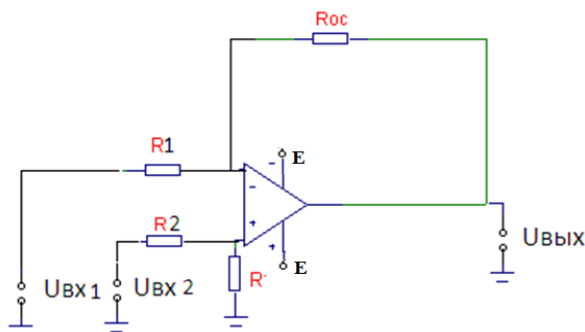


Рисунок 2.70 - Вычитатель

#### 5. Интегратор (рисунок 2.71)

Интегратор создают заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора  $R_{\text{oc}}$  конденсатором  $C_1$ .

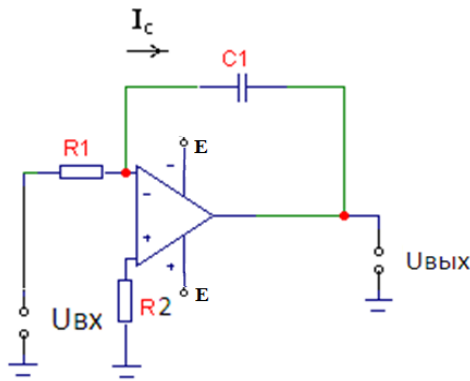


Рисунок 2.71 - Интегратор

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала. Так как ток  $I_{вх.} = I_c$  или  $U_{вх}/R1 = -C1(dU_{вых}/dt)$ , то выходное напряжение равно  $U_{вых} = -1/R1C1 \int U_{вх} dt + U_{вых0}$ ,

где  $U_{вых0}$ -выходное напряжение при  $t=0$ .

Если  $t=0$  и  $U_{вых0}=0$ , то тогда  $U_{вых} = -1/\tau \int U_{вх} dt$ ,

где  $\tau = R1C1$  - постоянная времени.

Временные зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  показаны на рисунке 2.72.

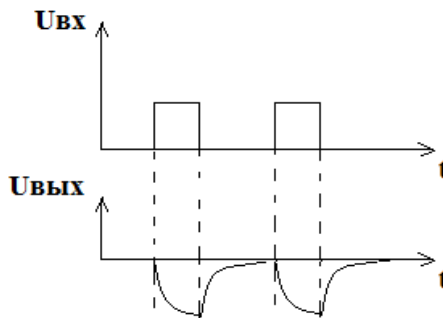


Рисунок 2.72 - Зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  от времени  $t$  для интегратора.

#### 6. Дифференциатор (рисунок 2.73)

Если в схеме интегратора поменять местами сопротивление  $R1$  и конденсатор  $C1$ , то получим схему дифференциатора.

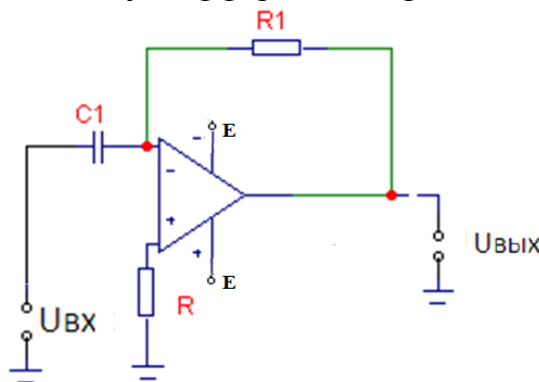


Рисунок 2.73 - Дифференциатор

Входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ и формула выполняемой операции определяется выражением

$$U_{вых} = -R1C1 (dU_{вх}/dt) = -\tau(dU_{вх}/dt).$$

Временные зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  показаны на рисунке 2.74.

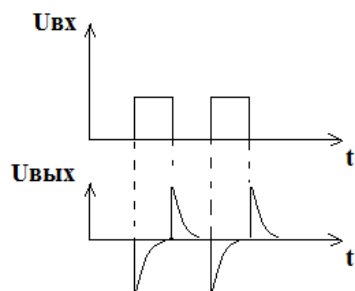


Рисунок 2.74 - Зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  от времени  $t$  для дифференциатора

### 7. Компаратор на ОУ (рисунок 2.75)

Компараторы играют очень важную роль при аналого-цифровом преобразовании. Компаратором называют устройство, предназначенное для сравнения изменяющегося аналогового входного сигнала с опорным напряжением.

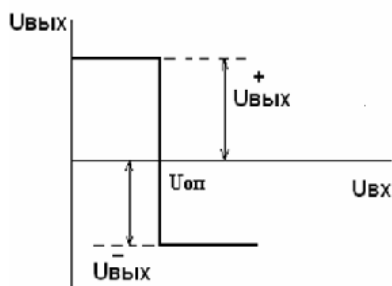
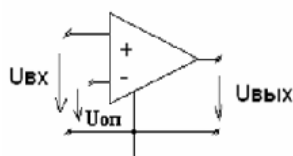


Рисунок 2.75 - Компаратор на ОУ

Функцию сравнения двух напряжений выполняет операционный усилитель (рисунок 2.75), если на один из его входов подать опорное напряжение, а на другой – входной сигнал. Компараторы выпускаются в интегральном исполнении, а также являются составной частью микросхем аналогово-цифровых преобразователей (АЦП).

## Тема 2.11. Избирательные усилители

### Виды и особенности избирательных усилителей (ИУ).

Избирательные усилители (ИУ) предназначены для усиления сигналов в некоторой узкой полосе частот [6]. Амплитудно-частотные характеристики (рисунок 2.76) должны обеспечивать требуемое усиление в заданной полосе частот и достаточно крутой спад усиления вне этой полосы.

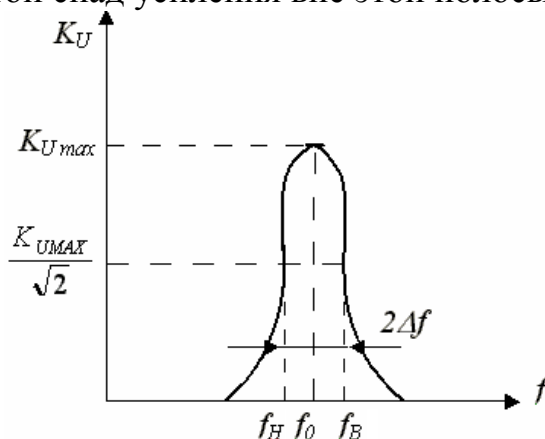


Рисунок 2.76 - АЧХ ИУ

Полоса пропускания ИУ ( $2\Delta f = f_в - f_н$ ) определяется на уровне  $K_{Um} / \sqrt{2}$ , где  $K_{Um}$  - коэффициент усиления при резонансной частоте  $f_0$ . Селективность (избирательность) усилительных свойств оценивают добротностью  $Q = f_0 / (2\Delta f)$ .

Избирательные усилители широко распространены в радиоприёмных и телевизионных устройствах, а также многоканальных системах связи. Они предназначены для настройки приёмного устройства на фиксируемую частоту принимаемой станции, не пропуская сигнала других устройств. Резкая зависимость  $K_U$  ИУ от частоты  $f$  достигается, как правило, включением специальных фильтров в цепь усиления или в цепь обратной связи. В связи с этим ИУ подразделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Высокочастотные избирательные усилители создают введением LC-фильтра в цепь нагрузки усилительного каскада (рисунок 2.77).

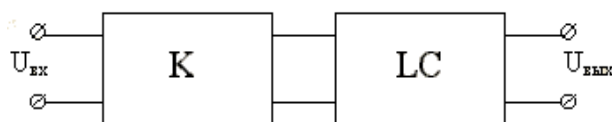


Рисунок 2.77 - Структурная схема высокочастотного ИУ

Низкочастотные узкополосные усилители создают включением в цепь обратной связи RC-фильтров (рисунок 2.78).

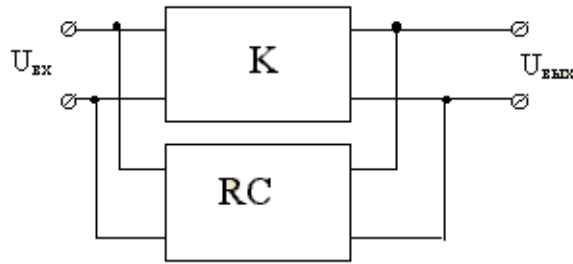


Рисунок 2.78 - Структурная схема низкочастотного ИУ

### Высокочастотные ИУ

Схема резонансного усилителя представлена на рисунке 2.79. Она похожа на схему однокаскадного усилителя с ОЭ, но в цепь коллектора вместо  $R_k$  включён колебательный  $LC$ -контур.

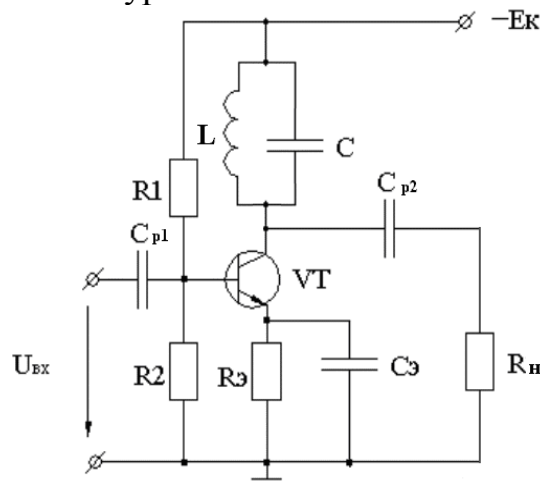


Рисунок 2.79 - Принципиальная электрическая схема высокочастотного ИУ

#### Назначение элементов:

- 1)  $R_1, R_2, VT, R_3, C_e$  - элементы однокаскадного усилителя с общим эмиттером:  $R_1/R_2$  – делитель напряжения, который обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т.е. в отсутствие входного сигнала;  $R_3$  и  $C_e$  – элементы эмиттерной температурной стабилизации;  $VT$  – транзистор (усилительный элемент);
- 2) колебательный  $LC$ -контур в коллекторной цепи транзистора выполняет роль  $LC$ -фильтра, т. е. выделяет резонансную частоту и соответствующую полосу пропускания на высоких частотах;
- 3)  $C_{p1}, C_{p2}$  – разделительные конденсаторы, через которые осуществляется связь с предыдущим или последующим каскадом.

На резонансной частоте  $f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  сопротивление колебательного

контура велико, в связи с чем коэффициент усиления максимален. При отклонении частоты влево или вправо от резонансной сопротивление контура уменьшается ввиду увеличения шунтирующего действия его индуктивности или ёмкости. Это вызывает уменьшение коэффициента усиления каскада.

ИУ характеризуется добротностью  $Q$ .

На рисунке 2.80 показаны АЧХ избирательных усилителей с различными добротностями  $Q$ .

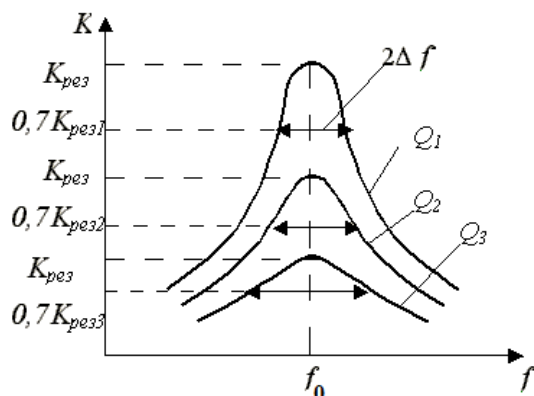


Рисунок 2.80 – АЧХ с различными добротностями  $Q$

При увеличении  $Q$  возрастает  $K_u$  усилителя на резонансной частоте и уменьшается полоса его пропускания, т.е. ИУ будет обладать лучшими избирательными свойствами.

### Низкочастотные ИУ

В качестве RC-фильтров в избирательных усилителях могут использоваться различные RC-цепи, у которых коэффициент передачи  $\beta \approx 0$  в диапазоне полосы пропускания от  $f_n$  до  $f_v$ .

Широкое применение в этих усилителях нашёл двойной Т-образный мост (рисунок 2.81).

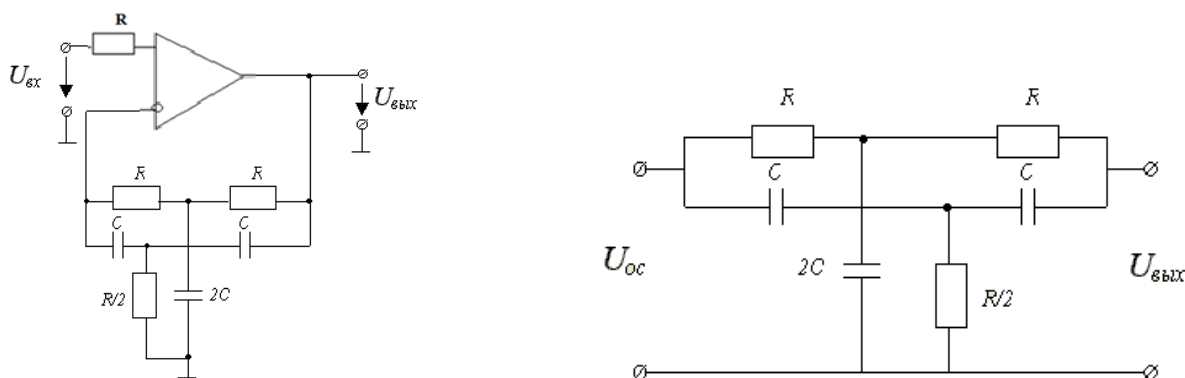


Рисунок 2.81 - Принципиальная электрическая схема низкочастотного ИУ с двойным Т-образным мостом.

Значение коэффициента передачи  $\beta = U_{ос} / U_{ввых}$  резко зависит от частоты. При  $f \rightarrow 0$ ;  $\beta \rightarrow 1$ , т. к. на очень низких частотах сопротивления конденсаторов становятся малыми и всё напряжение передаётся на вход усилителя через «нижний» одинарный Т-образный мост ( $C, R/2, C$ ).



На квазирезонансной частоте  $f_0 = 1/(RC)$ ;  $\beta = 0$ , т. к. на этой частоте каждый из одинарных Т-образных мостов имеет равные по модулю и противоположные по фазе коэффициенты передачи  $\beta$  и их выходные токи взаимно компенсируются, так что  $U_{oc} = 0$ .

Коэффициент усиления избирательного контура с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи определяется через параметры усилителя и цепи обратной связи:  $K_{oc} = \left| \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right| = \left| \frac{K}{1 + \beta K} \right|$ .

Таким образом, при частотах  $f = 0$  и  $f = \infty$ , когда  $\beta \rightarrow 1$ :  $K_{oc} = \left| \frac{K}{1 + K} \right| \approx 1$ , а на квазирезонансной частоте  $\beta = 0$ ,  $K_{oc} = K \gg 1$ .

## Тема 2.12. Генераторы гармонических колебаний

Генератором гармонических колебаний называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний синусоидальной формы требуемой частоты и мощности [6].

Классификация генераторов:

1) В зависимости от генерируемой частоты:

- а) низкочастотные (0,01...100 кГц);
- б) высокочастотные (0,1...300 МГц);
- в) сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц).

2) по способу возбуждения колебаний:

- а) с независимым возбуждением;
- б) автогенераторы или генераторы с самовозбуждением.

В структурную схему автогенератора (рисунок 2.82) входят два блока: усилитель с коэффициентом усиления  $K_u$  и звено положительной обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$ .

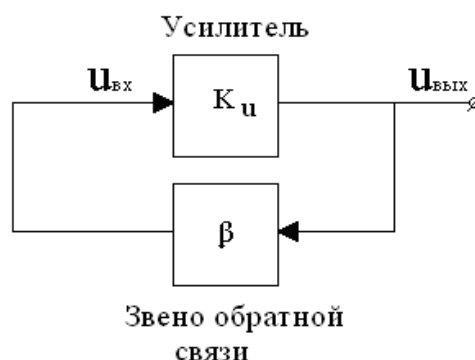


Рисунок 2.82 - Структурная схема автогенератора

Коэффициент усиления  $K_u$  усилителя и коэффициент передачи звена обратной связи  $\beta$  принимаются комплексными, т.е. учитывается их зависимость от частоты. В качестве усилителя в автогенераторах могут применяться различные усилители: на транзисторах, на интегральных микросхемах и т.д.

Звеном обратной связи являются частотно-зависимые цепи ( $LC$ -контуры и  $RC$ -четырёхполюсники). Входным сигналом для усиления является часть выходного напряжения усилителя, передаваемая звеном положительной обратной связи на вход усилителя.

Стационарный устойчивый режим в автогенераторе, при котором амплитуды входных и выходных напряжений имеют неизменные значения, будет возможен при выполнении условия, называемого *условием самовозбуждения*:  $K_u \cdot \beta = 1$ , которое следует из соотношений

$$\begin{aligned} U_{вых} &= K_u U_{вх} \\ U_{вх} &= \beta U_{вых} \end{aligned}$$

Тогда  $U_{вых} = \beta K_u U_{вых}$ .

Условие самовозбуждения можно представить в виде:

$$|K_u| e^{i\varphi} |\beta| e^{i\psi} = 1,$$

где  $|K_u|$ ,  $|\beta|$  – модули коэффициентов усиления и передачи соответственно;  $\varphi$ ,  $\psi$  – аргументы этих коэффициентов.

Это равенство выполняется при следующих условиях:

1.  $|K_u| |\beta| = 1$  – условие баланса амплитуд;
2.  $\varphi + \psi = 2\pi n$  – условие баланса фаз,

где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,

$\varphi$  – фазовый сдвиг выходного напряжения усилителя;

$\psi$  – фазовый сдвиг выходного напряжения звена обратной связи.

Условие баланса амплитуд соответствует тому, что потери энергии в автогенераторе восполняются звеном положительной обратной связи от источника питания автогенератора. Для получения стационарных устойчивых колебаний условие баланса амплитуд должно удовлетворять соотношению:  $|K_u| \cdot |\beta| \geq 1$ . Физический смысл неравенства  $|K_u| \cdot |\beta| \geq 1$  заключается в том, что сигнал, усиленный усилителем в  $|K_u|$  раз и ослабленный звеном обратной связи в  $|\beta|$  раз, возникает вновь на входе усилителя в той же фазе, но с большей амплитудой.

Условие баланса фаз означает, что сумма фазовых сдвигов выходных напряжений усилителя и звена обратной связи в автогенераторе равна нулю или целому числу  $2\pi$ , что свидетельствует о наличии в данном устройстве положительной обратной связи.

Для получения синусоидального (гармонического) напряжения необходимо, чтобы условия самовозбуждения генератора выполнялись только для некоторой частоты. С этой целью цепь ПОС должна обладать избирательными свойствами. Такие свойства имеют колебательный  $LC$ -контур и  $RC$ -цепи.

### ***LC – автогенератор***

В данном автогенераторе усилитель собран на полевом транзисторе и включен по схеме с общим истоком (рисунок 2.83). Звеном обратной связи является катушка  $L_c$ , включенная в стоковую цепь транзистора и индуктивно связанная с катушкой  $L_k$  резонансного контура  $L_k C_k$ . Первоначально колебания в автогенераторе возникают из-за флуктуации тока в колебательном контуре или при подаче напряжения питания. По этим причинам при условии, что эквивалентное активное сопротивление контура  $R_3 < \sqrt{L_k / C_k}$ , появляются слабые колебания с частотой  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_k}$ , которые при отсутствии положительной обратной связи прекратились бы из-за потерь энергии в контуре.

Но при наличии положительной обратной связи этого не происходит, т.к. появившееся напряжение на контуре усиливается транзистором. Эти колебания через катушку  $L_c$  индуктивно связанную с катушкой  $L_k$ , вновь возвращаются в

колебательный контур. Размах колебаний постепенно возрастает, что соответствует условию  $|K_U| |\beta| > 1$ .

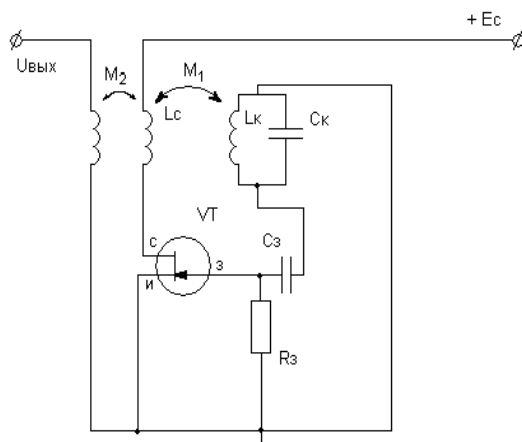


Рисунок 2.83– Схема LC – автогенератора

По мере роста амплитуды напряжение в цепи затвора транзистора из-за нелинейности его амплитудной характеристики (участок **ab** на рисунке 2.84, б) начинает уменьшаться и соблюдается условие  $|K_U| |\beta| = 1$ .

При этом появляются колебания с постоянной и автоматически поддерживаемой на требуемом уровне амплитудой, что соответствует стационарному режиму работы автогенератора.

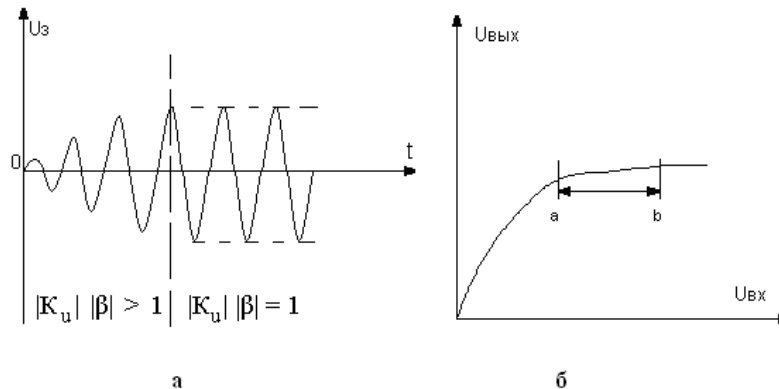


Рисунок 2.84 - Временная диаграмма автогенератора (а) и амплитудная характеристика транзистора (б)

С помощью звена  $R_3 C_3$  осуществляется создание отрицательного смещения  $U_{30}$  относительно истока.

Рассмотренная схема, в которой LC-контур включен последовательно с транзистором, имеет существенное преимущество, заключающееся в том, что элементы LC-контра находятся под низким напряжением. Но такой генератор обладает низким КПД.

Высоким КПД и большей мощностью генерируемых колебаний обладает автогенератор, где LC-контур включен параллельно с транзистором по

отношению к источнику питания (рисунок 2.85). Такой генератор называется *генератором с параллельным питанием*.

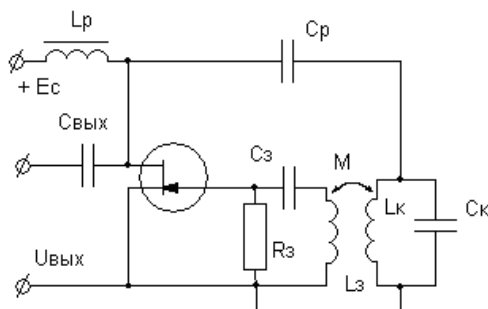


Рисунок 2.85 - Схема  $LC$ -автогенератора с параллельным подключением  $LC$ -контура (генератор с параллельным питанием)

Скачки напряжения и тока, появляющиеся в контуре  $L_k C_k$  при подключении к генератору источника питания  $E_c$ , через обмотку  $L_з$  передаются в цепь затвора полевого транзистора  $VT$ . Тогда за счет взаимной индукции  $M$  между усилителем и колебательным контуром действует положительная обратная связь (ПОС). Конденсатор  $C_p$  предотвращает протекание через контур постоянной составляющей коллекторного тока, а дроссель  $L_p$  уменьшает шунтирование контура по переменному току внутренним сопротивлением источника питания  $E_c$ .

Баланс амплитуд в таком автогенераторе с трансформаторной связью достигается выбором необходимого коэффициента взаимной индукции  $M$  (т.е. числа витков катушки  $L_з$ ), а баланс фаз - правильным подключением концов катушки  $L_з$  (при отсутствии генерации следует поменять концы катушки, подключаемые к затвору транзистора и общей шине).

Для построения  $LC$ -генераторов гармонических колебаний удобно использовать интегральные усилители, например, операционные (рисунок 2.86).

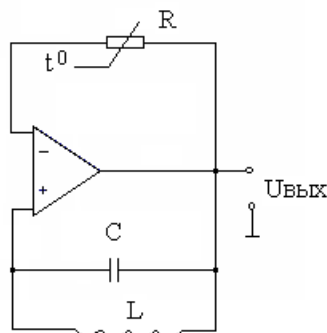


Рисунок 2.86 - Схема  $LC$ -автогенератора на ОУ

Колебательный  $LC$ -контур включается между выходом ОУ и неинвертирующим входом, обеспечивая нужную ПОС. В цепь отрицательной обратной связи (ООС) для стабилизации амплитуды генерируемых колебаний включают терморезистор  $R$  с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКР). Увеличение амплитуды колебаний вызывает уменьшение сопротивления терморезистора. При этом увеличивается глубина ООС, приводящая к уменьшению амплитуды колебаний.

В  $LC$  – генераторах, ввиду зависимости  $L$  и  $C$  колебательного контура и параметров транзистора от температуры наблюдается зависимость от температуры  $t^\circ$  и частоты  $f$ . В условиях постоянства  $t^\circ$  нестабильность частоты вызвана изменениями дифференциальных параметров транзистора в зависимости от изменения положения рабочей точки покоя усилительного каскада, что обуславливает необходимость его стабилизации.

Нестабильность частоты генераторов оценивают коэффициентом относительной нестабильности, который определяется по формуле:

$$\delta_f = \Delta f / f \cdot 100\%$$

где  $\Delta f$  – абсолютное отклонение частоты от номинального значения  $f$ .

Мерами, повышающими стабильность частоты генератора являются:

- 1) увеличение температурной стабилизации выбранного режима покоя усилительных каскадов;
- 2) применение специальных средств, компенсирующих температурные изменения частоты (например, введение в колебательный контур конденсаторов с зависимой от температуры емкостью).

При использовании в генераторах кварцевого резонатора (КР – колебательная система+пьезоэлемент)  $\delta_f = 10^{-3} \dots 10^{-5} \%$

### ***RC – автогенераторы***

Для получения гармонических колебаний низкой частоты (от нескольких сотен КГц до долей Гц) применяют автогенераторы, у которых в качестве звеньев обратной связи используются  $RC$  – четырехполосники. Такие автогенераторы называются  $RC$ –автогенераторами. Применение  $RC$  – четырехполосников вызвано тем, что  $LC$  – контуры на таких частотах становятся громоздкими, а добротность их не удовлетворяет необходимым требованиям.  $RC$  – автогенераторы на низких частотах обладают более высокой стабильностью, имеют меньшие габариты, массу и стоимость, чем  $LC$  – автогенераторы.

$RC$  – автогенератор содержит усилитель и звено обратной связи в виде частотно-зависимой  $RC$  – цепи. Такие цепи представлены на рисунке 2.87:

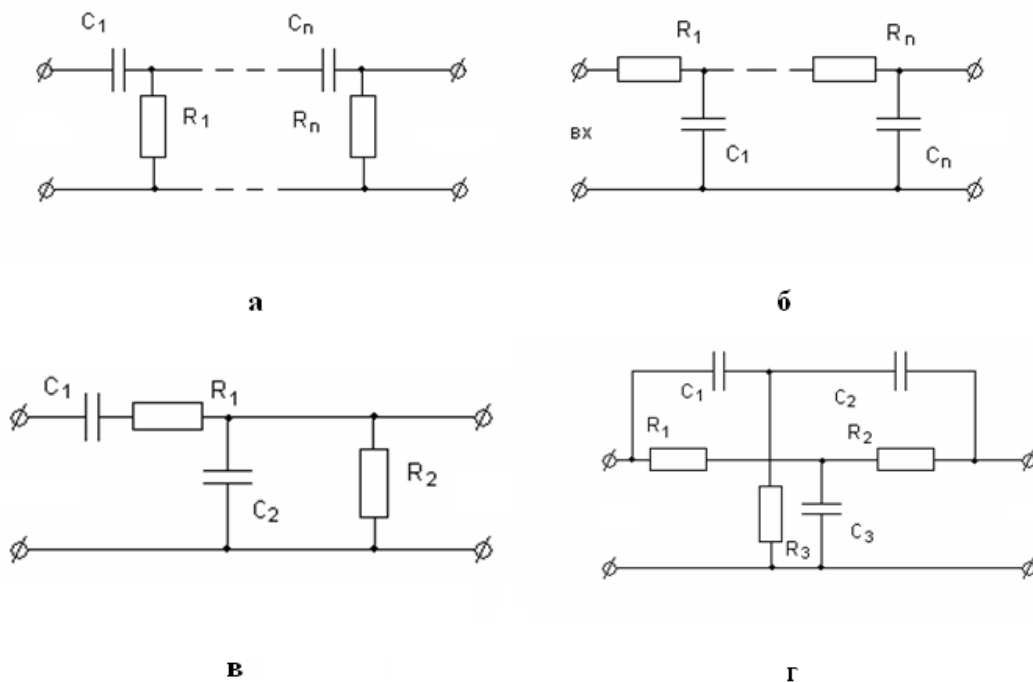


Рисунок 2.87 - Виды звеньев обратной связи: а) и б) Г-образные RC-цепи; в) мост Вина; г) двойной Т-образный мост

Например, RC – автогенератор с Т – образным RC – звеном обратной связи представляет собой однокаскадный усилитель, охваченный положительной обратной связью (рисунок 2.88).

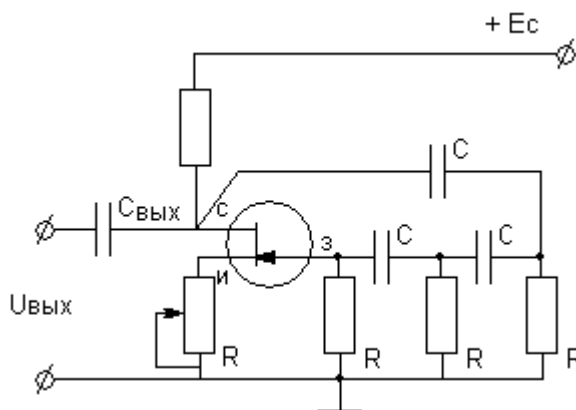


Рисунок 2.88 - RC-автогенератор с Т-образным звеном обратной связи

Следует отметить, что в однокаскадном усилителе с ОЭ без обратной связи  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Т.е. если  $U_{вых}$  усилителя подать на его вход, то получится 100%-я ООС. Для соблюдения баланса фаз напряжение  $U_{вых}$ , прежде чем подать его на вход, необходимо сдвинуть на  $180^\circ$ . Т.к. сопротивление  $R_{вх}$  усилителя велико, а  $R_{вых}$  - мало, то фазовый сдвиг на  $180^\circ$  можно осуществить с помощью трех одинаковых RC – звеньев, каждое из которых изменяет фазу на  $60^\circ$ .

Повысить частоту генерации в автогенераторе можно увеличением количества звеньев или при смене мест резисторов и конденсаторов в RC – цепи.

Недостатки RC – автогенератора:

- 1) цепь обратной связи сильно шунтирует конденсатор усиления, вследствие чего снижается  $K_U$  и нарушается условие баланса амплитуд;
- 2) генерируемые колебания имеют значительное искажение формы, вызванное тем, что условия самовозбуждения выполняются для гармоник с частотой, близкой к  $f_0$ .

$RC$ -генератор с мостом Вина легко выполнить на интегральном ОУ, включив избирательный мост Вина между выходом и неинвертирующим входом (рисунок 2.89). С помощью переменного резистора  $R4$  можно изменять коэффициент усиления усилителя, добываясь наименьших нелинейных искажений генерируемых колебаний.

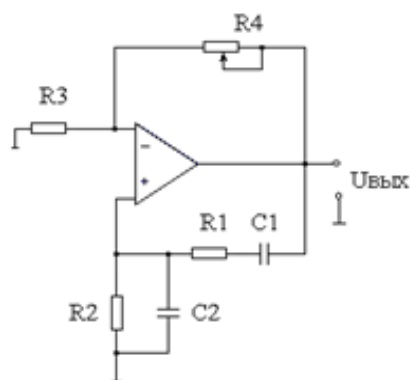


Рисунок 2.89 - Схема  $RC$ -автогенератора с мостом Вина на операционном усилителе



## Раздел 3 Импульсные и цифровые устройства

### Тема 3.1. Представление информации в импульсной форме.

#### Генераторы импульсов

Импульсная и цифровая техника использует импульсный режим работы, при котором кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой.

На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения, на ней основана цифровая вычислительная техника.

Импульсный сигнал характеризуется рядом параметров, которые можно рассмотреть на примере реального импульса напряжения прямоугольной формы (рисунок 3.1):

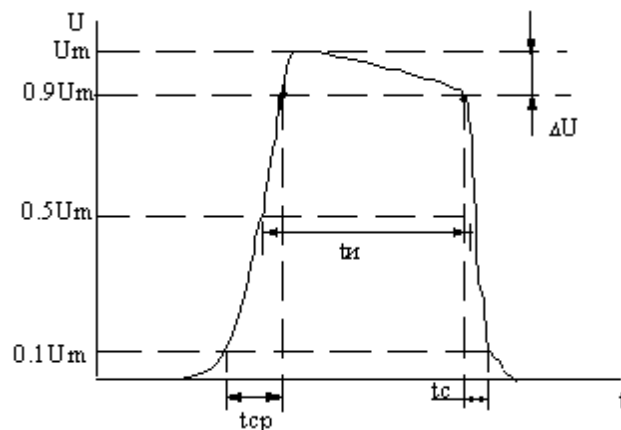


Рисунок 3.1 - Параметры сигнала прямоугольной формы

Параметры импульсного сигнала:

- 1) амплитуда импульса  $U_m$ ;
- 2) длительность импульса  $t_{и}$ , измеряют на уровне  $0,5 U_m$ , иногда на уровне  $0,1 U_m$  в зависимости от формы сигнала;
- 3) длительность фронта импульса  $t_{ф}$  - определяется временем нарастания импульса от  $0,1 U_m$  до  $0,9 U_m$ ;
- 4) длительность среза импульса – определяется временем убывания импульса от  $0,9 U_m$  до  $0,1 U_m$ ;
- 5) спад вершины импульса  $\Delta U$ .

Параметрами *последовательности* импульсов являются (рисунок 3.2):

- 1) период повторения  $T$ ;
- 2) длительность паузы  $t_{п} = T - t_{и}$  – интервал времени между окончанием одного и началом другого импульса;
- 3) длительность импульса  $t_{и}$ ;
- 4) частота повторения  $f = 1/T$ ;
- 5) коэффициент заполнения  $\gamma$ , который характеризуется отношением длительности импульса к периоду их следования  $\gamma = t_{и} / T$ ;
- 6) скважность  $q = T / t_{и} = 1/\gamma$ .

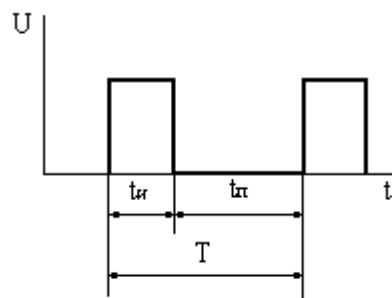


Рисунок 3.2. - Параметры последовательности импульсных сигналов

Сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0». На таком виде сигналов основана работа цифровых вычислительных устройств.

### *Простейшие формирователи импульсных сигналов*

#### ДИОДНЫЕ И ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ

В состав многих импульсных устройств входят электронные ключи, основу которых составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор), работающий в режиме ключа. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено», «Выключено».

В реальных ключах токи и уровни  $U_{\text{ВЫХ}}$ , зависят от типа и параметров активных элементов. Ключи могут собираться на диодах и на транзисторах.

Ключевая схема на биполярном транзисторе показана на рисунке 3.3.

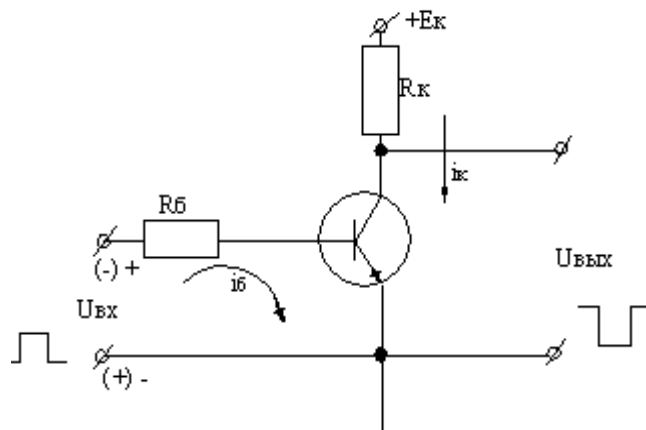


Рисунок 3.3 - Ключевая схема на биполярном транзисторе

Транзистор выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором  $R_k$  и источником питания  $E_k$ . Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Состояние ключа, т.е. открыт он или закрыт, определяется по выходной характеристике транзистора (рисунок 3.4).

Первое состояние определяется точка А1 на линии нагрузки, которая строится так же, как и для усилительного каскада.

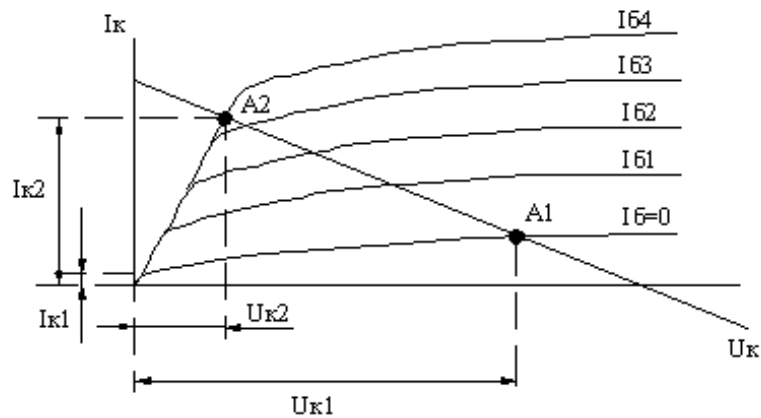


Рисунок 3.4 - Выходная характеристика транзистора

Это состояние называют режимом отсечки, который осуществляется подачей на его вход напряжения отрицательной полярности, т.е. при отрицательных потенциалах базы. При токе  $I_b=0$ , транзистор закрыт, коллекторный ток  $I_{к1}$  равен начальному коллекторному току, а напряжение  $U_k=U_{к1} \approx E_k$ .

Второе состояние определяется точка A2 и называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется сопротивлением резистора  $R_6$  и ток  $I_2=U_{вх} / R_6$ , т.к. сопротивление открытого [эмиттерного перехода](#) мало, потому что транзистор открыт. [Коллекторный переход](#) так же открыт, ток  $I_{к2} \approx E_k / R_k$ ,  $U_{к2} \approx 0$ . Т.е. повышению  $U_{вх}$  (потенциала базы) соответствует понижение  $U_{вых}$  (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют инвертирующим. Электронные ключи используют в устройствах формирования импульсов.

К простейшим устройствам формирования импульсов относят:

- 1)ограничители;
- 2)линейные цепи, включаемые на выходе электронных ключей.

Для ограничения сверху применяют диодные ключи или транзисторные ключи, работающие только в режиме отсечки или только в режиме насыщения. На диаграммах (рисунок 3.5) показано, как происходит ограничение синусоидального напряжения с помощью параллельного диодного ключа с ненулевым уровнем включения ключа.

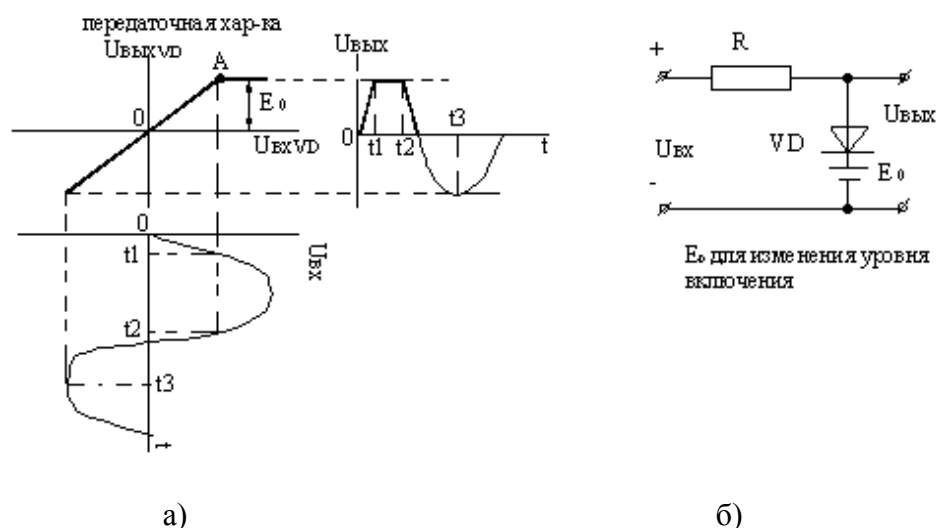


Рисунок 3.5 - Диаграмма работы диодного ключа: а) временные диаграммы и передаточная характеристика диодного ключа; б) схема включения диодного ключа

При положительной полярности напряжения  $U_{ВХ}$   $VD$  открыт (ключ замкнут), напряжение  $U_{ВЫХ} = 0$ , при отрицательной полярности напряжения  $U_{ВХ}$   $VD$  закрыт (ключ разомкнут),  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$ . Уровень ограничения равен уровню включения ключа (т. А).

Аналогично получают ограничение снизу. Для двухстороннего ограничения используют двойные ключи.

Таким образом, ограничители позволяют сформировать трапецидальное напряжение или прямоугольное, если амплитуда напряжения  $U_{ВХ}$  значительно больше уровня ограничения, а также сгладить вершины импульсов, искаженных помехой.

### ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

Линейные цепи служат для формирования коротких импульсов. К ним относятся дифференцирующие цепи и интегрирующие цепи. Дифференцирующие цепи – это линейные четырехполюсники, у которых напряжение  $U_{ВЫХ}$  пропорционально производной напряжения  $U_{ВХ}$  по времени:

$$U_{ВЫХ} = k \, d U_{ВХ} / dt ,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

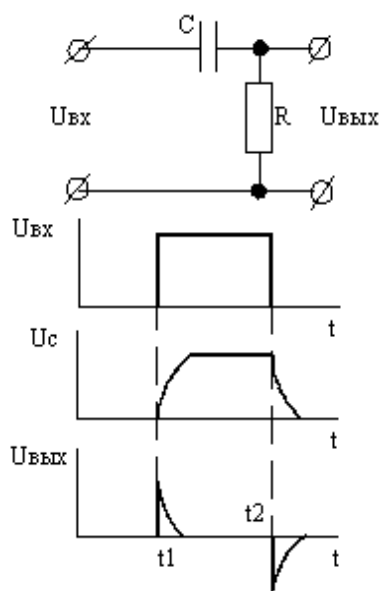


Рисунок 3.6. - Дифференцирующая цепь и временные диаграммы ее работы

На входе воздействует прямоугольный импульс напряжения (рис. 3.6). Конденсатор сначала заряжается, затем какое-то время находится в покое, затем разряжается, на выходе образуются короткие импульсы.

К линейным цепям относятся интегрирующие цепи, у которых  $U_{\text{ВЫХ}}$  пропорционально интегралу по времени от  $U_{\text{ВХ}}$ . При этом в схеме (рисунок 3.6)  $C$  и  $R$  меняются местами.

### **Мультивибраторы**

Мультивибраторы предназначены для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Мультивибраторы обычно выполняют функцию задающего генератора, формирующего запускающие входные импульсы для последующих узлов и блоков.

**Классификация** мультивибраторов производится по следующим признакам:

**1. по виду используемых элементов:**

- а) мультивибраторы на транзисторах;
- б) мультивибраторы на ИМС.

**2. по режиму работы:**

- а) автоколебательные;
- б) ждущие.

#### **АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МУЛЬТИВИБРАТОРЫ**

Подобно генераторам синусоидальных колебаний, автоколебательные мультивибраторы работают в режиме самовозбуждения. Для формирования импульсного сигнала внешнее воздействие не требуется. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения. Автоколебательные мультивибраторы могут быть построены на транзисторах (рис. 3.7) или на операционном усилителе (ОУ) (рис. 3.8).

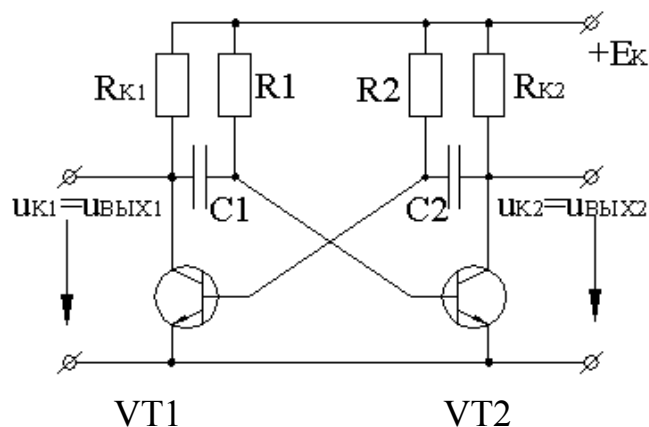


Рисунок 3.7 - Схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах

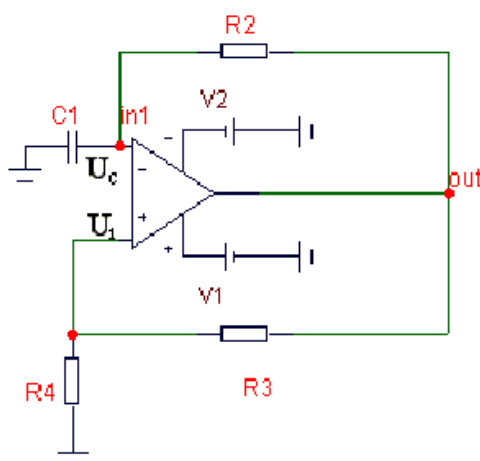


Рисунок 3.8 - Схема автоколебательного мультивибратора на ОУ

### Автоколебательный мультивибратор на транзисторах.

В автоколебательном режиме (рисунок 3.7) транзисторы поочередно переходят из открытого состояния в закрытое и обратно. При включении источника коллекторного питания  $+E_k$  один из транзисторов окажется открытым, а другой – закрытым. Если открыт, например, транзистор  $VT1$ , то конденсатор  $C1$ , зарядившийся во время установления процессов в схеме, начинает разряжаться по двум цепочкам: через сопротивления  $R_{к1}$  и  $R1$  и коллектор – эмиттер транзистора  $VT1$  и эмиттер – база транзистора  $VT2$ .

Разрядный ток создаёт на резисторе  $R1$  падение напряжения, убывающее по мере уменьшения этого тока по экспоненте. И это напряжение приложено к базе транзистора  $VT2$  и поддерживает его в закрытом состоянии, т.е.  $U_{бэ} VT2$  увеличивается по экспоненте.

В это же время конденсатор  $C2$  заряжается от источника  $E_k$  через участок эмиттер – база открытого транзистора  $VT1$  и резистор  $R_{к2}$ . По мере заряда конденсатора  $C2$  ток, протекающий по  $R_{к2}$  уменьшается и потенциал коллектора  $VT2$ , увеличивается по экспоненте. Через время, когда конденсатор  $C2$  зарядится, потенциал коллектора станет примерно равен  $E_k$ . Т. к.  $R1 \gg R_{к2}$ , то процесс разряда конденсатора  $C1$  проходит значительно медленнее, чем процесс заряда конденсатора  $C2$ . Когда потенциал базы  $VT2$  приблизится к

нулю, при полной разрядке  $C1$ ,  $VT2$  приоткрывается и начнет проводить ток. С этого момента, в результате действия положительной обратной связи, происходит лавинообразный процесс, в результате которого транзистор  $VT2$  открывается, а транзистор  $VT1$  закрывается, т. к. напряжение на конденсаторе  $C2$  приложено обратно к базе – эмиттер  $VT1$ . Далее все процессы повторяются, но уже относительно открытого транзистора  $VT2$ . Таким образом, параметры элементов  $C1$ ,  $R1$ ,  $C2$ ,  $R2$  определяют длительность импульса соответственно на выходе 1 и выходе 2:

В симметричном мультивибраторе выделяют следующие параметры:

- 1) период колебания  $T \approx 1,4R_1C$ ;
- 2) амплитуда импульсов  $U_m \approx \frac{E_K}{1,2...1,3}$ ;
- 3) длительность импульсов  $\tau_H \approx 0,7R_1C$ ;
- 4) длительность переднего фронта  $\tau_\phi \approx 2R_KC$ .

#### Автоколебательный мультивибратор на ОУ

Мультивибратор на ОУ относится к самовозбуждающимся генераторам (рисунок 3.8). ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики). Он сравнивает два сигнала: по неинвертирующему входу  $U_1$  и по инвертирующему входу  $U_c$  (напряжение конденсатора  $C1$ ). В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от  $U_{\text{вых max}}$  до  $U_{\text{вых min}} = -U_{\text{вых max}}$ . При  $R3=R4$  длительность импульса  $t_H \approx 1,1 R2C1$ , а период импульса  $T=2t_H \approx 2,2R2C1$ . Изменяя величины сопротивления  $R2$  и конденсатора  $C1$ , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

#### ЖДУЩИЙ МУЛЬТИВИБРАТОР

В ждущем режиме имеется одно состояние устойчивого равновесия и одно состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход - самопроизвольно по истечении некоторого времени. Ждущие мультивибраторы называют еще одновибраторами.

#### Ждущий мультивибратор на транзисторах.

Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью показана на рисунке 3.9).

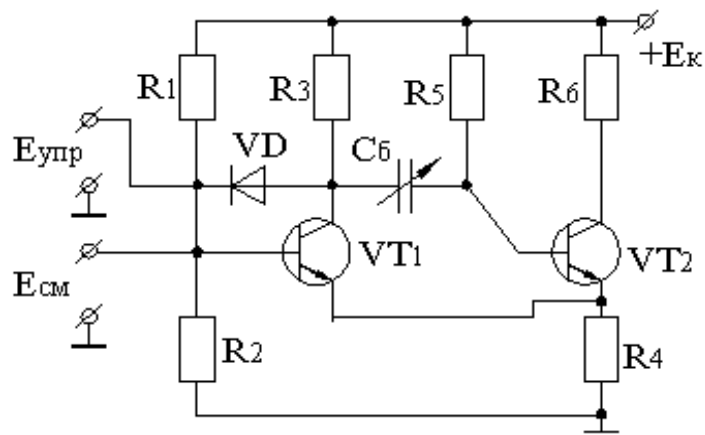


Рисунок 3.9 - Схема ждущего мультивибратора на транзисторах

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор  $VT2$  открыт положительным смещением от источника питания  $+E_k$  через резистор  $R5$ . Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на резисторе  $R4$ . Потенциал базы транзистора  $VT1$  устанавливается делителем  $R1, R2$ . Сопротивления  $R1, R2, R4$  выбирают такими, чтобы  $U_{б1} < U_{э2}$ , поэтому в устойчивом состоянии  $VT1$  закрыт. Емкость  $C_6$  оказывается подключенной левой обкладкой через  $R3$  к источнику  $E_k$ , а правой через открытый переход эмиттер – база к резистору  $R4$ .

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор  $VT1$  открывается. При этом положительная обкладка конденсатора  $C_6$  присоединяется через открытый  $VT1$  к эмиттеру  $VT2$ , а отрицательная обкладка к его базе. Это приводит к запирающему транзистора  $VT2$  и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе и прерыванию тока через коллектор – эмиттер транзистора  $VT2$ .

С моментом открывания транзистора  $VT1$  начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи  $+E_k, R5, C_6$ , коллектор – эмиттер  $VT1, R4$ , "земля".

Напряжение  $U_{б2}$  при этом постепенно возрастает и достигает порога отпирания транзистора  $VT2$ . Т. е.  $U_{э2} > U_{б1}$ ,  $VT1$  запирается, возвращая схему в исходное состояние (т.е. напряжение  $U_{к2}$  скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы).

Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора ( $R5, C$ ) с постоянной времени  $\tau \cong R5C$ .

Ждущие мультивибраторы используют для расширения импульсов; для задержки сигнала на заданное время (запускающий импульс может быть задержан на время, равное длительности импульса ждущего мультивибратора; если к его выходу подключить устройство, реагирующее на период напряжения по окончании выходного импульса, то можно реализовать реле времени); для задания регулируемых интервалов времени (таймеры).

Автоколебательный и ждущий мультивибраторы могут быть построены на ИМС со своими особенностями работы.

### **Блокинг–генераторы**



Блокинг-генераторы предназначены для формирования импульсов тока или напряжения прямоугольной формы преимущественно малой длительности. Они находят применение в схемах формирования пилообразного тока для формирования развертки электронного луча по экрану осциллографа. На основе блокинг-генератора выполняют формирователи управляющих импульсов в цифровых системах.

По принципу построения блокинг-генераторы представляют собой однокаскадные транзисторные усилители с глубокой положительной обратной связью, которая осуществляется импульсным транзистором. Схема блокинг-генератора, выполненная на транзисторе с ОЭ, показана на рисунке 3.10. Цепь положительной обратной связи (ПОС) осуществлена с помощью вторичной обмотки  $\omega_6$  трансформатора  $Tr$ , конденсатора  $C$  и резистора  $R$ , ограничивающего ток базы. Резистор  $R_6$  создает контур разряда конденсатора на этапе закрытого состояния транзистора.

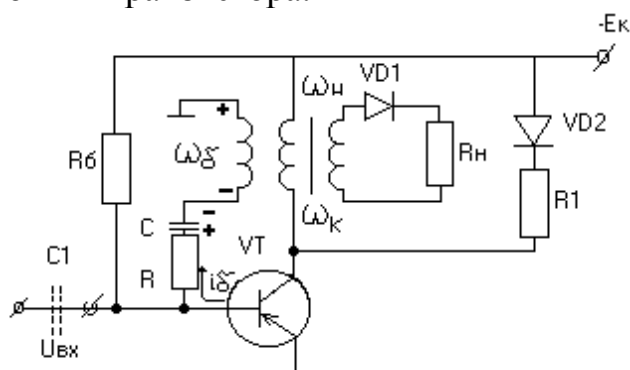


Рисунок 3.10 - Схема блокинг-генератора на транзисторе с ОЭ

Выходной сигнал снимают либо непосредственно с коллектора транзистора, либо с дополнительной нагрузочной обмотки  $\omega_н$  трансформатора  $Tr$ , которая связана с коллекторной обмоткой  $\omega_к$  трансформатора. Диод  $VD1$  исключает прохождение в нагрузку импульса напряжения отрицательной полярности, который возникает при запираии транзистора  $VT$ . Диод  $VD2$  и сопротивление  $R1$  выполняют функции защиты транзистора от перенапряжения.

Блокинг-генератор может работать в следующих режимах :

- 1) автоколебаний;
- 2) ждущем;
- 3) синхронизации.

В автоколебательном режиме в начальный момент времени транзистор  $VT$  закрыт, напряжение  $U_к = -E_к$ , напряжение на обмотке трансформатора, на базе транзистора  $U_б$  и на нагрузке  $U_н$  равны нулю. Закрытое состояние  $VT$  создается напряжением на конденсаторе  $C$ , который перезаряжается по цепи  $\omega_б - C - R - R_б - (-E_к)$ . Когда напряжение на  $C$  становится равным 0, то транзистор открывается и напряжение на коллекторе  $U_к$  уменьшается, что вызывает появление напряжения на коллекторной обмотке  $\omega_к$ . Напряжение на  $\omega_к$  трансформируется в  $\omega_б$  с такой полярностью, которая приводит в результате ПОС к увеличению базового тока  $i_б$ , что вызывает увеличение коллекторного тока  $i_к$ , снижение напряжения на коллекторе и дальнейшее повышение

напряжения на  $\omega_k$  и  $\omega_b$ . Процесс завершается переходом транзистора в режим насыщения и называется прямым блокинг–процессом.

Однако по мере заряда конденсатора, ток базы  $i_b$  уменьшается, вследствие чего уменьшается степень насыщения транзистора. Транзистор начинает закрываться и вместе с этим заканчивается формирование импульса напряжения.

Переход транзистора в закрытое состояние происходит за счет ПОС также лавинообразно и называется обратным блокинг–процессом.

При работе блокинг-генератора в режиме синхронизации в базовую цепь транзистора через конденсатор  $C1$  подают входные импульсы отрицательной полярности. Синхронизирующие импульсы осуществляют отпирание транзистора раньше момента естественного спада напряжения на его базе до нуля, в результате чего частота импульсов блокинг-генератора равна частоте следования импульсов синхронизации

Если блокинг-генератор работает в ждущем режиме, то на базу транзистора подается начальное дополнительное напряжение смещения, в результате чего транзистор остается закрытым до подачи входного импульса.

### ***Генераторы линейно изменяющегося напряжения***

Генераторы линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) служат для создания развертки электронного луча по экрану осциллографа, получение временных задержек импульсных сигналов, модуляции импульсов по длительности и т.д.

Линейно изменяющееся напряжение (ЛИН)- это импульсное напряжение, которое в течение некоторого времени изменяется практически по линейному закону, а затем возвращается к исходному уровню (рис. 3.11).

Параметры ЛИН:

- 1) максимальное значение амплитуды  $U_m$ ;
- 2) длительность рабочего хода  $t_p$ ;
- 3) время обратного хода  $t_o$ ;
- 4) коэффициент нелинейности  $\epsilon$ .

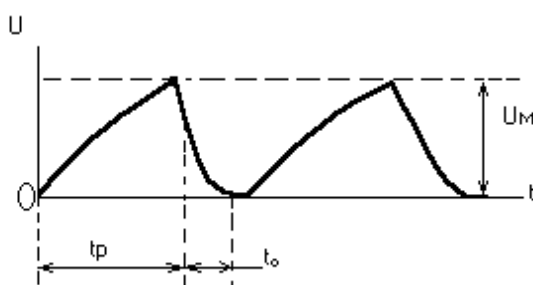


Рисунок 3.11 - Вид линейно изменяющегося напряжения

Формирование линейно изменяющегося напряжения (ЛИН) (или пилообразного) основано на чередовании во времени процессов заряда и разряда конденсатора. Схема ГЛИН показана на рисунке 3.12.

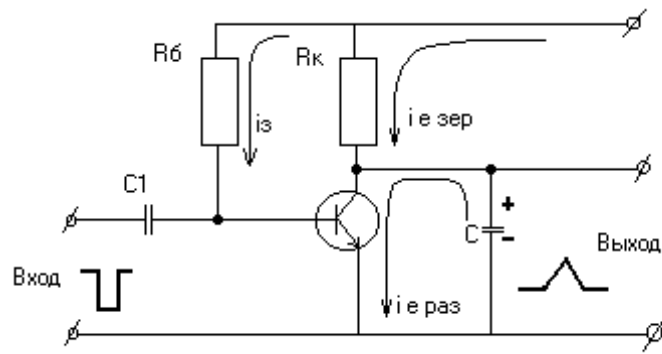


Рисунок 3.12 - Схема ГЛИН

На транзисторе  $VT$  собран ключ, управляемый прямоугольными импульсами отрицательной полярности. В исходном состоянии транзистор насыщен (ключ замкнут), что обеспечивается выбором соотношения сопротивлений резисторов  $R_б$  и  $R_к$ .

При воздействии входного импульса длительностью  $t_p$  транзистор закрывается (ключ разомкнут) и конденсатор  $C$  заряжается от источника  $+E_к$  через резистор  $R_к$  (рисунок 3.13). Напряжение на конденсаторе изменяется по экспоненте  $U_c = E_к (1 - e^{-t/(RC)})$ . По окончании входного импульса транзистор переходит в режим насыщения (ключ замкнут), и конденсатор быстро разряжается через промежуток коллектор-эмиттер. Используя начальный участок экспоненты, линейность которого достаточно высока, можно получить импульсы с малым коэффициентом нелинейности.

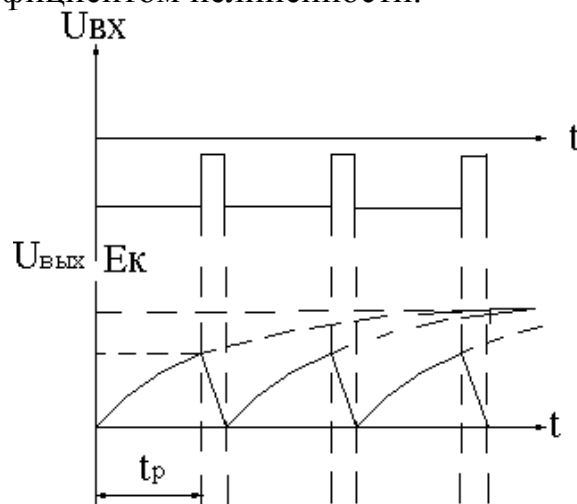


Рисунок 3.13 - Временные диаграммы  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  ГЛИН

## Тема 3.2. Логические элементы

### *Простые и составные логические элементы.*

Логические элементы (ЛЭ) выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией и составляют основу вычислительной техники, цифровых измерительных приборов и устройств автоматики.

Цифровая информация представляется двоичными константами 1 и 0. Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры Буля (алгебры логики).

Существуют три основные логические операции между логическими сигналами:

- конъюнкция – операция логического умножения (логическое И);
- дизъюнкция – операция логического сложения (логическое ИЛИ);
- инверсия – операция логического отрицания (логическое НЕ).

А также:

- операция И-НЕ (операция Шеффера);
- операция ИЛИ-НЕ (операция «стрелка Пирса»).

Логическая функция  $F$  выражает зависимость выходного логического состояния от входных переменных и принимает значения «0» или «1». Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности или таблицы переходов), где записываются комбинации входных сигналов и соответствующие им функции.

ЛЭ, реализующие эти операции, называются элементами «ИЛИ», элементами «И» и элементами «НЕ» и условно обозначаются (рисунок 3.14):

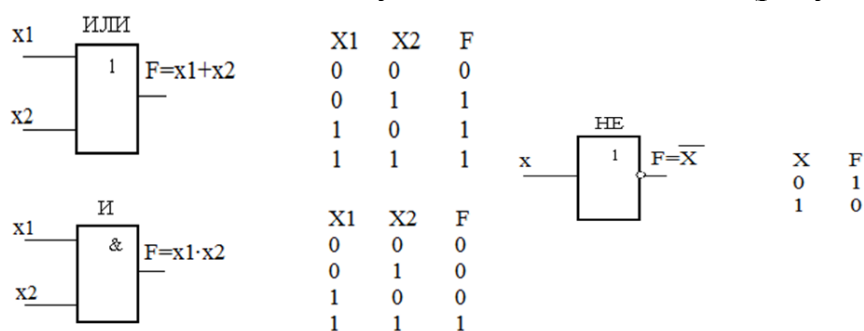


Рисунок 3.14 - Условное обозначение простых ЛЭ и правила выполнения логических операций

В элементах «ИЛИ» выходной сигнал  $F=1$ , если хотя бы на один из  $n$  входов подан сигнал «1». В элементах «И»  $F=1$ , если одновременно на все  $n$  входов подан сигнал «1».

ЛЭ, реализующие операции Шеффера и «стрелка Пирса», называются элементами «И-НЕ», элементами «ИЛИ-НЕ» и условно обозначаются (рисунок 3.15):

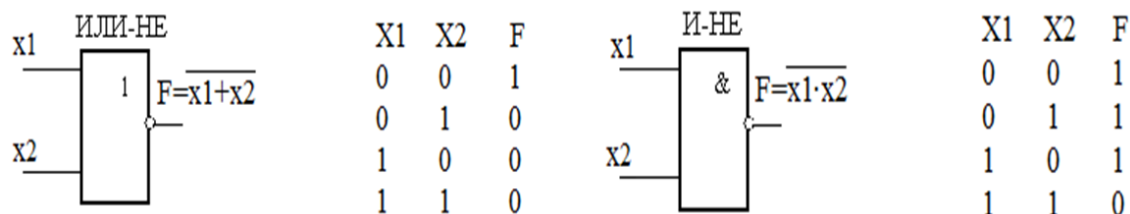


Рисунок 3.15 - Условное обозначение составных ЛЭ и правила выполнения логических операций

### Основные параметры логических элементов:

- функциональные возможности элемента;
- быстродействие;
- потребляемая мощность;
- помехоустойчивость.

Функциональные возможности определяются коэффициентом разветвления по выходу  $n$  и коэффициентом объединения по входу  $m$ .

Показателем быстродействия является среднее время задержки  $t_{з.с}$  прохождения сигнала через элемент.

Потребляемая мощность зависит от серии микросхемы.

Помехоустойчивость характеризует меру невосприимчивости логических элементов к изменению своих состояний под воздействием напряжения помех.

Интегральные логические элементы являются основной элементной базой для построения цифровых устройств.

В зависимости от компонентов, на которых построены логические элементы (т.е. в зависимости от того, какая логика работы лежит в основе), различают следующие типы базовых логических элементов, использующих соответствующие логики:

1. Диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
3. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
4. Интегрально-инжекционная логика (И<sup>2</sup>Л);
5. Логика на комплементарных полевых транзистора (КМОП).

В 1-м типе используются диоды и биполярные транзисторы, во 2-м, 3-м и 4-м – только биполярные транзисторы, в 5-м – полевые транзисторы.

Элемент «ИЛИ» наиболее просто реализуется на диодах (рисунок 3.16).

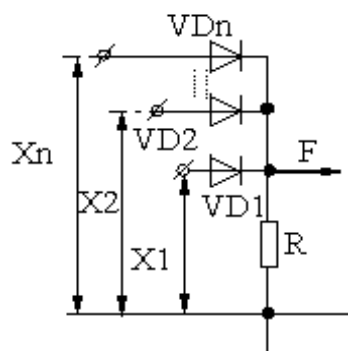


Рисунок 3.16 - Схемная реализация элемента «ИЛИ»

Значение  $F=1$  на выходе создается передачей входного сигнала вследствие отпирания одного из диодов. Остальные диоды находятся в закрытом состоянии.

Элемент «И» также реализуется на диодах (рисунок 3.17).

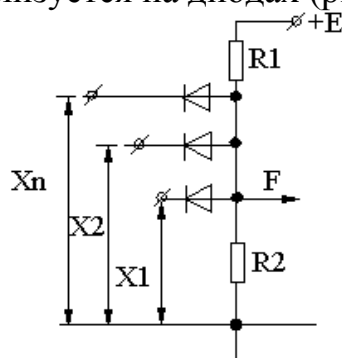


Рисунок 3.17 - Схемная реализация элемента «И»

При всех входных сигналах  $= 1$ , на катоде диодов положительный потенциал относительно общей точки и они закрыты. На выходе  $F=1$ . При нулевом значении сигнала хотя бы на одном из входов, напряжение на выходе определяется падением напряжения на открытом диоде и близко к нулю ( $F=0$ ).

Элемент «НЕ» представляет собой ключевую схему на транзисторе, которую мы уже рассматривали (рисунок 3.3).

Элемент «ИЛИ–НЕ» объединяет элементы «ИЛИ» и «НЕ» с очередностью проведения операций (рисунок 3.18).

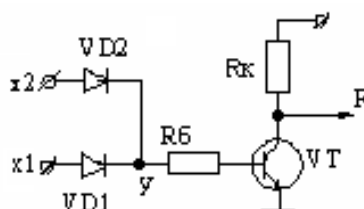


Рисунок 3.18 - Схемная реализация элемента «ИЛИ-НЕ»

Входным сигналам, равным 1, соответствует  $F=0$  на выходе, а при нулевых сигналах на входе, на выходе  $F=1$ .

В элементе «И–НЕ» (рисунок 3.19) единичным сигналам на всех входах соответствует «0» на выходе. При «0» на одном из входов создается логическая «1» на выходе. При «1» на обоих входах диоды  $VD1, VD2$  закрыты. В схеме образуется цепь  $+E_k-R_6-VD'-VD''$ , которая обеспечивает протекание тока базы транзистора  $I_b=E_k/R_6$ .

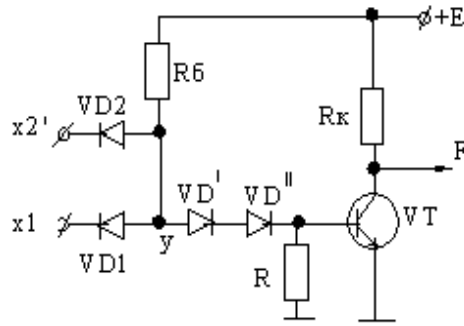


Рисунок 3.19 - Схемная реализация элемента «И-НЕ»

Транзистор открыт и насыщен,  $F=0$ . При логическом «0» на одном из входов (например  $x_1$ ) открывается  $VD1$ . Образуется цепь:  $+E_k - R_6 - VD1 - x_1$ . При этом цепь  $VD' - VD''$  - эмиттерный переход транзистора оказывается шунтированной цепью с проводящим диодом:  $I_6=0$ , транзистор закрыт,  $F=1$ .

Назначение диодов  $VD', VD''$ : т.к. потенциал логического «0» реально больше нуля, то при отсутствии  $VD'$  и  $VD''$  это может привести к отпирианию транзистора. При введении  $VD'$  и  $VD''$  напряжение между т. У и эмиттером транзистора будет приложено к диодам, а  $U_{03}=0$ .

Следует отметить, что существуют комбинированные логические элементы, которые позволяют осуществлять более сложные логические операции.

Например, элемент «2И-ИЛИ-НЕ» (рисунок 3.20) позволяет выполнять функцию  $F = \overline{x_1 x_2 + x_3 x_4}$ .

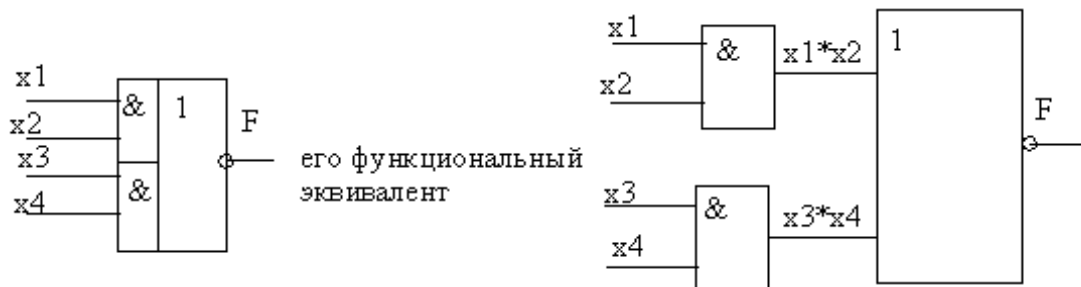


Рисунок 3.20 - Условное обозначение и функциональный эквивалент элемента «2И-ИЛИ-НЕ»

Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры логики.

## Основные законы и тождества алгебры логики

### Аксиомы в случае одной переменной:

- |                               |                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1) $x + 0 = x$                | 6) $x \cdot 0 = 0$                  |
| 2) $x + 1 = 1$                | 7) $x \cdot 1 = x$                  |
| 3) $x + x = x$                | 8) $x \cdot x = x$                  |
| 4) $x + \bar{x} = 1$          | 9) $x \cdot \bar{x} = 0$            |
| 5) $\overline{(\bar{x})} = x$ | 10) $\overline{(\overline{x})} = x$ |

### Основные законы алгебры логики:

1. Переместительный закон для логического сложения и умножения:

$$x + y = y + x;$$

$$x \cdot y = y \cdot x$$

2. Сочетательный закон для логического сложения и умножения:

$$x + y + z = (x + y) + z = x + (y + z);$$

$$x \cdot y \cdot z = (x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$$

3. Распределительный закон для логического сложения и умножения:

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$$

4. Законы инверсии (теоремы де Моргана) для логического сложения и умножения:

$$\overline{x + y + z} = \bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \bar{z};$$

$$\overline{x \cdot y \cdot z} = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z}$$

### Основные тождества алгебры логики:

$$1) x \cdot y + x \cdot \bar{y} = x$$

$$4) x \cdot (\bar{x} + y) = x \cdot y$$

$$2) x + x \cdot y = x$$

$$5) (x + y) \cdot (x + z) = x + y \cdot z$$

$$3) x \cdot (x + y) = x$$

$$6) x \cdot \bar{y} + y = x + y$$

## Тема 3. 3. Триггеры

Триггером называют устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями, способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. Триггер относится к базовым элементам цифровой техники.

Триггеры классифицируются по следующим признакам:

- 1) по функциональному признаку:

- а) *RS*-типа – триггеры с двумя установочными входами;
- б) *D* типа – триггеры задержки с одним входом;
- в) *T* типа – триггеры с одним счетным входом;



- г) *JK*- типа – универсальные триггеры с несколькими входами.
- 2) по способу управления:
- асинхронные;
  - тактируемые (синхронные).

В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход [1, 5, 6].

В синхронных (тактируемых) триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов. И переключение производится только при наличии разрешающего, тактирующего импульса.

### ***R-S*-триггер**

**Асинхронный *RS*-триггер** выполняется на логических элементах «ИЛИ-НЕ» или «И-НЕ».

Схема асинхронного *RS*-триггера (рисунок 3.21) содержит два элемента ИЛИ-НЕ, имеет два входа. При этом, *S*-вход называется установочным (set – устанавливать), устанавливает триггер в состояние логической «1»; а *R*-вход – вход сброса (reset – вновь устанавливать), переводит триггер в исходное состояние логического «0», и два выхода *Q* – прямой,  $\bar{Q}$  – инверсный. В случае, когда на входах сигналы равны «0» ( $R = 0, S = 0$ ), а на прямом выходе *Q* сигнал равен «1», то на инверсном выходе  $\bar{Q} = 0$ . То есть на прямом выходе состояние  $Q = 1$  сохраняется.

При  $R = 0, S = 0$  возможно и второе устойчивое состояние, при котором  $Q = 0, \bar{Q} = 1$ . То есть при  $R = 0, S = 0$ , триггер находится в состоянии хранения информации (1-го или 2-го устойчивого состояния).

При  $R = 0, S = 1$ , триггер оказывается в первом устойчивом состоянии ( $Q = 1, \bar{Q} = 0$ ), а при  $R = 1, S = 0$  – во втором устойчивом состоянии ( $Q = 0, \bar{Q} = 1$ ).

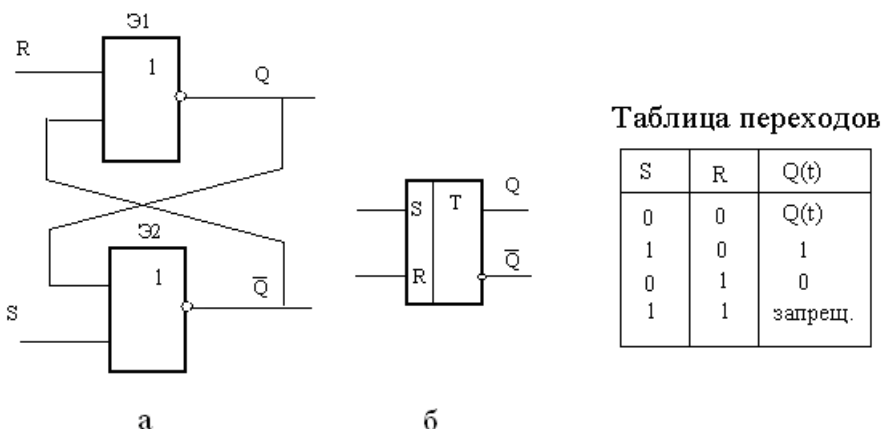


Рисунок 3.21 - Схема асинхронного *RS*-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ» (а), его условное обозначение (б) и таблица переходов

Комбинация  $R = 1, S = 1$  запрещена, т.е. при  $S = 1$  триггер устанавливается в состояние «1», а при  $R = 1$  – сбрасывается в состояние «0» (см. таблицу переходов).

Аналогичным образом работает  $RS$ -триггер на элементах И-НЕ (рисунок 3.22), с той разницей, что он должен иметь инверсные входы, т.е. устанавливаться в состояние «1» при  $S = 0$  и сбрасываться в состояние «0» при  $R = 0$ . Запрещенная комбинация – при  $R = 0, S = 0$ .

На основе асинхронного  $RS$ -триггера строится любой, сколь угодно сложный, триггер: к асинхронному  $RS$ -триггеру добавляется своя особенная комбинационная схема управления этим триггером.

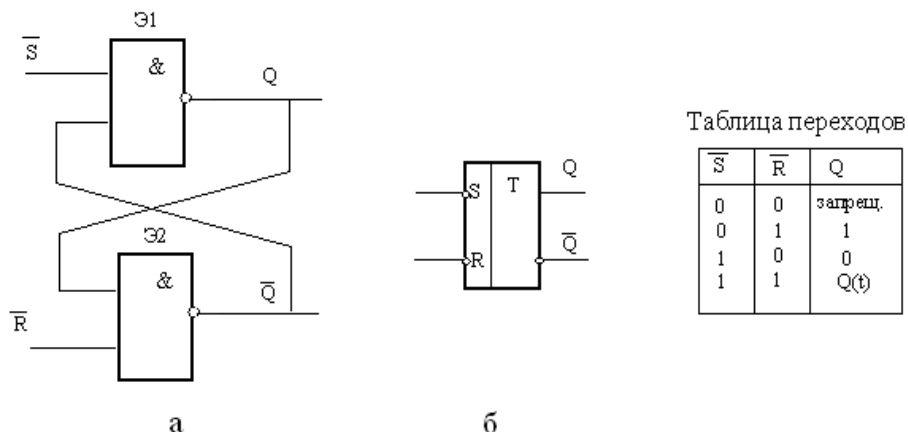


Рисунок 3.22 Схема асинхронного  $RS$ -триггера на элементах И-НЕ (а), его условное обозначение (б) и таблица переходов

*Синхронный  $RS$ - триггер* на элементах «И-НЕ» показан на рисунке 3.23. Синхронный  $RS$ - триггер состоит из схемы асинхронного  $RS$ - триггера, на входах которого установлены 2 управляющих элемента «И-НЕ» ( $\text{Э}_3, \text{Э}_4$ ).

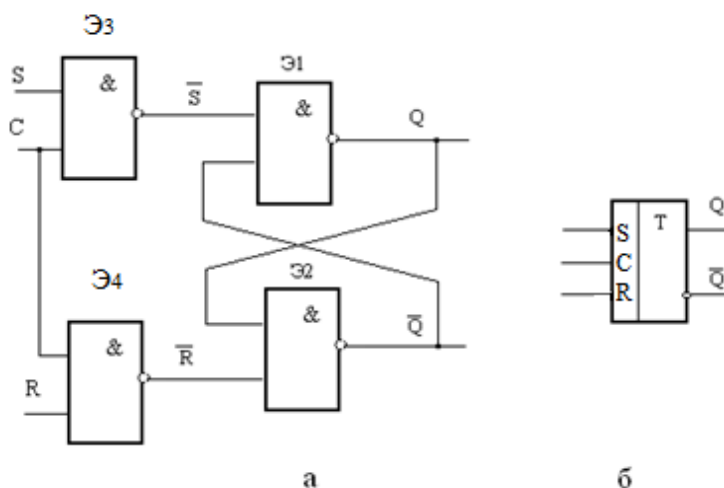


Рисунок 3.23 - Схема синхронного  $RS$ -триггера на элементах И-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Переключение подобного триггера происходит только при наличии разрешающего сигнала, подаваемого на вход  $C$  ( $C = 1$ ). Такой триггер имеет

статическое управление, т.е. осуществляет прием информации в течение всего интервала времени, пока  $C = 1$ .

Следует отметить следующие комбинации входных сигналов:

- 1) при  $R = S = C = 0$  – состояние триггера сохраняется;
- 2) при  $S = 1, R = C = 0$  – состояние триггера сохраняется;
- 3) при  $S = 1, R = 0, C = 1$  – на выходе  $Q=1$ ;
- 4) при  $S = 0, R = 1, C = 1$  – на выходе  $Q=0$ .

Комбинация  $S = R = C = 1$  должна быть исключена, так как на выходе элементов Э<sub>3</sub>, Э<sub>4</sub> одновременно присутствовал бы «0», что запрещено для асинхронного триггера.

## D- триггеры

*D-триггеры* (delay – задержка) используют для приема информации по одному входу.

Схема получается из схемы асинхронного RS-триггера (в данном случае на элементах «И-НЕ») (рисунок 3.24).

Работает триггер следующим образом. *D-триггер* переходит в состояние «1», т.е. на выходе  $Q = 1$ , если в момент прихода синхронизирующего сигнала  $C = 1$ , на его информационном входе  $D = 1$ . В этом состоянии триггер остается и после окончания сигнала на входе  $D$ , которое длится до прихода очередного синхронизирующего сигнала, возвращающего триггер в состояние «0».

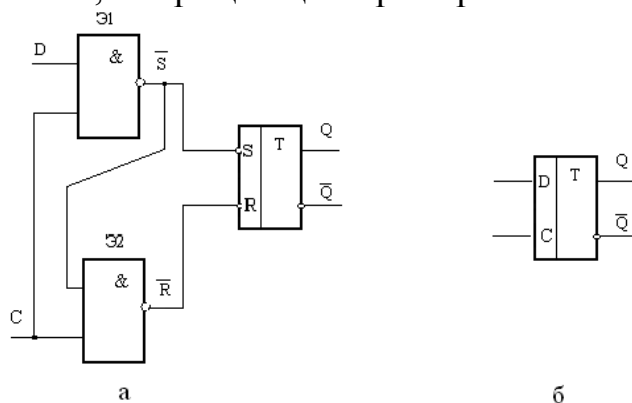


Рисунок 3.24 - Схема синхронного *D-триггера* (а) и его условное обозначение (б)  
 Это видно на временных диаграммах (рисунок 3.25).

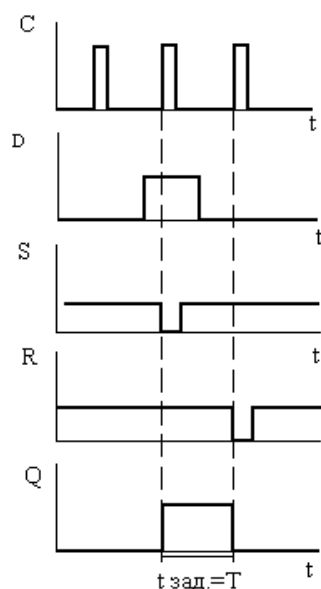


Рисунок 3.25 - Временные диаграммы синхронного  $D$ -триггера

При  $D = 1$ ,  $C = 1$  на выходе  $\bar{S}$  элемента  $\mathcal{E}_1$  сигнал «0» ( $\bar{S} = 0$ ), на выходе  $\bar{R}$  элемента  $\mathcal{E}_2$  сигнал «1» ( $\bar{R} = 1$ ). Так как  $RS$ - триггер имеет инверсные входы, то при  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 1$  он переходит в состояние «1» ( $Q = 1$ ) и остается в этом состоянии до тех пор, пока при  $D = 0$  не придет сигнал  $C = 1$ . Тогда  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 0$  и триггер возвращается в состояние «0» ( $C = 0$ ). При  $D = 0$ ,  $\bar{S} = 1$  и независимо от  $C$  на выходе  $Q = 0$ . Таким образом,  $D$ - триггер «задерживает» поступившую на его вход информацию на время, равное периоду синхронизирующих сигналов.

### **$T$ -триггер**

$T$ -триггер (tumble – опрокидываться), или счетный триггер, имеет один информационный вход и переходит в противоположное состояние в результате воздействия на его вход каждого очередного сигнала. Название «счетный» связано с широким применением  $T$ -триггеров в счетчиках импульсов.

$T$ -триггеры бывают одноступенчатые и двухступенчатые; а так же синхронные и асинхронные. Одноступенчатый  $T$ -триггер может быть реализован на базе  $D$ -триггера путем введения обратных связей (рисунок 3.26).

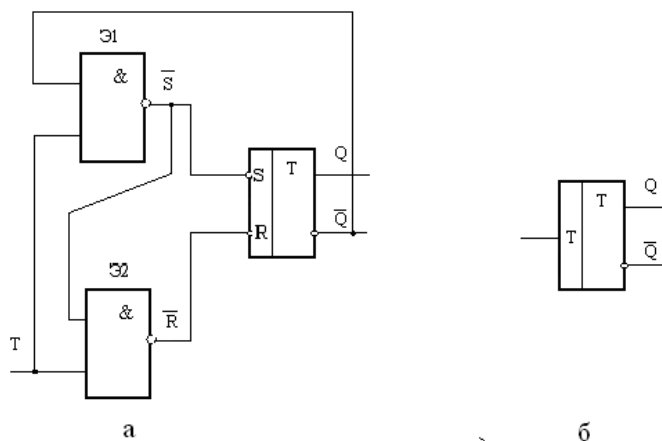


Рисунок 3.26 - Схема одноступенчатого  $T$ - триггера (а) и его условное изображение (б)

Состояние такого триггера меняется при каждом изменении сигнала на  $T$ -входе от «0» к «1» (рисунок 3.27).

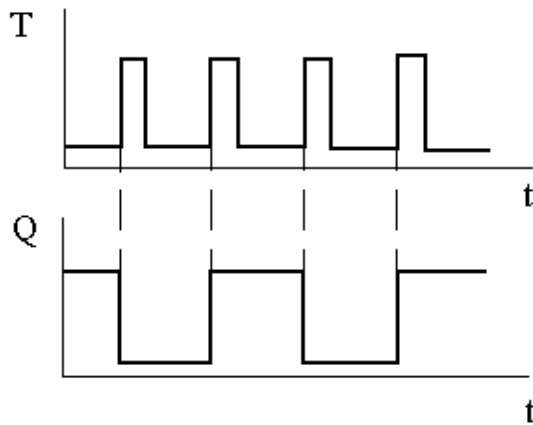


Рисунок 3.27 - Временные диаграммы одноступенчатого  $T$ -триггера

Двухступенчатые триггеры  $T$ -типа выполняются путем введения обратных связей на базе двух последовательно соединенных синхронных или асинхронных  $RS$ -триггеров, один из которых называют основным или ведущим; другой – вспомогательным или ведомым (рисунок 3.28).

В таком асинхронном  $T$ -триггере вход синхронизации  $C$  преобразуется в счетный вход  $T$ . Состояние такого  $T$ -триггера меняется на противоположное при каждом изменении сигнала на  $T$ - входе от «1» к «0».

Временные диаграммы показаны на рисунок 3.29.

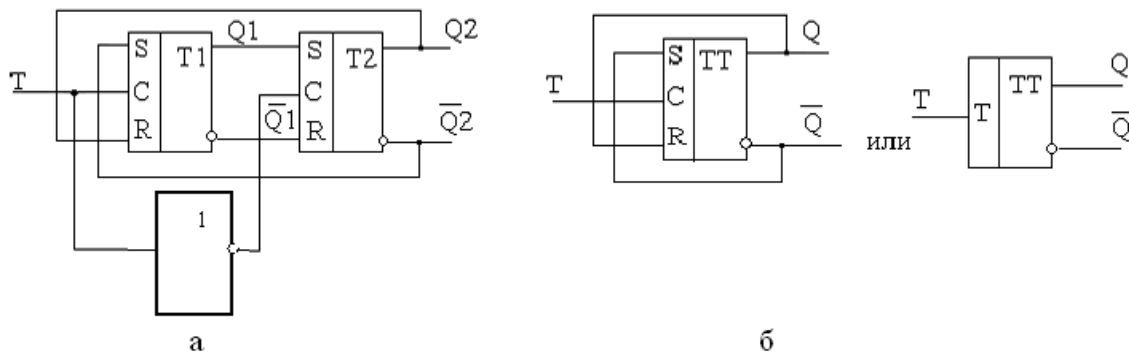


Рисунок 3.28 - Схема (а) и условное графическое изображение (б) асинхронного двухступенчатого  $T$ - триггера

В данном случае состояние триггера на выходе  $Q$  меняется по заднему фронту каждого импульса на  $T$ - входе, т.е. при изменении сигнала от «1» к «0». Объясняется это тем, что в момент начала импульса информация записывается в основной триггер, а после его окончания передается во вспомогательный.

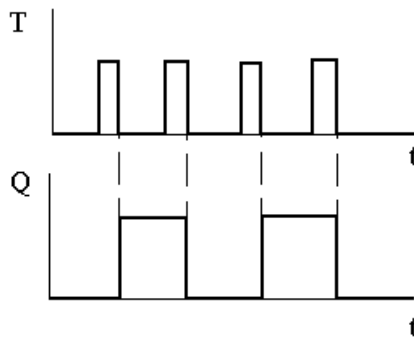


Рисунок 3.29 - Временные диаграммы двухступенчатого T-триггера

### JK-триггер

JK-триггер может быть построен на основе двухступенчатого T-триггера путем использования элементов И-НЕ на входных цепях ведущего триггера (рисунок 3.30).

Вход  $J$  соответствует входу  $S$ , а вход  $K$  – входу  $R$ ,  $C$  – синхронизирующий вход. Поэтому на базе JK- триггеров реализуют синхронный RS- триггер, у которого комбинация  $R = S = 1$ , запрещенная для обычного RS- триггера, является разрешающей для переключения при  $C = 1$ .

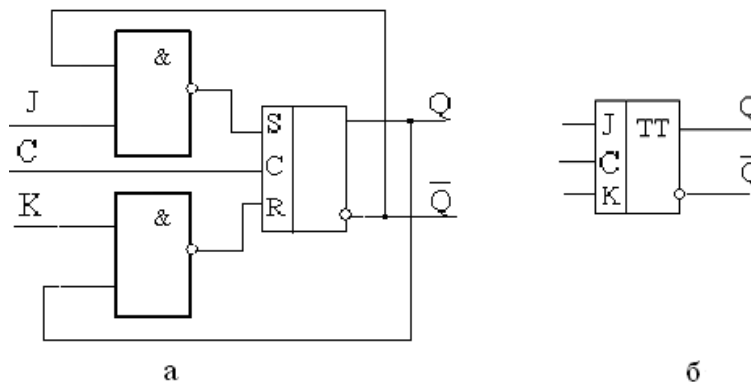


Рисунок 3.30 - Схема JK- триггера (а) и его условное обозначение (б).

При  $J = K = 1$ , JK-триггер изменяет свое состояние на противоположное в момент окончания каждого синхронизирующего сигнала, т.е. реализует функции T-триггера. Поэтому на базе JK-триггера легко реализуется синхронный T-триггер путем объединения входов и использования их в качестве входа  $T$  (рисунок 3.11, а). Добавляя инвертор на входе JK-триггера получают D-триггер (рис. 4.31, б).

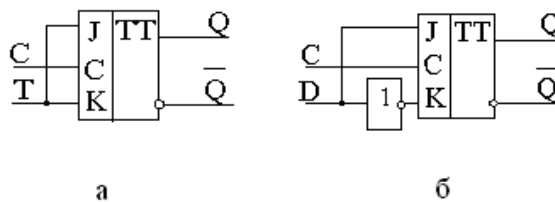


Рисунок 3.31. Схемы T- триггера (а) и D- триггера (б) на основе JK- триггера

Все типы триггеров, реализуемые на основе *JK*-триггера, дают задержку в появлении выходных сигналов, равную длительности синхронизирующего сигнала. Временные диаграммы *JK*-триггера показаны на рисунке 3.32.

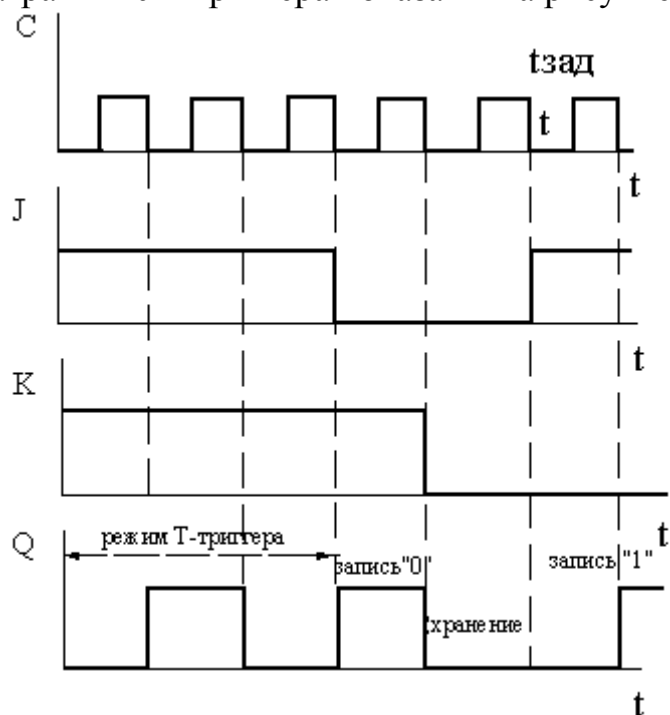


Рисунок 3.32 - Временные диаграмм *JK*- триггера

Примером выполнения триггеров на ИМС являются К155ТВ1, КМ155ТВ1, КР1533ТМ2 и др.

### Тема 3.4. Комбинационные схемы

Комбинационными называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов в этот же момент времени. Используются в информационно-измерительных системах, системах автоматического управления, устройствах промышленной автоматики и т.п. К комбинационным схемам относятся следующие устройства: дешифраторы и шифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры.

**Дешифратором** (декодером) называют устройство, предназначенное для распознавания различных кодовых комбинаций (или слов). В дешифраторе каждой комбинации сигналов на входе соответствует сигнал только на одном из его выходов. В микропроцессорах дешифраторы выполняют расшифровку кодов команд, адресов ячеек памяти, осуществляют коммутацию цепей.

Логическая схема дешифратора на два входа приведена на рисунке 3.33, а.

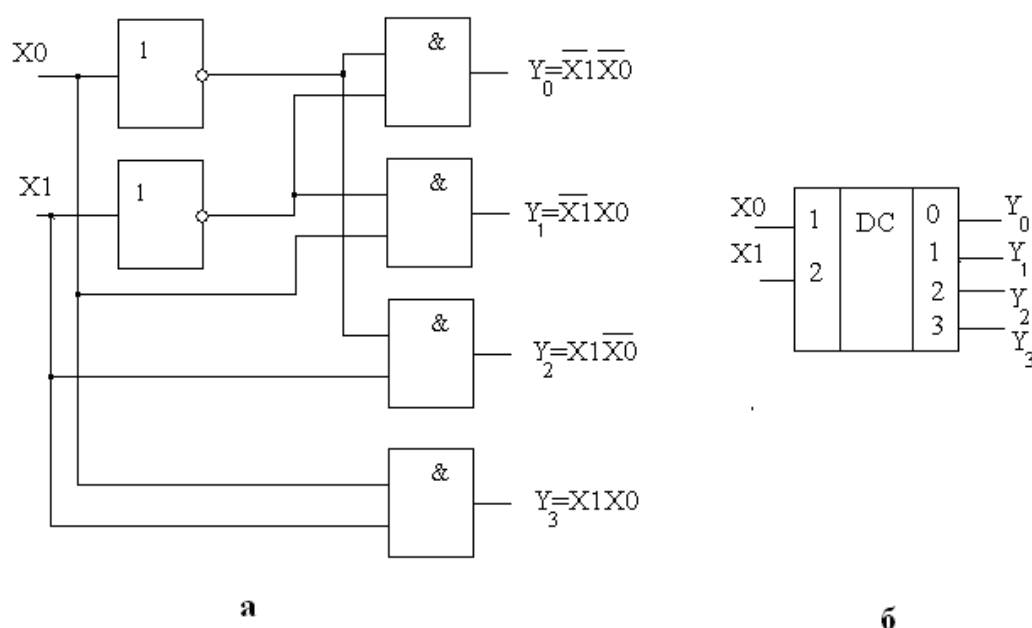


Рисунок 3.33 - Схема дешифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (таблица 3.1), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = \overline{X1} \cdot \overline{X0}; Y_1 = \overline{X1} \cdot X0; Y_2 = X1 \cdot \overline{X0}; Y_3 = X1 \cdot X0$$

Таким образом, в зависимости от комбинации входных сигналов (т.е. двоичного кода) единичный сигнал будет появляться только на одном из выходов дешифратора. Например, если комбинация входных сигналов 10, то единичный сигнал будет на выходе Y<sub>2</sub>, что соответствует цифре 2 в десятичной системе счисления и т.д.



Таблица 3.1

Таблица истинности дешифратора

Входные сигналы		Выходные сигналы			
X1	X0	Y <sub>0</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Дешифраторы выпускаются в виде ИМС различных серий в зависимости от назначения, например, К555 ИДЗ.

**Шифратор** (кодер) – комбинационная схема, преобразующая однопозиционный код в двоичный позиционный код. Примером является шифратор клавиатуры для ввода в цифровое устройство кода в двоичной системе счисления. При не нажатых клавишах на всех входах шифратора – логический «0», а нажатая клавиша подает на соответствующий вход логическую «1». Совокупность сигналов на входах образует код в двоичной системе, соответствующий нажатой клавише.

Логическая схема шифратора на два выхода приведена на рисунке 3.34, а.

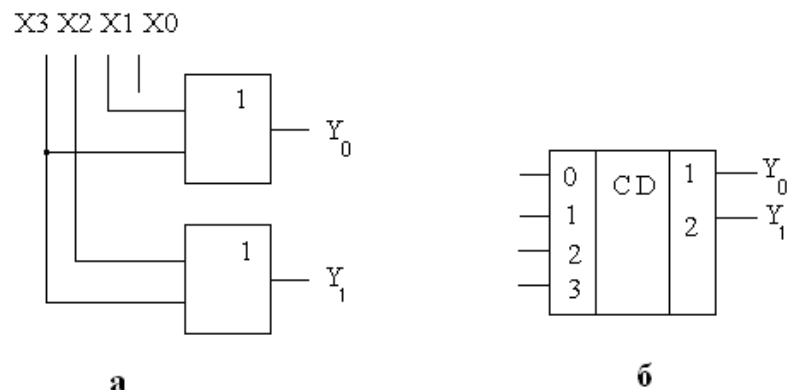


Рисунок 3.34 - Схема шифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (таблица 3.2), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = X_1 + X_3;$$

$$Y_1 = X_2 + X_3$$

Таблица 3.2

Таблица истинности шифратора

Входные сигналы				Выходные сигналы	
X3	X2	X1	X0	Y1	Y0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1

Таким образом, при подаче на вход, например, сигнала X2 («1» на входе X2) на выходе шифратора получаем сигналы 10 в двоичной системе, что соответствует числу 2 в десятичной системе счисления.

Очевидно, что в данном шифраторе сигнал, подаваемый на вход X0, не используется. Примером ИС шифратора может служить ИС К555 ИВЗ.

**Мультиплексор** – операционный узел, осуществляющий микрооперацию передачи сигнала с одного из входов на один выход, т.е. используется для последовательного опроса логических состояний большого числа переменных и передачи их на один выход.

Схема мультиплексора с двумя информационными входами (x<sub>0</sub>, x<sub>1</sub>) и управляющим (или адресным) входом a показана на рисунке 3.35.

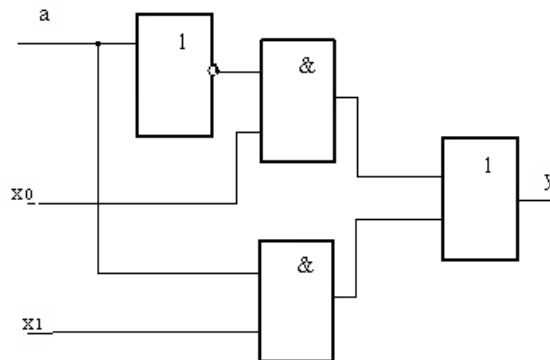


Рисунок 3.35 - Схема мультиплексора с двумя информационными входами

При сигнале на адресном входе a = 1 на выход передаётся значение x<sub>1</sub>, а при сигнале a = 0 – значение x<sub>0</sub>.

Мультиплексор на 4 входа (x<sub>0</sub>–x<sub>3</sub>) имеет 2 адресных входа a<sub>0</sub> и a<sub>1</sub> (рисунок 3.36). Если сигнал a<sub>0</sub> = 1, то передаётся значение x<sub>1</sub>, x<sub>3</sub>; если сигнал a<sub>0</sub>=0, то x<sub>0</sub>, x<sub>2</sub>; если a<sub>1</sub>= 1, то x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> ; если a<sub>1</sub>=0 то x<sub>0</sub>, x<sub>1</sub>.

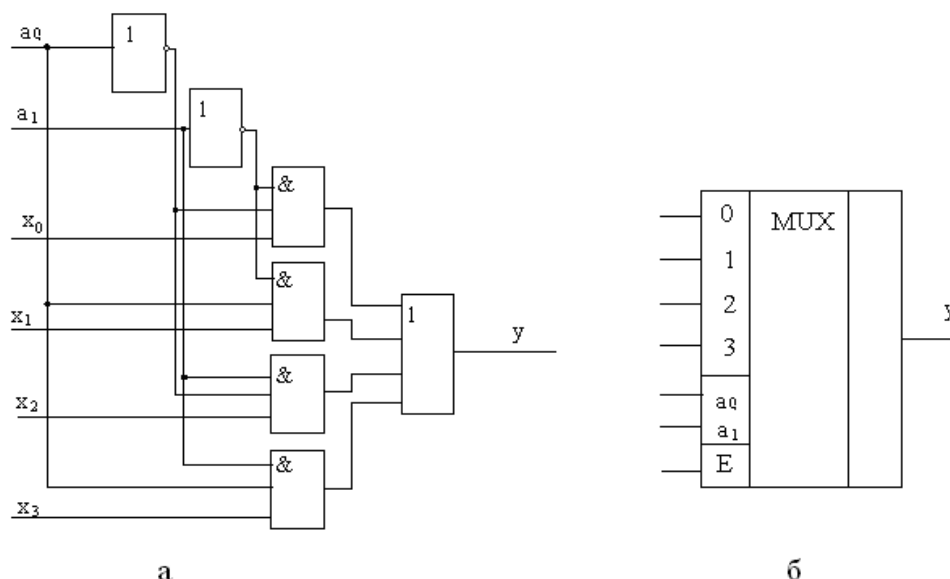


Рисунок 3.36 - Схема мультиплексора на 4 входа (а) и его условное обозначение (б)

Из схемы видно, что сигнал на выходе  $y$  будет складываться из 4-х слагаемых:  $y = \overline{a_1} \times \overline{a_0} \times x_0 + \overline{a_1} \times a_0 \times x_1 + a_1 \times \overline{a_0} \times x_2 + a_1 \times a_0 \times x_3$

Например, если  $a_1 = 1$ ,  $a_0 = 0$ , то

$y = 0 \times 1 \times x_0 + 0 \times 0 \times x_1 + 1 \times 1 \times x_2 + 1 \times 0 \times x_3 = x_2$ , т.е. адрес входа мультиплексора  $A = (a_1, a_0) = 10_2 = 2_{10}$ , т.е. опрашивается 2 вход.

Мультиплексоры выпускаются в виде ИС, например, ИС К555 КП2, КР1533КП2.

**Демультимплексор (селектор)** – операционный узел, в котором сигналы с одного информационного входа распределяются в желаемой последовательности по нескольким выходам. Схема демультимплексора на четыре выхода показана на рисунке 3.37, а.

Функцию демультимплексора может выполнять стробируемый дешифратор, в котором информационный сигнал  $X$  подается на стробирующий вход  $C$ , а остальные входы используются как адресные.

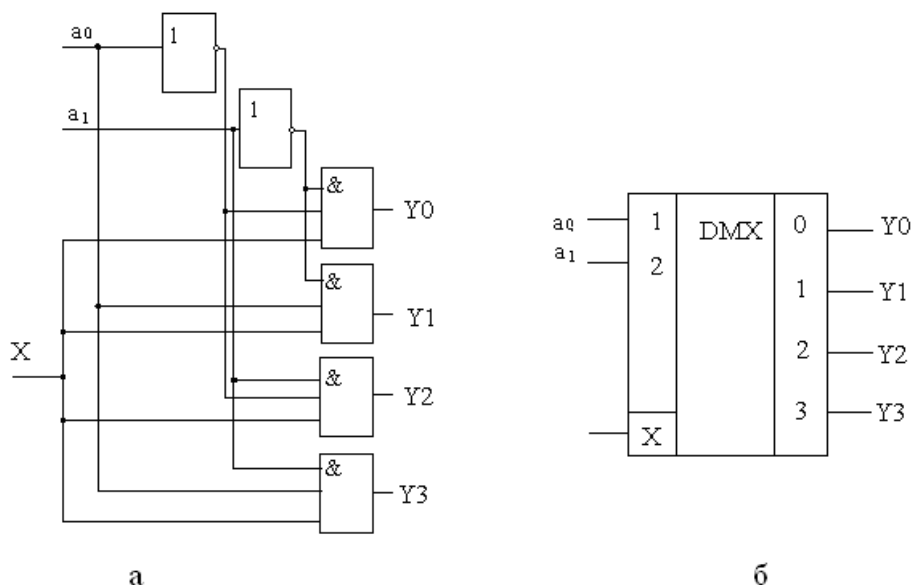


Рисунок 3.37 - Схема демультиплексора (а) и его условное обозначение (б)

**Сумматор** – операционный узел, выполняющий арифметическое суммирование кодов чисел. Сумматоры входят в состав арифметико-логического устройства (АЛУ) ЭВМ.

Классификация сумматоров:

1. По системе кодирования:
  - двоичные,
  - двоично-десятичные,
  - десятичные и др.;
2. По способу организации суммирования:
  - комбинационные (результат суммирования не запоминается),
  - накапливающие (результат суммирования запоминается);
3. По способу выполнения операций:
  - последовательные,
  - параллельные,
  - параллельно-последовательные.

Простейшим сумматором является одноразрядный двоичный сумматор, или *полусумматор*. Он предназначен для сложения двоичных цифр, в результате чего образуется их сумма и осуществляется перенос в соответствии с правилами двоичного сложения, имеет 2 входа ( $X, Y$ ) и 2 выхода ( $S$  – сигнал суммы и  $C$  – сигнал переноса в следующий разряд). Схема на логических элементах и условное графическое изображение полусумматора показано на рисунке 3.38.

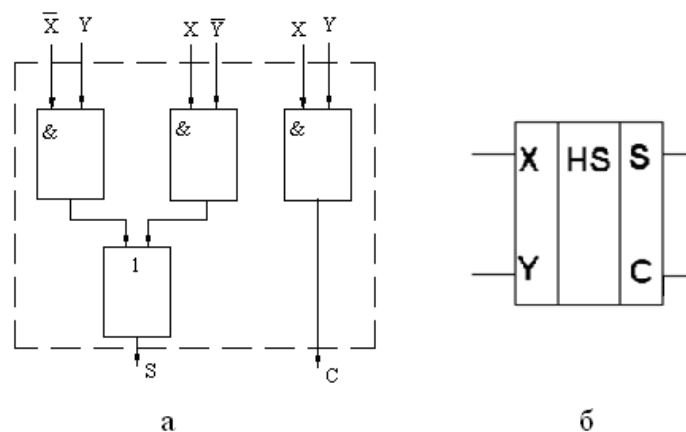


Рисунок 3.38 - Схема полусумматора на логических элементах (а) и его условное обозначение (б)

Если только на одном из входов сигнал равен 1, то выходной сигнал на линии выхода  $S = 1$ . Если оба входных сигнала равны 1, то выходной сигнал на выходе  $S = 0$ , а на выходе  $C$  (перенос) сигнал равен 1. Для всех остальных комбинаций входных сигналов перенос  $C = 0$ . Логические соотношения для этой схемы будут таковы:

$$S = \bar{X}Y + X\bar{Y}; C = XY.$$

Комбинации входных сигналов полусумматора  $X$ ,  $Y$  и соответствующие им выходные сигналы  $S$  и  $C$  показаны в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Входные сигналы полусумматора  $X$ ,  $Y$  и выходные сигналы  $S$ ,  $C$

Вход		Выход	
$X$	$Y$	$S$	$C$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

В таком одноразрядном сумматоре не учитывается перенос из младшего разряда. Полный сумматор используется при сложении более двух двоичных цифр. В таком сумматоре три входа: два входа для первого и второго слагаемых, третий вход – для сигнала переноса из младшего разряда.

Рассмотрим пример сложения двух двоичных чисел 1011 и 1110:

$$\begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 11001 \text{ — сумма}
 \end{array}
 \quad \text{или} \quad
 \begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 0101 \text{ — частичная сумма} \\
 \underline{11} \text{ — разряды переноса} \\
 11001 \text{ — полная сумма}
 \end{array}$$

Цифры переноса в каждом столбце должны быть учтены в процессе сложения.

Таким образом, сумматор (рисунок 3.39) имеет 3 входа и 2 выхода: выход  $S$  – для выходного значения поразрядной суммы и выход  $C_0$  – для выходного сигнала переноса, который суммируется в следующем разряде.

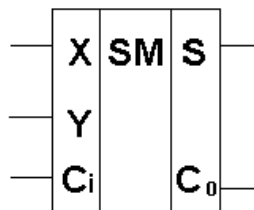


Рисунок 3.39 - Условное обозначение сумматора

Логические соотношения для сумматора будут следующими:

$$S = \bar{X}\bar{Y}C_i + \bar{X}YC_i + X\bar{Y}C_i + XYC_i,$$

$$C_0 = XC_i + XY + YC_i.$$

Рассмотрим работу четырехразрядного параллельного двоичного сумматора, схема которого представлена на рисунке 3.40.

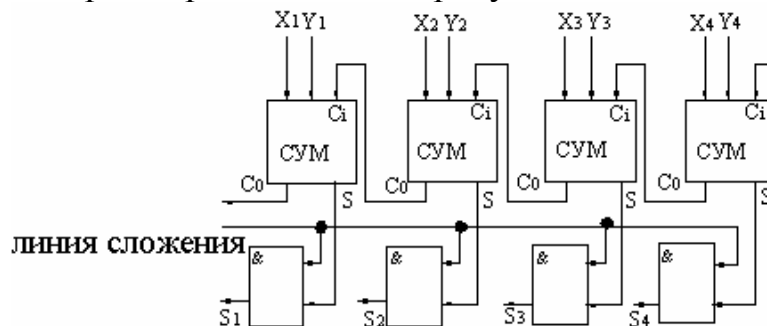


Рисунок 3.40 - Схема четырехразрядного параллельного двоичного сумматора

Например, входы для первого слагаемого  $X1...X4$ , для второго  $Y1...Y4$ . Пусть первое число – 0111, а второе – 0011. Их сумма 1010, т.е.  $S1 = 1, S2 = 0, S3 = 1, S4 = 0$ .

Так как  $X4$  и  $Y4$  – младшие разряды, то перенос из предыдущего разряда в них не поступает.  $X4 = 1$  и  $Y4 = 1, S = 0$ , при этом возникает перенос, который суммируется в сумматоре вместе с разрядами  $X3$  и  $Y3$ . Так как  $X3 = 1$  и  $Y3 = 1$  и  $C_i = 1$ , то  $S3 = 1$ , на линии переноса также появится единица.

Так как  $X2 = 1, Y2 = 0, C_i = 1$ , то  $S2 = 0$ , перенос в следующий разряд будет = 1. Так как  $X1 = 0, Y1 = 0, C_i = 1$ , то  $S1 = 1$ , перенос будет = 0.

Сумматоры выпускаются в виде ИМС, например, К561ИМ1 – сумматор на 4 разряда.

### Тема 3.5. Счетчики и регистры

Цифровым счетчиком импульсов называют устройство, реализующее счет числа входных импульсов и фиксирующее это число в каком-либо виде.

Счетчики применяются для подсчета шагов программы, циклов, построения распределителей импульсов и т.д.

**Классификация счетчиков:**

- 1) По целевому назначению:
  - а) простые: суммирующие и вычитающие,
  - б) реверсивные;
- 2) По способу организации цепей переноса информации:
  - а) с последовательным переносом,
  - б) со сквозным,
  - в) с групповым;
- 3) По способу переключения триггеров:
  - а) асинхронные,
  - б) синхронные.

Суммирующий счетчик предназначен для выполнения счета в прямом направлении, т.е. для сложения. Вычитающие счетчики служат для осуществления счета в обратном направлении, т.е. для вычитания. Таким образом, каждый вновь поступающий на вход импульс в суммирующем счетчике увеличивает его показание на единицу, а в вычитающем – уменьшает. Реверсивные счетчики предназначены для выполнения счета как в прямом, так и в обратном направлении, т. е. могут работать и в режиме сложения и в режиме вычитания.

В асинхронных счетчиках переход каждого триггера (разряда) из одного состояния в противоположное происходит сразу после изменения сигнала на входе. В синхронных счетчиках для переключения триггеров необходимо наличие синхронизирующего импульса.

Основой для построения счетчиков являются асинхронные или синхронные Т-триггеры, поэтому счет импульсов ведется в двоичной системе исчисления. Простейшая схема асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика показана на рисунке 3.41. Счетчик состоит из трех последовательно соединенных Т-триггеров, имеющих вход R для установки в состояние «0».

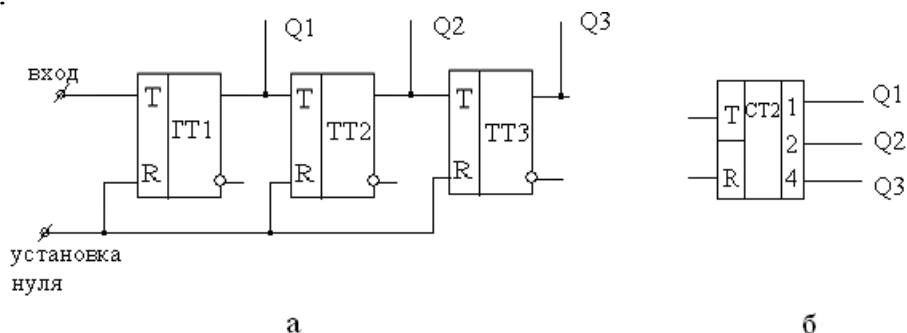


Рисунок 3.41 - Схема асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика (а) и его условное обозначение (б)

Счетные импульсы подаются на счетный Т-вход первого триггера. Счетные входы последующих триггеров связаны непосредственно с прямыми выходами предыдущих триггеров.

Работу схемы можно рассмотреть с использованием временных диаграмм (рисунок 3.42). В исходном положении все триггеры находятся в положении «0». По окончании первого входного импульса триггер Т1 перейдет в состояние «1», второй и третий триггеры останутся в состоянии «0»; по окончании второго импульса Т1 переключится в «0», т.е. первый разряд счетчика становится равным «0», а второй триггер Т2, т.е. второй разряд, переключается в состояние «1», третий триггер останется в состоянии «0».

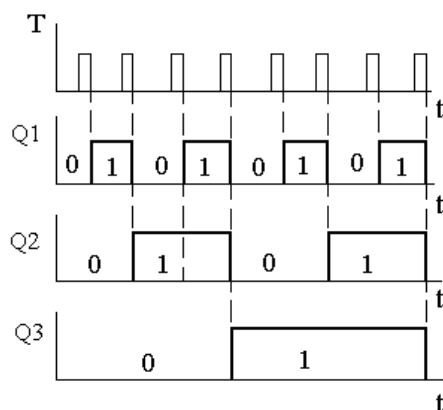


Рисунок 3.42 - Временные диаграммы асинхронного суммирующего двоичного трехразрядного счетчика

В счетчике записывается число 010 и т.д. (после 8-го входного импульса все триггеры переходят в состояние «0» и счет повторяется). Значения состояний триггеров представим в виде таблицы переходов счетчика. Из таблицы 3.4 видно, что состояние триггеров отражает число поступивших на вход импульсов в двоичной системе.

Общее число возможных состояний N (модуль счета) определяют числом триггеров n:  $N=2^n$ . В данном случае  $N=8$ .

Таблица 3.4

Таблица переходов суммирующего двоичного трехразрядного счетчика

№ входного импульса	Состояние триггера		
	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8	0	0	0

Для построения вычитающего счетчика нужно соединить последовательно не прямые, а инверсные выходы триггеров. Такой счетчик работает следующим образом. В начале все триггеры устанавливаются в состояние «1» (для данной схемы



из трех триггеров это соответствует двоичному числу 111). Поступивший на вход счетчика импульс переводит триггер  $T1$  в состояние «0», а состояние остальных триггеров не изменяется. Следовательно, в счетчике будет записано число 110. Следующий входной импульс уменьшает число еще на одну единицу и т.д.

Рассмотренный счетчик является счетчиком с последовательным переносом. Для увеличения быстродействия используются счетчики со сквозным переносом, при этом используются синхронные  $T$ -триггеры. Разбивая триггеры на группы и организуя цепь формирования сигналов на счетных входах, строятся счетчики с групповым переносом.

Для создания счетчика, работающего в другом коде, например в десятичном, применяют обратные связи. Рассмотрим функциональную схему десятичного (или декадного) счетчика импульсов на четырех триггерах с принудительным счетом (рисунок 3.43).

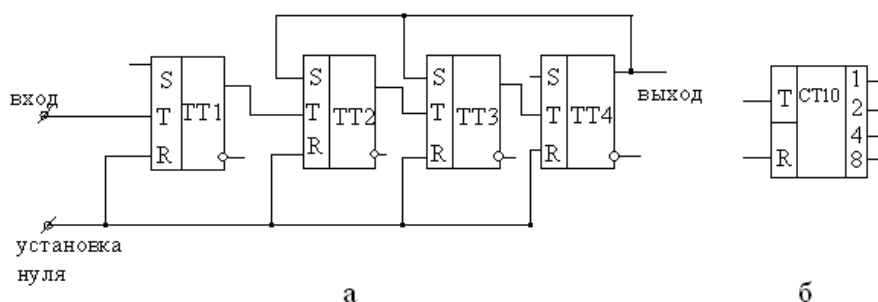


Рисунок 3.43 - Схема десятичного счетчика импульсов (а) и его условное обозначение (б)

До 8-го входного импульса счетчик работает как двоичный. С приходом восьмого импульса с выхода триггера  $T4$  сигналы обратной связи поступают на входы  $T2$ ,  $T3$  и переводит их из состояния «0» в состояние «1», что наглядно видно по таблице переходов двоично-десятичного счетчика (таблица 3.5). Девятый импульс переводит триггер  $T1$  в состояние «1» и все триггеры оказываются в состоянии «1». Десятый импульс переводит все триггеры в состояние «0», и счет начинается снова. Используя обратные связи, можно построить счетчик, работающий в системе счисления с любым основанием.

Таблица 3.5

Таблица переходов двоично-десятичного счетчика

№ входного импульса	Состояние триггеров			
	Q4	Q3	Q2	Q1
7	0	1	1	1
8	1	0(1)	0(1)	0
		↓	↑	↑
9	1	1	1	1
10	0	0	0	0

Построение последовательных счетчиков с произвольным коэффициентом счета осуществляется следующим образом.

При модуле счета  $N \neq 2^n$  счетчик должен состоять из  $n$ -триггеров, так чтобы  $2^{n-1} < N < 2^n$ . Тогда соответствующий двоичный счетчик будет иметь избыточные устойчивые состояния, которые надо устранить за счет внутренней связи между триггерами.

Пусть надо создать триггер с  $N = 5$ . Число триггеров должно быть не менее трех, т.е. при модуле счета  $N = 5$  счетчик должен возвращаться в исходное (нулевое) состояние после пятого импульса, т.е. при  $Q_1 = 1, Q_2 = 0, Q_3 = 1$ .

Исключить оставшиеся состояния можно с помощью комбинационной схемы, которая после набора  $Q_1 = 1; Q_2 = 0; Q_3 = 1$  подавала бы 1-ый сигнал на  $R$  – входы триггеров и возвращала бы их в состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ . Такая схема показана на рисунке 3.44.

После пятого импульса на входы элемента И поступают высокие уровни с выходов  $Q_1$  и  $Q_3$ . На его выходе появляется тоже высокий уровень, который подается на  $R$  – входы триггеров и перебрасывает их в исходное состояние. Таким же образом можно построить счетчики на любой другой модуль счета.

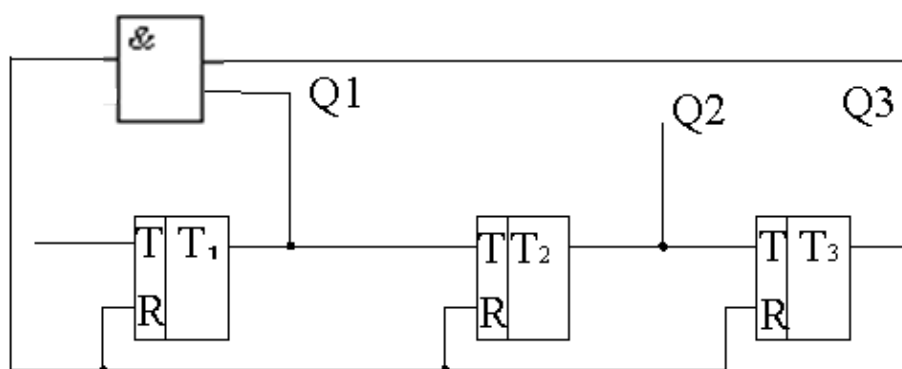


Рисунок 4.44 - Схема счетчика с модулем счета  $N=5$

Основные параметры счетчиков:

- 1) модуль счета или коэффициент пересчета  $N$ ;
- 2) быстродействие счетчика;
- 3)  $f_{сч}$  – частота счетных импульсов;
- 4)  $t_{уст}$  – время установки счетчика.

Примерами цифровых счетчиков могут служить ИМС К155ИЕ2, К555ИЕ6, К561ИЕ14 и др.

### Регистры

Регистрами называют устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой информации.

В зависимости от способа записи и считывания информации различают следующие типы регистров:

- 1) параллельные;
- 2) последовательные;
- 3) параллельно-последовательные.

Основные элементы регистра – двоичные ячейки, в качестве которых применяются триггеры. Число триггеров определяется длиной «слова», т.е. числом двоичных разрядов «слова».

Схема *параллельного n-разрядного регистра* показана на рис. 3.45. В параллельных регистрах запись двоичного числа, или «слова», осуществляется параллельным кодом, т.е. во все разряды регистра одновременно.

Информация в ячейки регистра записывается по команде «Ввод» (т.е. на входе «Ввод» должна быть «1»). Тогда сигналы на каждом из n- входов установят триггеры в соответствующие состояния. На входе регистра информация появится по команде «Вывод», а при ее отсутствии на выходах – нули. При считывании информация, записанная в регистре, сохраняется. Поэтому такие регистры называют регистрами памяти.

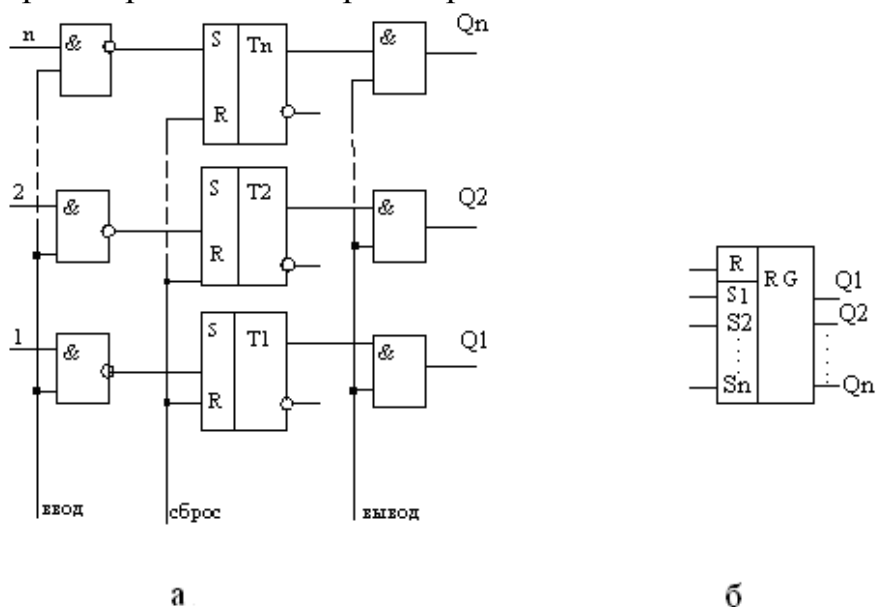


Рисунок 3.45 - Схема параллельного n-разрядного регистра (а) на RS-триггерах и его условное изображение (б)

*Последовательные (сдвиговые) регистры* состоят из последовательно соединенных двоичных ячеек памяти (триггеров), состояния которых передаются (или сдвигаются) на последующие ячейки под действием тактовых импульсов.

Структурная схема последовательного четырехразрядного регистра показана на рисунке 3.46. Перед записью информации регистр устанавливается в ноль. Для этого в отсутствие сигнала на входе подается серия тактовых импульсов с числом импульсов, равным количеству разрядов в регистре.

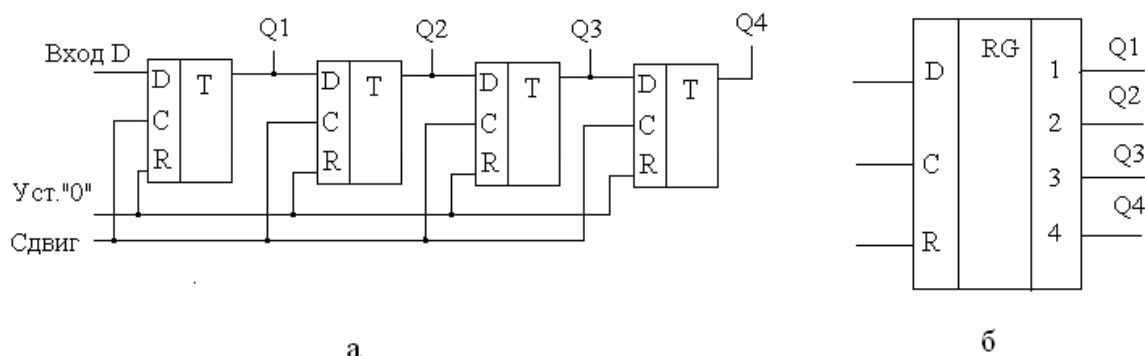


Рисунок 3.46 - Структурная схема последовательного регистра (а) и его условное обозначение (б)

При записи информации одновременно с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы. Тактовыми импульсами осуществляется продвижение информации от младшего разряда регистра к старшему. В результате этого процесса после четвертого тактового импульса ячейки регистра принимают состояние, соответствующее коду входного четырехразрядного числа. Считывать информацию из сдвигающего регистра можно в последовательном коде, продвигая информацию через все разряды регистра к выходу, либо в параллельном коде одновременно с выходов разрядов, что видно на рисунке 3.47).

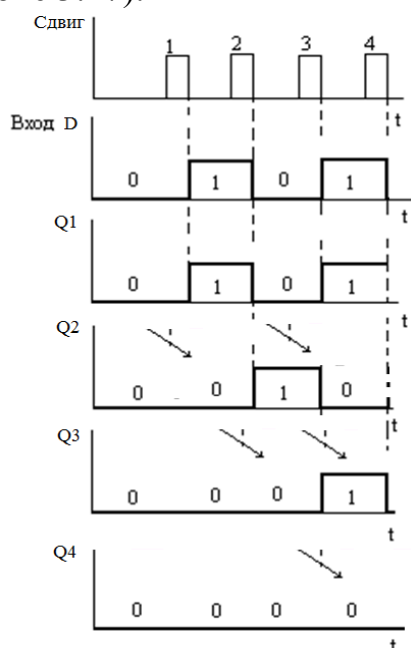


Рисунок 3.47 - Временные диаграммы работы сдвигового регистра

В параллельно-последовательных регистрах сочетаются свойства регистров последовательного и параллельного действия. В этой связи они могут быть использованы для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно (рисунок 3.48).

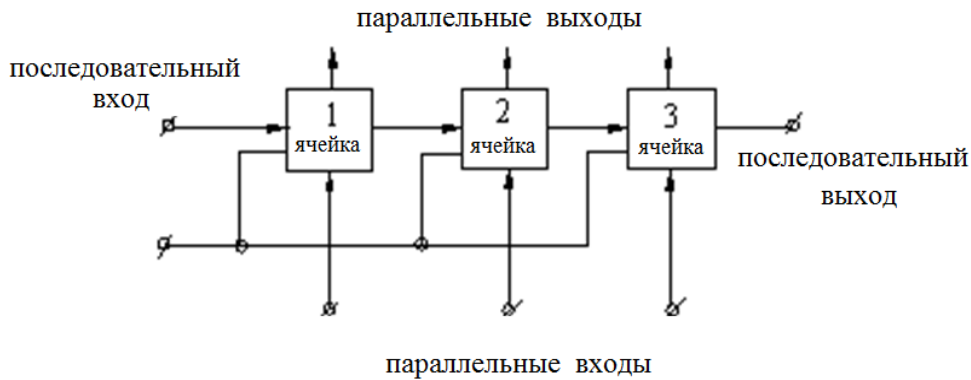


Рисунок 4.48 - Структурная схема параллельно-последовательного регистра

Примеры выполнения регистров на ИМС – К155ИР13, КР580ИР82 и др.

### Тема 3.6. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи

#### Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – функциональный узел,

однозначно преобразующий кодовые комбинации цифрового сигнала в значении аналогового сигнала.

Основой для нахождения однозначного соответствия может служить соотношение:

$$U_{\text{вых}} = E_0 (X_1 2^{-1} + X_2 2^{-2} + \dots + X_N 2^{-N}),$$

где  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе ЦАП;

$E_0$  – опорное напряжение;

$X(X_1, X_2, \dots, X_N)$  – цифровой код;  $X_i$  принимают значение 0 или 1.

При определении  $E_0$  каждому  $X_i$  на выходе устройства соответствует напряжение  $U_{\text{вых}}$ .

Принцип действия ЦАП заключается в преобразовании цифрового кода в сопротивление (проводимость) или напряжение. Под действием цифрового сигнала  $x_i$  (а это может быть «0» или «1») размыкается или замыкается ключ (рисунок 3.49), т.е. подключается или отключается резистор (происходит деление опорного напряжения  $E$ ). Для преобразования многоразрядного кода в сопротивление или напряжение создаются многополюсные резисторные матрицы. При этом каждый разряд преобразуемого кода управляет определенным ключом, который в зависимости от логического значения разряда либо замыкается, подключая опорный источник питания к соответствующему полюсу резисторной цепи, либо остается разомкнутым.

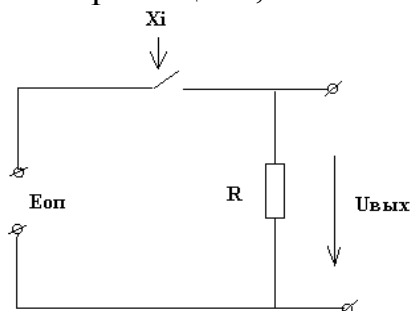


Рисунок 3.49 - Принцип действия ЦАП

Выходной сигнал получается в результате суммирования токов или напряжений на резисторе. Схема многополюсного ЦАП, в которой матрица резисторов подключена к входу операционного усилителя ключами, показана на рисунке 3.50.

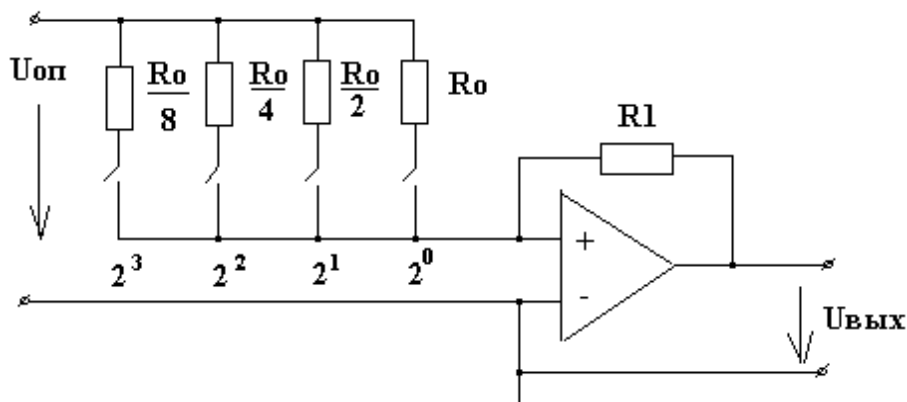


Рисунок 3.50 - Схема многополюсного ЦАП

Коэффициенты передачи  $k = U_{\text{вых}} / U_{\text{оп}}$  по входам  $2^0$ ,  $2^1$ ,  $2^2$ ,  $2^3$  равны соответственно:

$$k_0 = (R1/R_0)z_0;$$

$$k_1 = (2R1/R_0)z_1;$$

$$k_2 = (4R1/R_0)z_2;$$

$$k_3 = (8R1/R_0)z_3,$$

где  $z$  – числа, принимающие значения «0» или «1» в зависимости от положения соответствующих ключей.

Выходное напряжение ЦАП определяется суммой:

$$U_{\text{вых}} = - U_{\text{оп}} (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) = - U_{\text{оп}} (R1/R_0) (z_0 + 2z_1 + 4z_2 + 8z_3)$$

Недостатком такого ЦАП является большой диапазон изменения сопротивления взвешенных резисторов.

Поэтому в современных ЦАП применяются резисторные матрицы, в которых используются одинаковые или отличающиеся в 2...4 раза резисторы. Наиболее часто применяются матрицы  $R$ - $2R$  (рис. 3.51), составленные из резисторов всего двух номиналов  $R$  и  $2R$ , что делает изготовление матрицы очень технологичным и позволяет выполнять ее в интегральном исполнении вместе со всеми необходимыми активными элементами (электронными ключами и схемами их управления, суммирующими операционными усилителями и т. д.).

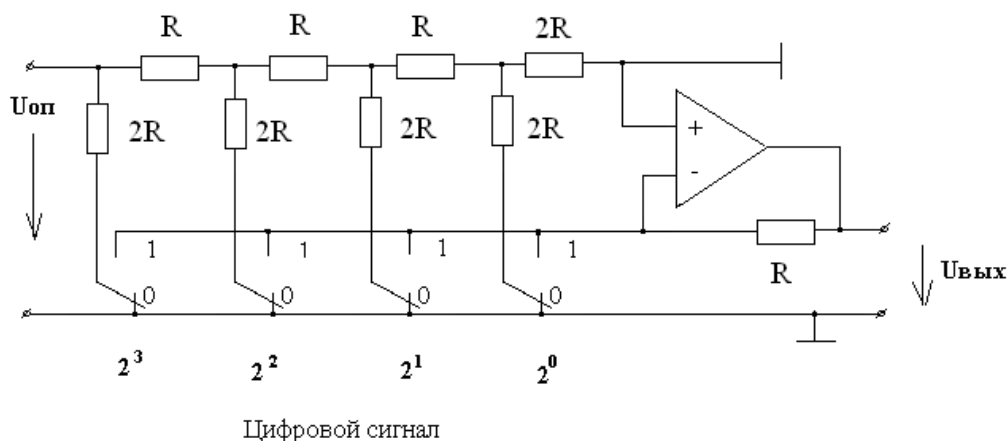


Рисунок 3.51 - Схема ЦАП на основе резисторной матрицы R-2R

Особенностью матрицы R-2R является постоянство сопротивления в узлах: если цепочка резисторов R-2R замкнута на резистор с сопротивлением 2R со стороны младшего разряда, то в любом ее узле (объединяющем два резистора R и один резистор 2R) сопротивление слева и справа будет равно 2R (если ключи справа и слева замкнуты на «землю»). Суммарный ток будет строго пропорционален коду входного цифрового сигнала.

Матрицы резисторов изготавливаются в виде интегральных микросхем 572 и 594 серий.

**Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)** – решают задачу поиска однозначного эквивалента аналоговому сигналу цифрового кода, т.е. АЦП вырабатывает двоичные кодовые сигналы, представляющие периодические выборки аналогового сигнала.

В АЦП происходят следующие два процесса:

1. Деление (когда весь диапазон изменения входного сигнала разбивается делением на интервалы, которым присваиваются двоичные коды);
2. Кодирование (осуществляется путем сравнения входного сигнала с значениями выделенных интервалов, в результате чего входной сигнал заменяется цифровым машинным кодом).

Функциональная схема АЦП последовательного типа представлена на рисунке 3.52, где ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ДС - двоичный счетчик, ГТИ - генератор тактовых импульсов, устройство сравнения напряжений, построенное на ОУ и называемое компаратором [8, 9].

Тактовые импульсы поступают на вход двоичного многоразрядного счетчика, с выхода которого информация поступает на вход ЦАП. Выходное напряжение ЦАП сравнивается в компараторе с входным аналоговым уровнем напряжения, и в тот момент, когда эти напряжения оказываются равными друг другу, снимается двоичный код, зафиксированный в счетчике.

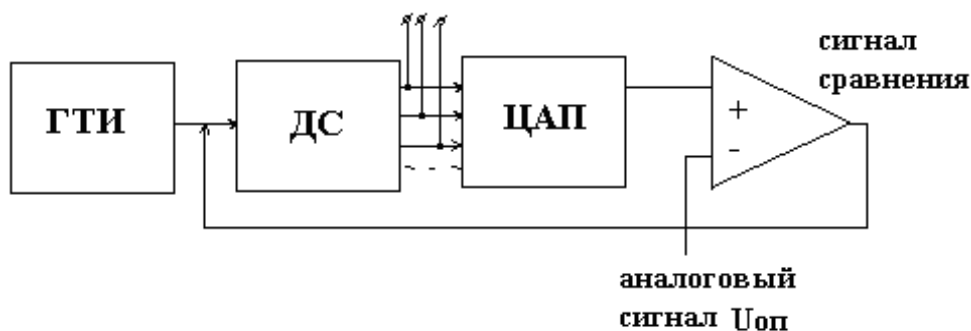


Рисунок 3.52 - Функциональная схема АЦП

Параллельные АЦП – самые быстродействующие, так как результат преобразования появляется сразу же после срабатывания компараторов и логических элементов, на которых выполнено кодирующее устройство. В лучших образцах параллельных 8–12 - разрядных АЦП, используемых, например, в радиолокации, цифровом телевидении, видеотехнике, это время составляет сотые доли микросекунды, что позволяет производить до  $10^8$  преобразований в секунду и таким образом обрабатывать сигналы с частотами до нескольких десятков мегагерц.

Функциональная схема простейшего двухразрядного параллельного АЦП приведена на рисунке 3.53.

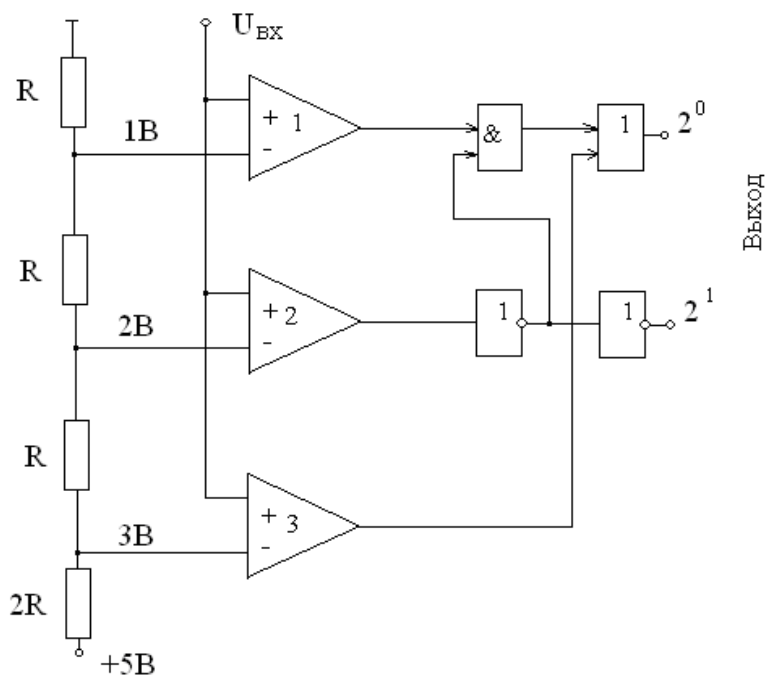


Рисунок 3.53 - Функциональная схема АЦП параллельного типа

На сигнальные неинвертирующие входы компараторов 1, 2, 3 (в качестве которых могут использоваться широкополосные операционные усилители) подается напряжение сигнала  $0 < U_{вх} < 4В$ , на инвертирующие входы – эталонные напряжения 1В, 2В, 3В.



При отсутствии входного сигнала на выходе компараторов действуют отрицательные напряжения, условно принимаемые за уровень логического 0. Если уровень входного сигнала превышает 1В, но не достигает 2В, то первый компаратор срабатывает и на его выходе появляется положительное напряжение, отображающее логическую 1. При этом на выходе элемента «И» также появляется 1, так как на двух его входах действуют напряжения логической 1: одно подается с выхода первого компаратора, другое с выхода инвертора, подключенного к выходу второго компаратора. Вследствие этого на выходе элемента «ИЛИ» появится напряжение логической 1, отображающее младший значащий разряд ( $2^0$ ) в выходном коде. На выходе  $2^1$  второго инвертора (старший значащий разряд  $2^1$ ) будет действовать 0, поскольку на его входе действует 1.

Если уровень входного сигнала превысит 2В ( $2В < U_{вх} < 3В$ ), то сработает второй компаратор и на его выходе появится напряжение логической 1, которое после двойного инвертирования будет действовать на выходе  $2^1$ . При этом на выходе  $2^0$  будет логический 0, поскольку элемент «И» на выходе первого компаратора закроется, так как на одном из его входов будет 1, а на другом — 0.

Когда напряжение входного сигнала превысит 3В, сработает третий компаратор и на его выходе появится напряжение логической 1, которое, пройдя через элемент «ИЛИ», даст напряжение логической 1 на выходе  $2^0$ . Таким образом, если  $U_{вх} = 0$ , то на выходе действует код 00; если  $U_{вх} = 1В$ , то на выходе – код 01; при  $U_{вх} = 2В$  имеем код 10, а при  $U_{вх} = 3 В$  на выходе – код 11.

Пример ИМС ЦАП – К572ПА1, а пример ИМС АЦП – К1107ПВ1.

### **Тема 3.7. Микропроцессорные системы и микропроцессоры**

#### **Основные понятия и определения**

*Микропроцессор (МП)* представляет собой функционально законченное программно-управляемое устройство цифровой обработки данных, выполненное в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС).

*Микропроцессорный комплект (МПК)* представляет собой совокупность совместимых БИС, специально разработанных для построения различных микропроцессорных устройств.

*Микропроцессорное устройство (МПУ)* – функционально и конструктивно законченное изделие, в состав которого входят микросхемы, включая микропроцессоры, предназначенное для обработки, передачи, преобразования информации или управления.

*Микропроцессорная система (МПС)* – любая вычислительная, контрольно-измерительная или управляющая система, построенная на базе МП. В составе МПС могут находиться другие микросхемы и радиокомпоненты.

*МикроЭВМ* представляет собой конструктивно завершённое вычислительное устройство, реализованное на базе микропроцессорного

набора БИС и оформленное в виде автономного прибора со своим питанием, интерфейсом ввода-вывода и комплектом программного обеспечения.

*Микроконтроллер* – устройство управления, построенное на базе микропроцессорных БИС.

*Алгоритм* – набор предписаний, однозначно определяющих содержание и последовательность выполнения операций для решения определенной задачи.

*Программа* – набор инструкций, реализующих алгоритм. Программы могут быть написаны в машинных кодах, на языке ассемблер и на языках высокого уровня.

*Микропрограммирование* – представление машинной команды в виде последовательности микрокоманд.

*Архитектура микропроцессора* – его логическая организация, определяемая возможностями МП по аппаратной или программной реализации функций, возлагаемых на МПУ. Архитектура отражает структуру МП, способы представления информации, форматы данных, набор операций, способы обращения ко всем доступным для пользователя элементам структуры, реакцию МП на внешние сигналы.

*Интерфейс* – система шин, магистралей, вспомогательной аппаратуры и алгоритмов, реализованных на этом оборудовании, предназначенная для организации обмена информацией между МП, памятью, устройствами ввода-вывода и другими устройствами, входящими в состав МПС или микроЭВМ.

*Кэш-память* – особая высокоскоростная память процессора. КЭШ-память используется в качестве буфера для ускорения обмена данными между процессором и оперативной памятью, а также для хранения копий инструкций и данных, которые недавно использовались процессором. Значения из кэш-памяти извлекаются напрямую, без обращения к основной памяти.

В системах автоматического управления микропроцессорные устройства и микроЭВМ, как правило, встраиваются непосредственно в контур объектов и являются их частью. Поэтому они оснащаются памятью, устройствами ввода - вывода и программным обеспечением, необходимым для выполнения функций управления. Применение микропроцессорной техники привело к расширению возможностей, изменению состава и способов разработки, резкому уменьшению габаритов и стоимости систем автоматизации управления различными технологическими процессами (в том числе и в сельском хозяйстве).

### **Способы представления информации**

Универсальным способом отображения информации при ее сборе, передаче, хранении и обработке является кодирование. Для представления числовой, буквенной, символьной, логической и других информации в микропроцессорных системах применяются двоичные позиционные коды, в которых используются только два символа (0 и 1). Двоичные коды в микропроцессорной технике реализуются благодаря дискретному представлению электрических и других сигналов в виде импульсов или

перепадов. Поэтому такую информацию называют цифровой, а соответствующие системы обработки дискретными или цифровыми.

Один разряд двоичного кода несет информацию в 1 бит. Бит определяет содержательность информации, единичный элемент которой может принимать лишь два различных равновероятных значения 0 или 1. Для хранения 1 бита информации требуется один элемент памяти, например триггер любого типа. 1 байт = 8 бит – это восьмиразрядная двоичная информация, составляющая минимально адресуемый объем информации в большинстве вычислительных систем. Для удобства подсчета больших объемов двоичной информации вводят условные единицы 1 Кбайт = 1024 байт ( $2^{10}$ ) и Мбайт – 1024 Кбайт. Например, 64 Кбайт = 64x1024 байт = 65 536 байт ( $2^{16}$ ).

Последовательность двоичных символов определенной длины или сигналов, направляющих эти символы, образует «слово». В общем случае «слово» имеет переменную длину. Число двоичных разрядов в слове зависит от технических возможностей МП. Количество битов в слове зависит от типа микропроцессора. Количеством битов в «слове» определяется, например, число разрядов приемных регистров, входящих в оперативную память микропроцессора. Кроме того, количество битов в «слове», предназначенное для передачи данных, равно числу проводников, составляющих тракт передачи команд и данных МП.

Пример двухбайтового слова 0100110011100111 8-разрядной микропроцессорной системы представлен на рисунке 3.54.



Рисунок 3.54 - Структура «слова»

### **Взаимосвязь различных систем счисления.**

Любое число  $N_b$ , записанное в позиционной системе счисления, может быть представлено в виде степенного разложения:

$$N_b = K_N K_{N-1} \dots K_1 K_0 K_{-1} \dots K_{-M} = K_N b^N + K_{N-1} b^{N-1} + \dots + K_1 b^1 + K_0 b^0 + K_{-1} b^{-1} + \dots + K_{-M} b^{-M}$$

$$= \sum K_i b^i$$

где  $b$  – основание системы счисления, в качестве которого может быть принято любое число;

$K_i$  – цифры или символы числа ( $0 \leq K \leq b-1$ );

$n, m$  – соответственно количество целых и дробных разрядов;

$i$  – номер разряда.

Для записи числа в различных системах используются следующие цифры и символы: десятичной ( $b = 10$ ) – 0, 1...9; двоичной ( $b = 2$ ) – 0, 1; восьмеричной ( $b = 8$ ) – 0, 1 ... 7; шестнадцатеричной ( $b = 16$ ) – 0, 1 ... 9, А, В, С, D, Е, F. Как видно, в шестнадцатеричной системе счисления записи чисел кроме цифр десятичной системы используются буквы А, В, С, D, Е, F, соответствующие числам 10, 11, 12, 13, 14, 15.

Чтобы перейти из двоичной системы в десятичную, надо числа в строке двоичного числа сложить поразрядно, например,  $11001 = 1 * 2^0 + 0 * 2^1 + 0 * 2^2 + 1 * 2^3 + 1 * 2^4 = 1 + 0 + 0 + 0 + 8 + 16 = 25$ , т.е. двоичное число 11001 равно числу 25 в десятичной системе.

Чтобы перейти из десятичной системы в двоичную, необходимо десятичное число разделить на 2, остаток от деления при этом становится младшим разрядом результата. Далее результат деления снова делится на 2, остаток будет вторым разрядом результата. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в результате деления частное от деления станет равным нулю. Например,

$$\begin{array}{rcl}
 13 & : & 2 = 6 \\
 6 & : & 2 = 3 \\
 3 & : & 2 = 1 \\
 1 & : & 2 = 0
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \longleftarrow \\
 \longleftarrow \\
 \longleftarrow \\
 \longleftarrow \\
 \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
 \end{array}$$

$\Rightarrow 13_{10} = 1110$

Но т.к. двоичные числа содержат больше цифр, чем их десятичный эквивалент, то при записи двоичного числа легко ошибиться. Чтобы этого избежать, используют более компактное представление чисел, и делают это в восьмеричной и шестнадцатеричной системах счисления, т.к. преобразование из десятичной системы в двоичную систему неудобно.

Чтобы перевести двоичное число в восьмеричную систему разбивают двоичное число на группы по 3 разряда, начиная справа. Каждая группа заменяется ее восьмеричным эквивалентом. Например,

$$\underbrace{\quad\quad\quad}_3 \bigg| \underbrace{\quad\quad\quad}_6 \bigg| \underbrace{\quad\quad\quad}_3 =$$

Еще более компактным представлением двоичных чисел является их представление в шестнадцатеричной системе счисления.

Чтобы преобразовать двоичное число в шестнадцатеричную систему, это число делится на группы по 4 разряда, и каждая группа преобразуется в соответствующий символ. Чтобы произвести обратное преобразование, каждый символ заменяется четырьмя разрядами. Например,

$$\underbrace{1}_{F} \mid 1 \quad \underbrace{0}_{6} \mid =$$

Информация, представленная в числовом варианте, представляется машинным кодом, т.е. машинным языком, понятным МП.

Обычно эти коды записывают сокращенными английскими словами, в виде мнемокода или мнемоники. Программы, написанные с использованием мнемоники, называют программами, написанными на языке Ассемблер – языке нижнего уровня.

Кроме алфавитно-цифровой информации, которая представляется двоичными константами 1 и 0, в микропроцессорной технике применяется логическая информация. В зависимости от того, истинно ли какое-то событие или нет, переменная, отображающая эту информацию, может принимать два фиксированных значения: **да** или **нет**, **истина** или **ложь**. Такие переменные называются логическими (булевыми) переменными.

### Архитектура и структура МП системы

Под архитектурой МП - систем понимается абстрактное представление о системе, определяющее ее возможности по аппаратурной и программной реализации необходимых функций. Архитектура объединяет аппаратурные, микропрограммные и программные средства микропроцессорной техники.

Микропроцессорная система (рисунок 3.55) или микроЭВМ включает в себя один или несколько микропроцессоров, БИС постоянной (ПЗУ) и оперативной памяти (ОЗУ), БИС управления вводом и выводом информации, генератор тактовых импульсов и некоторые другие схемы. Связаны эти устройства между собой посредством системы шин. Шина - это совокупность проводников, каждый из которых предназначен для передачи соответствующего бита информации. Обработываемая в МП-системе информация вводится или выводится с помощью специальных устройств ввода и вывода информации, называемых периферийными устройствами (ПУ). Информация, необходимая для функционирования МП-системы (программы и данные), хранится в блоке памяти (в ОЗУ и ПЗУ).

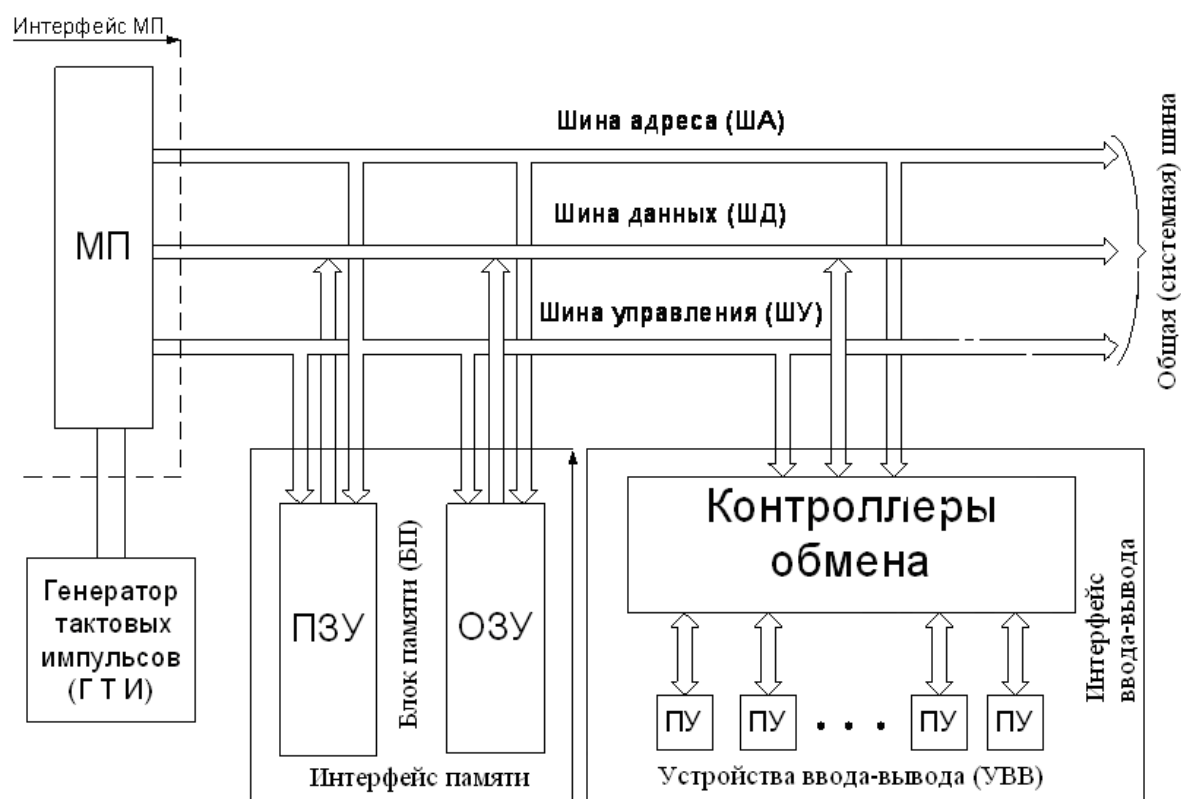


Рисунок 3.55 - Структура МП – системы

**ПЗУ** - постоянное запоминающее устройство, которое в процессе работы микропроцессорной системы позволяет осуществлять только чтение заранее записанных данных, имеет высокую скорость работы и является энергонезависимым, т.е. сохраняет информацию при выключении питания.

По способу занесения информации ПЗУ делятся на два вида:

- 1) неперепрограммируемые ПЗУ:
  - а) программируемые маской на предприятии-изготовителе;
  - б) ПЗУ, однократно программируемые пользователем;
- 2) перепрограммируемые ПЗУ (ППЗУ).

В случае (а) информация заносится в процессе изготовления микросхемы с помощью соответствующих фотошаблонов. В случае (б) запись информации производится пользователем с помощью специальных устройств (программаторов).

Перепрограммируемые ПЗУ допускают стирание записанной и запись новой информации.

**ОЗУ** работает в режимах оперативной (т.е. совпадающим с темпом работы МП) записи и чтения данных. ОЗУ энергозависимы, т.е. информация теряется при выключении питания. Объем памяти ОЗУ, применяемых в микросхемах памяти, зависит от количества разрядов линий передачи адреса. Например, для организации памяти общим объемом 256 слов по восемь разрядов на базе микросхем памяти, содержащих 256 элементов памяти, требуется восемь адресных линий (от А0 до А7).

Существует два типа полупроводниковых ОЗУ:

- 1) статические;
- 2) динамические ОЗУ.

Блок памяти содержит большое количество ячеек, каждая из которых хранит 1 бит информации. Эти ячейки связаны в группы фиксированных размеров, которые называются «словами». Чтобы облегчить доступ к любому «слову» памяти, с каждым положением «слова» связано некоторое имя. Эти имена являются числами, которые указывают положение «слова» и называются «адресами».

**Устройства ввода - вывода (УВВ)**- это технические средства, способные воспринимать данные, передаваемые извне в регистры МП или в память (порты ввода), а также передаваемые из регистров МП и ячеек памяти (порты вывода) на периферийные устройства (ПУ). Средством сопряжения периферийных устройств с микропроцессором являются порты ввода-вывода, которые представляют собой регистры.

Функционирование всех узлов и блоков МП системы осуществляется с помощью **ГТИ** - генератора тактовых импульсов (или синхронизатора).

Для выполнения МП одной команды, хранящейся в блоке памяти, требуется несколько периодов тактовых импульсов (рисунк 3.56).

Время выполнения команды называется командным циклом, который может включать один или несколько машинных циклов, который в свою очередь, состоит из цикла выборки и исполнительного цикла.

Во время цикла выборки МП определяет адрес команды, находящейся в ЗУ, и считывает эту команду в МП. За время исполнительного цикла МП осуществляет выполнение считанной команды.

**Блок МП** - это устройство, выполняющее функции программной обработки информации и реализованное по одной схеме большой степени интеграции (БИС) или в виде модуля, содержащего несколько БИС. МП является основой, «мозгом» МП - системы.

**Шина данных** - служит для обмена операциями (исходными элементами данных), под которыми понимаются числовые данные или команды, которые также представляются числами.

**Шина адреса** - служит для передачи адресов, т.е. для указания местоположения ячейки памяти в блоке памяти.

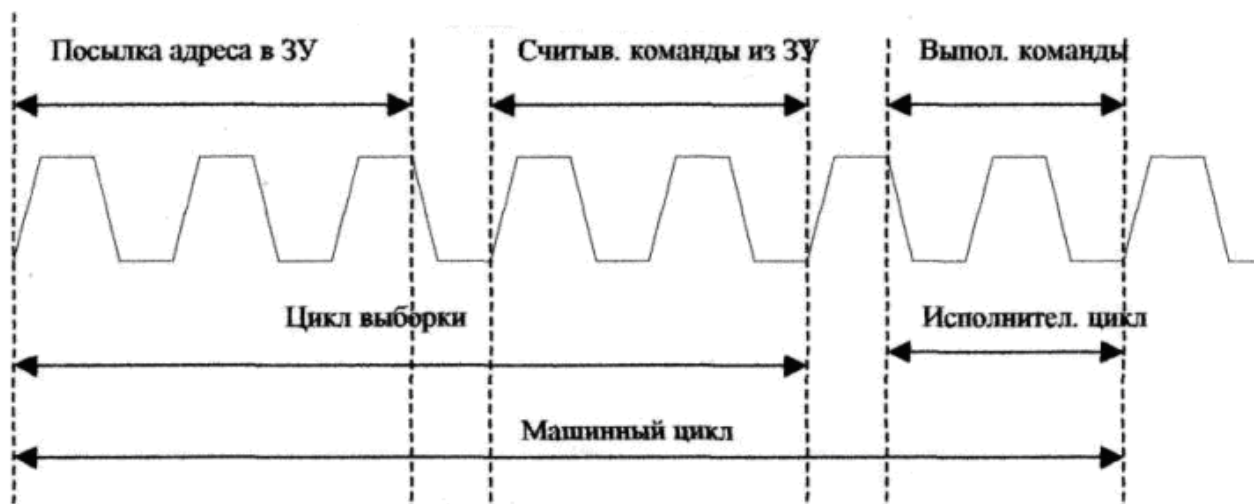


Рисунок 3.56 - Структура машинного цикла, вырабатываемого ГТИ

**Шина управления** - служит для обмена между блоками сигналами управления.

### *Организация работы микропроцессорной системы*

В ходе работы МП - системы МП на шину адреса выдает адрес ячейки памяти (ОЗУ и ПЗУ), в которой хранится очередная команда. По шине управления туда поступают сигналы, обеспечивающие чтение содержимого, указываемой шиной адреса, ячейки памяти. Запрошенная команда выдается на шину данных, откуда она принимается в МП. Здесь команда расшифровывается. Если данные, действия над которыми предусматривает команда, находятся в регистрах МП, то он приступает к выполнению указанной в команде операции. Если же при расшифровке команды выясняется, что участвующие, в операции данные находятся в памяти, то МП выставляет адрес ячейки операнда на шину адреса. После выдачи данных из памяти через шину данных над ними выполняются операции. По завершению выполнения текущей команды на шину адреса выдается адрес следующей команды и процесс повторяется [3, 5, 6].

В процессе работы МП - системы результаты по мере необходимости могут выдаваться на ПУ (для управления объектами, отображения на экране дисплея и т.д.) либо вводиться с ПУ (например, с датчиков после некоторых преобразований, с клавиатуры и т.д.).

### **Архитектура и структура МП**

Основным модулем любого МП является арифметико-логическое устройство (АЛУ), выполняющее операции сложения, вычитания, а также логические операции «И», «ИЛИ» над двумя числами (операндами) с выдачей результата по одному выходу. Ввод данных осуществляется с помощью аккумулятора А и регистра временного хранения (ВР) (рисунок 3.57). В процессе обработки чаще всего участвуют две величины, которые вводятся в



эти указанные регистры, находящиеся на выходе АЛУ. Результат вычисления возвращается в аккумулятор А. Оба входных регистра могут загружаться из источника данных, присоединенных к шине данных. Таким источником могут быть внутренние регистры В, С, D, E, H и L, устройство ввода-вывода и внешнее запоминающее устройство (ЗУ). Внутренние регистры предназначены для хранения промежуточных результатов вычислений.

Как данные, так и команды вводятся через шину данных. Команды передаются во время цикла ввода (или выборки) команд и используются для обработки данных в течение исполнительного цикла.

Требуемый порядок следования этих операций обеспечивает устройство управления (УУ). Устройство управления не только управляет работой МП, но и запускает в определенные моменты времени ряд внешних устройств. К ним относятся внешние ЗУ и порты ввода-вывода информации.

Такие операции осуществляются с помощью команд WR (запись) и RD (чтение), одновременно с которыми на адресную шину поступает код адреса для поиска требуемой ячейки ЗУ.

С помощью управляющего сигнала ALE (address latch enable – разрешение адресного режима) часть информации шины адресов, а именно биты от A0 до A7 включительно, выводятся из МП по шине данных. Это делается для более эффективного использования внешних выводов корпуса МП. Временное разделение (мультиплексирование) с помощью ALE позволяет выдать всю адресную информацию через шины адресов и данных с тем, чтобы по окончании действия ALE снова использовать шину данных для передачи данных.

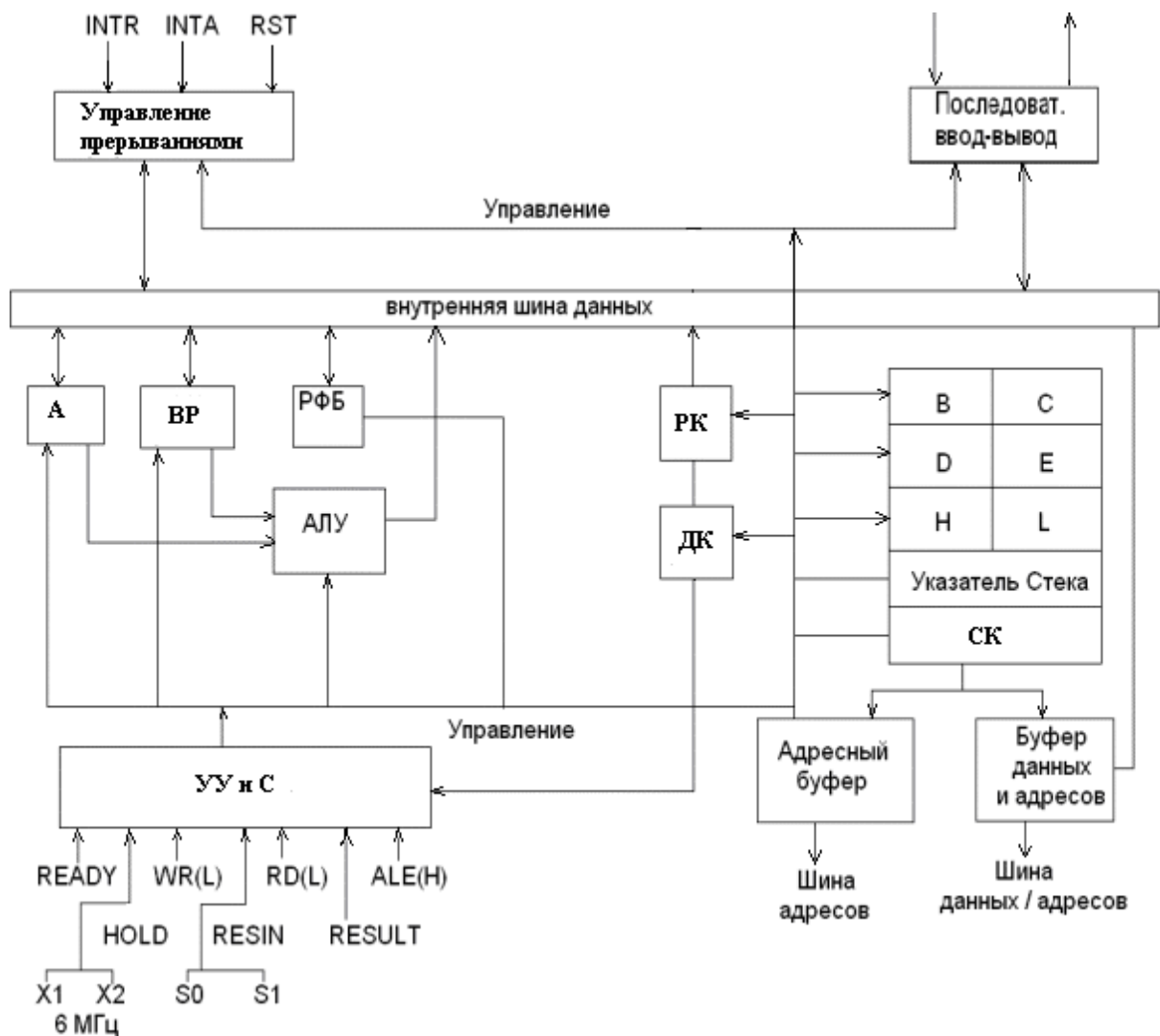


Рисунок 3.57 - Структура МП

С помощью внешнего сигнала HOLD (захват шины) можно предписать МП не пользоваться шинами адреса, данных и управления. МП при этом переводится в состояние ожидания и находится в этом состоянии до тех пор, пока не получит сообщение, что требуемый регистр перешёл в состояние готовности или что требуемый адрес найден в ЗУ. Сообщение об этом поступает в виде сигнала READY.

Сигнал RESIN (внутренний сброс) позволяет установить счетчик команд в нужное состояние. В этом случае программа будет автоматически начинаться снова. Сигналы состояния S0 и S1 содержат информацию о состоянии МП.

С помощью блока «Управление прерываниями» производится прерывание выполнения основной программы с помощью команды INTR и переход к выполнению требуемой подпрограммы с помощью команд INTA и RST.

С помощью блока «Последовательный ввод-вывод» можно вывести последовательно из МП параллельный набор битов или ввести в МП последовательный набор битов и преобразовать его в параллельный набор. Такое преобразование требуется, если необходимо передавать данные по одной

линии, например, в процессе обмена данными. Связь МП с внешними схемами осуществляется через буферы (адресный, данных и адресов).

В структурной схеме МП для временного хранения данных имеются регистр указателя стека и счётчик команд (СК). Указатель стека сообщает, по какому адресу стекового ЗУ, т. е. в зарезервированной части ЗУ, записан последний байт.

В счётчике команд (СК) производится подсчет адресов команд программы во время выполнения вычислений. В зависимости от номера выполненной команды изменяется содержимое указателя стека.

С регистром команд (РК) соединен дешифратор команд (ДК), предназначенный для выбора источников, приемников и операций АЛУ. Регистр команд и дешифратор команд используются для получения дешифрации кода команды.

При извлечении команды первый байт, содержащий её код, помещается в регистр команд и поступает в дешифратор (ДК). Дешифратор команд совместно с устройством управления и синхронизации (УУ и С) формируют управляющие сигналы для всех внутренних блоков МП.

Регистр флажковых битов (РФБ), который еще называют регистром признаков, содержит 5 булевых переменных, называемых флажковыми состояниями:

- 1) **Z**-бит (бит нуля), устанавливается в 1, если результат действия команды равен 0. В противном случае он устанавливается в 0.
- 2) **S**-бит (бит знака), устанавливается в 1, если значащий бит результата равен 1. В противном случае устанавливается в 0.
- 3) **P**-бит (бит чётности), устанавливается в 1, если результат содержит четное число единиц.
- 4) **C**-бит (бит переноса), устанавливается в 1, если произошло переполнение АЛУ, т. е. в случае результата, превышающего  $2^8$  (1 байт) или меньшего 0.
- 5) **A**-бит (бит добавочного переноса), устанавливается в 1, если при выполнении операции десятичной арифметики формируется перенос из третьего бита в четвёртый в данном байте.

### **Сопряжение МП с внешними устройствами**

Для подключения разнообразных устройств ввода или вывода данных необходимо привести их связи и сигналы к стандартному виду, т. е. провести согласование интерфейсов. Для этого используется специальный аппаратный блок - информационный контроллер, имеющий стандартный интерфейс со стороны подключения к шине данных и не стандартный интерфейс со стороны устройства ввода-вывода.

### ***Интерфейс в микропроцессорных системах***

Взаимное сопряжение устройств микропроцессорной системы обеспечивается посредством системы аппаратных и программных средств, называемых интерфейсом.

В состав интерфейса входят:

- аппаратурные средства соединения устройств (например, разъёмы);
- программные средства, описывающие характер сигналов интерфейса;
- описание электрофизических параметров сигналов.

В зависимости от структуры системы и особенностей взаимодействия компонентов можно условно выделить несколько уровней интерфейсов: внутрислатные или внутримодульные; межслатные или внутрислочные; межслочные; интерфейсы распределенных систем управления.

В качестве периферийных устройств для ввода и вывода информации могут использоваться клавиатура, дисплеи, принтеры, преобразователи информации, линии связи и т. п. Для подключения их к системной шине требуются определенные технические и программные средства - соответствующие устройства сопряжения, сигналы, система команд. Эти средства объединяются в понятие интерфейс ввода-вывода. Средством подключения внешних устройств к МП являются порты ввода-вывода.

Обмен данными с периферийными устройствами может осуществляться в программно управляемом режиме, либо способом *прямого доступа к памяти* (ПДП). Программно управляемый режим обмена с ПУ организуется по программе, которая хранится в памяти. При программно управляемой передаче данных микропроцессор (МП) на время операции обмена отвлекается от выполнения основной программы, что приводит к снижению производительности МП-системы.

Способ прямого доступа к памяти осуществляется путем отключения микропроцессора от шины адреса и данных (перехода в режим захвата). Обмен между ПУ и ОЗУ осуществляется непосредственно. Прямой доступ к памяти резко повышает предельную скорость ввода-вывода информации и общую производительность МП-системы, и делает ее более эффективной для работы в системах реального времени.

### **Системы команд микропроцессора**

Программой называется последовательность команд для центрального процессора, выполнение которых позволяет решить данную задачу. Последовательность команд представляет собой последовательность действий, которые необходимо выполнить, и называется алгоритмом.

Микропроцессорная система воспринимает только двоичные коды. Поэтому программу, составленную в мнемокодах, необходимо переводить в ее двоичный эквивалент. Это можно сделать вручную, используя таблицы соответствия системы команд для данного МП, или с помощью специальных программ. Более полную автоматизацию процессов программирования обеспечивает язык Ассемблер, в котором вместо кодовых комбинаций используются мнемонические обозначения операций. Следует отметить, что каждый МПК имеет свой язык Ассемблер.

Язык Ассемблер в упрощенном виде представляет собой сокращенные английские слова, обозначающие определенную команду.

Для удобства программа на языке Ассемблер разделяется на поля.

Приведем пример:

Метка	Код	Операн д	Комментарий
HERE: 56H	MVI	C, 56H;	Загрузка регистра C по адресу
THERE:	JMP	NEXT;	Переход к NEXT
MAYBE:	XRA	D ;	Операция исключающее ИЛИ между аккумулятором и регистром D

Поле «метка» может содержать любое символическое имя, ссылающееся к той позиции памяти, которой впоследствии будет назначен адрес. Поле «код» содержит обозначение той операции, которую необходимо выполнить.

Источник и назначение (т.е. откуда и куда идет информация) определяется в поле «операнд». Это может быть буква, обозначающая регистр, непосредственные данные или символическое имя. Если требуется задать оба операнда, то они записываются через запятую. Такие поля языка Ассемблер могут интерпретироваться по-разному в зависимости от конкретного микропроцессора.

Основные команды микропроцессора условно можно разделить на несколько групп:

- 1) Команды пересылки данных, которые осуществляют обмен между памятью и регистром или между регистрами:
- 2) Команды арифметические:
- 3) Логические команды
- 4) Команды перехода изменяют нормальную последовательность исполнения команд:

Существуют еще команды обработки булевых данных, команды циклического сдвига, псевдокоманды и др.

# ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## Материалы лабораторных занятий

### 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.

#### Общие сведения

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

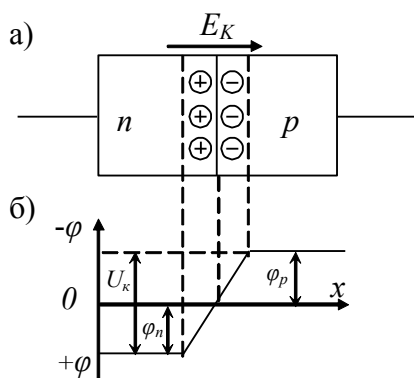


Рисунок 1.1  
 $P$ - $N$  переход

носителей заряда может происходить также под действием света, электрического поля, излучения и др. Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями заряда (электронами и дырками), называют собственной. Вводя в собственный полупроводник примеси, получают примесную

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 электронно-дырочным 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 остается 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  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$  и электрическое поле напряженностью  $E_k$ . На потенциальной диаграмме  $n-p$ -перехода (рис.1.1 б) 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 дырок, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области  $p$  в область  $n$ .

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

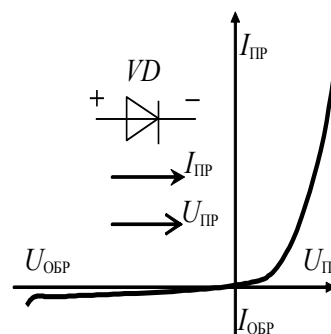


Рисунок 1.2  
ВАХ диода

назначению диоды делят 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  $I_{пр.маx}$  и максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.маx}$ .

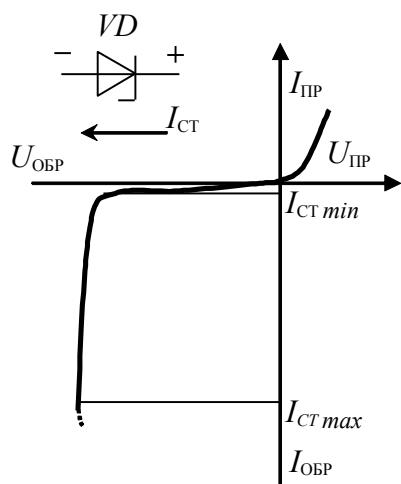


Рисунок 1.3  
ВАХ стабилитрона

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  $I_{ст.min}$  и максимальный  $I_{ст.max}$  токи стабилизации, максимальная мощность  $P_{ст.маx}$ .

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 (закрыт) 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  $U_{вкл.маx}$ , 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.



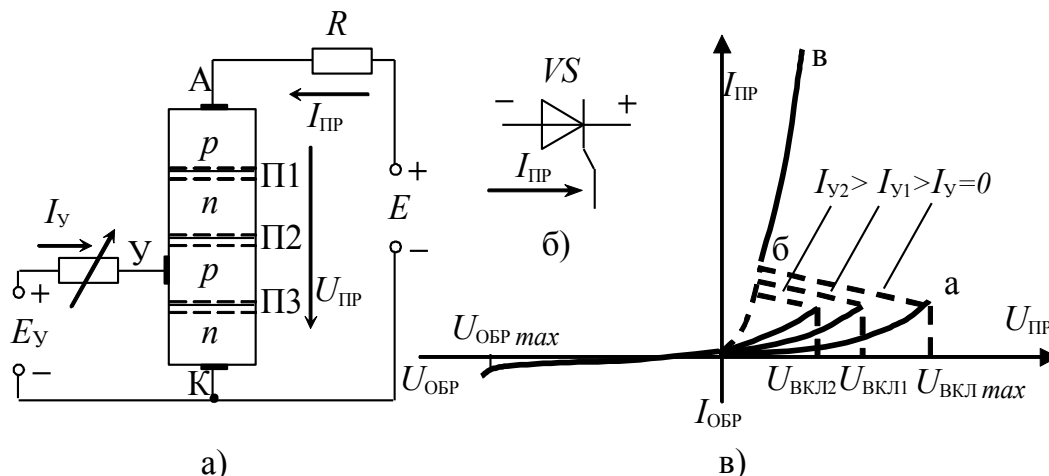


Рисунок 1.4 Тиристор: структура(а),  
Обозначение (б), ВАХ (в)

Напряжение включения  $U_{\text{вкл. max}}$  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.1.4 в) 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  $U_{\text{обр. max}}$ .

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

ТАБЛИЦА 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 $I_{пр}=0,05\text{A}$ , $U_{пр}=0,67\text{В}$ . 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 $U_{ст}=4\text{В}$ , $I_{ст}=0,05\text{A}$ . 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 $U_{пр}=1\text{В}$ , $I_{пр}=0,19\text{A}$ . 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 $I_{пр}>I_{уд}$ ?

### Порядок выполнения эксперимента

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

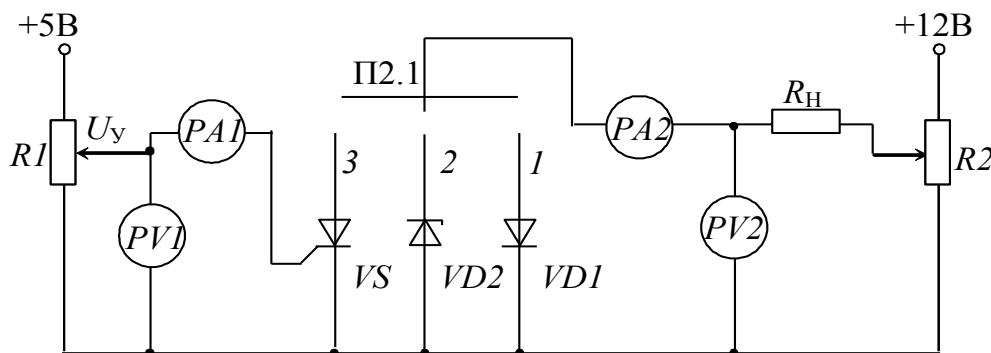


Рисунок 1.5

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.

ТАБЛИЦА 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).

ТАБЛИЦА 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 ступенями через 2 В и медленно увеличивая ток управления  $I_y$  до момента включения тиристора, зафиксировать и записать в табл.1.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора  $U_{вкл}(I_y)$ .

ТАБЛИЦА 1.4

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

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

8. Снять вольтамперную характеристику тиристора  $I_{пр}(U_{пр})$ , установив ток управления, при котором открывается тиристор (см. п.6). Результаты измерений представить таблицей 1.5. Построить ВАХ тиристора.

ТАБЛИЦА 1.5

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

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

## Содержание отчета

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 тиристорov.

## Контрольные вопросы

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, тиристорov.

## 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.

#### Общие сведения

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).

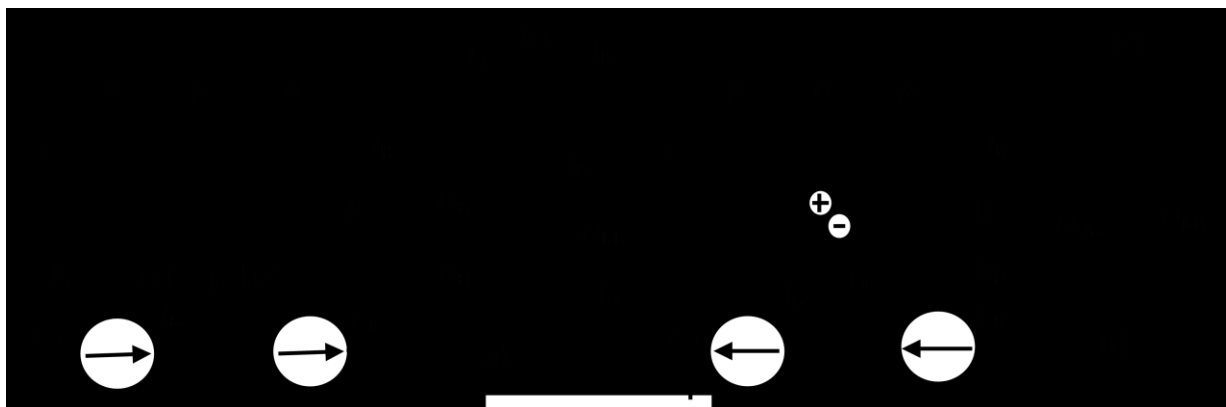


Рисунок 2.1 Биполярный транзистор

Средний слой кристалла называют б а з о й . Ее толщина мала, составляет 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 мегаОм, 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  $I_б$ . 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  $I_б$ , а выходным - ток коллектора  $I_к$ .

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

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

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

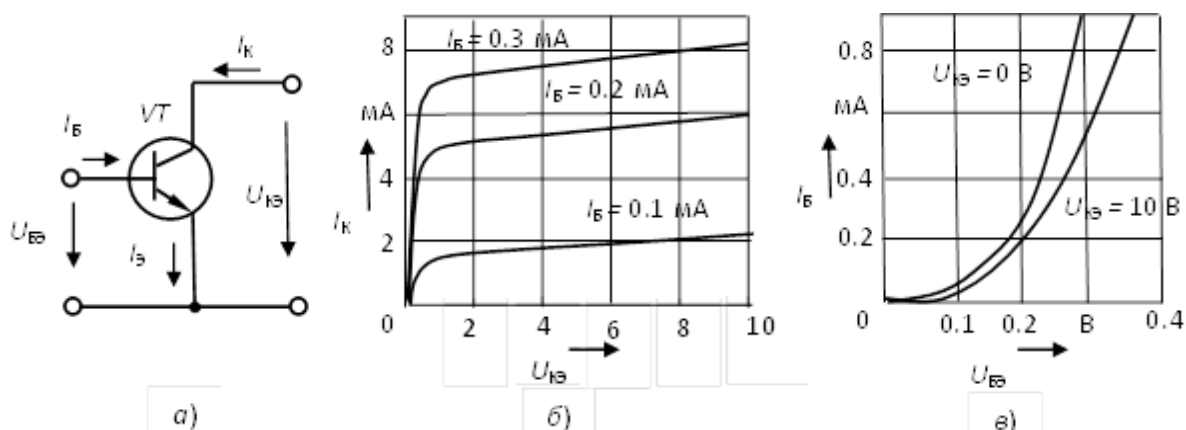


Рисунок 2.2 Биполярный транзистор включенный по схеме с общим эмиттером

Основными характеристиками транзисторов ОЭ являются

- 1) выходные -  $I_к(U_{кэ})$  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;

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

$h_{22} = \Delta I_к / \Delta U_{кэ}$  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.

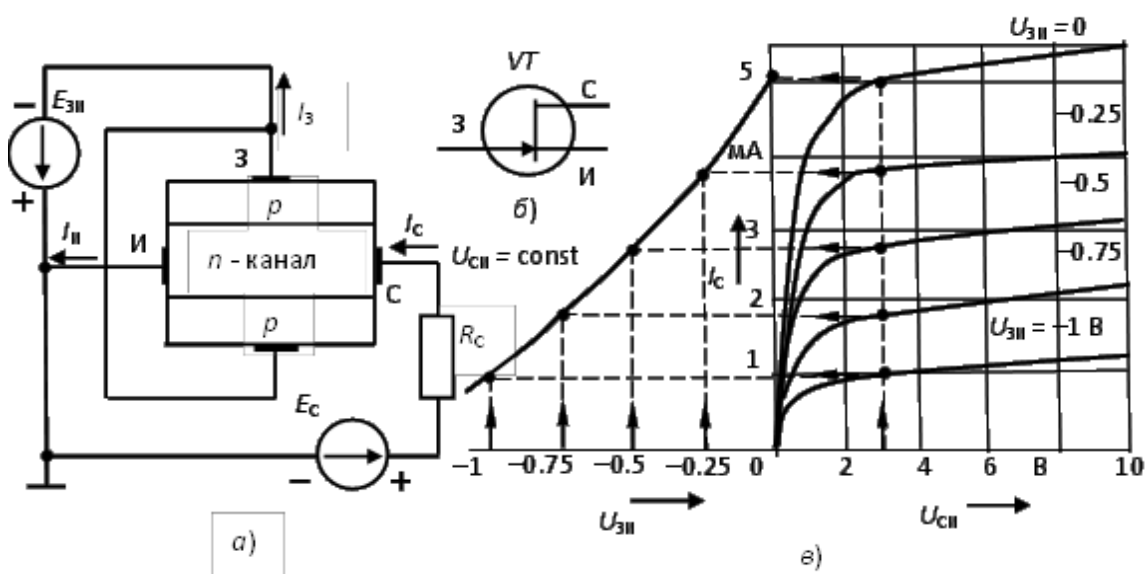


Рисунок 2.3 Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$  - переходом:  
а) структура; б) обозначение; в) характеристики

У ПТ с управляющим  $n-p$ -переходом (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: исток (И), из которого заряды выходят в канал, сток (С), в который заряды входят из канала. Слои  $p$ -типа соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый затвором (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.

Управляющее напряжение между З 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.

Управляющее действие затвора иллюстрируют передаточной (стоко-затворной) характеристикой  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$ . На практике чаще используют выходные (стоковые) характеристики  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ , по которым строят передаточные (рис.2.3, в).

МДП - транзисторы со встроенным каналом имеют структуру металл - диэлектрик - полупроводник. У поверхности кристалла полупроводника (подложки  $p$ -типа) созданы две области  $n$ -типа и тонкая перемычка между ними - канал (рис.2.4,а). Области  $n$ -типа имеют выводы: И - исток и С - сток. 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).

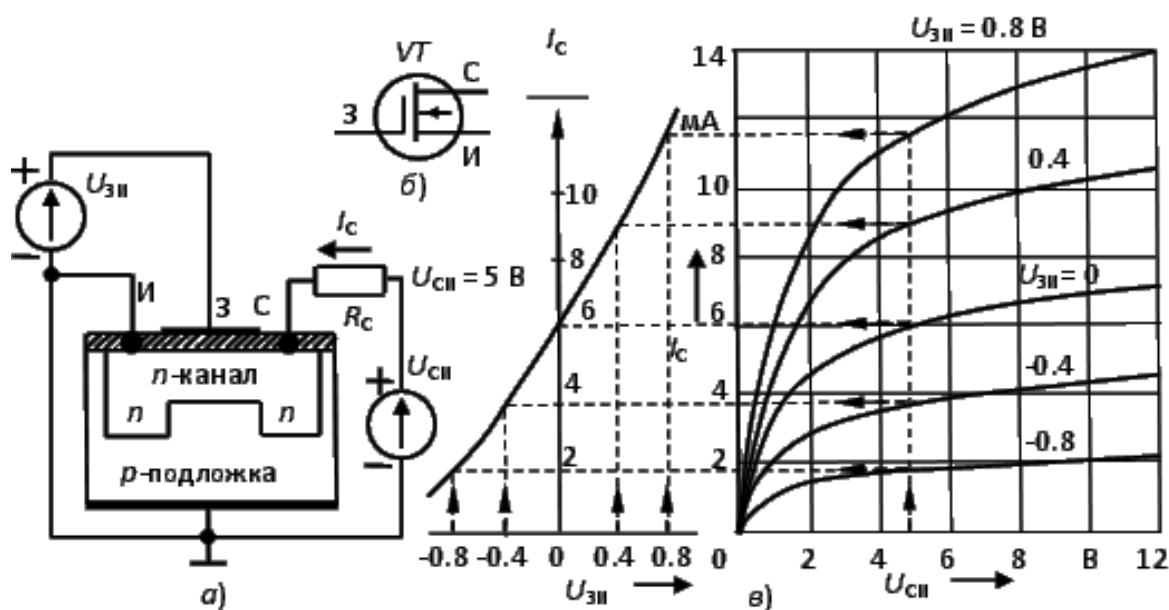


Рисунок 2.4 МДП транзистор со встроенным каналом



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 - транзисторы с индуцированным каналом 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.

ТАБЛИЦА 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Параметр	$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$	$R_{вх}$	$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$	$R_{ввых}$	$k_U = \Delta U_{кэ} / \Delta U_б$
$U_{си}, В$	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.

## Порядок выполнения эксперимента

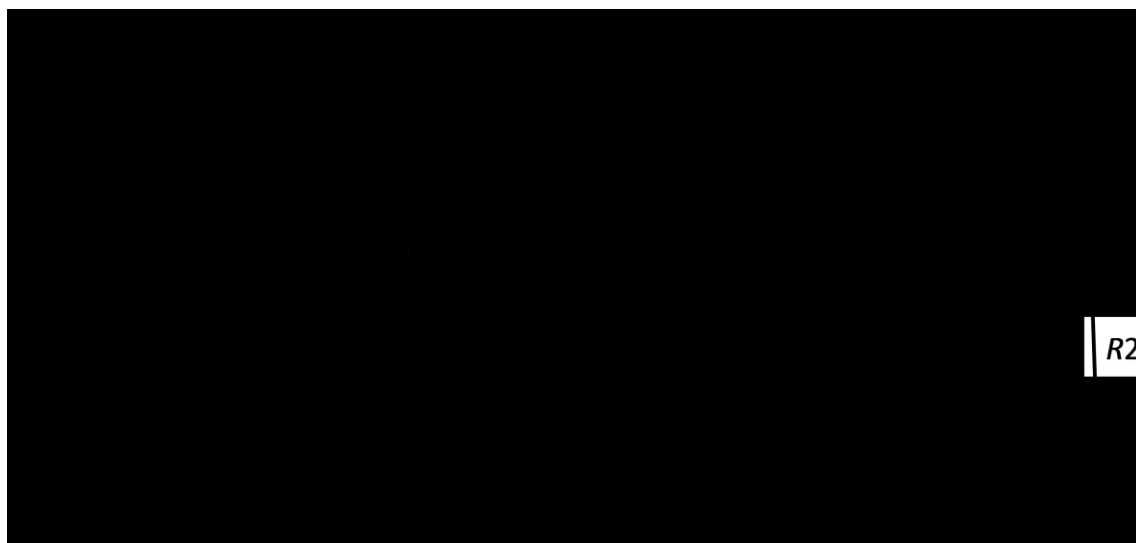


Рисунок 2.5 Схема экспериментальной установки

1. Подготовить схему рис.2.5 для исследования биполярного транзистора  $VTI$ : регуляторы  $R1$  и  $R2$  установить в крайние левые положения, переключатель  $П2$  установить в положение 4. После проверки преподавателем включить схему к источнику напряжения.

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  $I_б = 0$ .

ТАБЛИЦА 2.2

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

3. Снять семейство входных характеристик  $I_б(U_{бэ})$  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.

ТАБЛИЦА 2.3

$I_б, mA$		0	0,1	0,2	0,4	0,6
$U_{бэ}, mV$ 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).

ТАБЛИЦА 2.4

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

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.

ТАБЛИЦА 2.5

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

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.

### Содержание отчета

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; схема 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  $U_{си}=10 В$ .

### Контрольные вопросы

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

## 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.

#### Общие сведения

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 источников 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.3.1.

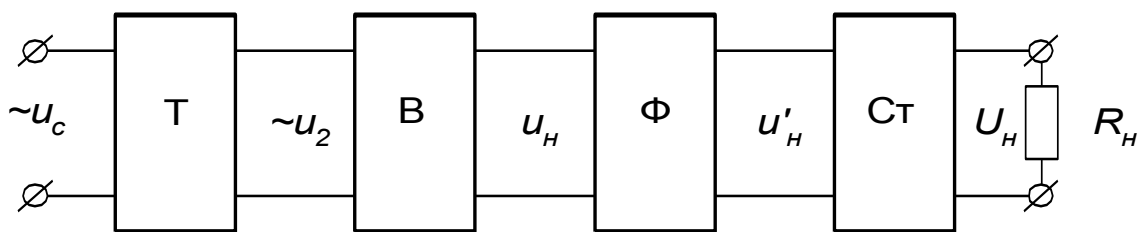


Рисунок 3.1 Структурная схема выпрямителя

Основным и обязательным элементом схемы является выпрямитель (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 необходимости постоянства величины напряжения  $U_H$  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.3.2,а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на активную нагрузку без фильтра, представлены на рис.3.2,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  $i_n = \frac{U_{2m}}{R_n} \sin(\omega t)$ , являющийся для диода прямым током. При этом  $u_b=0$ ,  $u_n=u_2=U_{2m}\sin(\omega t)$ . На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, и диод закрывается под действием отрицательного потенциала на аноде диода. На этом интервале времени ( $T/2 - T$ )  $i_n=0$ ,  $u_n=0$ , напряжение на вентиле  $u_b=u_2=U_{2m}\sin(\omega t)$  будет являться обратным напряжением диода.

В результате такой работы вентиля ток через нагрузку будет протекать в течение только одного полупериода переменного напряжения  $u_2$  и вызывать на нагрузке периодическое несинусоидальное напряжение  $u_n$ , среднее значение которого может быть определено

$$U_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

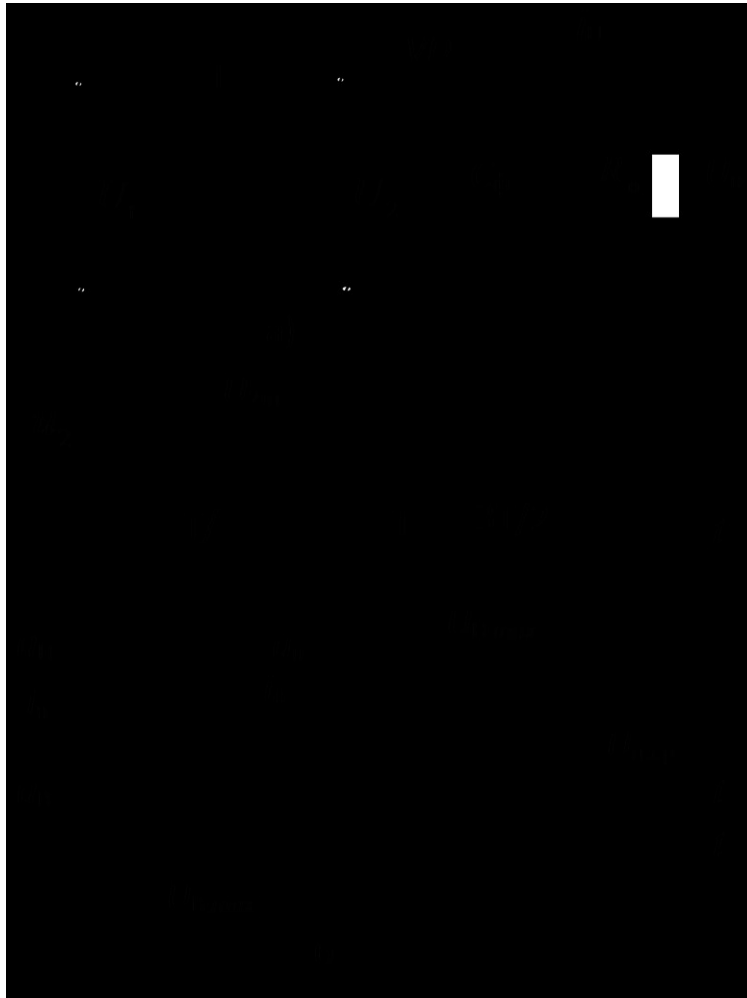


Рисунок 3.2 Однофазный однополупериодный выпрямитель

Средний ток через вентиль  $I_{пр}$  равен среднему току нагрузки  $I_{пр}=I_H$ .

Максимальное напряжение на закрытом вентиле

$$U_{в\max} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \pi \cdot U_H = 3,14U_H.$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}U_H = 2,22U_H.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi U_H}{2R_H} \approx 1,57I_H.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = (S_1 + S_2)/2 \approx S_2 = U_2 I_2 = 2,22U_H \cdot 1,57I_H \cong 3,5P_H.$$

Недостатками однополупериодного выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напряжения, вынужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора ( $S_T = 3,5P_H$ ),

низкие коэффициенты использования вентиляей ( $K_I = I_{в.маx}/I_H = \pi$ ,  $K_U = U_{в.маx}/U_H = \pi$ ).

Однополупериодные выпрямители применяются для питания маломощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных установках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентиляей, включенных по мостовой схеме (рис.3.3,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.3.3, б. В первый полупериод напряжения  $u_2$ , когда потенциал на аноде  $VD1$  положительный, диоды  $VD1$  и  $VD3$  открыты, и ток нагрузки протекает через  $VD1$ ,  $R_H$  и  $VD3$ . В этом интервале времени  $u_H=u_2$ , диоды  $VD2$  и  $VD4$  закрыты и находятся под обратным напряжением. На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, и диоды  $VD1$  и  $VD3$  будут теперь в закрытом состоянии находиться под обратным напряжением, а диоды  $VD2$  и  $VD4$  - открыты. Ток  $i_H$  будет протекать через  $VD2$ ,  $VD4$  и через нагрузку  $R_H$  в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

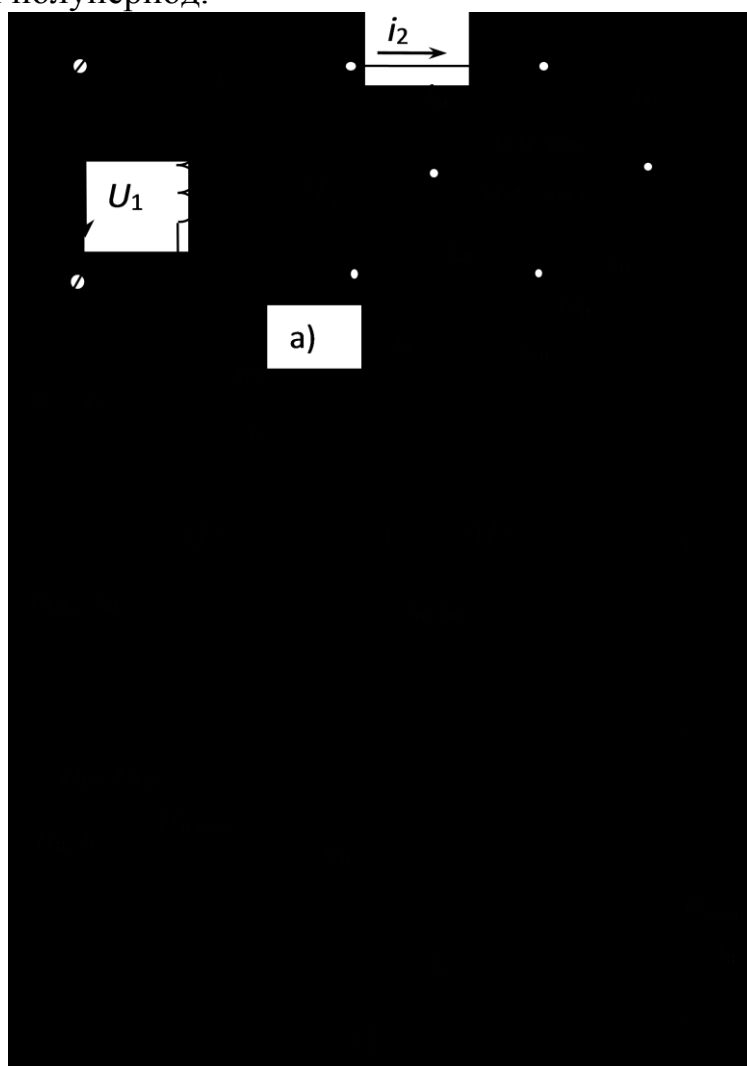


Рисунок 3.2 Однофазный мостовой выпрямитель



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

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

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

Максимальное напряжение на закрытых вентилях  $U_{в\max} = U_{2m} = 1,57U_H$ .

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

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  $u_H$ , 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 коэффициента пульсаций  $q$ , который равен отношению амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению:  $q = U_{1Гм} / U_{H,ср}$ .

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют сглаживающие фильтры. Основными элементами пассивных фильтров являются реактивные элементы: конденсаторы и дроссели. На базе транзисторов и операционных усилителей выполняются более сложные активные фильтры. Эффективность фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания, равным отношению коэффициентов пульсаций до и после установки фильтра

$$S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}$$

Емкостной фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение  $u_H = u_C$  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. 3.4). Когда  $u_2 < u_C$  ( $t_2 - t_3$ ), вентиль закрыт, и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки  $R_H$  с постоянной времени  $\tau_p = C_\phi R_H$ ; при этом  $u_H = u_C = U_{C\max} e^{-t/\tau_p}$ .

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

Рисунок 3.3 Принцип действия C- фильтра

И н д у к т и в н ы й фильтр состоит из индуктивной катушки (дресселя), 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 Г- и П-образные LC-фильтры (табл. 3.1).

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

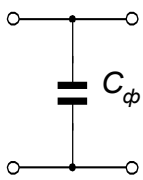
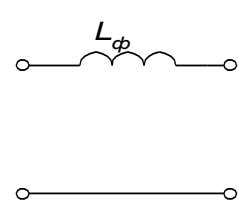
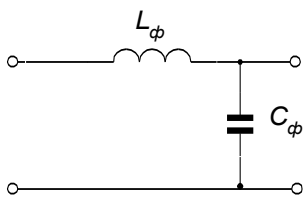
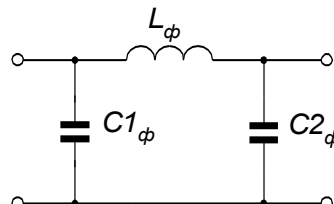
Для надежной работы вентилях их выбирают из условия, чтобы среднее значение тока через открытый вентиль  $I_{пр}$  и максимальное обратное напряжение на закрытом вентиле  $U_{вmax}$  не превышали допустимый прямой ток вентиля  $I_{пр.max}$  и обратное максимальное напряжение  $U_{обр.max}$

$$I_{пр} < I_{пр.max} \text{ и } U_{вmax} < U_{обр.max} .$$

$I_{пр}$  и  $U_{вmax}$  рассчитываются из соотношений, приведенных в табл. 3.2 для соответствующей выпрямительной схемы, а  $I_{пр.max}$  и  $U_{обр.max}$  определяются из справочника для выбираемых вентилях.

Выбор трансформатора проводится по расчетной мощности  $S_T$  и коэффициенту трансформации  $k_T = U_1/U_2$  (см. табл. 3.2).

ТАБЛИЦА 3.1

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

При расчете фильтра известными являются: величина допустимого коэффициента пульсаций на нагрузке  $q_H = q_{\text{вых}}$ , коэффициент пульсаций выпрямителя  $q = q_{\text{вх}}$ , и соотношения определяемых параметров фильтра с его коэффициентом сглаживания (см. табл. 3.1).

ТАБЛИЦА 3.2

Схема	$U_2/U_{\text{н.ср.}}$	$I_2/I_H$	$I_{1k\Gamma}/I_H$	$S_\Gamma/P_H$	$U_{\text{вмах}}/U_H$	$I_B/I_H$	$q$	$m$
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 внешняя характеристика, которая показывает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки  $U_H=f(I_H)$ . Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_H = U_{H.ср.}^{XX} - (R_T + R_{пр} + R_{\phi})I_H = U_{H.ср.}^{XX} - R_{вых} I_H,$$

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

$R_T$  – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{пр}$  – суммарное сопротивление открытых вентилях;

$R_{\phi}$  – суммарное сопротивление фильтра.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для заданного в табл.3.3 выпрямителя и указанных там же значений напряжения  $U_H$ , мощности  $P_H$  нагрузки рассчитать прямой ток вентилях  $I_{пр}$ , обратное напряжение  $U_{вmax}$  и по справочнику выбрать диоды. Определить для трансформатора напряжение вторичной обмотки  $U_2$ , коэффициент трансформации  $k_T$ , расчетную мощность  $S_T$ , если напряжение питающей сети  $U_1=220В$ , частота  $f_1=50$  Гц. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра для обеспечения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки  $q_H$  согласно данным табл.3.3. Для составных фильтров принять  $C_{\phi} = 20$  мкФ. Результаты расчетов записать в табл.3.4.

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданного в табл.3.3 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.

ТАБЛИЦА 3.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3
$U_H, В$	7	13	8	14	8,5	15	9	16
$P_H, Вт$	1,2	4	0,4	4	0,05	3	0,01	1,6
Тип фильтра	$L$	Г-обр. $LC$	П-обр. $LC$	$L$	$C$	Г-обр. $LC$	$C$	П-обр. $LC$
$q_H$	0,02		0,01		0,01		0,02	

ТАБЛИЦА 3.4

Параметры	$I_H,$ мА	$I_{пр},$ мА	$U_{вmax}, В$	$U_2, В$	$k_T$	$S_T,$ Вт	$S$	$C_{\phi},$ мкФ	$L_{\phi},$ Гн
Вычислено									

## Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования однофазных выпрямителей.

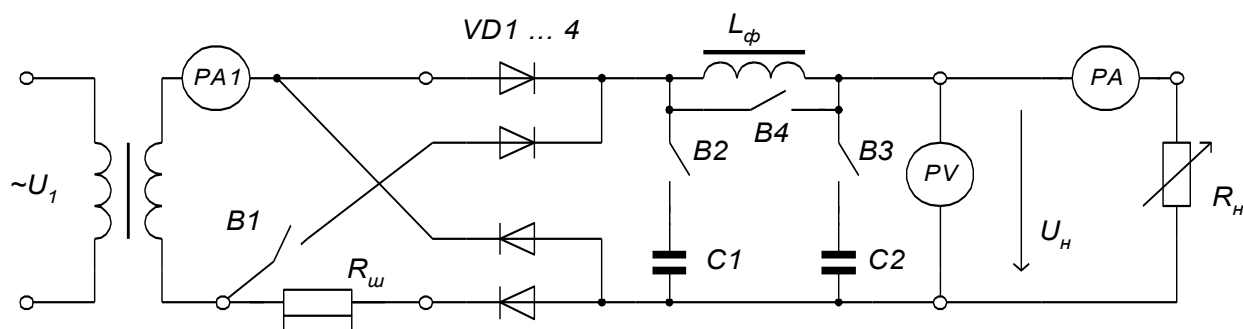


Рисунок 3.5 Схема установки

2. Подключить согласно рис.3.5 к выходным клеммам выпрямительного устройства нагрузку  $R_n$ , вольтметр  $PV$ , амперметр  $PA$  и осциллограф. Подать питание на стенд и измерительные приборы.

3. В режиме холостого хода для однополупериодного ( $B1$  отключен) и для мостового ( $B1$  включен) выпрямителей установить регулятором напряжения  $U1$  максимальное выходное напряжение, измерить его значения и определить кратность напряжений  $U_2 / U_{н.ср.}$  в режиме работы без фильтра ( $B2$  и  $B3$  отключены,  $B4$  включен).

4. Изменяя сопротивлением  $R_n$  ток нагрузки выпрямителя  $I_n$  от 0 до максимального значения, снять внешние характеристики одополупериодного и мостового выпрямителей при работе без фильтра; с емкостным; индуктивным; Г-образным; П-образным фильтрами. Результаты измерений записать в табл.3.5. Обратить внимание на изменение напряжения на нагрузке и увеличение потребления переменного тока при включении конденсаторов фильтра.

ТАБЛИЦА 3.5

Тип выпрямителя									
без фильтра		с C-фильтром		с L-фильтром		с Г-обр. LC		с П-обр. CLC	
$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$
0		0		0		0		0	

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.3.5) 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.

### **Содержание отчета**

Цель работы; схема лабораторной установки (рис.3.5), расчет предварительного задания, внешние характеристики выпрямителей без фильтра и с фильтрами в общей системе координат, осциллограммы временных диаграмм напряжений и токов.

### **Контрольные вопросы**

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 № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока.

#### Общие сведения

Стабилизатором называют устройство, автоматически поддерживающее с заданной точностью напряжение или ток в нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки в заданных пределах.

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

$$K_{ст U} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \bigg/ \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}; \quad K_{ст I} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \bigg/ \frac{\Delta I_{вых}}{I_{вых}}$$

при  $R_n = const$ ,

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

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

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

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 или транзисторы.

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

приведена на рис. 4.1. Стабилизатор состоит из источника эталонного напряжения 1, измерительного элемента 2 и регулирующего элемента 3.

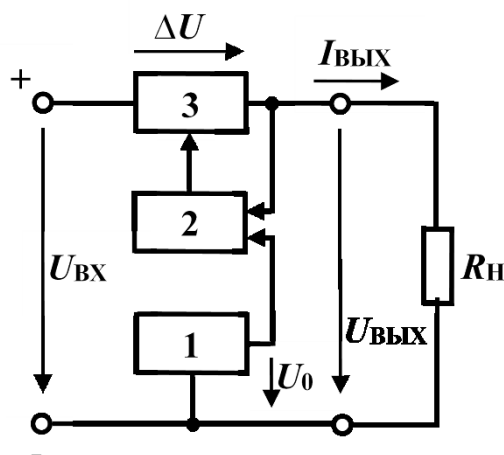


Рисунок 4.1 Структурная схема стабилизатора

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

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - \Delta U = \text{const.}$$

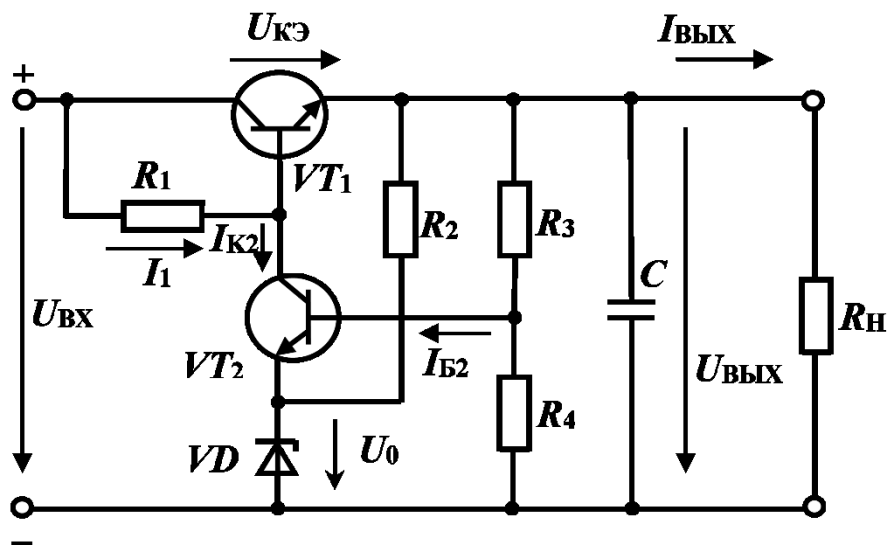


Рисунок 4.2 Компенсационный стабилизатор напряжения

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. 4.2. В этой схеме в качестве



регулирующего элемента использован транзистор  $VT_1$ , измерительный элемент реализован на транзисторе  $VT_2$ . Ток этого транзистора зависит от разности напряжений между базой и эмиттером. В качестве эталонного источника напряжения применен параметрический стабилизатор на резисторе  $R_2$  и стабилитроне  $VD$ . Выходное напряжение поступает на базу транзистора  $VT_2$  через делитель напряжения  $R_3, R_4$ .

Если напряжение на выходе стабилизатора по каким-либо причинам возросло, то возрастает напряжение  $U_{БЭ}$  транзистора  $VT_2$ , что приводит к росту токов  $I_{Б2}, I_{К2}$ . К коллектору  $VT_2$  подключена база транзистора  $VT_1$ , следовательно, изменение  $I_{К2}$  вызывает противоположное изменение  $I_{Б1}$ , т.к.  $I_1 = const$ . Снижение тока  $I_{Б1}$  приведет к увеличению выходного сопротивления транзистора  $VT_2$ , падение напряжение на транзисторе  $U_{КЭ1}$  возрастет, таким образом  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - U_{КЭ1}$  остается практически неизменным. Основные параметры стабилизатора определяют:

$$K_{cm U} = \frac{U_{ВЫХ} \cdot R_1 \cdot R_4}{U_{ВХ} \cdot (R_3 + R_4)} h_{21} / (h_{11} + R_1);$$

$$R_{ВЫХ} = \frac{h_{11} \cdot R_4}{h_{21} \cdot (R_3 + R_4)}.$$

Схема исследуемого стабилизатора тока показана на рис. 4.3. На базе транзистора  $VT$  поддерживается постоянный потенциал, задаваемый параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD$ . Нагрузка  $R_H$  включена в коллекторную цепь транзистора  $VT$ , который включен по схеме с общей базой, где  $I_K = \alpha I_Э$ .

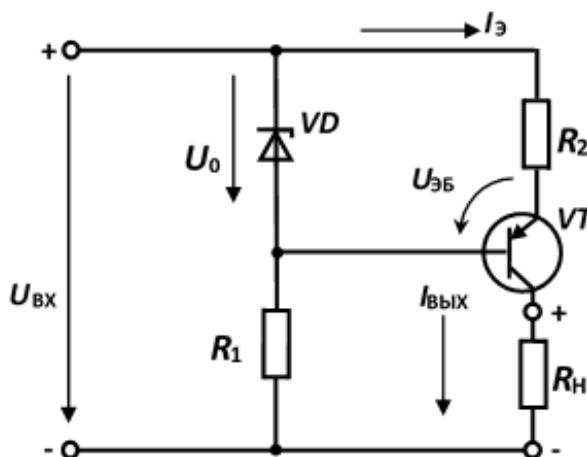


Рисунок 4.3 Компенсационный стабилизатор тока

Ток эмиттера  $I_Э$  определяется напряжением  $U_{ЭБ} = U_0 - R_2 I_Э$ .

Благодаря этому устанавливается режим работы

$$I_Э = (U_0 - U_{ЭБ}) / R_2 = const.$$

У современных транзисторов  $\alpha \rightarrow 1$ , таким образом, получается устройство, выходной ток которого  $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$ , не зависит от  $R_{\text{Н}}$ , а определяется только  $U_0$  и  $R_2$ . Режим стабилизации поддерживается до тех пор, пока транзистор  $VT$  работает в активном режиме, т.е.

$$U_{\text{ВХ}} > \Delta U + I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{Н}},$$

где  $\Delta U$  - напряжение насыщения транзистора.

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

$$R_{\text{Н max}} = \frac{U_{\text{ВХ}} - \Delta U}{I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{\text{ст}} = I_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{ВХ}} h_{22}).$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{21} \cdot R_2}{h_{22}(r_{\text{д}} + h_{11})}.$$

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для компенсационного стабилизатора напряжения (рис. 4.2) рассчитать  $K_{\text{ст}}$  и  $R_{\text{ВЫХ}}$ , если  $R_1 = 6,8$  кОм;  $R_3 = 1,2$  кОм;  $R_4 = 6,8$  кОм; для транзистора  $VT2$ :  $h_{11} = 1,2$  кОм;  $h_{21} = 180$ . Входное и выходное напряжения принять  $U_{\text{ВХ}} = 22$  В;  $U_{\text{ВЫХ}} = 12$  В.

2. Используя метод эквивалентного генератора при  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} = 12$  В и рассчитанном в п.1 значении  $R_{\text{ВЫХ}}$ , определить изменение выходного напряжения  $\Delta U = I_{\text{Н}} R_{\text{ВЫХ}}$  и выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} - \Delta U$  при заданном в табл.4.1 токе нагрузки  $I_{\text{Н}}$ .

3. Рассчитать  $R_{\text{ВЫХ}}$  стабилизатора тока (рис. 4.3), если  $R_2 = 180$  Ом, дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{\text{д}} = 35$  Ом. Транзистор  $VT$  имеет следующие параметры:  $h_{11} = 50$  Ом;  $h_{22} = 1$  мСм;  $h_{21} = 30$ .

4. Определить для стабилизатора тока максимально допустимое сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н max}}$  при  $U_{\text{ВХ}}$  и  $I_{\text{ВЫХ}}$ , заданных в табл. 4.1. Принять  $\Delta U = 1$  В.

ТАБЛИЦА 4.1

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{Н}}$ , мА	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{\text{ВХ}}$ , В	23		24		25		26	
$I_{\text{ВЫХ}}$ , мА	20				40			

### Порядок выполнения эксперимента

1. Входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  на стабилизаторы подается от выпрямителя, который исследовался в лабораторной работе 3.  $U_{\text{вх}}$  измеряется вольтметром  $V_1$ .
2. Подготовить схему однофазного мостового выпрямителя с П-образным фильтром, поставив в нужное положение выключатели В1-В4.
3. Подключить нагрузку  $R_{\text{н}}$  к выходным клеммам стабилизатора напряжения и цифровые приборы для измерения тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ .
4. Включить выключатель стабилизатора напряжения и выключатель выпрямителя (выключатель стабилизатора тока должен быть выключен). При минимальном токе нагрузки снять зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ , изменяя  $U_{\text{вх}}$  от 0 до максимального значения с помощью регулятора напряжения  $U_1$ . Построить график зависимости и определить по ней  $K_{\text{ст}}$ . Сравнить с расчетным по п.1 предварительного задания  $K_{\text{ст}}$ .

ТАБЛИЦА 4.2

$U_{\text{вх}}$ В	0					
$U_{\text{вых}}$ В						

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

ТАБЛИЦА 4.3

$I_{\text{н}}$ мА						
$U_{\text{вых}}$ В						

6. Отключить выключатели выпрямителя и стабилизатора напряжения. Подключить нагрузку к выходу стабилизатора тока.
7. Включить выключатель стабилизатора тока и выключатель выпрямителя. Установить с помощью регулятора  $U_1$  максимальное входное напряжение. Изменяя  $R_{\text{н}}$  во всем диапазоне, снять зависимость  $I_{\text{вых}}(U_{\text{вых}})$ . По полученным результатам рассчитать для каждого измерения  $R_{\text{н}}$  и построить  $I_{\text{вых}}(R_{\text{н}})$ . Определить  $R_{\text{н max}}$  и  $R_{\text{вых}}$  стабилизатора. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.2

$I_{\text{вых}}$ мА						
$U_{\text{вых}}$ В						
$R_{\text{вых}}$ Ом						

8. Установить минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  (минимальное  $U_{\text{вых}}$ ). Изменяя  $U_{\text{вх}}$  от 0 до максимального значения, снять зависимость

$I_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ . Построить график  $I_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$  и определить  $K_{\text{СТ}}$ . Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.4

$U_{\text{ВХ}}$ В						
$I_{\text{ВЫХ}}$ МА						

### 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  $K_{\text{СТ}}$ ,  $R_{\text{ВЫХ}}$  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  $U_{\text{ВЫХ}}$  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  $R_{\text{НМАХ}}$ ? 9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?

## Лабораторная работа №5 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.

### Общие сведения

Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению  $k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$  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.5.1 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.

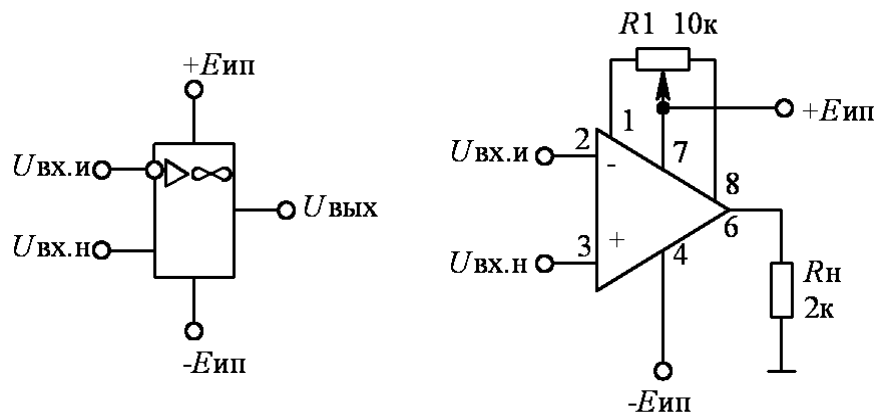


Рисунок 5.1 Обозначение операционного усилителя

На рис.5.2 приведена принципиальная схема ОУ К544УД1А. Высокое входное сопротивление ОУ обеспечивается согласованной парой полевых транзисторов  $VT1, VT5$  входного дифференциального каскада, включающего

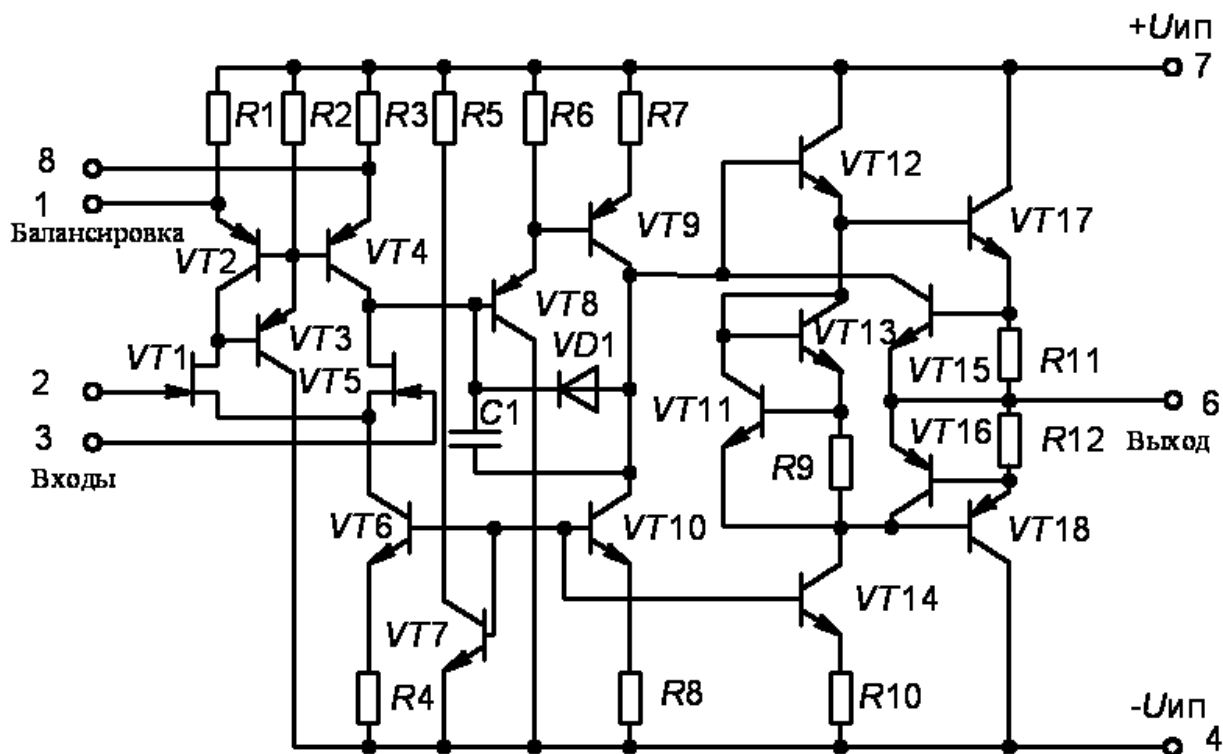


Рисунок 5.2 Принципиальная схема ОУ

в себя кроме названных транзисторы  $VT_2$ ,  $VT_4$  и резисторы  $R_1$ ,  $R_3$ . Работа этого каскада обеспечивается стабилизатором тока, включающим транзисторы  $VT_6$ ,  $VT_7$  и резисторы  $R_4$ ,  $R_5$ . Температурная компенсация осуществляется звеном, выполненным на транзисторах  $VT_{10}$ ,  $VT_{14}$  и резисторах  $R_8$ ,  $R_{10}$ . ОУ имеет защиту от коротких замыканий по выходу ( $VT_{16}$ ,  $VT_{18}$ ,  $R_{12}$ ). Выходным каскадом является составной эмиттерный повторитель ( $VT_{12}$ ,  $VT_{17}$ ,  $VT_{15}$ ,  $R_{11}$ ), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий нагрузочную способность. Выходной каскад имеет свой стабилизатор тока ( $VT_{11}$ ,  $VT_{13}$ ,  $R_9$ ). В согласующее звено между входными и выходными цепями входят элементы:  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $VT_8$ ,  $VT_9$ ,  $VD_1$ ,  $C_1$ .

Важнейшими характеристиками

ОУ являются амплитудные

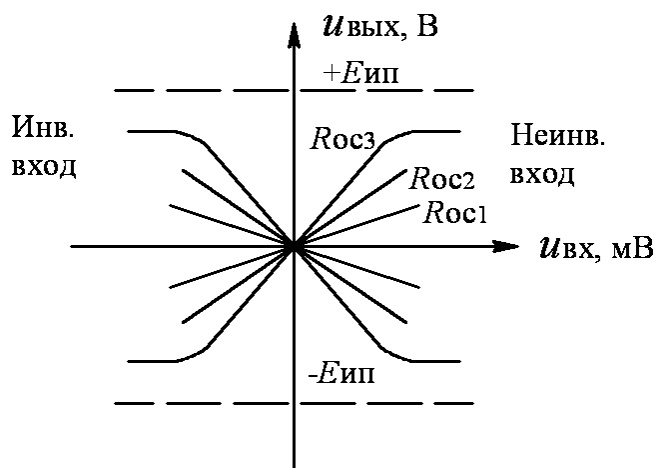


Рисунок 5.3 Амплитудная характеристика

(передаточные)  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

(рис.5.3) и амплитудно-

частотные (АЧХ)  $k_u(f)$ .

Последние имеют вид АЧХ

усилителя постоянного тока за

исключением специальных

частотнозависимых устройств

(избирательный усилитель и

др.). Передаточные

характеристики имеют

линейный участок, для

которого  $k_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \text{const}$ , и

нелинейный -  $k_u' < k_u$ . При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки. Рассмотрим примеры построения устройств на базе ОУ.

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

И н в е р т и р у ю щ и й у с и л и т е л ь (рис. 5.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор  $R_1$  подается  $U_{вх}$  и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора  $R_{о.с.}$ . Коэффициент усиления

$$k_{u.и} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{о.с.}}{R_1}.$$

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

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. 5.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного и

$$k_{u.н} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{о.с.}}{R_1}.$$

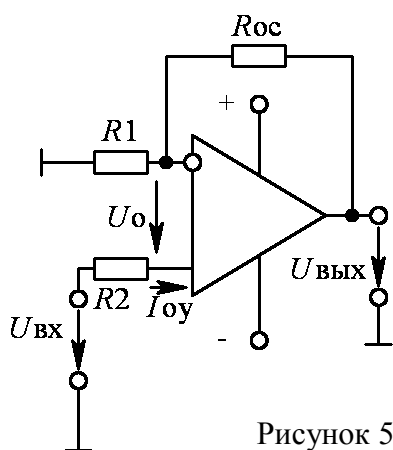


Рисунок 5.5  
Неинвертирующий усилитель

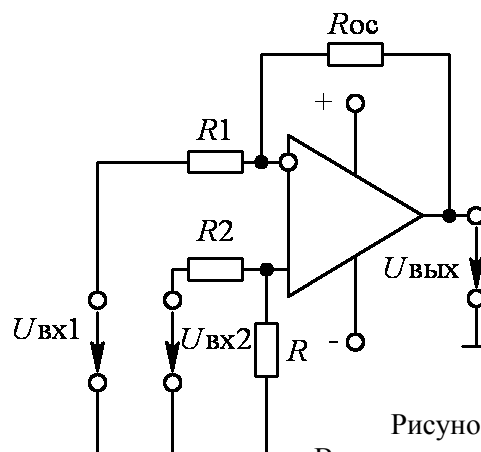


Рисунок 5.6  
Вычитатель - усилитель

В ы ч и т а т е л ь - у с и л и т е л ь (рис. 5.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{о.с.} = R$ , то  $U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1})$ .

С у м м а т о р ы . Схемы инвертирующего и неинвертирующего сумматоров приведены на рис.5.7, 5.8. Для инвертирующего сумматора выходное напряжение определяется по формуле

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

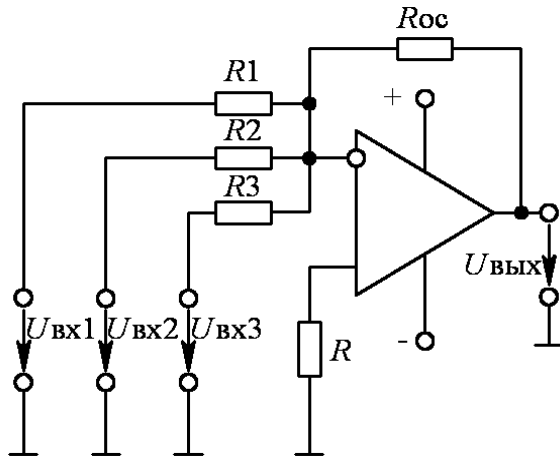


Рисунок 5.7  
Инвертирующий сумматор

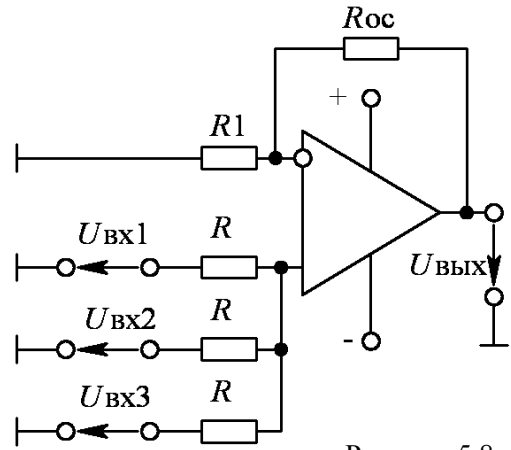


Рисунок 5.8  
Неинвертирующий сумматор

При равенстве входных сопротивлений  $R_1 = R_2 = R$

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

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1 + R_{\text{o.c.}}/R}{n} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХn}}) - \text{для неинвертирующего сумматора.}$$

В схеме сумматоров переменным параметром является сопротивление обратной связи  $R_{\text{o.c.}}$ , которое и определяет коэффициент усиления. Формулы приведены для постоянных величин (числовой сумматор)  $U_{\text{ВХ.1}}$ ,  $U_{\text{ВХ.2}}$  и т.д. В работе исследуется также инвертирующий геометрический сумматор, для которого складываются мгновенные значения  $U_{\text{ВХ.1}}$  и  $U_{\text{ВХ.2}}$ .

И н т е г р а т о р , схема которого показана на рис.5.9, реализует операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{o.c.}}} \int_0^t u_{\text{ВХ}} \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{ВХ}} \cdot dt$$

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

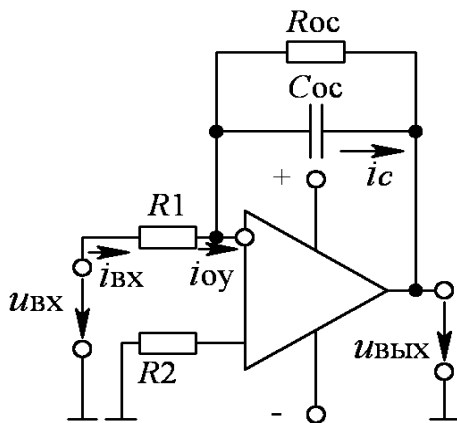


Рисунок 5.9  
Интегратор

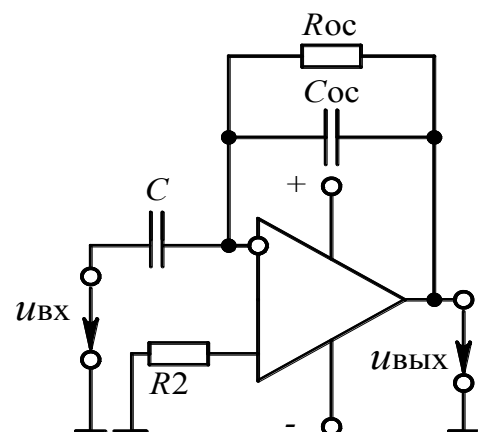


Рисунок 5.10  
Дифференциатор



Д и ф ф е р е н ц и а т о р (рис. 5.10) выполняет операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{o.c}C \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Для интегратора и дифференциатора на инвертирующий вход подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора. На рис.5.11, а приведен электрический аналог и на рис.5.11,б временные диаграммы, поясняющие принцип дифференцирования и интегрирования в электрических и электронных цепях.

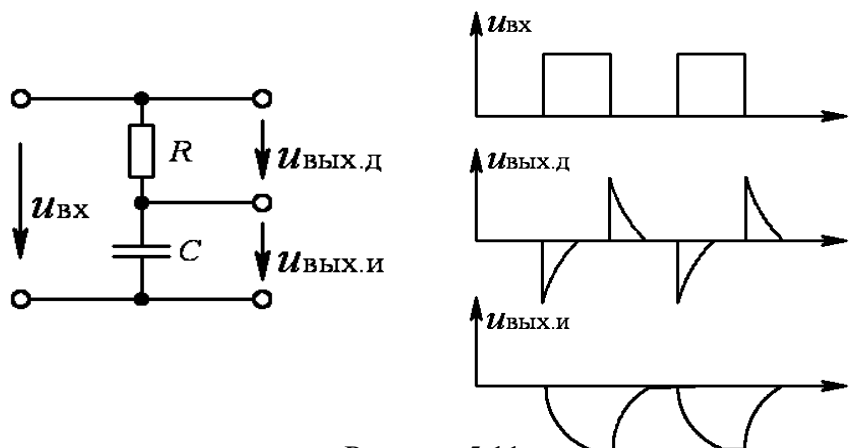


Рисунок 5.11

Л и н е й н ы е у с и л и т е л и представлены инвертирующим усилителем (рис.5.12), для которого  $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{o.c}}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ}}$  и избирательным усилителем (рис.5.13) с частотно-зависимым двойным Т-образным мостом на базе

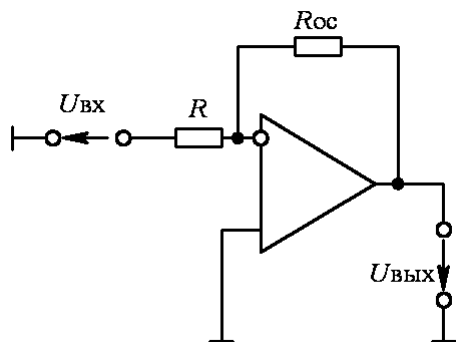


Рисунок 5.12  
Линейный усилитель

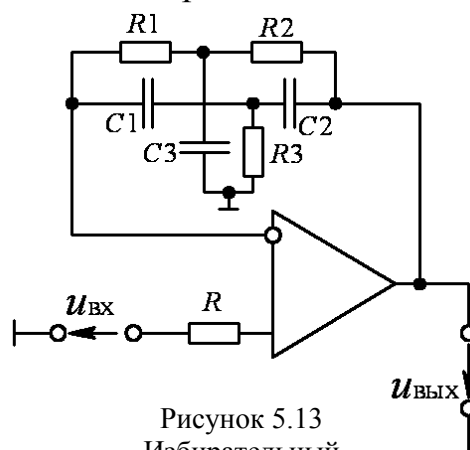


Рисунок 5.13  
Избирательный усилитель

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  $R_3=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=0,5R$ . Если  $C_3=C_1+C_2=2C$ , тогда  $\omega_0=\frac{1}{R_1C_1}=\frac{1}{R_2C_2}=\frac{1}{R_3C_3}=\frac{1}{RC}$ .

### Генераторы

Мультивибратором называется генератор периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор (рис.5.14) является автогенератором и работает без подачи входного сигнала. Рассматриваемый генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны  $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C \cdot \ln(1+)$ , при  $R_1=R_2$   $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C \cdot \ln 3$ , период

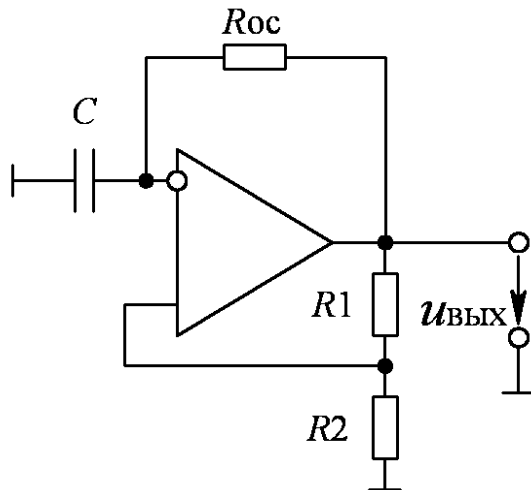


Рисунок 5.14  
Мультивибратор

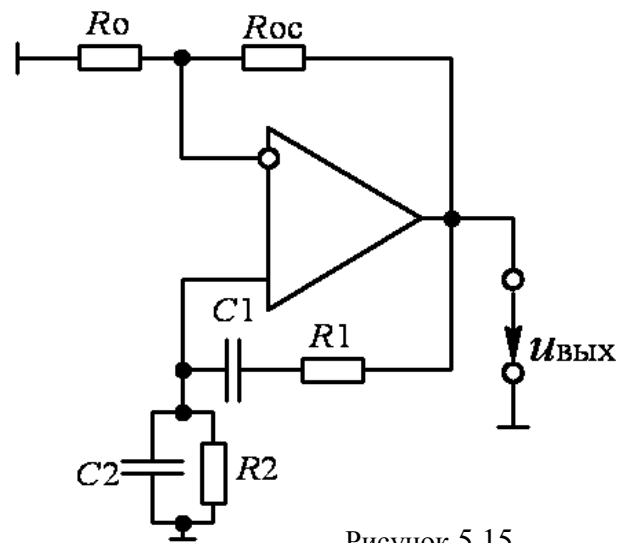


Рисунок 5.15  
Генератор  
остом Вина

повторения импульсов  $T_{п}=(t_{и}+t_{п})=2t_{и}$ , скважность  $Q=\frac{T_{п}}{t_{и}}=2$ . Изменяя  $\tau=R_{о.с}C$  и величины  $R_1, R_2$ , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина на базе ОУ (рис. 5.15) является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов  $R_1, R_2, C_1, C_2$ , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого

$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$  - 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  $R_{о.с}$  и  $R_0$  определяет коэффициент усиления  $k_u$ .

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

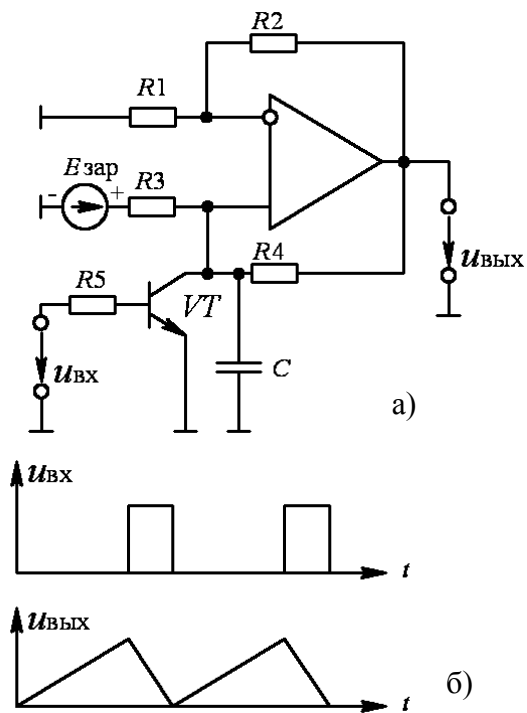


Рисунок 5.16  
Генератор ГЛИН

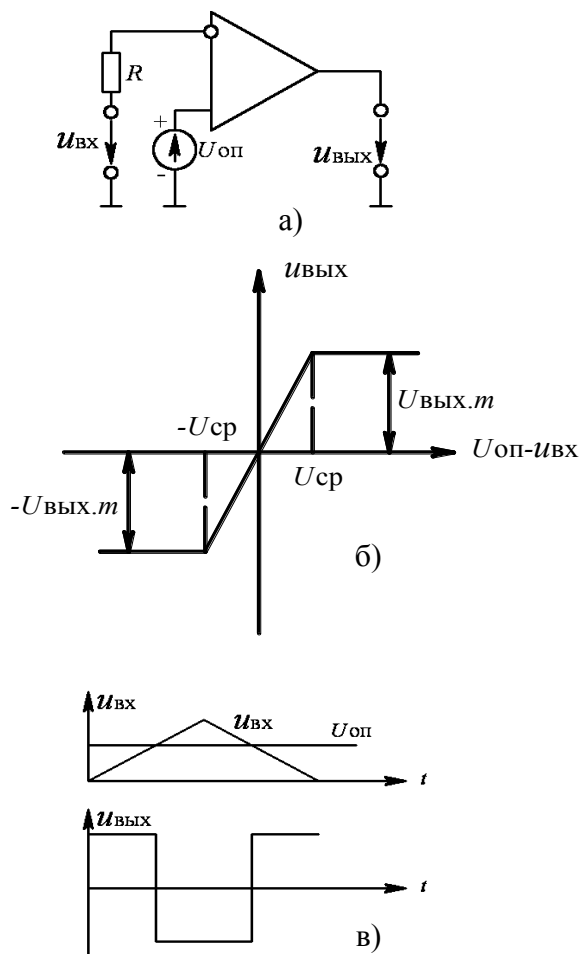


Рисунок 5.17  
Компаратор

электронно-лучевых трубках и т.д. Реализация ГЛИНа на ОУ и временные диаграммы входного и выходного напряжений даны на рис.5.16. 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  $\tau_{зар} = R_3C$ , 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.5.17, а приведен **двухвходовый** 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.5.17, 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.5.17, 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.5.18, а). Здесь применяется ПОС через цепочку  $R_1, R_2$ , а входной сигнал подается на инвертирующий вход.

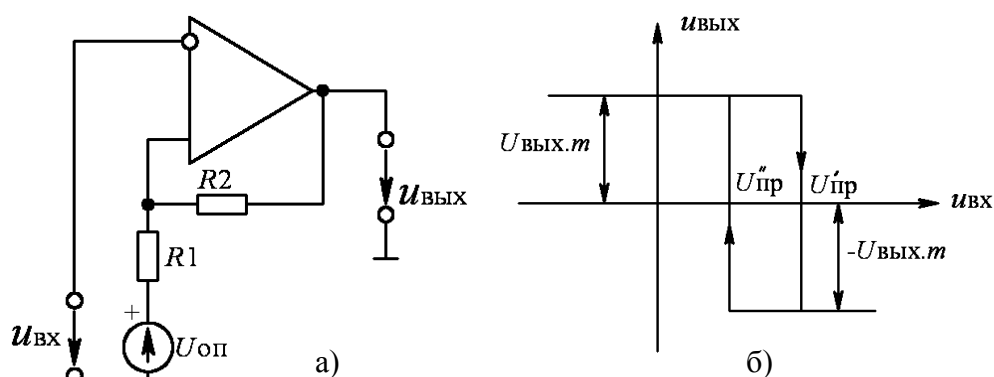


Рисунок 5.18  
Триггер Шмитта

На рис.5.18,б построена передаточная характеристика этого компаратора, для которой

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

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

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

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

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для инвертирующего усилителя (рис.5.4)  $R_1=10$  кОм и  $R_{о.с}=20, 100$  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.5.6) при  $R_1=R_2=R=10$  кОм и  $R_{о.с}=10$  и  $20$  кОм при трех значениях  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.5.2.

3. Рассчитать  $U_{вых}$  инвертирующего сумматора (рис.5.7) при  $R_1=R_2=R=10$  кОм и  $R_{о.с}=20, 50, 100$  кОм при трех различных наборах  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.5.2.

4. Определить постоянную времени  $\tau$  для интегратора ( $R_1=10$ кОм;  $C_{о.с}=5$  и  $10$  нФ) и дифференциатора ( $R_{о.с}=10$  и  $50$  кОм,  $C=10$  и  $5$ нФ).

5. Рассчитать резонансную частоту  $f_0$  и период  $T_0$  избирательного усилителя (рис.5.13) при  $R=24$  кОм и  $C=1,1$  нФ.

6. Рассчитать длительность импульсов ( $t_{и}$ ) и пауз ( $t_{п}$ ), а также период повторения импульсов ( $T_{п}$ ) выходного напряжения мультивибратора (рис.5.14) при  $C= 6,8$  нФ и  $R_{о.с.}=16$  кОм.

7. Определить частоту и период выходного напряжения генератора гармонических колебаний (рис.5.15) при  $R=24$  кОм и  $C=1,1$  нФ.

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

### Порядок выполнения эксперимента

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

Для инвертирующего (рис.5.4) или неинвертирующего (рис.5.5) усилителя снять передаточные характеристики для заданных в предварительном задании значений  $R_{о.с.}$ . 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.5.1.

ТАБЛИЦА 5.1

$U_{вх}$ , мВ	0							1000
$U'_{вых}$ , В при $R_{о.с.}=20$ кОм	0							
$U''_{вых}$ , В при $R_{о.с.}=100$ кОм	0							
$U'''_{вых}$ , В при $R_{о.с.}=270$ 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.5.1. На построенных характеристиках нанести точки по предварительному расчету.

3. Собрать цепь вычитателя-усилителя согласно рис.5.6 и подать на входы от источников постоянного тока напряжения различные по уровню и знаку при различных значениях  $R_{о.с.}$ . Значения входных и выходного напряжений занести в табл.5.2.

4. а) Для инвертирующего (рис.5.7) или неинвертирующего (рис.5.8) цифрового сумматора произвести измерения входных и выходного напряжений для различных по знаку и величине входных напряжений при двух значениях  $R_{о.с.}$ . По п.п. 3,4 уровень входных напряжений брать в пределах  $\pm 1$ В. Результаты измерений занести в табл.5.2.

ТАБЛИЦА 5.2

	$U_{\text{ВХ1}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{ВХ2}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$	$R_{\text{о.с}}, \text{ кОм}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ расч.}, \text{ мВ}$
Вычитатель				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.  $R_{\text{о.с}}$  сумматора 10 или 20 кОм. Снять осциллограммы входных  $u_{\text{ВХ}}(t)$  и выходного  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  напряжений, по которым определить параметры входных сигналов (амплитуду, частоту, период). Произвести графическое сложение входных сигналов с коэффициентом усиления  $k_u=2$ .

5. По рис.5.9 и 5.10 на входы дифференциатора и интегратора подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора стенда. Снять осциллограммы и определить параметры входных  $u_{\text{ВХ}}(t)$  импульсов (амплитуда, период, частота), а также снять осциллограммы выходных  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  напряжений при следующих номинальных данных устройств: для дифференциатора -  $C_{\text{ВХ}}=10$  и 5 нФ,  $R_{\text{о.с}}=20$  и 30 кОм,  $C_{\text{о.с}}=2$  нФ; для интегратора -  $R_{\text{ВХ}}=10$  кОм,  $C_{\text{о.с}}=10$  и 5нФ,  $R_{\text{о.с}}=20$  кОм. По снятым осциллограммам определить графическим способом постоянную времени  $\tau$  и сравнить с результатами предварительного расчета.

6. Собрать схему линейного усилителя согласно рис.5.12 с подключением на вход генератора низкочастотных колебаний (синусоидальный выход). Снять амплитудную характеристику на частоте 1кГц в линейном режиме, который контролируется осциллографом на выходе усилителя, для значений  $R_{\text{о.с}}=91$  и 270 кОм. Результаты эксперимента свести в табл.5.3.

ТАБЛИЦА 5.3

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

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

7. По рис.5.13 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.5.4.

ТАБЛИЦА 5.4

$$U_{\text{вх}} = 90\text{мВ}$$

$f$ , кГц						
$U_{\text{вых}}$ , В						
$k_u$						

По результатам табл.5.4 построить АЧХ, определить резонансную частоту, которую сравнить с результатами предварительного расчета. По АЧХ определить  $f_n, f_v$ , полосу пропускания.

8. Согласно рис.5.14 и 5.15 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.5.15 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.5.17) 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. 5.18) 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 "⊥" (общая точка схемы).

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

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 № 6 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.

### Общие сведения

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.

Таблица 6.1

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

В общем случае число элементарных логических функций от  $n$  переменных равно  $2^{2^n}$ . Так, при одной переменной возможны четыре функции (табл.6.1). Здесь единичная и нулевая функции не зависят от значения аргумента и являются постоянными. Двум переменным соответствует 16 функций:  $2^{2^2} = 16$ . В табл. 6.2 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.

Основными логическими операциями являются (см. табл.6.2):

- 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: (читается “не  $x$ ”).

Как видно из табл. 6.2, 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. 6.3), можно доказать, что таковыми являются наборы из одной функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

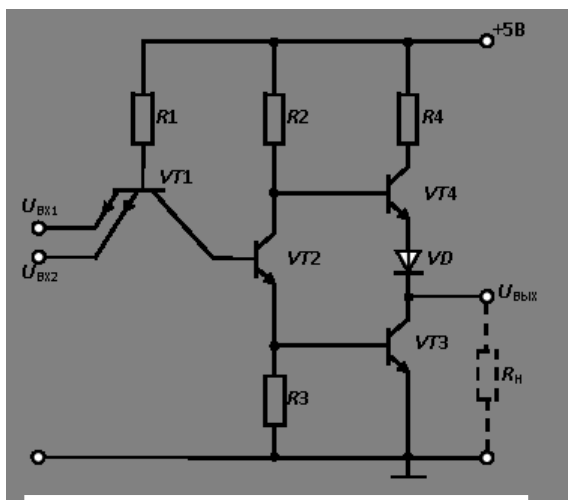


Рисунок 6.1 Реализация элемента И-НЕ

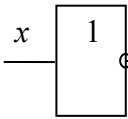
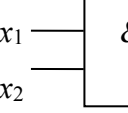
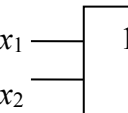
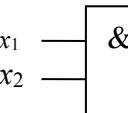
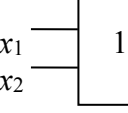
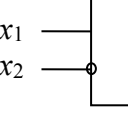
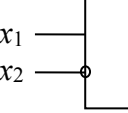
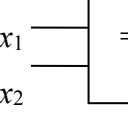
В базовых элементах одной серии использована одинаковая микросхемная реализация. Серия характеризуется общими электрическими, конструктивными и технологическими параметрами.

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

многэмиттерного транзистора  $VT1$  и сложного усилителя-инвертора (рис.6.1).

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

ТАБЛИЦА 6.2

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	$\bar{x}$ $\neg x$	$x$	0	1	$\bar{x}$	1	0		$y = \bar{x}$
Элемент И (конъюнктор)	Логическое умножение, конъюнкция	$x_1 \cdot x_2$ $x_1 \wedge x_2$ $x_1 \& x_2$	$x_1 \cdot x_2$	0	0	0	1		$y = x_1 \cdot x_2$	
Элемент ИЛИ (дизъюнктор)	Логическое сложение, дизъюнкция	$x_1 + x_2$ $x_1 \vee x_2$	$x_1 + x_2$	0	1	1	1		$y = x_1 + x_2$	
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		$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	
Элемент ИЛИ-НЕ (элемент Пирса)	Стрелка Пирса, отрицание дизъюнкции	$\overline{x_1 + x_2}$ $x_1 \downarrow x_2$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	0	0		$y = \overline{x_1 + x_2}$	
Запрет $x_2$	Запрет	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	0	0	1	0		$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	
Импликация от $x_2$ к $x_1$	Импликация	$\overline{x_1 + x_2}$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	1	1		$y = \overline{x_1 + x_2}$	
Исключающее ИЛИ (неравнозначность)	Исключающее ИЛИ	$x_1 \oplus x_2$ $\overline{x_1 x_2} + \overline{x_1} x_2$	$x_1 \oplus x_2$	0	1	1	0		$y = x_1 \oplus x_2$	

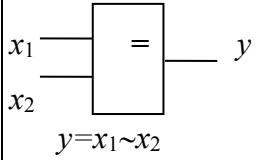
Равнозначность (эквивалентность)	Равнозначность	$x_1 \sim x_2$ $x_1 x_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2$	$x_1 \sim x_2$	1	0	0	1	
-------------------------------------	----------------	---	----------------	---	---	---	---	---

ТАБЛИЦА 6.3



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,  $U_{вх}^0 \leq 0,4$  В, то через открытый переход база-эмиттер  $VT1$  и резистор  $R1$  протекает входной ток  $I_{вх}^0 \leq 1,6$  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  $VD$  и резистор  $R4$ .

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

Если в базовом элементе (рис.6.1) отсоединить элементы  $R4$ ,  $VT4$ ,  $VD$ , 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 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. 6.3). Для данного примера  $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4$ . Используя тождество  $x = \bar{\bar{x}}$  и формулы де Моргана, эту функцию можно представить в виде:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_4$$

Полученной логической функции соответствует схема рис.6.2.

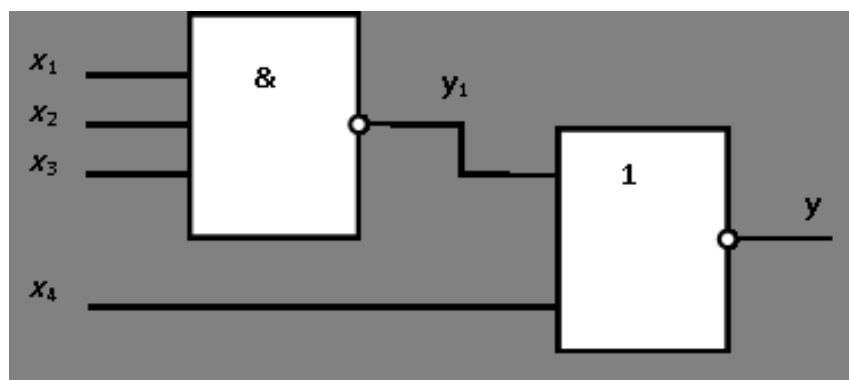


Рисунок 6.2 Схема на логических элементах

### 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. 6.4.

ТАБЛИЦА 6.4

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	-	-	-	-

### Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить принцип работы логических элементов (табл.6.2).
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.
3. Собрать схему предварительного задания, проверить правильность работы, составить таблицу истинности.
4. 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).

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

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.

## Лабораторная работа № 7 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.

### Общие сведения

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, демультиплексоры, 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.7.1) представляет собой дешифратор-демультиплексор с 4 на 16. Основу этой микросхемы составляют 16 ЛЭ И-НЕ и 8 инверторов. Работа дешифратора определяется таблицей истинности (табл. 7.1). Дешифратор реализует логические функции:

$$F_0 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0; F_1 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 A_0; F_2 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 A_1 \bar{A}_0; \dots; \\ F_{15} = A_3 A_2 A_1 A_0 .$$

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.7.1). Кроме четырех входов  $A_0...A_3$  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 будет высокий уровень напряжения. Такой режим используется при наращивании числа разрядов дешифрируемого кода.

ТАБЛИЦА 7.1

Входы						Выходы						
		$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	...	$\bar{13}$	$\bar{14}$	$\bar{15}$
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.

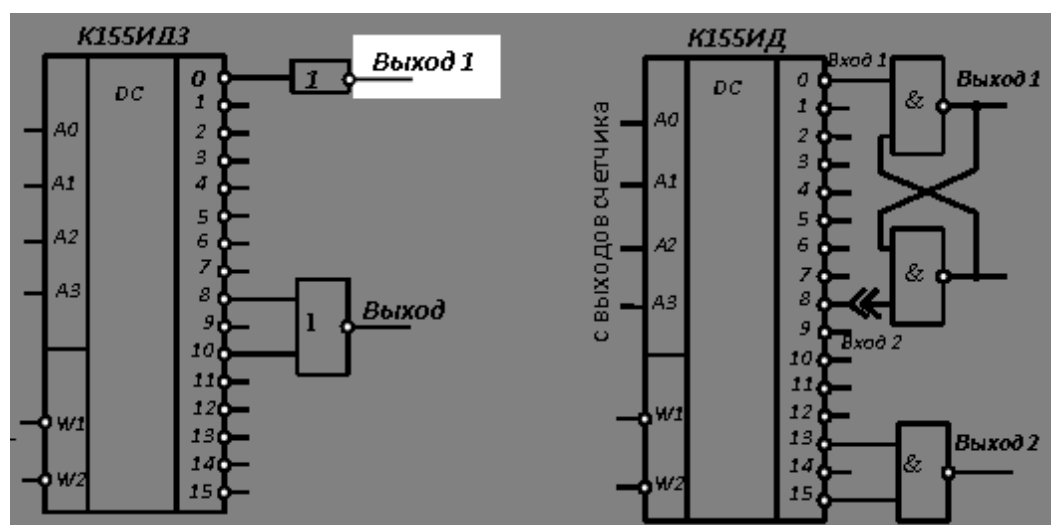


Рисунок 7.4

Входы  $\bar{W}_1$  и  $\bar{W}_2$  можно использовать как логические, тогда микросхема ИД3 служит демультиплексором данных. Входы  $A_0...A_3$  в этом случае используются как адресные, чтобы направить поток данных, принимаемых входами  $\bar{W}_1$  или  $\bar{W}_2$ , на один из выходов. 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.7.1, 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.7.1) или формирователя импульсов (рис.7.2), благодаря цикличности "перемещения" логических уровней по выходам. Формирование конечной последовательности импульсов может осуществляться различными способами (см. рис.7.2). Например, на выходе 1 длительность сформированного импульса равна половине цикла, т.к. переключение  $\bar{R}\bar{S}$ -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.7.2 показан простой способ получения пакета из двух импульсов на выходе одного ЛЭ. Аналогичная схемотехника используется и для формирования последовательности импульсов различной длительности.

Мультиплексор (управляемый кодом переключатель)

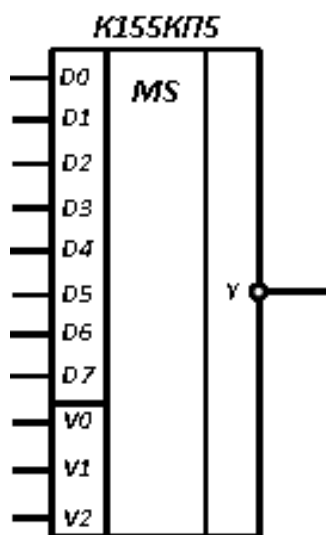


Рис. 7.3

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.7.3). 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.

Логическое уравнение имеет вид:

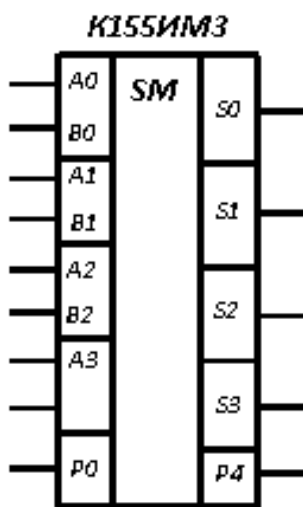
$$\bar{Y} = D_0\bar{V}_2\bar{V}_1\bar{V}_0 + D_1\bar{V}_2\bar{V}_1V_0 + D_2\bar{V}_2V_1\bar{V}_0 + D_3\bar{V}_2V_1V_0 + D_4V_2\bar{V}_1\bar{V}_0 + D_5V_2\bar{V}_1V_0 + D_6V_2V_1\bar{V}_0 + D_7V_2V_1V_0.$$

Состояние мультиплексора определяется таблицей истинности (табл. 7.2). 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 передачи информации по линиям связи и для последовательного опроса (контроля) при большом числе каналов или устройств.

ТАБЛИЦА 7.2

Адресные входы			Информационные входы								Выход
$V_2$	$V_1$	$V_0$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	д
0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	1
0	0	0	1	x	x	x	x	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

ТАБЛИЦА 7.3

Рисунок 7.4  
Сумматор

Входы			Выходы	
$A_i$	$B_i$	$P_i$	$S_i$	$P_{i+1}$
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

Сумматор предназначен для сложения двух чисел, заданных в двоичном коде. Число входов и выходов сумматора определяется разрядностью слагаемых. Одноразрядный двоичный сумматор характеризуется таблицей истинности (табл.7.3). Такой сумматор называется полным, т.к. обрабатывает сигнал переноса с предыдущего разряда  $P_i$  и выдает сигнал переноса на последующий разряд  $P_{i+1}$ . Схематика 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 K155ИМ3 (рис. 7.4) представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным поразрядным сложением и последовательным формированием сигнала переноса. Он имеет два четырехразрядных числа по входам данных  $A_0...A_3$  и  $B_0...B_3$ , а по входу  $P_0$  - сигнал переноса с предыдущего разряда. Сумма разрядов входных чисел появляется на выходах  $S_0...S_3$ . На выходе  $P_4$  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  $B_{пр} = B_3B_2B_1B_0$ , может быть представлено в обратном коде  $B_{обр} = \bar{B}_3\bar{B}_2\bar{B}_1\bar{B}_0$  и в дополнительном коде  $B_{доп} = B_{обр} + 1$ .

Операцию вычитания можно представить в виде

$$A_{пр} - B_{пр} = A_{пр} + B_{доп} - 10000.$$

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  $A > B - P_4 = 1$ .

Разрабатываемые схемы будут проще, если учесть, что при использовании микросхем 155 серии на неподключенных входах генерируются 1, поэтому достаточно подключать с наборного поля только нулевые сигналы.

### Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 7.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
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 К155ИМ3.

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 в качестве формирователя пакета импульсов с параметрами, заданными табл.7.4. Частота переключения генератора тактовых импульсов равна 1 Гц.

3. Составить схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух адресных входах имеется 1).

4. Перевести в двоичный код и сложить два числа  $A$  и  $B$ , заданных табл.7.4.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать работу дешифратора в качестве преобразователя кодов. Проверить таблицу соответствия между логическими уровнями на выходах и кодовыми наборами на входах (табл. 7.1).

2. Собрать схему включения дешифратора, составленную в предварительном задании и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

3. Исследовать работу мультиплексора, для этого подать сигналы на информационные входы  $D_0...D_7$  с выходов дешифратора  $\bar{0}...7$ , а адресные входы  $V_0...V_2$  соединить с шинами наборного поля. Проверить таблицу состояний (табл.7.2).

4. Собрать схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику, и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

5. Исследовать работу сумматора, набрав на входах двоичные числа  $A$  и  $B$ . Проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании.

6. Факультативно. Использовать сумматор в качестве вычитателя и компаратора чисел  $A$  и  $B$ . Пояснить результаты.

7. Собрать схему сигнализации нулевого результата сложения ( $S_0=S_1=S_2=S_3=0$ ), используя имеющиеся на лабораторном стенде ЛЭ и один элемент индикации.

### Содержание отчета

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.

### Контрольные вопросы

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 № 8

### 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.

#### Общие сведения

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).

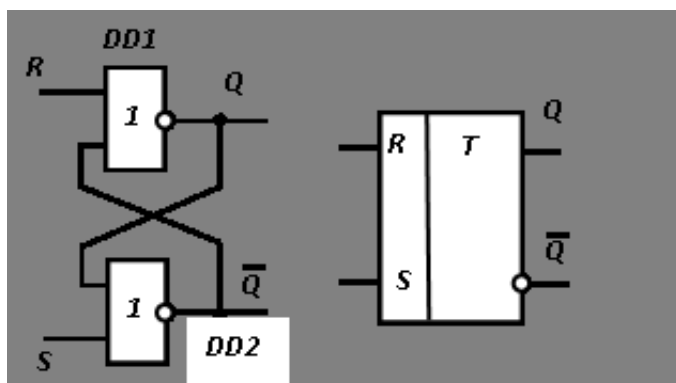
В зависимости от логической структуры схемы управления различают  $RS$ -,  $D$ -,  $T$ -,  $JK$ -триггеры и др.

Работа триггера может быть описана логическим уравнением, связывающим состояние входов и выходов триггера до его срабатывания ( $t$ ) и после срабатывания ( $t+1$ ). Состояние триггера можно задать таблицей переходов или временной диаграммой его работы.

А с и н х р о н н ы й  $RS$  - т р и г г е р имеет два установочных входа  $R$  и  $S$ . Схема триггера на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ и его условное обозначение показаны на рис.8.1. 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 8.1

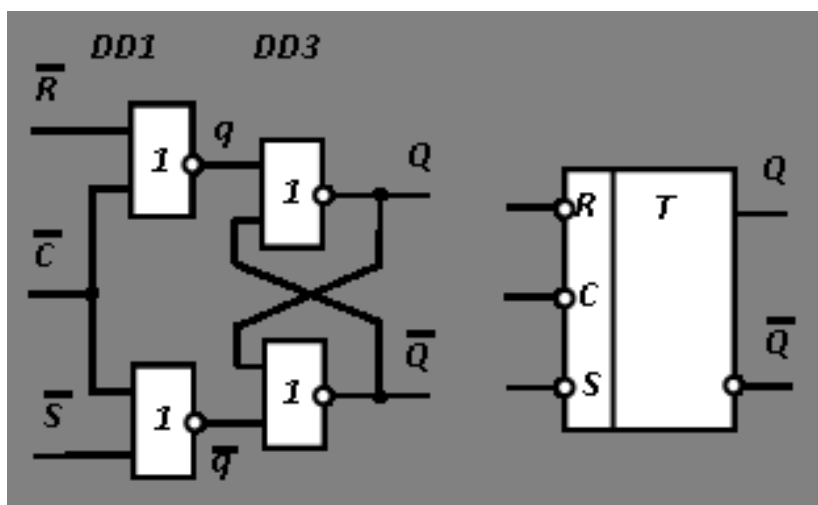


$R$	$S$	$Q^{t+1}$
1	0	0
0	1	1
0	0	$Q^t$
1	1	X

Рисунок 8.1 RS-триггер  
структура, обозначение, таблица состояний

На входах  $DD1$  - 0,0, что сохраняет этот элемент в состоянии  $Q=1$ . Для изменения состояния триггера на его входы надо подать комбинацию сигналов  $R=1, S=0$ . Тогда на входе  $DD1$  появится высокий уровень 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.8.1). Триггер с таким же законом работы можно выполнить на логических элементах 2И-НЕ.

Синхронные RS-триггеры имеют два информационных входа  $R$  и  $S$  и синхровход  $C$ . Схема триггера и его условное обозначение показаны на рис.8.2. 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  $\bar{C}$  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  $DD3-4$  находятся в режиме хранения информации. Схема управления работает 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 в состояние  $Q=1$ , а при  $\bar{R}=0$ ,

Рисунок 8.2  
Синхронный RS-триггер

$\bar{s}=1$  - в состоянии  $Q=0$ . Комбинация  $\bar{R}=\bar{s}=\bar{C}=0$  запрещена. Так как при  $\bar{C}=1$  любое изменение сигналов на входах игнорируется, синхронные триггеры защищены от воздействия помех.

Синхронный  $D$ -триггер состоит из асинхронного  $RS$ -триггера и схемы управления на ЛЭ. Он имеет информационный вход  $D$  и синхривход  $C$ . Его схема и условное обозначение показаны на рис.8.3. ЛЭ  $DD3-4$  представляют собой  $RS$ -триггер, управляемый инверсными сигналами.

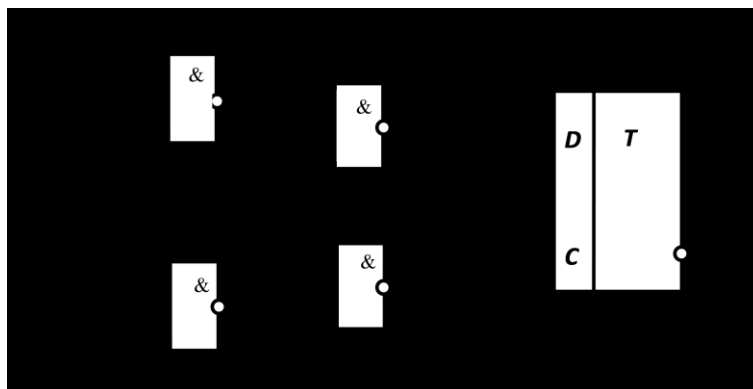


Рисунок 8.3  
Синхронный  $D$  – триггер

Его устойчивое состояние обеспечивается комбинацией  $q = \bar{q} = 1$ . При  $C=0$  на 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  $D=1$   $q=0$ ,  $a=1$ , и  $RS$ -триггер оказывается в состоянии  $Q=1$ . При  $D=0$   $q=1$ ,  $a=0$ , 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.

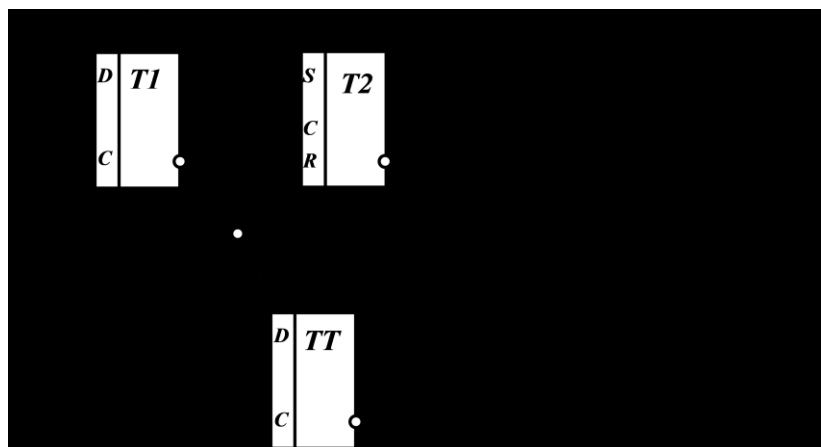


Рисунок 8.4  
Двухтактный  $D$  - триггер



Широкое применение получили д в у х т а к т н ы е  $D$ -т р и г г е р ы. Схема и условное обозначение приведены на рис.8.4 а, б. Он состоит из  $D$ -триггера и синхронного  $RS$ -триггера с объединенными через инвертор  $S$ -входами.

Принцип работы триггера можно проследить по временной диаграмме (рис.8.4в). 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  $T1$ .

$JK$ -т р и г г е р является универсальным. Его условное обозначение приведено на рис.8.5а. Он имеет два установочных входа  $R$  и  $S$ , информационные входы  $J$  и  $K$  и синхровход  $C$ .

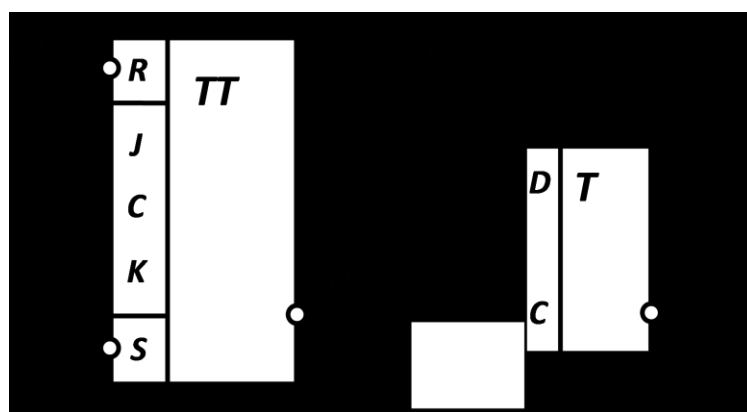


Рисунок 8.5

а)  $JK$  – триггер

б) реализация  $T$ - на базе  $D$ - триггера

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

$$Q_{t+1} = J_t \cdot \bar{Q}_t + \bar{K}_t \cdot Q_t$$

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

$T$ -т р и г г е р или с ч е т н ы й т р и г г е р имеет один информационный вход  $T$ . Каждый импульс на этом входе переводит его в новое состояние. Это соответствует работе  $JK$ -триггера при  $K=J=1$ .

Такой же триггер можно получить на основе  $D$ -триггера (рис.8.5б). 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.

## Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 8.2

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	T	T	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.8.2.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Используя логические элементы K155ЛА3, 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 K155ТМ2. Информационный вход D включить к наборному полю, а синхровход С 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 K155ТВ1. Подключить установочные входы R, S и информационные J, K к наборному полю, а синхровход С 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 K155ТМ2 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 K155ТМ2. Определить частоту следования выходных импульсов  $f_3$ . Проверить соотношения  $f_1/f_2$  и  $f_1/f_3$ .

## Содержание отчета

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.

## Контрольные вопросы

1. Что называют триггером? 2. Как классифицируются триггеры по способу записи информации и по функциям? 3. Как работают  $RS$ -триггеры? 4. Чем отличаются двухтактные триггеры от одноктактных? 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 № 9 СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ

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

### Общие сведения

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 к о э ф ф и ц и е н т и л и м о д у л ь с ч е т а  $K$  - 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 с у м м и р у ю щ и е , в ы ч и т а ю щ и е и р е в е р с и в н ы е . 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 а с и н х р о н н ы е (последовательные) и с и н х р о н н ы е (параллельные).

В а с и н х р о н н ы х 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.9.1, а). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.9.1) или временная диаграмма (рис.9.1, б).

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:  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера  $T_1$ . 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.9.1). 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 выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. рис.9.1, 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 ( $K=2^4=16$ ).

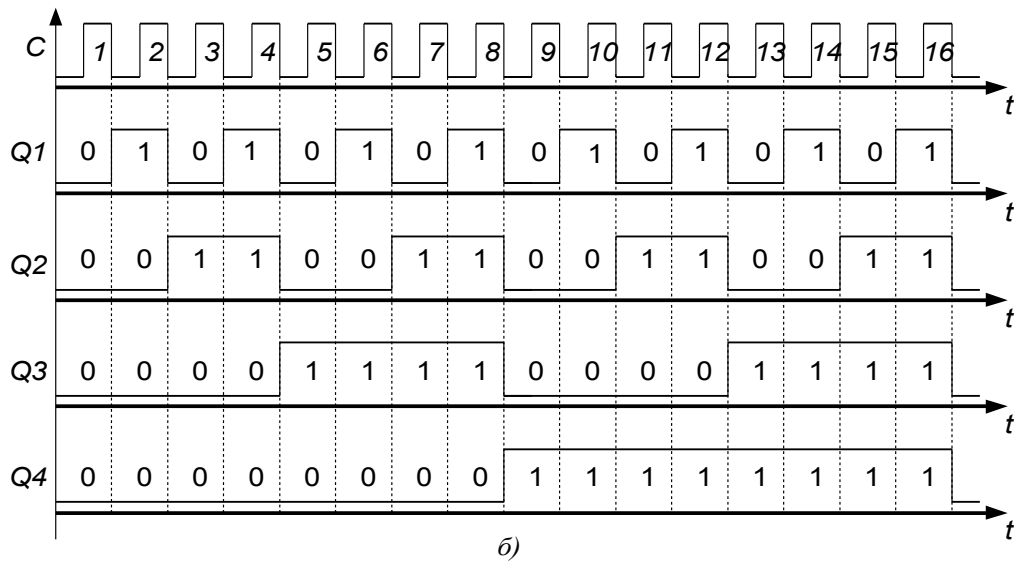
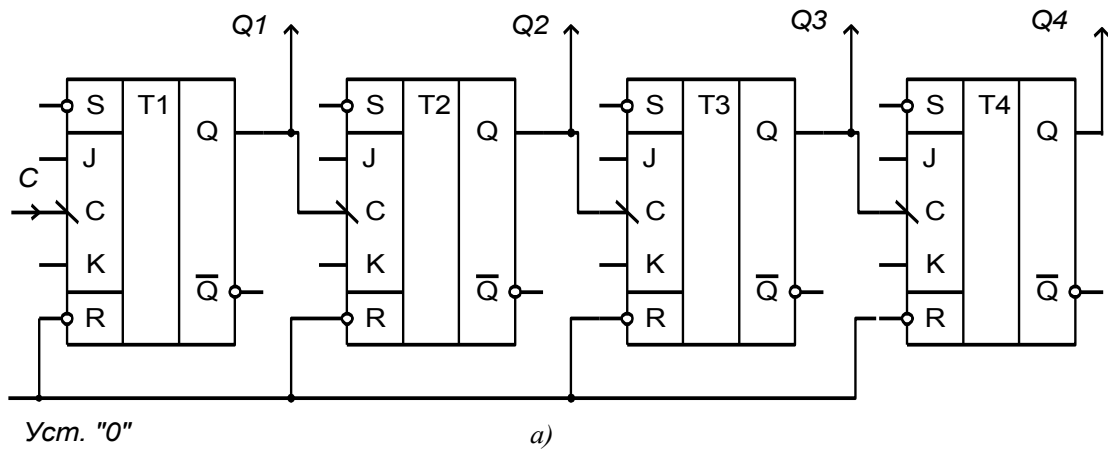


Рисунок 9.1  
Суммирующий счетчик, а) структура, б) временная диаграмма

ТАБЛИЦА 9.1

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
...	...	...	...	...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

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.

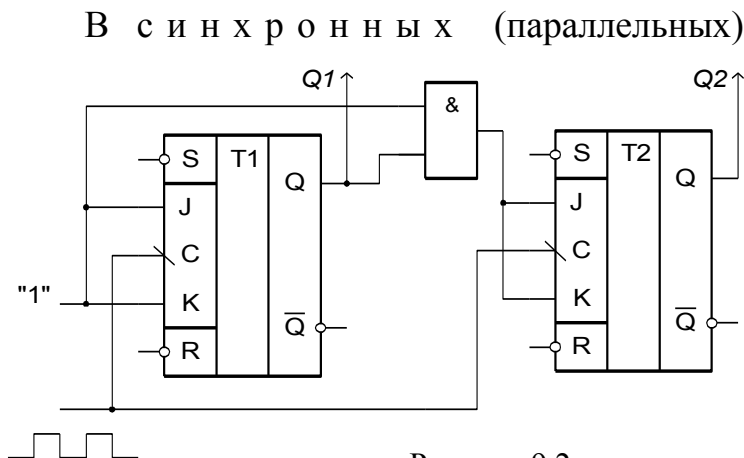


Рисунок 9.2  
Синхронный счетчик

В синхронных (параллельных) счетчиках счетные импульсы поступают одновременно на входы синхронизации всех триггеров (рис.9.2). 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.9.1).

#### Счетчики

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

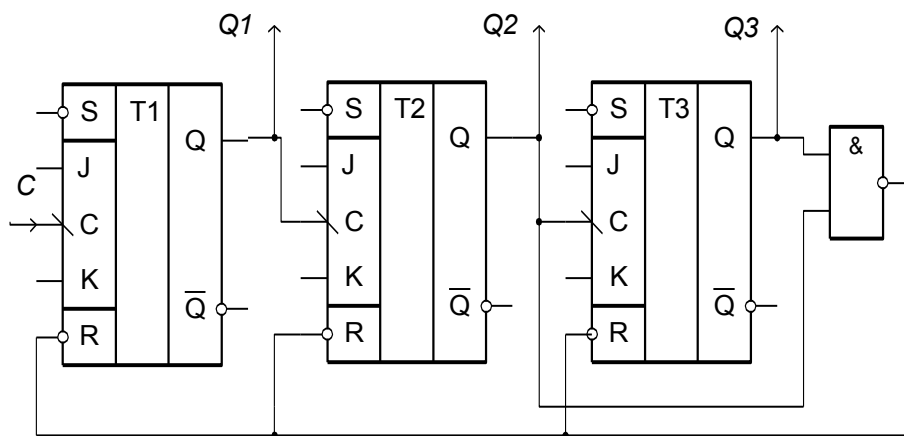


Рисунок 9.3  
Счетчик на шесть состояний

схемы. На рис.9.3 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. 9.4.

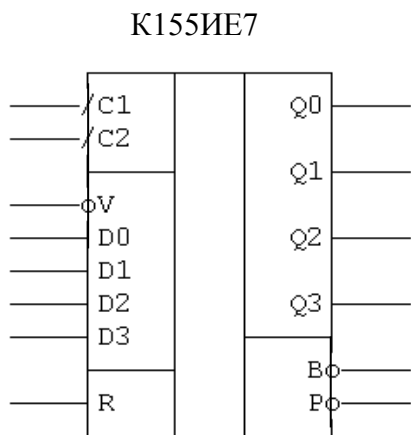


Рисунок 9.4  
Четырех разрядный  
реверсивный счетчик

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).

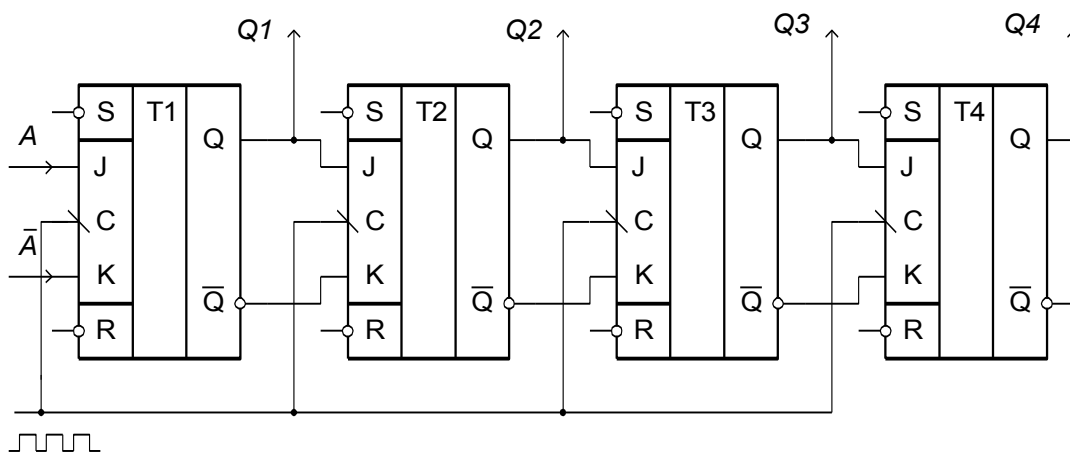


Рисунок 9.5  
Регистр сдвига

В четырехразрядном регистре сдвига, выполненном на  $JK$ -триггерах (рис.9.5), 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  $J = 0, K = 1$ , 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 триггер и т.д. (рис.9.6). 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.

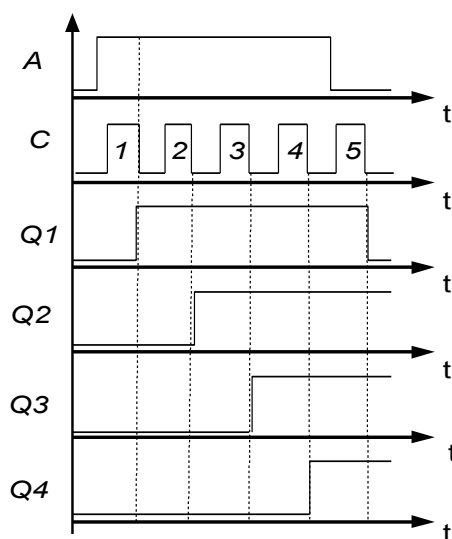


Рис.9.6

М и к р о с х е м а

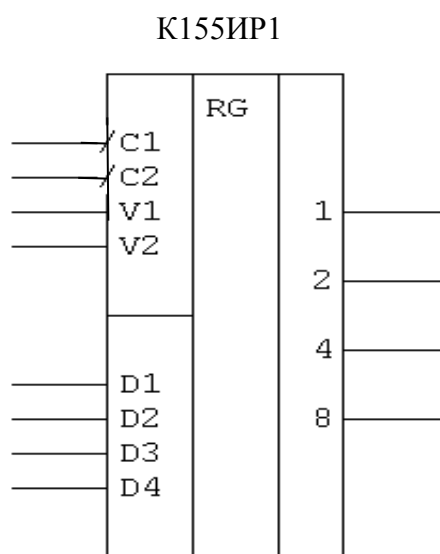


Рисунок 9.7  
Регистр сдвига

К155ИР1 (рис.9.7) 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 последовательный 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 предназначены 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.

Микросхема К155ТМ5 (рис.9.8) 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*.

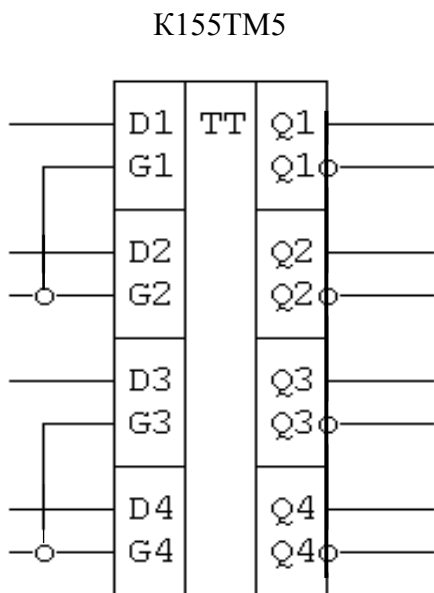


Рисунок 9.8  
Регистр памяти

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. 9.2. Для исключения избыточных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ.

ТАБЛИЦА 9.2

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

2. Составить таблицу переключений счетчика.

### Порядок выполнения эксперимента

1 Ознакомьтесь 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»

2 Собрать схему четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на *JK*-триггерах ИС К155ТВ1 (рис.9.1, 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  $\overline{R}$ -входы сигнал нуля. От источника импульсов подать на вход счетчика 15 импульсов и составить таблицу переключений.

3 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.

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

5. Собрать схему двухразрядного параллельного счетчика на триггерах К155ТВ1 и ЛЭ К155ЛА4 (рис. 9.2). Проверить его работу.

6. Собрать схему четырехразрядного регистра сдвига на триггерах К155ТВ1 (рис.9.5). 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.

7. 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».

8. 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, убедится, 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.

9. 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.

10. 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

*VI* подать «0», и подать один импульс на вход *CI*. На выходе регистра должен появиться код «1110». Подать «1» на вход *VI* и три импульса на вход *CI*. Записать какой код появится на выходе регистра?

### **Содержание отчета**

Цель работы; схема счетчика с заданным табл.9.1 модулем счета и таблица переключений его триггеров; схема четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK-триггерах (рис.9.1, а) и таблица его переключений; схема двухразрядного параллельного счетчика (рис.9.2); схема четырехразрядного регистра сдвига (рис.9.5) и временные диаграммы его работы; временные диаграммы работы регистра памяти K155TM5 и регистра сдвига K155ИР1 в режиме последовательно-параллельного преобразователя.

### **Контрольные вопросы**

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 №10 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.

### Общие сведения

Каскад усиления переменного тока по схеме ОЭ построен на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис.10.1). Расчет каскада сводится к выбору точки покоя на статической линии нагрузки, определению величин  $R_K$  и  $R_B$  по заданным параметрам нагрузки, например,  $U_{\text{вых.м}}$  и  $R_H$ , и напряжению источника питания  $E_K$ .

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

$$I_{\text{кп}} \geq I_{\text{нм}} = U_{\text{вых.м}} / R_H.$$

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

Уравнение статической линии нагрузки

$$I_K = \frac{E_K - U_{\text{кэ}}}{R_K}.$$

Линию нагрузки можно построить в координатах  $I_K$ ,  $U_{\text{кэ}}$  по двум точкам. Одна из них - точка покоя **П**, координаты которой определены. Вторая может быть получена согласно уравнению - если принять  $I_K = 0$ , то  $U_{\text{кэ}} = E_K$ . Построение статической линии нагрузки показано на рис. 10.2 (линия *ав*).

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

$$R_K = \frac{E_K - U_{\text{кэп}}}{I_{\text{кп}}};$$

$$R_B = \frac{E_K - U_{\text{бэп}}}{I_{\text{бп}}}; \quad I_{\text{бп}} = I_{\text{кп}} / h_{21}.$$

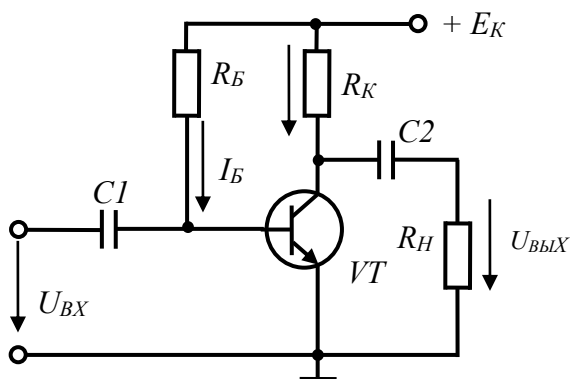


Рисунок 10.1  
Усилительный каскад

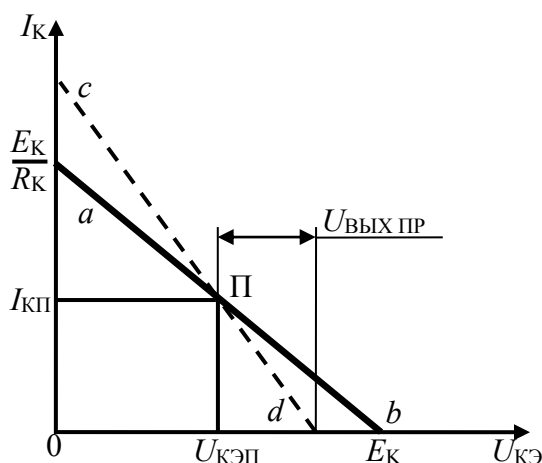


Рисунок 10.2.  
Линия нагрузки каскада

При работе каскада в режиме холостого хода и  $i_{\text{вх}} = I_{\text{вх.м}} \sin \omega t$  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  $E_{\text{к}}/2$ .

При работе каскада на нагрузку в коллекторную цепь параллельно  $R_{\text{к}}$  включается  $R_{\text{н}}$ . Поэтому режим работы каскада меняется. Рабочая точка перемещается по динамической линии нагрузки, уравнение которой

$$\Delta u_{\text{кэ}} = \Delta i_{\text{кэ}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

Динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя  $\Pi$  (частный случай -  $\Delta i_{\text{кэ}}=0$ ). Вторую точку можно получить, задавшись приращением  $\Delta i_{\text{к}}$  и подсчитав изменение напряжения  $\Delta U_{\text{кэ}}$  относительно координат точки покоя. Динамическая линия нагрузки показана на рис.10.2 (с-д). Очевидно, что угол между осью  $U_{\text{кэ}}$  и динамической линией нагрузки тем больше, чем меньше  $R_{\text{н}}$  (при  $R_{\text{н}} = 0$  он составит  $90^\circ$ ). В связи с этим предельная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых пр}}$  с уменьшением  $R_{\text{н}}$  становится меньше  $E_{\text{к}}/2$ . Это может вызвать появление нелинейных искажений. Если заданное значение  $U_{\text{вых.м}}$ , больше, чем  $U_{\text{вых пр}}$ , чтобы избежать нелинейных искажений, надо сместить точку покоя. Увеличивают  $I_{\text{кп}}$  и анализ повторяют.

Динамические параметры каскада:

$$k_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_i = h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_p = k_u k_i.$$

### 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  $U_{\text{БЭ}}$  принять равным во всех режимах 0,6 В. Напряжением  $U_{\text{кэ}}$  в режиме насыщения пренебречь. Напряжение источника питания  $E_{\text{к}} = 12 \text{ В}$ .

1. Рассчитать величину  $R_{\text{к}}$ , которая обеспечит на холостом ходу ( $R_{\text{н}}=\infty$ ) заданный в таб.10.1. коэффициент усиления. Начертить в координатах  $I_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{кэ}}$  линию нагрузки. Рассчитать сопротивление  $R_{\text{б}}$ , которое позволит получить максимальную амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых.м}}$ , без искажений. Показать положение точки покоя на линии нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{вых пр}}$ .

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

3. Рассчитать при заданном в табл. 10.1 сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$  значения коэффициентов усиления  $k_u$ ,  $k_p$ ,  $k_i$ . Построить динамическую линию

нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{вых.}m}$ , сравнить с предыдущими результатами.

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

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

ТАБЛИЦА 10.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$k_u$	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

### Порядок выполнения эксперимента

Математическая модель каскада усиления реализована в программе LAB\_UK.EXE. При запуске она иллюстрирует работу каскада при выбранных в качестве примера значениях  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{б}}$ ,  $R_{\text{н}}$  и  $U_{\text{вх.}m}$ , 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  $U_{\text{вх.}m}$  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  $k_u$ , 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  $k_u$  и нанести на предыдущий график амплитудную характеристику каскада в этом режиме. Объяснить изменения  $k_u$ .

3. Ввести рассчитанное значение  $R_{\text{к}}$  при заданном  $R_{\text{н}}$ . Записать значения  $k_u$ ,  $k_p$ ,  $k_i$  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  $U_{\text{вх.}m}$  и проверить отсутствие искажений. Перечертить с экрана осциллограммы входного и выходного напряжений.

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

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

## Содержание отчета

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

## Контрольные вопросы

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  $U_{\text{вых.т}} > E_k/2$ ? 6. Какое влияние оказывает  $R_B$  на положение точки покоя? 7. Всегда ли нужно выбирать  $U_{\text{кэп}} \approx E_k/2$  ?

## Лабораторная работа № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: Ознакомление с работой схем выпрямления трехфазного тока; экспериментальная проверка основных соотношений между токами и напряжениями в схемах; ознакомление с формой кривых тока и напряжения в различных цепях и с ходом внешних характеристик обеих схем выпрямления.

### Общие сведения

Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом. Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (рис. 11.1, *a*) содержит трехфазный трансформатор и три вентиля ( $VD1, VD2, VD3$ ). Первичная обмотка трансформатора, в зависимости от величины питающего напряжения, может быть соединена в звезду или в треугольник, вторичная - только в звезду. Нагрузка включается между нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и общей точкой катодов вентиляей.

Схема выпрямления является однополупериодной.

Рассмотрим работу идеальной схемы (рис. 11.1, *a*) на активную нагрузку. В любой момент времени ток протекает только в той фазе, в которой на аноде вентиля имеется наибольший положительный потенциал (рис. 11.1, *b*).

Если предположить, что индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора  $X_T$  равно нулю, и переход тока от одного вентиля к другому – коммутация – происходит мгновенно, то чередование работы вентиляей происходит в момент пересечения положительных полуволн фазных ЭДС, в так называемых точках естественного зажигания. На отрезке  $t_1 - t_2$  работает вентиль фазы  $a$ , на отрезке  $t_2 - t_3$  вентиль фазы  $b$ , и т.д. Выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, складывается из чередующихся анодных токов  $i_{a1}, i_{a2}, i_{a3}$ , длительность протекания которых составляет одну треть периода (рис. 11.1, *e*),  $I_a = I_H/3$ .

Форма напряжения  $u_H$  на нагрузке представляет собой огибающую фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора. Как известно, среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле:

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \cos \omega t \, d\omega t .$$

Для схемы с нулевым выводом ( $m = 3$ ) напряжение холостого хода  $U_{H\text{ ср}} = 1,17U_2$ . Пульсация выпрямленного напряжения частотой 150 Гц достигает значительной величины  $q = 0,25$ .

В непроводящую часть периода к каждому вентилю прикладывается разность двух фазных напряжений (собственной фазы и смежной работающей фазы, как это видно из заштрихованной области на рис. 11.1, *b*). Максимальное



обратное напряжение достигает амплитуды линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора:

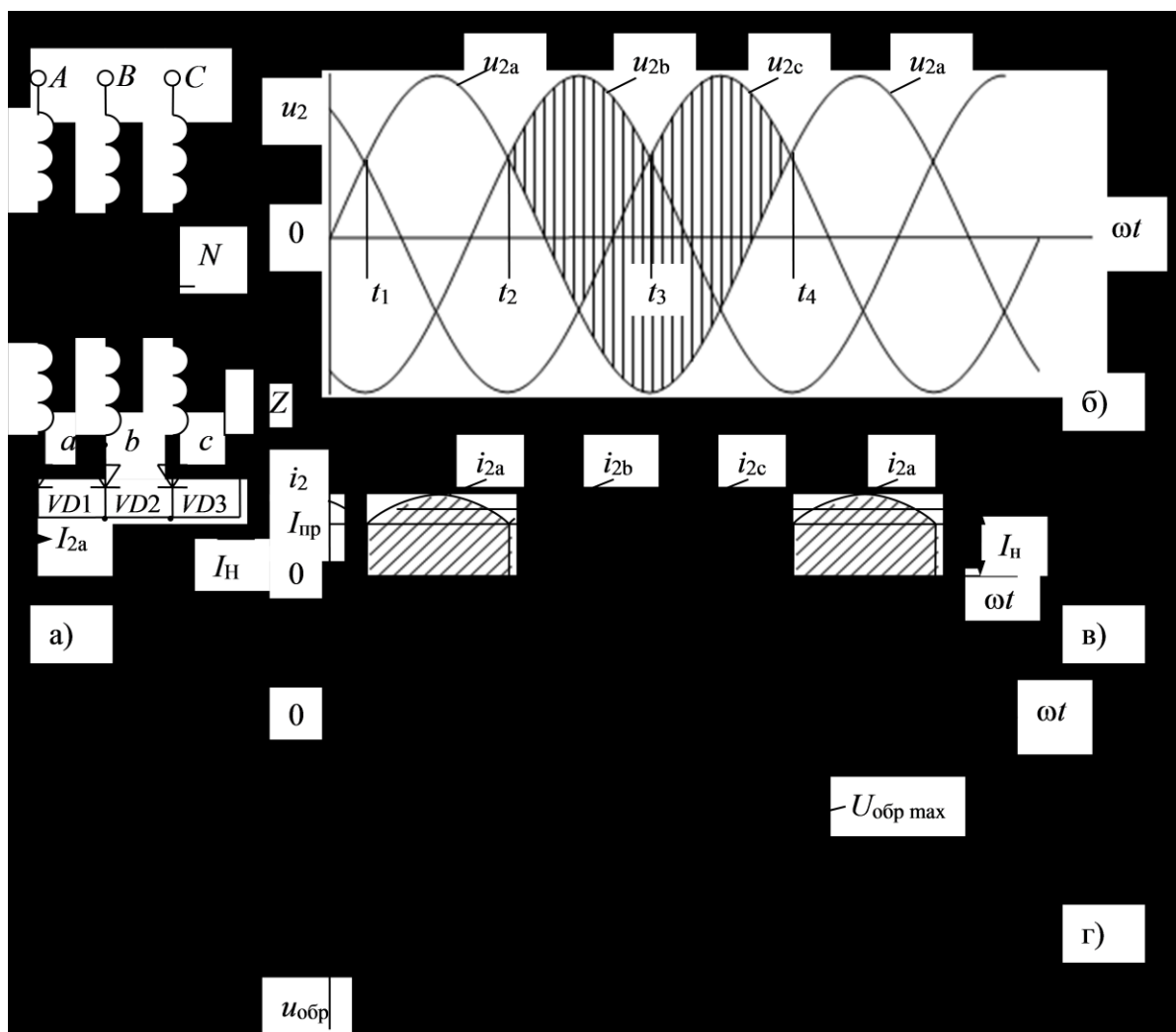


Рисунок 11.1 Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом

$$U_{\text{обр max}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 = 2,09 \cdot U_{\text{н ср}}.$$

Большим недостатком схемы с нулевым выводом является наличие потока вынужденного намагничивания трансформатора как результат протекания во вторичных обмотках токов одного направления. Эти потоки замыкаются через кожух и воздух. Они вызывают нагрев кожуха и увеличивают потери в трансформаторе. Во избежание насыщения и связанного с этим увеличения намагничивающего тока первичной обмотки трансформатора приходится увеличивать сечение сердечника или применять схему соединения обмоток «зигзаг».

Из-за большого спектра гармоник расчетная мощность трансформатора значительно превышает мощность нагрузки,  $S_T = 1,34 P_n$ .

На работу реальных схем выпрямления оказывают существенное влияние индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и характер нагрузки.

Как видно из диаграммы рис. 11.2, б, в момент времени  $t_1$  ток фазы  $a$  не может мгновенно снизиться до нуля, а ток фазы  $b$  не может возрасти скачком до максимума, так как ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния трансформатора, препятствует быстрому изменению тока. Поэтому в течение времени коммутации  $\gamma$  обе смежные фазы работают параллельно. ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния обмоток, складывается с напряжением фазы  $a$  и вычитается из напряжения фазы  $b$ . Результирующие напряжения параллельно работающих фаз уравниваются, а их величина определяется полусуммой фазных напряжений. В этом случае мгновенные значения выпрямленного напряжения (на нагрузке) уменьшаются относительно огибающей трехфазной системы напряжений на величину ординат заштрихованных участков (рис. 11.2, а).

Уменьшение напряжения на нагрузке, вызванное влиянием реактивного сопротивления обмоток трансформатора, увеличивается с ростом тока  $I_H$ , сопротивления  $X_T$  и числа фаз выпрямителя  $m$ :

$$\Delta U_k = \frac{X_T I_H}{2\pi / m}.$$

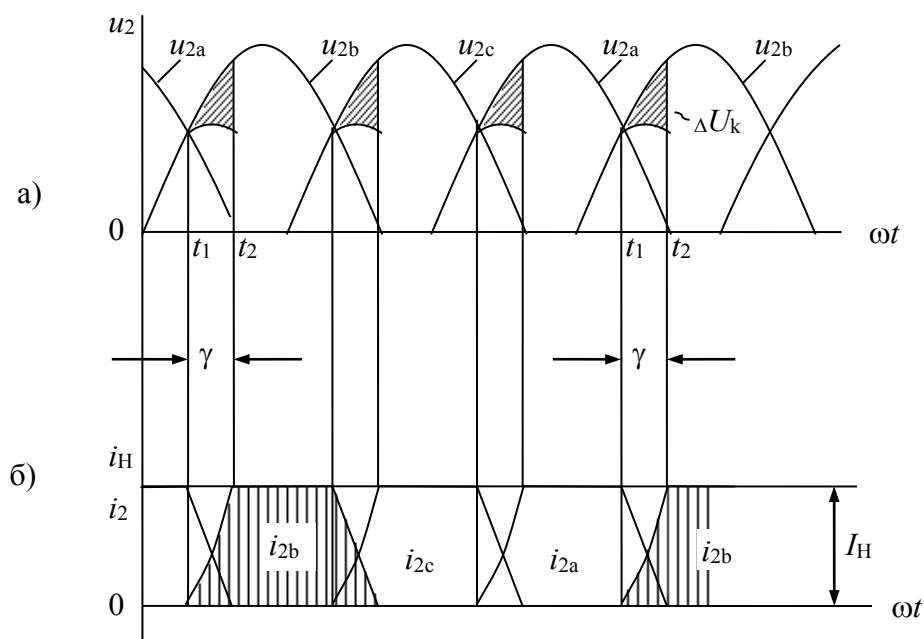


Рисунок 11.2 Влияние индуктивности

При работе выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку, в отличие от активной, значительно сглаживаются пульсации выпрямленного тока  $I_H$ . В пределе при неограниченном увеличении индуктивности нагрузки ( $X_H \rightarrow \infty$ ) ток нагрузки спрямляется, а форма тока в фазах приближается к прямоугольной.

Мостовая схема выпрямления трехфазного тока. Мостовая схема выпрямления трехфазного тока (схема Ларионова) имеет две группы вентилей, катодную ( $VD1, VD3, VD5$ ) и анодную ( $VD2, VD4, VD6$ ). Общая точка катодной

группы вентиля является положительным полюсом, анодной группы - отрицательным полюсом. В отличие от предыдущей, мостовая схема является двухполупериодной.

В любой момент времени в этой схеме работают два вентиля: один - из катодной, другой - из анодной группы. В идеальной схеме, работающей на активную нагрузку (рис. 11.3, а), открытие вентиля катодной группы происходит в момент пересечения, соответствующих положительных и отрицательных участков синусоид фазных ЭДС. Последовательность работы отдельных вентилях в течение периода переменного напряжения можно проследить по диаграммам фазных ЭДС (рис. 11.3, б). Так, на участке  $t_1 - t_2$  работает вентиль  $VD1$  из катодной и  $VD4$  из анодной группы.

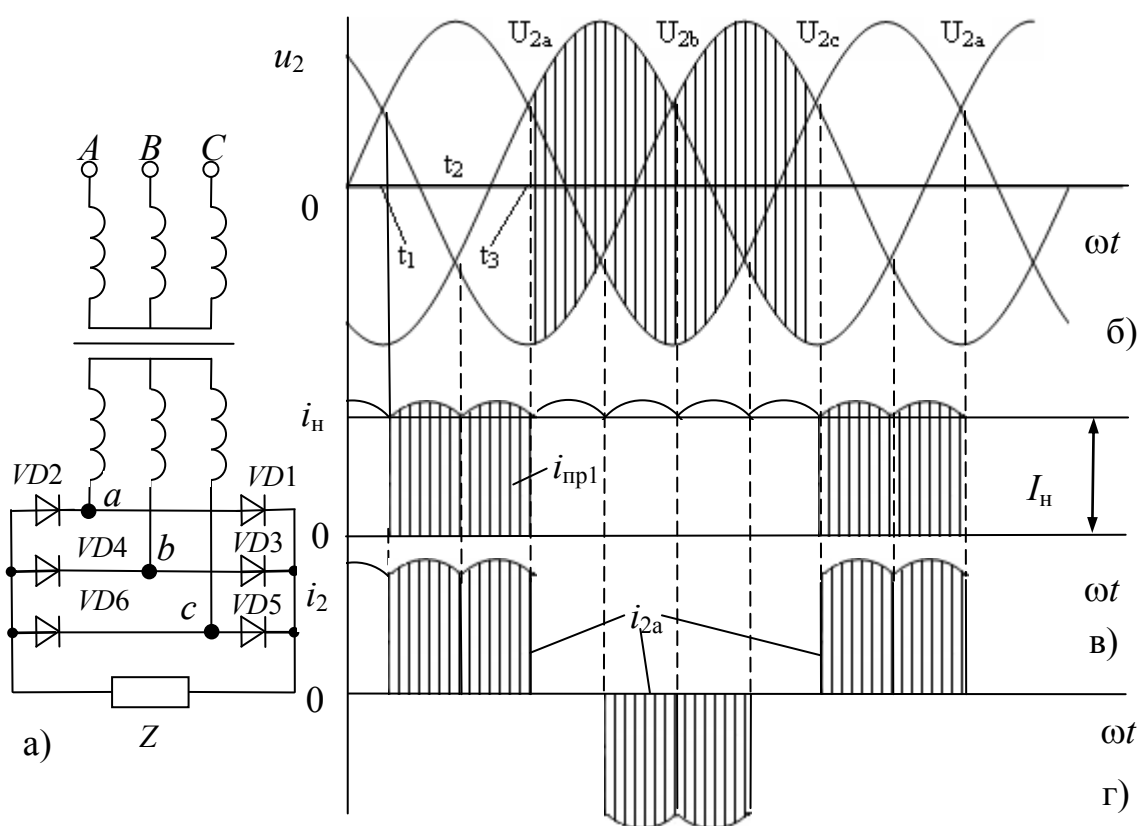


Рисунок 11.3 Трехфазный мостовой выпрямитель

С момента  $t_2$  вместо вентиля  $VD4$  вступает в работу вентиль  $VD6$ , в то время как  $VD1$  продолжает работать еще в течение одной шестой периода, т.е. от  $t_2$  до  $t_3$ . Затем, на смену  $VD1$  приходит вентиль  $VD3$  и т.д. Таким образом, каждый вентиль работает одну треть периода,  $I_a = I_H/3$ .

Форма тока вентиля показана на рис. 11.3, в, г. Форма тока в нагрузке  $I_H$  изображена на рис. 11.3, в. Ток  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора протекает дважды за период в противоположных направлениях (рис. 11.3, г).

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (рис. 11.3, в) составляет  $q = 0,057$ , а частота пульсаций - 300 Гц, т.е. в два раза выше, чем в однополупериодной схеме. Поэтому мостовая схема выпрямления трехфазного тока эквивалентна шестифазной схеме выпрямления с нулевым выводом.

Среднее значение выпрямленного напряжения в мостовой схеме ( $m = 6$ ) на холостом ходу

$$U_{н\text{ ср}} = 2,34 \cdot U_2.$$

Обратное напряжение на неработающих вентилях в каждый момент времени определяется геометрической разностью фазных ЭДС, а его максимум равен амплитуде линейного напряжения,

$$U_{обр\text{ max}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 = 1,045 \cdot U_{н\text{ ср}}.$$

Мостовая схема выгодно отличается от схемы с нулевым выводом благодаря хорошему использованию трансформатора ( $S_T = 1,045 \cdot P_H$ ), малому значению максимального обратного напряжения на вентилях  $U_{обр\text{ max}} = 1,045 \cdot U_{н\text{ ср}}$  и небольшой пульсации выпрямленного напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителя. Внешняя (нагрузочная) характеристика  $U_{н\text{ ср}} = f(I_H)$  является основной электрической характеристикой выпрямителя.

При небольшой мощности выпрямителя коммутационные процессы, вызванные индуктивным сопротивлением рассеяния трансформатора, можно не учитывать. Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_{н\text{ ср}} = U_{н\text{ ср}}^{XX} - (R_T + R_{пр} + R_{\phi}) I_H = U_{н\text{ ср}}^{XX} - R_{вых} I_H,$$

где  $U_{н\text{ ср}}^{XX}$  – выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

$R_T$  – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

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

$R_{\phi}$  – суммарное сопротивление фильтра.

### Предварительное задание к эксперименту

Для указанного в таблице 11.1 типа выпрямителя по заданным току  $I_H$  и сопротивлению  $R_H$  нагрузки рассчитать напряжения  $U_{н\text{ ср}}$ ,  $U_2$ , коэффициент трансформации  $n$ , амплитуду обратного напряжения  $U_{обр\text{ max}}$  и прямой ток  $I_{пр}$  вентиляей. Напряжение питающей сети  $U_1 = 220$  В, частота  $f = 50$  Гц.

ТАБЛИЦА 11.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис. 11.1	Рис. 11.3	Рис. 11.1	Рис. 11.3	Рис. 11.1	Рис. 11.3	Рис. 11.1	Рис. 11.3
$R_H$ , Ом	20	25	30	20	25	32	40	35
$I_H$ , А	0,6	1,2	1,1	0,5	0,8	1,7	0,8	1,0



Повернуть рукоятку ступенчатого переключателя нагрузки  $R_H$  в крайнее левое положение (холостой ход). Включить рубильник на щите и автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

3. Снять внешние (нагрузочные) характеристики выпрямителя при активной (ключ  $K$  замкнут) и активно-индуктивной нагрузке (ключ  $K$  разомкнут) (рис. 11.4). Показания измерительных приборов ( $PV2, PA3$ ) записать в табл. 11.2.

ТАБЛИЦА 11.2

Схемы выпрямления							
Схема с нулевым выводом				Мостовая схема			
Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка		Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка	
$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$
0		0		0		0	
...	...	...	...	...	...	...	...

4. Записать показания измерительных приборов и проверить в схеме энергетические соотношения между напряжениями  $\frac{U_2}{U_H}$  и токами  $\frac{I_2}{I_H}$ . Данные эксперимента сравнить с теоретическими значениями. Соотношения для напряжений определить при холостом ходе ( $I_H = 0$ ), а соотношения для токов – при максимальном значении выпрямленного тока в активной и активно-индуктивной нагрузках.

Все расчетные соотношения записать в сводную табл. 11. 3.

ТАБЛИЦА 11.3

Схемы выпрямления	Характер нагрузки	$I_2, A$	$I_H, A$	$U_2, B$	$U_{H\text{ ср}}, B$	Соотношения				$\lambda$
						Расчетные		Теоретические		
						$\frac{I_2}{I_H}$	$\frac{U_2}{U_{H\text{ ср}}}$	$\frac{I_2}{I_H}$	$\frac{U_2}{U_{H\text{ ср}}}$	
Схема с нулевым выводом	Активная нагрузка $L_H = 0$							0,587	0,855	–
	Активно-индуктивная нагрузка $L_H = \infty$							0,577	0,855	–
Мостовая схема	Активная нагрузка $L_H = 0$							0,815	0,427	
	Активно-индуктивная нагрузка $L_H = \infty$							0,815	0,427	

5. Установив переключатель "Ослабление" (на передней панели осциллографа) в положение "1:100", зарисовать формы кривых обратного напряжения на диодах, напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке при максимальном токе в ней. Все осциллограммы снимать при неизменном положении ручек потенциометров на передней панели осциллографа.

6. Переведя переключатель "Ослабление" в положение "1:1" и установив шунты, зарисовать форму кривых токов  $i_n, i_2, i_1$  при максимальном значении тока в активной и активно-индуктивной нагрузке. Сигнал на вход осциллографа снимается с шунтов  $R_{ш1}, R_{ш2}, R_{ш3}$ , встроенных в штепсельные вилки (рис. 11.4).

После окончания опытов привести схему в исходное положение.

7. Собрать мостовую схему (рис. 11.3, а). В соответствии с рис. 11.4 на стенде установить электрические связи между контактными гнездами X10-X11-X12-X15, соединив их в одну точку специальным проводом - разветвителем на 4 входа.

Подключить согласно рис. 11.4 к контактным гнездам X3, X16 осциллограф, подключить вольтметр PV1 (установить электрические связи между контактными гнездами X1-X5, X2-X7), подключить вольтметр PV2 (установить электрические связи между контактными гнездами X3-X4).

Установить переключатель нагрузки  $R_n$  в положение «холостой ход». Автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

8. Снять внешние характеристики выпрямителя при активной и активно-индуктивной нагрузке. Показания приборов записать в таблицу 11.2.

9. Определить в схеме соотношения напряжений  $\frac{U_2}{U_{н\text{ ср}}}$  и токов  $\frac{I_2}{I_n}$  и сравнить их с теоретическими значениями.

10. Определить при максимальном значении тока нагрузки коэффициент мощности выпрямителя  $\lambda = \frac{P}{3U_1 I_1}$ ,

где  $P$  - показания ваттметра, Вт;

$U_1$  - фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, В;

$I_1$  - ток фазы первичной обмотки трансформатора, А.

Результаты расчетов пунктов 10 и 11 записать в сводную табл. 11. 3.

11. По аналогии с пунктами 5 и 6 зарисовать форму кривых  $u_{\text{обр max}}, u_n, i_n, i_2, i_1$ .

12. После выполнения исследований мостовой схемы привести ее в исходное состояние.

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

Цель работы. Рабочие схемы выпрямления. Таблицы измерений и вычислений, осциллограммы. Внешние характеристики  $U_{н\text{ср}} = f(I_{н})$  для обеих схем.

### Контрольные вопросы

1. Принцип работы трехфазной схемы выпрямления с выводом нулевой точки.
2. Принцип работы мостовой схемы выпрямления.
3. Как происходит коммутация тока в вентилях исследуемых реальных схем?
4. Чем объясняется плохое использование трансформатора по нагрузке в нулевой схеме?
5. Поясните вид кривых токов и напряжений  $i_2, i_{н}, u_2, u_{н}$  в обеих схемах.
6. Перечислите достоинства мостовой схемы.



## Лабораторная работа №12 УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Цель работы: изучить работу однофазного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку; исследовать работу инвертора, ведомого сетью; снять основные характеристики управляемого выпрямителя и инвертора.

### Общие сведения

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.

### Управляемый выпрямитель

Рассмотрим работу однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку (рис. 12.1, 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. 12.1, б). В первый полупериод, когда на аноде тиристора  $V_{S1}$  появляется положительный потенциал по отношению к катоду, в верхнем контуре протекает ток от полуобмотки

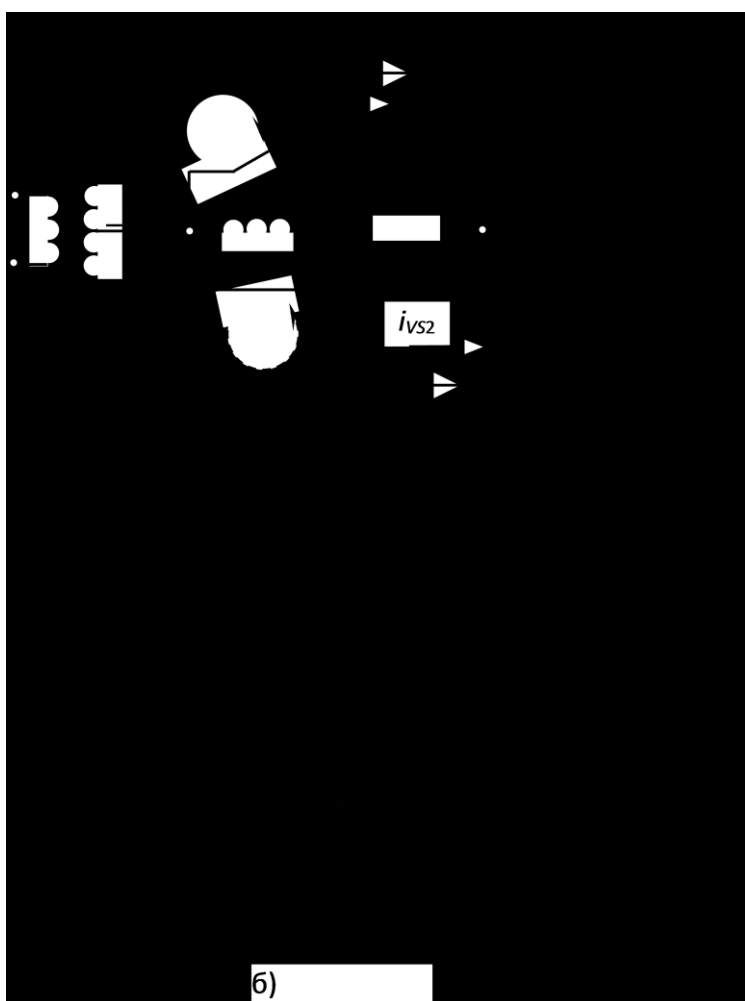


Рисунок 12.1 Однофазный управляемый выпрямитель (а), временные диаграммы (б)

трансформатора через открытый тиристор в нагрузку (направление тока выделено жирной стрелкой при полярности напряжения, указанной на рис. 12.1, а). В этом интервале времени тиристор  $VS2$  закрыт отрицательным анодным напряжением.

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. 12.1, б).

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

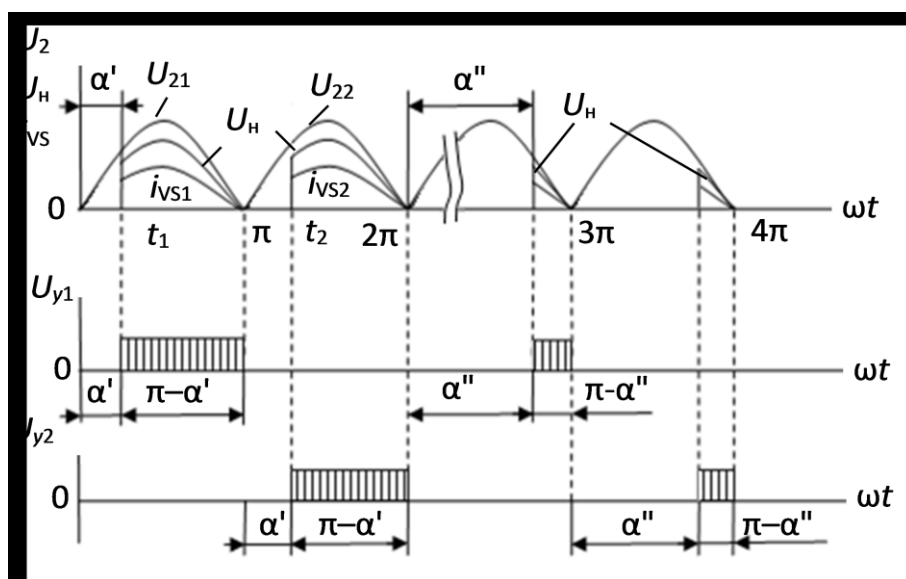


Рисунок 12.2 Регулирование тока в нагрузке

Форма этого тока повторяет огибающую положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора (рис. 12.1, 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. 12.2). Соответствующие этому сдвигу по фазе углы запаздывания в электрических градусах называются углами регулирования и обозначаются буквами  $\alpha', \alpha''$  и т.д.

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. 12.2) 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. 12.2). 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.

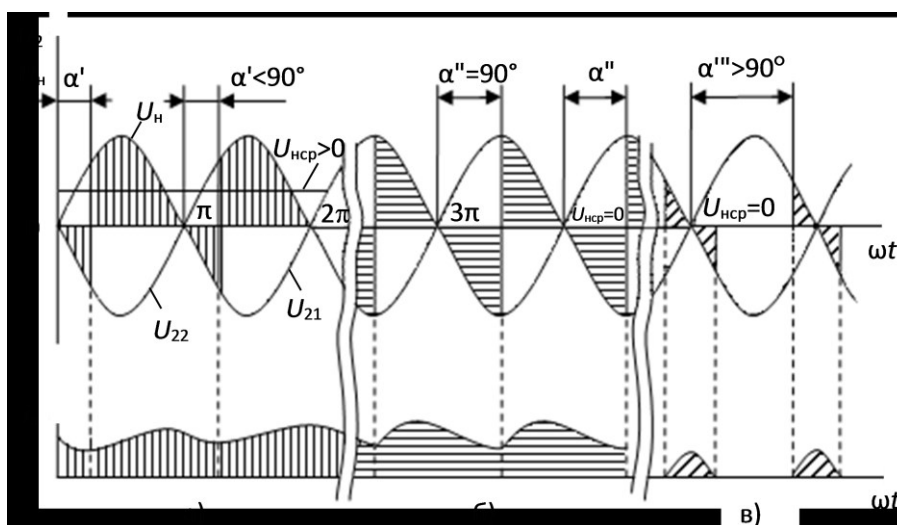


Рисунок 12.3 Временные диаграммы при индуктивной нагрузке

При работе на активно-индуктивную нагрузку кривая тока остается непрерывной (рис. 12.3, 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. 12.3). 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. 12.3, б). При этом среднее значение выпрямленного напряжения равно нулю.

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

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

### Инвертор

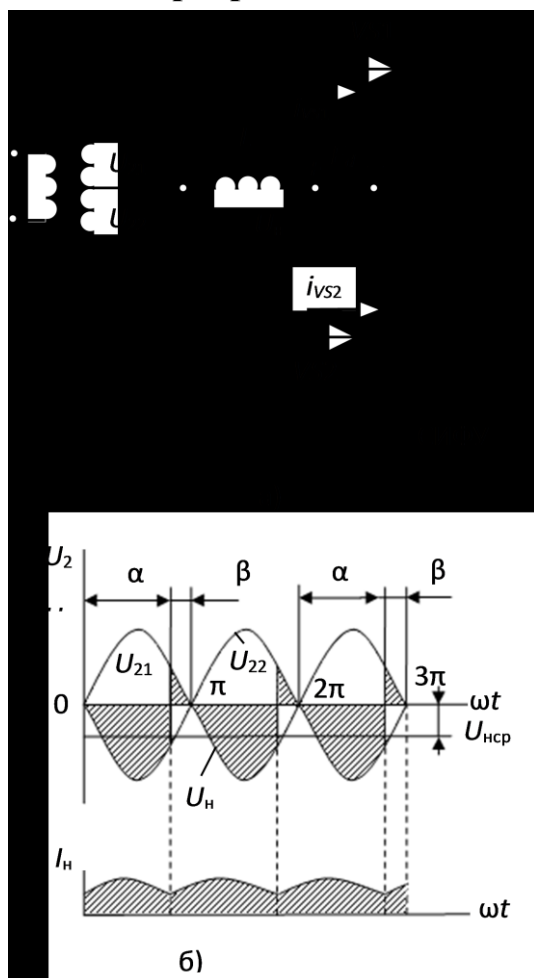


Рисунок 12.4 Инвертор (а), временные диаграммы (б)

Инвертированием 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 вентилей. 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.

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. 12.4, а).

Переход преобразователя от выпрямительного к инверторному режиму показывают временные диаграммы напряжения и тока (сравните рисунки 12.3 и 12.4).

При углах регулирования  $\alpha < 90^\circ$  преобразователь отдает непрерывный ток в активно-индуктивную нагрузку (рис. 12.3, а), и напряжение на ее зажимах положительно ( $U_n > 0$ ).

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. 12.3, 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. 12.3, в).

Если же при  $\alpha > 90^\circ$  источник постоянного тока с полярностью, указанной на рис. 12.4, а обеспечивает непрерывный ток, то преобразователь переходит в инверторный режим с изменением знака напряжения

$$U_n = U_{но} \cos \alpha = U_{но} \cos(\pi - \beta) = - U_{но} \cos \beta .$$

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. 12.4, 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

вводить запас по углу  $\beta_{\min} \approx 10 \dots 15^\circ$ , с тем, чтобы завершить процесс коммутации переключаемых фаз и восстановить управляющие свойства тиристоров до момента их естественного открывания.

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

### Предварительное задание к эксперименту

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  $U_2 = 127 \text{ В}$ .

2. Для значений  $\alpha$ , приведенных в таблице 12.1, рассчитать внешнюю характеристику  $U_n = f(I_n)$ , приняв  $x_a = 60 \text{ Ом}$ .

ТАБЛИЦА 12.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$ , град.	20	40	50	70	80	100	120	150

3. Построить совмещенные временные диаграммы  $u_2(\omega t)$ ,  $u_n(\omega t)$  и  $i_n(\omega t)$  для  $\alpha$ , заданного вариантом таблицы 12.1.

### Порядок выполнения эксперимента

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  $\alpha = 0 \dots 180^\circ$ . Отсчет углов регулирования – по фазоуказателю.

3. Снять регулировочные характеристики управляемого выпрямителя  $U_n = f(\alpha)$  для активной (при закороченном дросселе) и активно-индуктивной нагрузки ( $R_{n \text{ max}}$ ). Результаты эксперимента занести в табл. 12.2 и сопоставить с рассчитанной в предварительном задании характеристикой  $U_n = f(\alpha)$ .

ТАБЛИЦА 12.2

Угол регулирования, $\alpha$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	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 углов 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. 12.1. Результаты эксперимента занести в табл. 12.3 и сопоставить с результатами предварительного расчета.

ТАБЛИЦА 12.3

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. 12.4.

ТАБЛИЦА 12.4

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

$\beta = 60^\circ$ ( $\alpha = 120^\circ$ )	$I_n(\text{mA})$					
	$U_n(\text{V})$					

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

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

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 № 13 ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: изучение структуры, основных характеристик фотодиода и фоторезистора, принципа функционирования простейших устройств на оптронах.

### Общие сведения

Оптоэлектроникой 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 ( $10^{13} \dots 10^{15}$  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

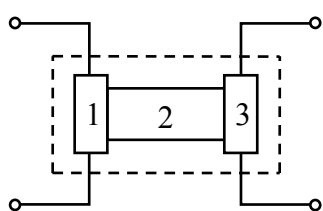


Рисунок 13.1  
Структура оптрона

оптроном. Простейший оптрон можно представить четырехполюсником, состоящим из трех элементов: источник света – 1, световод – 2 и приемник света – 3 (рис. 13.1).

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. 13.2.

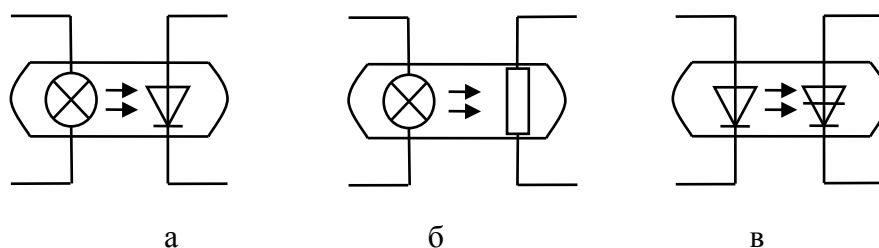


Рисунок 13.2 Оптроны  
(а – диодный, б – резисторный, в – динисторный)

Работа фоторезисторов основана на явлении изменения сопротивления вещества под воздействием внешнего светового излучения. Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электроды. Структура фоторезистора и условное обозначение показаны на рис. 13.3, 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. 13.4). Ток при  $\Phi = 0$  называется темновым током  $I_T$ , при  $\Phi > 0$  – общим током  $I_{\text{общ}}$ . Их разность равна фототоку  $I_\Phi = I_{\text{общ}} - I_T$ .

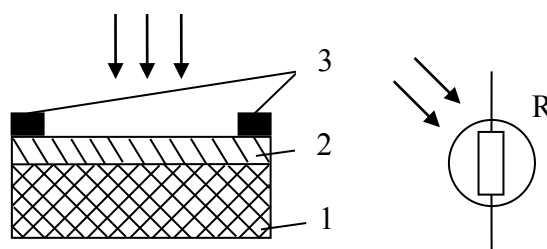


Рисунок 13.3  
Структура фоторезистора

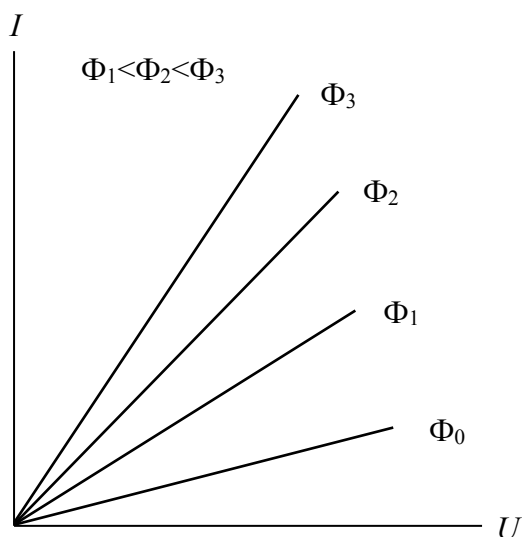
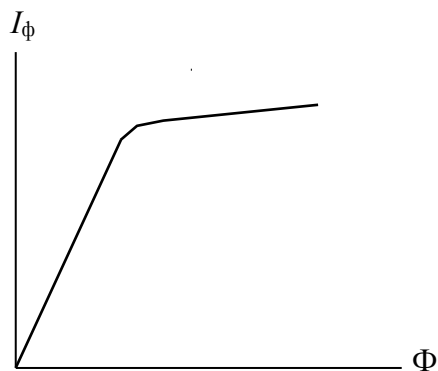


Рисунок 13.4  
ВАХ фоторезистора

Энергетическая характеристика – это зависимость фототока от светового потока, либо освещенности при  $U = \text{const}$ . В области малых  $\Phi$  она линейна, а при увеличении светового потока рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности рекомбинации носителей заряда (рис. 13.5). Энергетическая характеристика иногда называется люксамперной, в том случае, если по оси абсцисс откладывают освещенность  $E$  в люксах.

3. Чувствительность – это отношение выходной величины ко 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  $E$

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

Рисунок 13.5  
Энергетическая характеристика

В качестве одного из основных параметров фоторезистора используют величину удельной

интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1 В:

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

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. 13.6, а, б), где а – условное обозначение фотодиода, б – структура фотодиода. Вследствие оптического возбуждения в  $p$  и  $n$  областях возникает неравновесная концентрация носителей заряда.

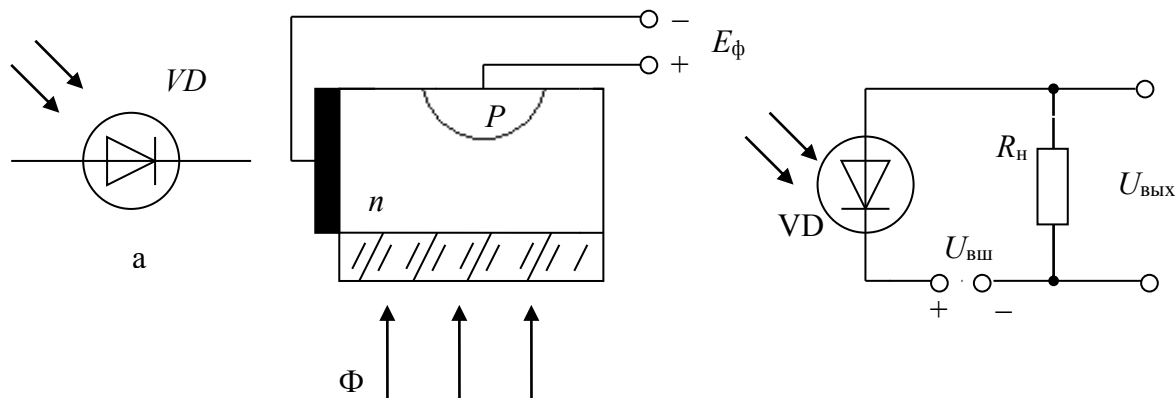


Рисунок 13.6 Фотодиод

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 фотополупроводниковой силой (фото-ЭДС). В данной ситуации фотодиод работает в режиме фотогенератора, преобразуя световую энергию в электрическую.

Фотодиод может работать совместно с внешним источником (рис. 13.6, в). 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. 13.9, б. Фототок суммируется с обратным током теплового происхождения.

К основным характеристикам фотодиода относят:

1. Энергетические характеристики, которые связывают фототок со световым потоком. Причем фотодиод может быть включен без внешнего источника ЭДС (генераторный режим), так и с внешним источником (рис. 13.7).

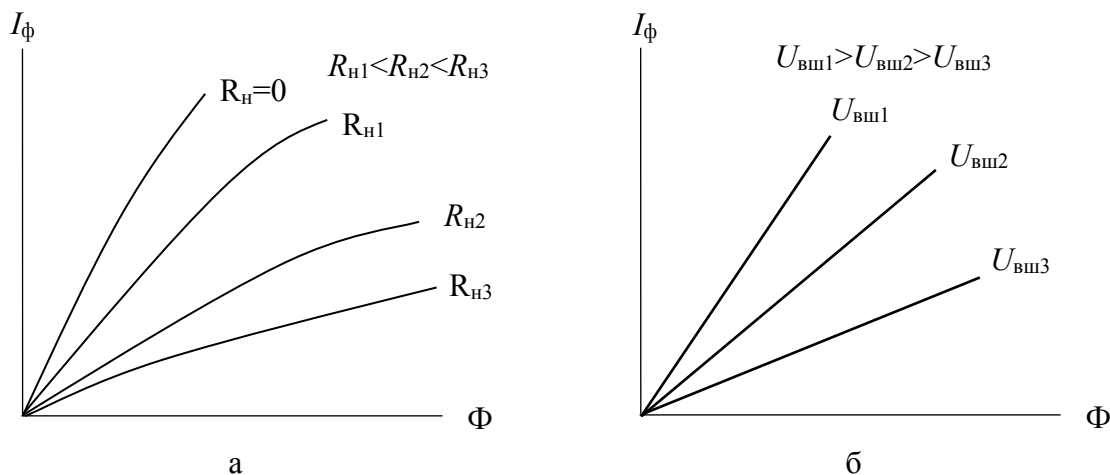


Рисунок 13.7

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. 13.8, а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии света на область базы  $p_1$  в этой области генерируются электроны и дырки.

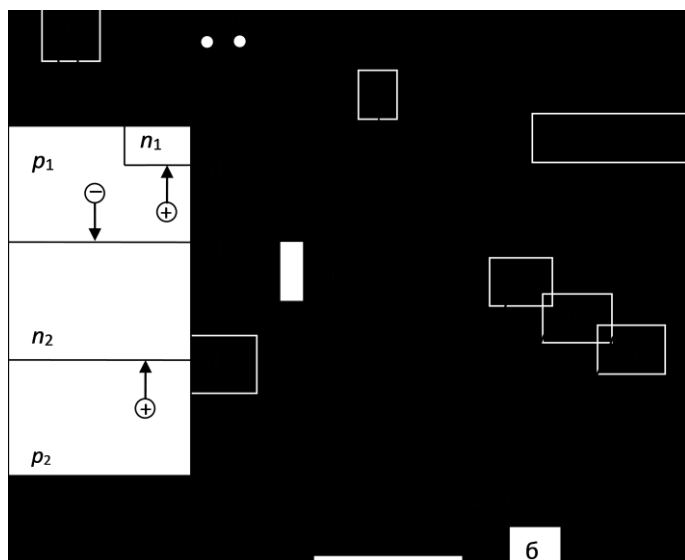


Рисунок 13.8 Фототиристор

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 тиристор (рис. 13.8, 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. 13.9: а – фоторезистора, б – фотодиода), а также данные таблицы 13.1, для заданного вариантом  $U$  найти

значения фототока  $I_{\text{ф}}$ , и по полученным значениям построить энергетическую характеристику фотоэлектронного прибора. Определить величину токовой чувствительности к освещенности  $S_E$  при  $E=200$  лк.

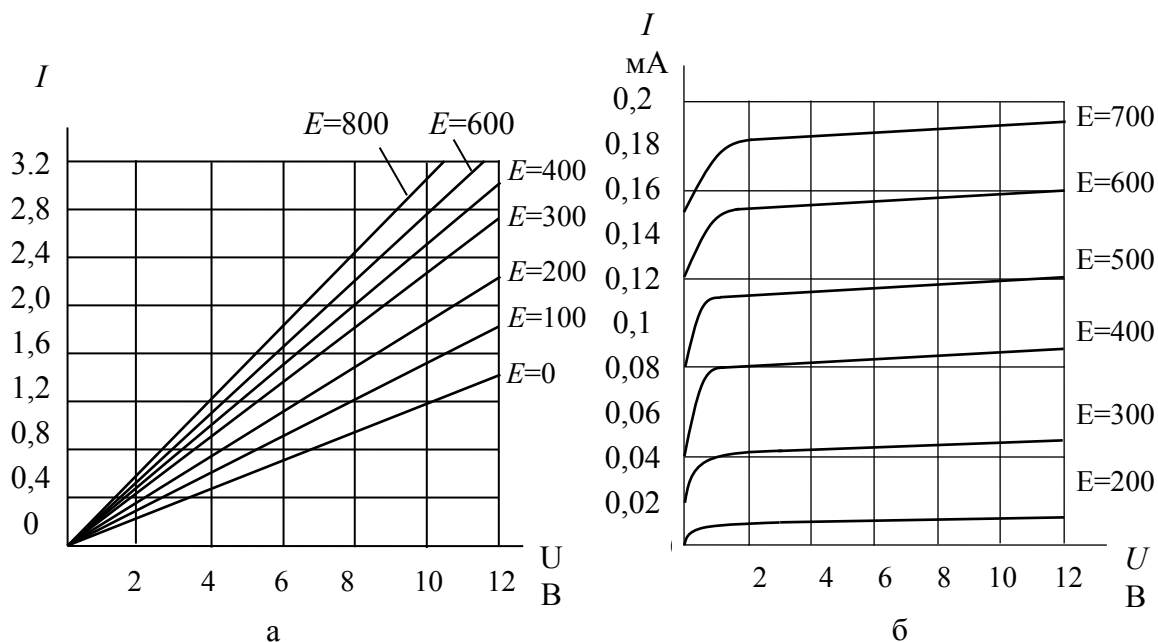


Рисунок 13.9

ТАБЛИЦА 13.1

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

### Порядок выполнения эксперимента

1. 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  $I_{\text{ф}}(U)$  фоторезистора. Для этого ручку переключателя Р3 установить в положение А, а тумблер В1 перевести в верхнее положение. Данные эксперимента занести в таблицу 13.2.

ТАБЛИЦА 13.2

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

2. Вернуть в левое положение ручки регуляторов Р1 и Р2. Установить ручкой регулятора Р1 напряжение на фоторезисторе  $U = 3 \text{ В}$  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 13.3.

ТАБЛИЦА 13.3

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

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 13.4.

ТАБЛИЦА 13.4

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

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 режиме  $R_{\text{н}} = 0$ ), с Г4 ( $R_{\text{н}} = 200 \text{ Ом}$ ), с Г5 ( $R_{\text{н}} = 500 \text{ Ом}$ ). Снять зависимость фототока  $I_{\Phi}$  от освещенности  $E$ . Данные занести в таблицу 13.5.

ТАБЛИЦА 13.5

$E, \text{лк}$		200	400	1000	1200	1500	2000
$I_{\Phi}, \text{мкА}$	$R_{\text{н}}=0$						
	$R_{\text{н}}=200 \text{ Ом}$						
	$R_{\text{н}}=500 \text{ Ом}$						

Перевести тумблер В1 в верхнее положение и снять энергетические характеристики фотодиода для случая, когда напряжение внешнего источника  $U_{\text{вн}}$  отлично от нуля. Полученные значения занести в таблицу 13.6.

ТАБЛИЦА 13.6

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

6. 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.

### **Содержание отчета**

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

### **Контрольные вопросы**

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 *p-n*-перехода.
7. Перечислите основные параметры фотодиода.



## Лабораторная работа № 14 ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Цель работы: изучить принцип действия регистров и АЛУ; освоить методику вычислений и простейшие математические операции.

### Общие сведения

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

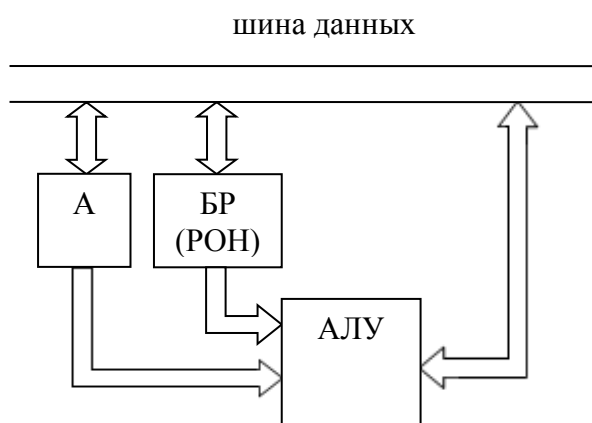


Рисунок 14.1  
Структура АЛУ

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. 14.1).

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. 14.2) 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

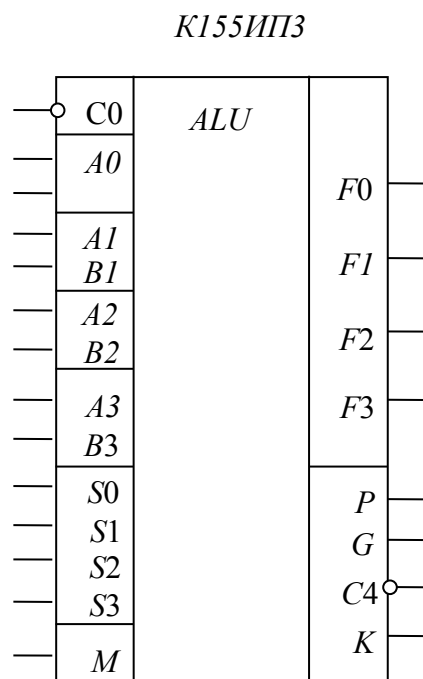


Рисунок 14.2  
АЛУ четырехразрядное

над четырехразрядными числами в двоичных кодах, причем одно из чисел подается на 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. 14.1.

ТАБЛИЦА 14.1

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

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  $\bar{C}_0$ . При этом формируется признак переноса четвертого разряда  $\bar{C}_4$ . 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  $\overline{CO}$  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.

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

Микросхема К155ИР13 (рис. 14.3) представляет собой восьмиразрядный

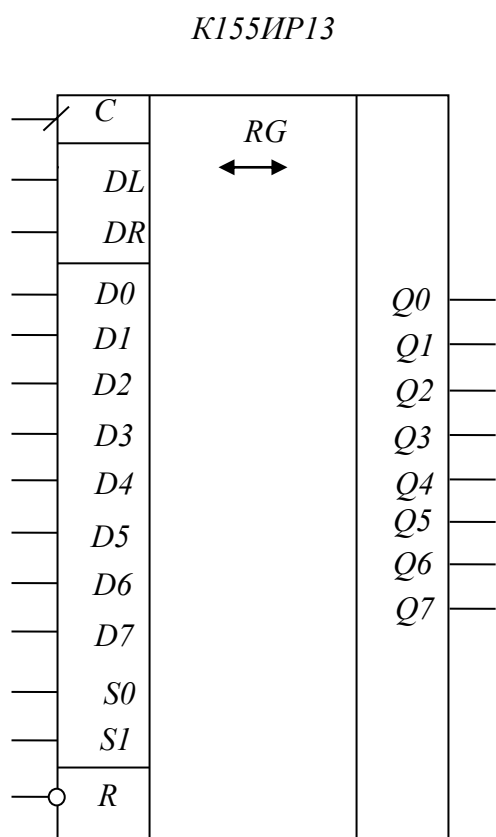


Рисунок 14.3  
Реверсивный регистр

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  $\overline{R}$ , а также восемь выходов  $Q7...Q0$ .

В зависимости от состояний установочного входа и управляющих входов  $S0$  и  $S1$  схема может работать в различных режимах (табл. 14.2).

Как видно из табл. 14.2, 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

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

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.

*K155ПП1*

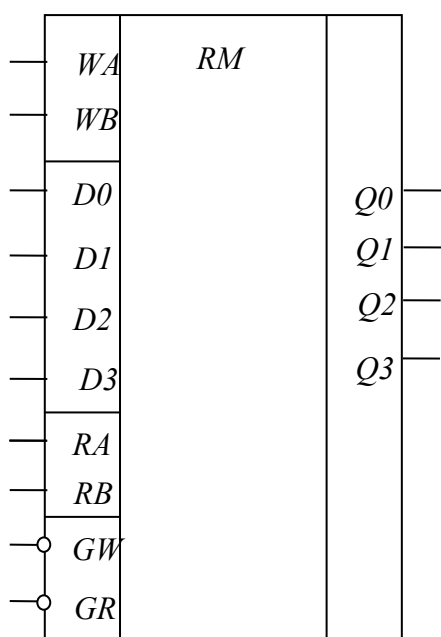


Рисунок 14.4  
Регистр памяти

Микросхема  $K155PP1$  (рис. 14.4), 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  $4 \times 4$  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 считывания  $RB$ ,  $RA$  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. 14.1) над данными в табл. 14.3 числами, переведя их в двоичный код.

ТАБЛИЦА 14.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>A</i>	9	10	11	12	11	14	5	6
<i>B</i>	6	5	4	3	2	1	11	10
<i>C</i> <sub>0</sub>	0	0	1	1	0	0	1	1

### Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться со схемотехникой 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 К155ИР13 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. 17.2 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  $\overline{GR}=0$ , прочитайте их с помощью светодиодных индикаторов. Отметить эти результаты в таблице истинности.

4. При исследовании АЛУ К155ИП3 выполнить все операции табл. 17.1 согласно предварительному заданию. При этом на информационные входы *A*<sub>3...A0</sub> и *B*<sub>3...B0</sub> 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.

### Содержание отчета

Цель работы; условное изображение исследуемых микросхем (рис. 14.2-14.4); рассчитанная в предварительном задании табл. 14.1 с результатами операций по п.4; таблица истинности по п.3; структурная схема соединений по п.6 и п.7.

### Контрольные вопросы

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 выводы 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  $A = \text{const}$ , а  $B = \text{var}$ . 10. Выделите на принципиальных электрических схемах АЛУ и регистров шины данных, адреса и управления. Дайте необходимые пояснения.

## Лабораторная работа №15

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

Цель работы: 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.

#### Общие сведения

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 изготавливаемых промышленностью преобразователей по быстродействию, точности и надежности выделяются параллельный ЦАП и АЦП поразрядного уравнивания.

Основным элементом параллельного ЦАП с матрицей на резисторах 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. 18.1).



Рис 15.1. Параллельный ЦАП с управляемой резистивной матрицей

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  $I_1 = U_{\text{ОП}} / (R \cdot 2^{n-1})$ , а суммарный ток усилителя равен сумме всех токов, протекающих от источника  $U_{\text{ОП}}$  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

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

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

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

С позиций оптимального сочетания быстродействия, точности и надежности для построения АЦП может быть использован метод поразрядного уравнивания. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием представлена на рис. 15.2.

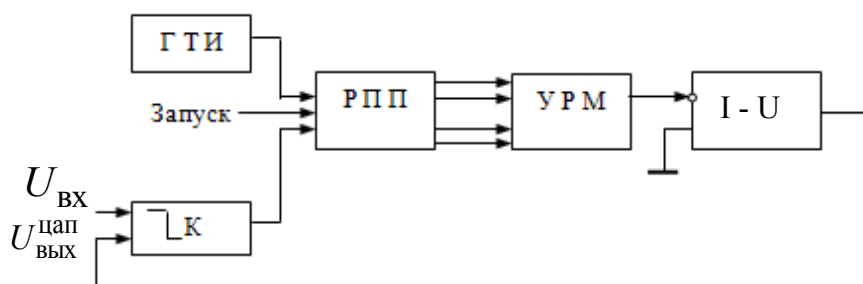


Рисунок 15.2. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием

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  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ . Входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  сравнивается с испытательным напряжением



$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  компаратором К, 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 приблизительное равенство двух сравниваемых напряжений  $U_{\text{ВХ}} \approx U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ .

Рассмотрим численный пример (см. табл. 15.1).

ТАБЛИЦА 15.1

№ такта	№ разряда	$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}, \text{ мВ}$	$a_i$
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

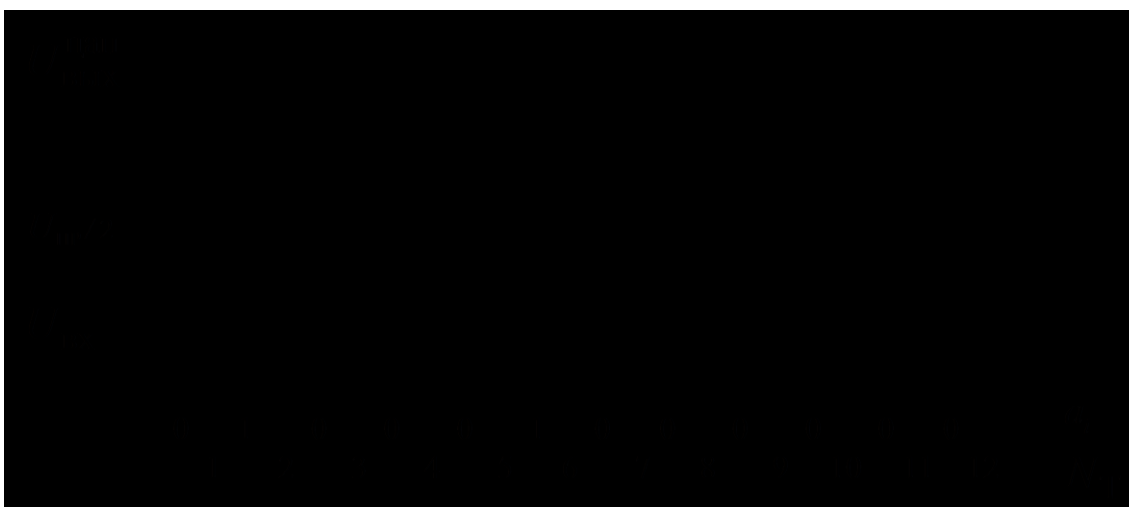


Рисунок 15.3

Пусть.  $U_{ВХ} = 2720$  мВ. Так как уровень напряжения старшего разряда равен  $U_{\text{пр}}/2 = 10240/2 = 5120$  мВ, то значение  $a_i = a_{12}$  старшего  $n$ -го разряда, зарегистрированное компаратором, будет равно «0» ( $U_{ВХ} = 2720 < U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} = 5120$  мВ). Поэтому для первого такта уравнивания будет получено значение  $a_i = a_{12} = 0$ . Уровень  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  следующего  $n-1$  разряда будет в два раза меньше старшего  $n$ -го разряда, и компаратор регистрирует значение  $a_{11} = 1$  ( $U_{ВХ} = 2720 > U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} = 2560$  мВ). На третьем такте уравнивания  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} = 2560 + 2560/2 = 3840$  мВ, и будет зарегистрировано значение  $a_{01} = 0$ ; и т. д. до 12-го последнего такта уравнивания. Значения  $a_i$  для всех 12-ти тактов (разрядов) приведены в табл. 15.1. На рис. 15.3 представлена зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  и  $a_i$  в функции от тактов уравнивания  $N_T$ . АЦП поразрядного уравнивания исследуется в настоящей работе. Схема установки представлена на рис. 15.4.

АЦП содержит: БИС DA1 типа КР572ПВ1А в специальном включении, 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 режима 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  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  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.*

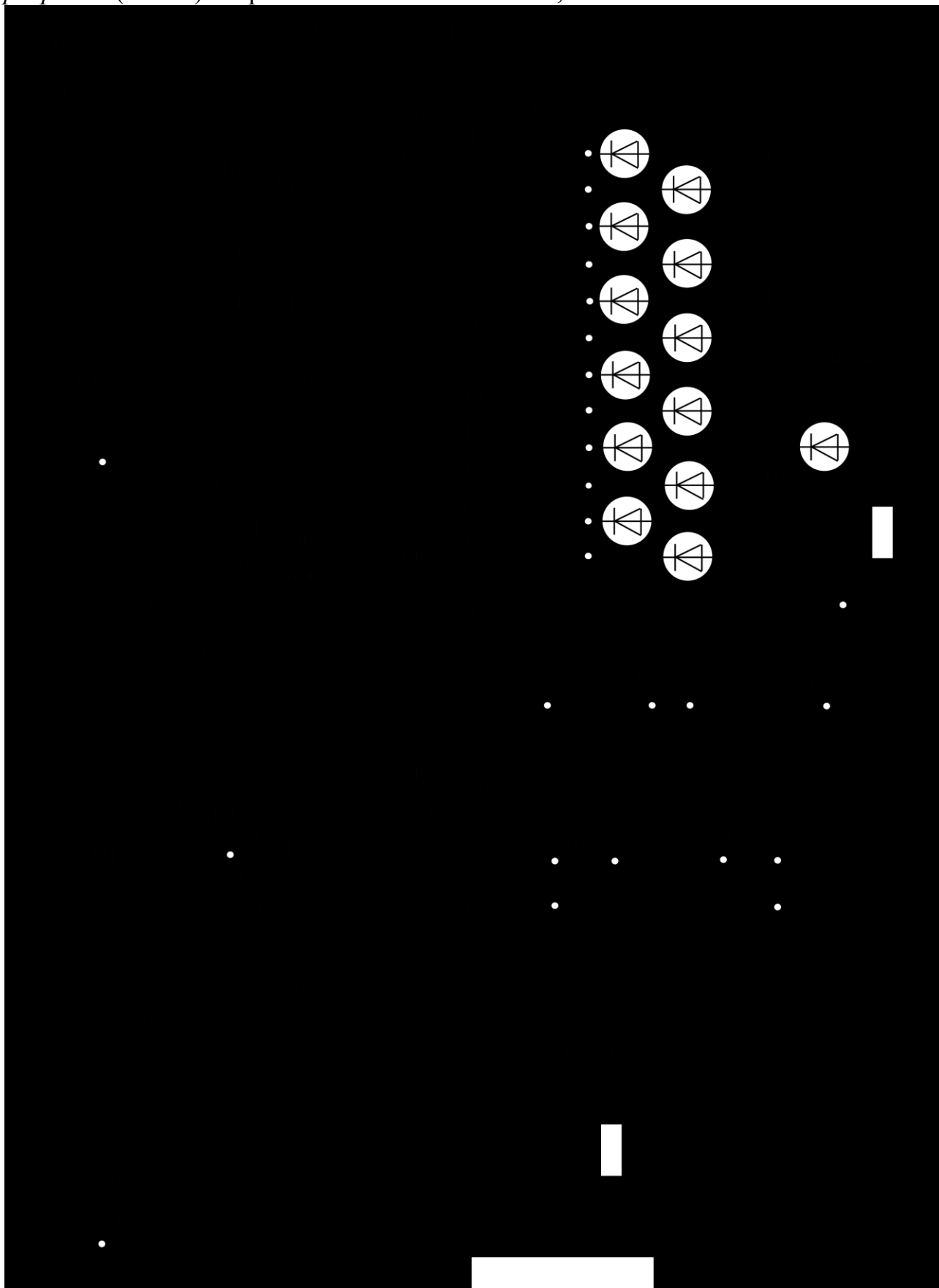


Рисунок 15.3 Схема установки

В однократном, *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 на микросхеме  $DA2$  «ток – напряжение» ( $I-U$ ), преобразуется в напряжение и поступает на вход компаратора  $DA3$ . В компараторе это напряжение ( $U_{\text{ЦАП}}^{\text{ВЫХ}}$ ) сравнивается с входным  $U_{\text{ВХ}}$ . 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  $\gamma \cong 1/2^n$ .

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

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

При экспериментальном исследовании погрешность АЦП определяется из выражения:

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

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

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

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:

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

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

1. Изучить метод поразрядного уравнивания.

2. 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  $U_{\text{ВХ}} \geq U_{\text{пр}} = 10,24$  В для двух значений разрядов преобразования  $n_1$  и  $n_2$ , указанных в табл. 15.2. Результаты расчетов свести в таблицу 15.3.

3. Определить для заданных в табл. 15.2 двух значений разрядов основную приведенную методическую погрешность измерения  $\gamma$ .

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

ТАБЛИЦА 15.2

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

ТАБЛИЦА 15.3

$U_{\text{ВХ}} = 0$				$U_{\text{ВХ}} \geq 10,24$ В							
№ такта	№ разр.	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$		$a_i$		№ такта	№ разр.	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$		$a_i$	
1	12					1	12				
2	11					2	11				
...	...					...	...				
...	...					...	...				
12	1					12	1				

### Порядок выполнения эксперимента

1. Подключить к клеммам стенда  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  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 положение “Вкл.”.

2. После 5 минутного прогрева установить потенциометр  $R1$  в крайнее левое положение ( $U_{ВХ} = 0$ ) и при  $n = 12$  (переключатель  $SA4$  – 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.

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

4. 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  $U_{ВХ} = 0$  и  $U_{ВХ} \geq 10,24 В$ , двух заданных значений разрядов и при длительности такта ГТИ 2 мс ( $SA3$  в положении 2 мс) зарисовать осциллограммы  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни  $U_{ВХ} = 0$  и  $U_{ВХ} \geq 10,24 В$ . Сравнить полученные осциллограммы с расчетными для  $U_{ВХ} = 0$  и  $U_{ВХ} \geq 10,24 В$  и с осциллограммами п. 3.

5. 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  $U_{ВХ} = 0$ ,  $U_{ВХ} \geq 10,24 В$ , а также при трех промежуточных значениях  $U_{ВХ}$ , находящихся, соответственно, в пределах: (0 ... 3) В; (3 ... 7) В; (7 ... 10,24) В. Проследить на осциллографе за изменениями уровня  $U_{ВЫХ}^{ЦАП} = U_{ВЫХ}$  в процессе уравнивания всех значений  $U_{ВХ}$ , записав при этом в табл.8.4 значения  $U_{ВХ.э}$ , код при разрядности  $n_1$ , код при разрядности  $n_2$  и  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  после уравнивания, зарегистрированные цифровым вольтметром.

ТАБЛИЦА 18.4

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							
$U_1$							
$U_2$							
$U_3$							

6. 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  $\gamma_{нАЦП}$  преобразования  $U_{ВХ.Э}$  в код и погрешность  $\gamma_{нЦАП}$  преобразования кода напряжений  $U_{ВХ.Э}$  в аналог ЦАП. Результаты расчетов внести в табл. 15.4. Как изменяются погрешности  $\gamma_{нАЦП}$  и  $\gamma_{нЦАП}$  с изменением значений  $U_{ВХ.Э}$  и разрядности преобразования  $n$ ?

### Содержание отчета

Цель работы; схема лабораторной установки (рис. 15.4); 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.

### Контрольные вопросы

1. 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?



## Лабораторная работа № 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ

Цель работы: Изучение работы некоторых электронных элементов и узлов, конструирование на их основе устройств автоматики.

#### Общие сведения

В лабораторной работе рассматриваются следующие электронные элементы и узлы.

$\overline{R}\overline{S}$  - т р и г г е р на двух логических элементах 2И-НЕ (рис 19.1). Триггер имеет входы  $\overline{S}$ ,  $\overline{R}$  и выходы  $Q$  (прямой) и  $\overline{Q}$  (инверсный), напряжение которых может иметь два уровня: низкий  $U^0 = 0.1...0.4$  В (логический ноль) или высокий  $U^1 = 2.5...5$  В (логическая 1).

Входы  $\overline{S}$  и  $\overline{R}$  обозначаются как инверсные в связи с тем, что для данного триггера управляющими являются сигналы низкого (нулевого) уровня.

При неизменных входных сигналах триггер находится в одном из двух устойчивых состояний:  $Q = 1$  или  $Q = 0$ . Перевод триггера из одного состояния в другое производится подачей на входы  $\overline{S}$  или  $\overline{R}$  кратковременного нулевого сигнала: при  $\overline{S} = 0$  триггер устанавливается в состояние  $Q = 1$ , при  $\overline{R} = 0$  – переходит в состояние  $Q = 0$ . Комбинация  $\overline{S} = 0$  и  $\overline{R} = 0$  несущая противоречивые команды – «установить 1» и «установить 0» - является запрещенной (неопределенной). Триггер - это простейший элемент памяти, так как сохраняет информацию о последней из входных команд.

М у л ь т и в и б р а т о р на двух логических элементах (ЛЭ) 2И-НЕ (рис. 16.2) предназначен для выработки прямоугольных импульсов на выходе  $Q_2$  при сигнале на входе  $X_1 = 1$ . Если  $X_1 = 0$ , то  $Q_1 = 1$ ,  $Q_2 = 0$ , конденсатор  $C$

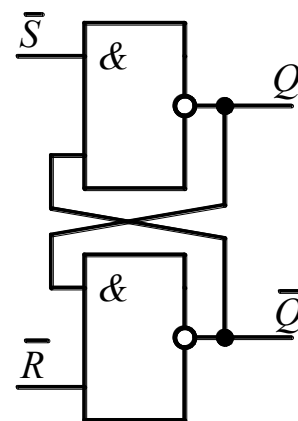


Рисунок 16.1  
RS - триггер

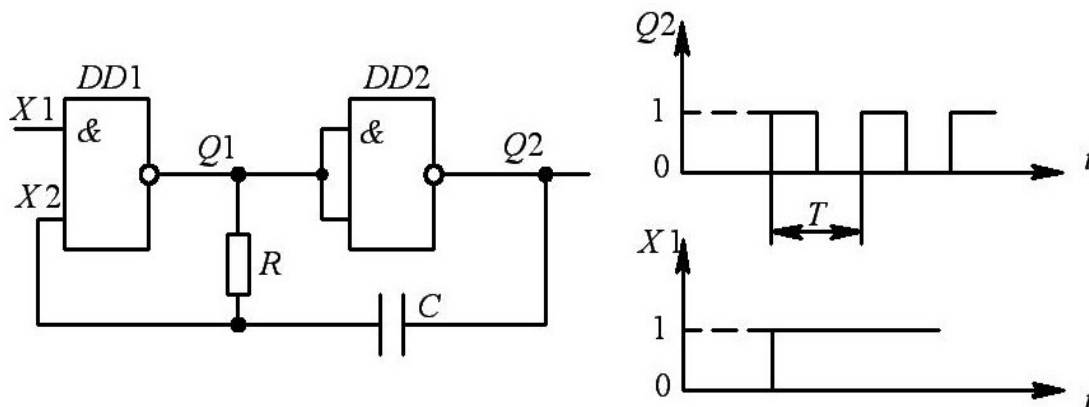


Рисунок 16.2 Мультивибратор

заряжен, и, поскольку вход  $X_2$  соединен с конденсатором,  $X_2 = 1$ . Состояние схемы устойчиво, генерации импульсов нет.

При подаче сигнала  $X_1 = 1$  сигналы на выходах ЛЭ изменятся на  $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = 1$ ; начнется перезаряд конденсатора  $C$  по цепи: выход  $DD2$  – конденсатор  $C$  – резистор  $R$  – выход  $DD1$ . Напряжение на входе  $X_2$  будет понижаться, и когда оно достигнет порогового значения (напряжения перехода ЛЭ из одного состояния в другое  $U_{пор} = 1.3$  В), сигналы на выходах опять изменятся:  $Q_1 = 1$ ,  $Q_2 = 0$ . Далее начинается новый перезаряд конденсатора  $C$  (по цепи выход  $DD1$  – резистор  $R$  – конденсатор  $C$  – выход  $DD2$ ), в результате которого напряжение на входе  $X_2$  снова будет повышаться, и при  $X_2 \geq U_{пор}$  произойдет новое переключение ЛЭ в противоположное состояние ( $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = 1$ ). Так работает генератор прямоугольных сигналов.

**Т и р и с т о р** – четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя  $p$ - $n$ -переходами. Тиристор обладает двумя устойчивыми состояниями: состояние низкой проводимости (тиристор закрыт) и состояние высокой проводимости (тиристор открыт). Перевод тиристора в открытое состояние осуществляется подачей на управляющий электрод положительного по отношению к катоду напряжения. Запирание тиристора осуществляется в цепях переменного тока или пульсирующего напряжения – при снижении тока ниже тока удержания, в цепях постоянного тока – за счет принудительной коммутации.

Тиристоры широко применяются в качестве коммутирующих бесконтактных элементов (например, в бесконтактных пускателях) и для регулирования в широких пределах напряжения на нагрузке за счет регулирования момента открывания тиристора.

**Т и р и с т о р н ы й о п т р о н** имеет излучающий оптрон и фотоприемный элемент, между которыми осуществляется оптическая связь. В тиристорной оптопаре излучателем является светодиод инфракрасного излучения, а приемным элементом – кремниевый фототиристор. Фототиристор открывается при наличии напряжения между его анодом и катодом, как только происходит освещение светодиодам базы фототиристора. Включенное состояние фототиристора сохраняется и с прекращением излучения светодиодом при снятии входного напряжения. Чтобы запереть фототиристор, с него нужно снять внешнее анодное напряжение. Если фототиристор включен в цепь переменного или пульсирующего напряжения, его выключение происходит в каждый из периодов при снижении тока до значения ниже тока удержания (близкого к нулю).

Тиристорные оптроны целесообразно использовать для гальванической развязки цепей управления и более мощных (силовых) цепей, - например, для дистанционного управления двигателем, осветительными установками и т.д.

**Б л о к с ч е т а и ц и ф р о в о й и н д и к а ц и и** числа импульсов (рис. 16.3) состоит из десятичного счетчика импульсов  $CT10$ , дешифратора  $DC$ , и цифрового газоразрядного индикатора  $HG1$ .

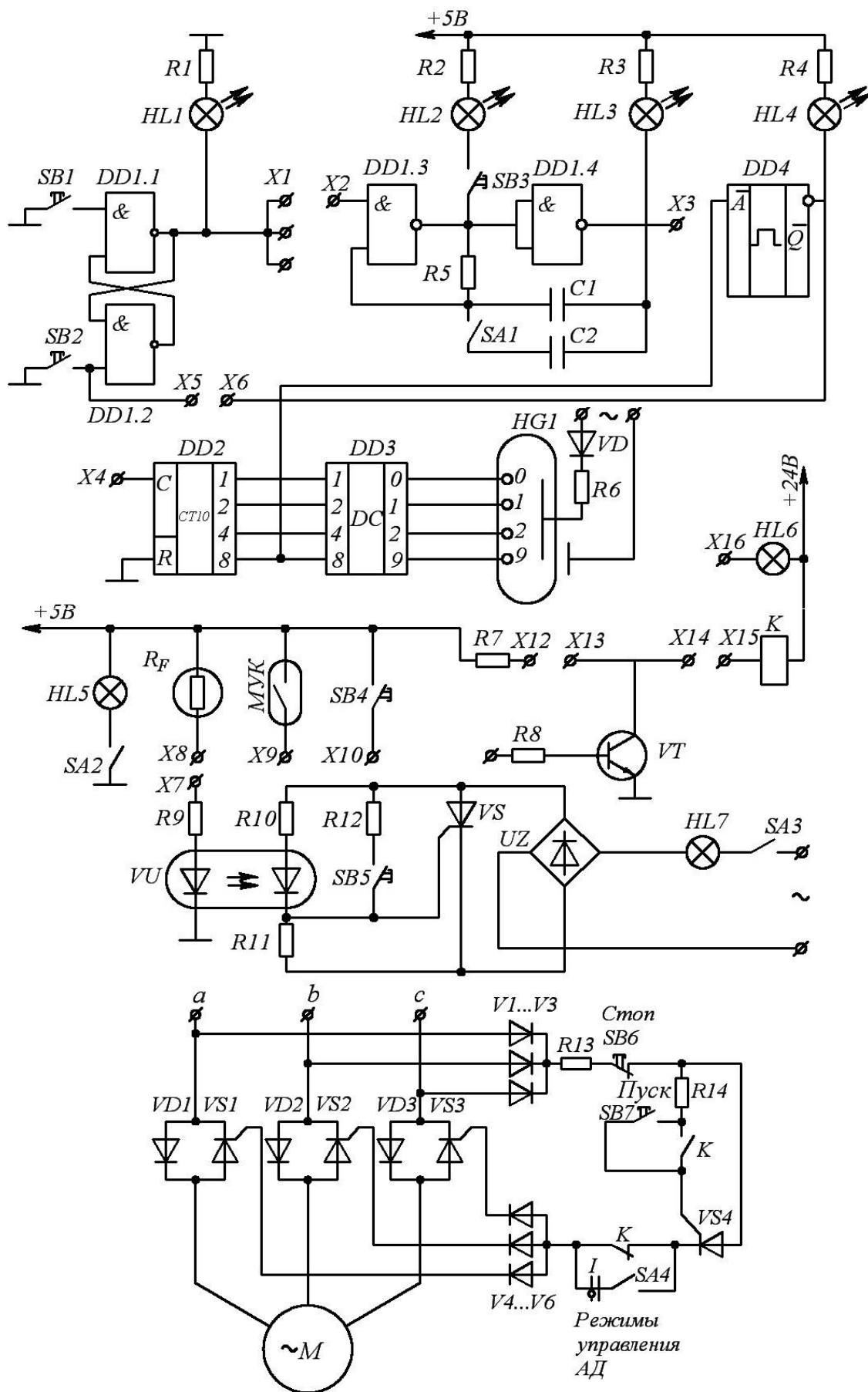


Рисунок 16.3. Блок счета и цифровой индикации числа импульсов

Десятичный счетчик *CT10* суммирует импульсы, поступившие на его вход *C*, и представляет их число (от 0 до 9) в двоичном коде 8-4-2-1. Каждый из этих выводов отображает разряд двоичного числа с соответствующим (8, 4, 2 или 1) числовым «весом», а комбинация сигналов (нулей и единиц) на выходах выражает в двоичной системе число импульсов. Например, комбинация 0110 («1» - на выходах 4 и 2, «0» - на выходах 8 и 1) означает, что на счетчик  $4+2=6$  импульсов. Счет ведется до 10 импульсов; 10-й импульс устанавливает все выходы в исходное состояние – «0».

Дешифратор *DC* преобразует число в двоичном коде, поданное на его входы 8-4-2-1, в десятичное число – сигнал «0» на том из 10 выходов *DC*, номер которого соответствует поданному числу (на остальных 9 выходах будет сигнал «1»). Так, если на вход дешифратора поступает число 0101 (сигнал «1» на входах 4 и 1), то сигнал «0» появится на выходе 5, так как двоичному числу 0101 соответствует десятичное 5.

Цифровой газоразрядный индикатор *HG1* представляет собой стеклянный баллон, наполненный инертным газом, в который помещены 10 катодов, имеющих форму цифр от 1 до 9 и один сетчатый анод. При появлении на одном из катодов «нулевого» потенциала напряжение между анодом и заданным катодом оказывается достаточным для возникновения тлеющего разряда в газе, который высвечивает цифру, изображаемую катодом.

### **Бесконтактное управление асинхронным двигателем**

Управление асинхронным двигателем с помощью контактной аппаратуры при большой частоте включения приводит к подгоранию и износу контактов. Бесконтактные тиристорные пускатели лишены этого недостатка, обладают большим быстродействием и обеспечивают надежную работу электропривода в целом.

На рис. 16.3 приведена схема тиристорного пускателя, силовая часть которого состоит из трех тиристорно-диодных элементов, включенных по встречно-параллельной схеме между сетью и статором асинхронного двигателя. Здесь тиристор и диод в каждой фазе является аналогом контакта контактора. Из сети в обмотку статора ток идет через диоды, а возвращается в сеть через тиристоры, обеспечивая тем самым протекание по статорной обмотке трехфазного переменного тока. Управление силовыми тиристорами *VS1...VS3* осуществляется трехфазным диодным мостом, в плечи которого *V4...V6* включены управляющие переходы силовых тиристоров. Между выходными зажимами трехфазного диодного моста включен вспомогательный тиристор *VS4*, который включается от кнопки *SB7* «Пуск» или от контакта реле *K*. Тиристор *VS4* поддерживается в открытом состоянии своим анодным током. Управляющие сигналы от *VS4* через *V4...V6* открывают тот силовой тиристор, катод которого в этот момент имеет наиболее отрицательный потенциал.

Схема позволяет осуществлять два режима дистанционного управления двигателем с помощью реле *K*. Если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 1», реле *K* своим замыкающим контактом запускает двигатель (остановка –

кнопкой *SB6* «Стоп»); если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 2», двигатель запускается кнопкой *SB7* «Пуск», а отключается размыкающим контактом реле *K* (например, под воздействием каких-то внешних защитных блокировок). Аварийное отключение двигателя в любом режиме осуществляется кнопкой *SB6* «Стоп».

### Предварительное задание к эксперименту

В зависимости от варианта выполнить задание, указанное в табл. 16.1

ТАБЛИЦА 16.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер задания	1	2	3	4	1	2	3	4

#### Задание 1

Начертить схему и объяснить работу реле времени на элементах *DD1...DD4* (рис. 19.3), используя приведенные схемы электронных узлов, которые необходимо дополнить электрическими связями между контактными гнездами *X1-X2*, *X3-X4*, *X5-X6*.

#### Задание 2

Начертить и объяснить работу схемы устройства автоматического отключения электрической лампы (*HL6*) через заданный интервал времени. Для этого использовать показанные на рис. 19.3 схемы электронных элементов *DD1...DD4*, *VT*, которые должны быть дополнены электрическими связями между контактными гнездами *X1- X2*, *X3-X4*, *X5- X6*, *X1- X11*, *X14- X16*.

#### Задание 3

Начертить схему и объяснить принцип работы автоматического управления наружным электроосвещением (лампа *HL7*). Для этого использовать показанные на рис. 19.3 фоторезистор *R<sub>F</sub>*, транзистор *VT*, узел управления лампой *HL7* через однофазный мост *UZ*, тиристор *VS* и оптрон *VU*. Для получения схемы устройства необходимо выполнить электрические связи между этими элементами, соединив контактные гнезда *X8-X11*, *X12-X13*, *X7- X14*.

*Пояснение.* При достаточной освещенности фоторезистора его сопротивление резко снижается, открывается транзистор, который шунтирует входную цепь оптрона, что приведет к разрыву его входной цепи и погасанию лампы *HL7*.

#### Задание 4

Начертить и объяснить работу схемы бесконтактного управления асинхронным двигателем (рис. 16.3).

## Порядок выполнения эксперимента

### Испытание электронных элементов и узлов

1. Опробовать работу  $\overline{RS}$ -триггера на элементах  $DD1.1 - DD1.2$ , переключая его кнопками  $SB1, SB2$  и наблюдая за светодиодом  $HL1$ . Составить таблицу истинности.

2. Испытать работу мультивибратора, собранного на элементах  $DD1.3 - DD1.4$ . Для этого соединить выход  $X1$  элемента  $DD1.1$  с входом  $X2$  элемента  $DD1.3$ . Запустить мультивибратор кнопкой  $SB1$ , наблюдать за миганием светодиода  $HL3$ , а при включении кнопки  $SB3$  – за «перемигиванием»  $HL2-HL3$ . Убедиться, что частота импульсов мультивибратора уменьшается при возрастании емкости  $C$  (для этого подключить тумблером  $SA1$  параллельно емкости  $C1$  емкость  $C2$ ). Остановить мультивибратор кнопкой  $SB2$ . Вычислить частоту (число импульсов в одну секунду) при емкостях  $C1$  и  $C1+C2$ .

3. Испытать работу десятичного счетчика  $DD2$  в качестве делителя частоты, соединив выход  $X3$  мультивибратора с входом «C» ( $X4$ ) счетчика  $DD2$ . Наблюдая за частотой импульсов на входе счетчика с помощью светодиода  $HL3$  и газоразрядного индикатора  $HG1$ , убедиться, что на выходе счетчика (вывод «8»  $DD2$ , светодиод  $HL4$ ) частота импульсов в 10 раз меньше, чем на входе (на каждые 10 входных импульсов – индикаторы  $HL3, HG1$  – получаем 1 выходной импульс  $HL4$ ).

4. Собрать и испытать схему реле времени на элементах  $DD1...DD4$ , соединив контактные гнезда  $X1-X2, X3-X4, X5-X6$ . Кнопкой  $SB1$  включить светодиод  $HL1$ , который должен погаснуть после отсчета десяти импульсов  $HL3$  ( $HG1$ ). Измерить и записать выдержку реле времени для двух значений емкости ( $C1$  и  $C1+C2$ ).

5. Испытать работу транзистора  $VT$ . Соединить вывод  $X10$  кнопки  $SB4$  с выводом  $X11$  базы транзистора, вывод коллектора  $X14$  – с выводом  $X16$  лампы  $HL6$ . При нажатии кнопки  $SB4$  транзистор  $VT$  открывается, и лампа  $HL6$  загорается.

6. Испытать работу тиристора  $VS$ . Включить тумблер  $SA3$ , тогда при нажатии кнопки  $SB5$ , падающей напряжение на управляющий электрод тиристора, тиристор  $VS$  открывается, и лампа  $HL7$  загорается.

7. Испытать работу оптрона  $VU$ . Соединить вывод  $X10$  кнопки  $SB4$  с входом  $X7$  оптрона  $VU$ . При нажатии кнопки  $SB4$  срабатывает оптрон  $VU$ , тиристор  $VS$  открывается, и лампа  $HL7$  загорается.

### Сборка и испытание устройств автоматики

1. Устройство автоматического отключения через заданный интервал времени электрической лампы, например, в подъезде жилого дома. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда  $X1-X2, X3-X4, X5-X6, X1-X11, X14-X16$ . При нажатии кнопки  $SB1$  загорается лампа «коридорного освещения»  $HL6$  и будет гореть, пока реле времени (индикация по  $HG1$ ) отсчитывает выдержку от 0 до 10. Выдержка реле времени (частота импульсов мультивибратора) может изменяться с помощью тумблера  $SA1$ .

2. Устройство автоматического управления электрической лампой в функции освещенности, например, управления наружным электроосвещением. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда  $X8-X11$ ,  $X12-X13$ ,  $X7-X14$ . Включить тумблеры  $SA2$  и  $SA3$ . При повороте зеркальца, прикрывающего фоторезистор, под таким углом, чтобы световой поток лампы  $HL5$  падал на фоторезистор  $R_F$  (имитация наступления рассвета), лампа  $HL7$  (наружное освещение) погасает. Это обусловлено тем, что при наступлении «рассвета» сопротивление фоторезистора  $R_F$  резко понижается и шунтирует светодиод оптрона  $VU$ ; оптрон разрывает свою выходную цепь.

3. Устройство управления мигающим светодом. Соединить контактные гнезда  $X1-X2$ ,  $X3-X11$ ,  $X14-X16$ . При нажатии кнопки  $SB1$  лампа  $HL6$  горит «мигающим светом», частоту которого можно изменять частотой импульсов мультивибратора (тумблером  $SA1$ ).

4. Управление асинхронным двигателем с помощью бесконтактного тиристорного пускателя. Включить трехполосный автомат на питающем щитке. При нажатии кнопки  $SB7$  «Пуск» открывается тиристор  $VS4$ , который в свою очередь, открывает тиристоры  $VS1...VS3$  бесконтактного пускателя; двигатель запускается.

5. Включение асинхронного двигателя в функции освещенности, например, автоматическое включение вентилятора в цехе с наступлением дня. Собрать схему, соединив контактные гнезда  $X8-X11$ ,  $X14-X15$ . Фоторезистор  $R_F$  прикрыть зеркальцем, включить лампу  $HL5$  тумблером  $SA2$ . При открывании зеркальца часть светового потока лампы  $HL5$  падает на фоторезистор  $R_F$  (имитация наступления дня), что приводит к срабатыванию реле  $K$ , которое включает бесконтактный пускатель; двигатель запускается.

### Содержание отчета

Цель работы; схема автоматического устройства, заданного в предварительном задании; описание работы этой схемы; результаты испытаний электронных элементов и узлов в соответствии с указаниями в разделе «Порядок выполнения эксперимента».

### Контрольные вопросы

1. Какую из кнопок  $SB1$  и  $SB2$  (рис. 16.3) нужно замкнуть, чтобы загорелся светодиод  $HL1$ ? Как погасить  $HL1$ ? Ответ обосновать.

2. Для чего предназначен мультивибратор? От чего и как зависит частота вырабатываемых мультивибратором импульсов?

3. Какое число импульсов поступило на вход десятичного счетчика  $CT10$  (рис. 16.3), если на его выходах 1 и 4 имеется «логическая 1», а на выходах 2 и 8 – «логический 0»?

4. Какая цифра будет светиться на газоразрядной индикаторной лампе  $HG1$ , катоды которой подключены к дешифратору  $DC$  (рис. 19.3), если на входы 1 и 4 дешифратора  $DC$  подана «логическая 1», а на входы 2 и 8 – «логический 0»?

5. В каком состоянии (горит или погашена) будет лампа  $HL7$  (рис. 16.3), если тумблер  $SA3$  замкнут, а тиристор  $VS$ : а) открыт; б) заперт?
6. Как воздействовать на оптрон  $VU$  (рис. 16.3), чтобы открылся тиристор  $VS$ ?
7. Почему в каждую фазу силовой цепи двигателя  $M$  (рис. 16.3) параллельно тиристорам включены диоды во встречном направлении?



## Материалы практических занятий

### 1. Определение параметров полупроводниковых диодов, тиристоров.

**Задача Д1.** Определить значение и форму выходного напряжения  $u_2$  в цепи (рис. 1), полагая, что диод представляет собой идеальный вентиль. Напряжение на входе  $u_1 = 30 \sin \omega t$  В.

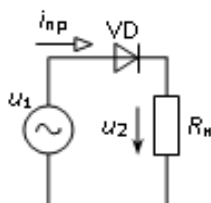


Рис. 1

**Задача Д2.** Кремниевый диод Д210 работает в цепи (рис. 1) при прямом токе  $I_{пр} = 100$  мА. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 1.2. Определить прямое сопротивление диода и выходное напряжение  $U_{2\text{ ср}}$ , если на входе цепи  $u_1 = 4 \sin \omega t$  В.

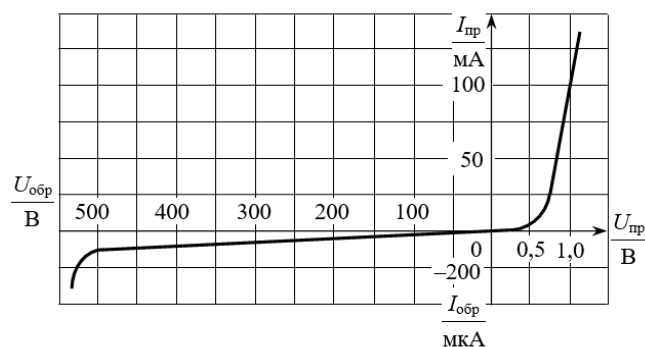


Рис. 2

**Задача Д3.** Рассчитать простейший однополупериодный выпрямитель без фильтра (рис.3) для выпрямления синусоидального напряжения  $U = 220$  В с помощью кремниевых диодов КД202Д. Электрические параметры диодов:  $U_{пр} = 0,9$  В,  $I_{пр} = 5$  А,  $I_{обр\text{ max}} = 0,8$  мА (при  $U_{обр\text{ max}}$ ),  $U_{обр\text{ max}} = 140$  В.

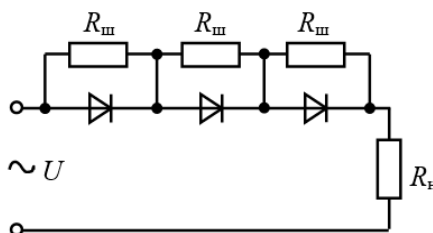


Рис. 3

**Задача Д4.** Рассчитать простейший выпрямитель на диодах КД202Д (рис. 4), чтобы выпрямленный ток  $I_{выпр}$  был равен 10 А.

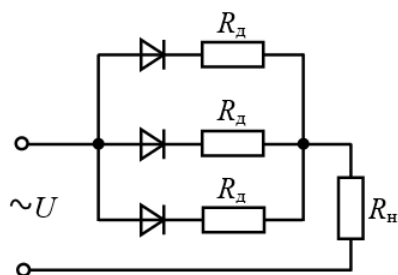


Рис.4

**Задача Д5.** Рассчитать сопротивление  $R_б$  балластного резистора в схеме параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5, а), выполненного на кремниевом стабилитроне КС210Ж. Вольт-амперная характеристика стабилитрона дана на рис. 5, б. Входное напряжение изменяется от  $U_{\min} = 13$  В до  $U_{\max} = 19$  В. Сопротивление нагрузочного резистора  $R_n = 1,8$  кОм. Будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения? Чему равен коэффициент стабилизации?

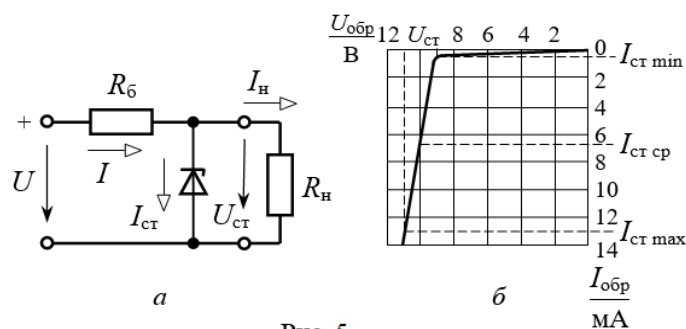


Рис. 5

**Задача Д6.** При прямом напряжении 0,9В максимально допустимый ток диода равен 300 мА. Каково наибольшее напряжение источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором сопротивлением  $R_n = 17$  Ом?

## 2. Определение параметров биполярных и полевых транзисторов.

**Задача Тр1.** По статическим характеристикам транзистора КТ315В, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 1), для точки покоя  $U_{кэп} = 10$  В,  $I_{бп} = 0,4$  мА определить  $h$ -параметры и начертить схему замещения транзистора.

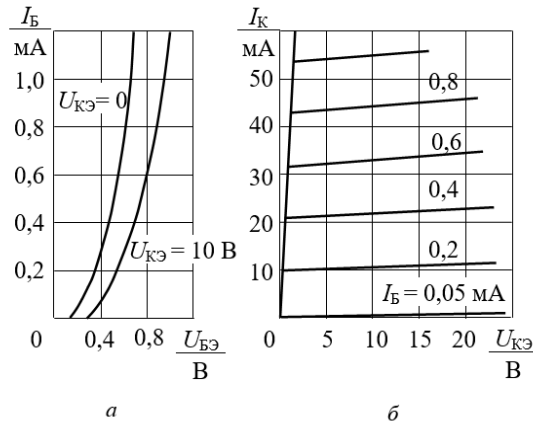


Рис.1

**Задача Тр2.** В биполярном транзисторе  $I_K = 10 \text{ mA}$ ,  $I_{Э} = 10,5 \text{ mA}$ .  
 Определить коэффициенты передачи тока  $\alpha$  и  $\beta$ , если тепловым током можно пренебречь.

**Задача Тр3.** Биполярный транзистор с  $\beta = 100$  имеет  $I_B = 10 \text{ мкА}$ .  
 Определить  $I_K$  и  $I_{Э}$ , если тепловым током можно пренебречь. Сравнить токи  $I_K$  и  $I_{Э}$ .

**Задача Тр4.** По выходным характеристикам транзистора КТ315В (рис. 2.13) определить  $I_B$  и  $U_{КЭ}$  в рабочей точке, если  $I_K = 25 \text{ mA}$ , а рассеиваемая на коллекторе мощность  $P_K = 150 \text{ мВт}$ .

**Задача Тр5.** Определить крутизну характеристики  $S$  и внутреннее сопротивление  $R_i$  полевого транзистора КП103М по статическим характеристикам при  $U_{СИ} = 6 \text{ В}$ ,  $U_{ЗИ} = 4 \text{ В}$ .  
 Рассчитать коэффициент усиления  $\mu = SR_i$ .

**Задача Тр6.** Полевой транзистор имеет следующие параметры:  $S = 2 \text{ mA/V}$ ,  $R_i = 200 \text{ кОм}$ . Рассчитать приращение напряжения  $\Delta U_{СИ}$ , чтобы ток стока  $I_C$  остался прежним, если напряжение  $U_{ЗИ}$  изменилось на  $0,05 \text{ В}$ .

### 3. Расчет выпрямителей. Расчет сглаживающих фильтров.

**Задача В1.** На вход выпрямителя (рис. 1) подано напряжение  $u_1 = U_m \sin \omega t$ .  
 Число витков вторичных полуобмоток трансформатора  $w_1 = w_2$ .  
 Начертить временные диаграммы напряжения на нагрузке при включении ее между выводами а) 1 - 2; б) 1 - 3; в) 2 - 3.

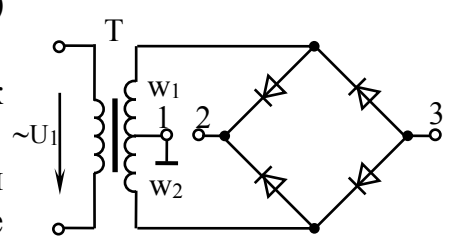


Рис. 1

Задача В1 При прямом напряжении 0,9 В максимально допустимый ток диода равен 300 мА.

Каково наибольшее напряжение источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором  $R_n = 17 \text{ Ом}$ ?

Задача В3. В цепи (рис. 2) через нагрузочный резистор  $R_n = 500 \text{ Ом}$  протекает ток  $I_n = 0,1 \text{ А}$ .

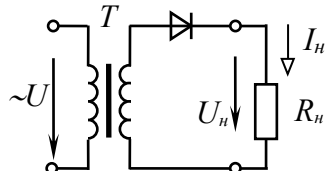


Рис. 2

Выбрать тип диода и рассчитать коэффициент трансформации и мощность трансформатора, если напряжение питающей сети  $U_1 = 220 \text{ В}$ .

Задача В4 Аккумуляторная батарея, ЭДС которой  $E$

$= 12 \text{ В}$ , внутреннее сопротивление  $R_0 = 1 \text{ Ом}$ , заряжается через однофазный мостовой выпрямитель, подключенный к трансформатору с вторичным напряжением  $u_2 = 22 \sin \omega t$ , В. Начертить электрическую схему зарядной установки и определить среднее значение зарядного тока.

Задача В5. Определить параметры Г-образного LC-фильтра к однополупериодному выпрямителю, если коэффициент пульсации напряжения нагрузки  $K_{П2} = 0,02$ , частота питающей сети  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Задача В6 Определить угол управления однофазного мостового управляемого выпрямителя на тиристорах, если среднее значение напряжения на нагрузке должно быть равным а) 10 В; б) 1,75 В. Напряжение вторичной обмотки трансформатора, к которому подключен выпрямитель,  $U_2 = 13 \text{ В}$ .

Задача В7. Определить коэффициент полезного действия стабилизатора на полупроводниковом стабилитроне, у которого напряжение стабилизации  $U_{ст} = 5 \text{ В}$  при токе стабилизации  $I_{ст} = 0,5 \text{ А}$ , если  $R_n = 10 \text{ Ом}$ ;  $R_6 = 5 \text{ Ом}$ .

#### 4. Расчет усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах.

Задача У1. Схема усилительного каскада на транзисторе ГТ108А приведена на рис. 1, а. Рассчитать сопротивления  $R_1, R_2, R_K, R_Э$  резисторов, если  $E_K = 12 \text{ В}$ ,  $I_{КП} = 5 \text{ мА}$ ,  $U_{ЭКП} = 5 \text{ В}$ ,  $h_{21} = 115$ ,  $U_{ЭБП} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_1 = 5I_{БП}$ ,  $R_Э = 0,1R_K$ .

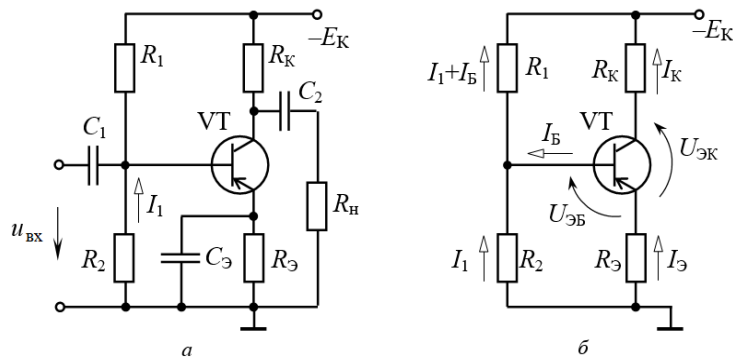


Рис.1

**Задача У2** Для каскада на транзисторе ГТ108А, схема которого приведена на рис. 1, а, заданы  $E_K = 10$  В,  $U_{ЭК} = 5$  В,  $U_{ЭБ} = 0,15$  В,  $R_K = 900$  Ом,  $R_E = 100$  Ом,  $h_{21} = 100$ . Рассчитать токи  $I_K$ ,  $I_B$  и сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , если  $I_1 = 5I_B$ .

**Задача У3.** Усилитель имеет  $K_U = 100$ . Он охвачен положительной обратной связью по напряжению с коэффициентом передачи  $\beta = 0,01$ .

Определить коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

**Задача У4.** Усилитель имеет следующие динамические параметры:  $K_U = 250$ ,  $R_{вх} = 0,5$  кОм,  $R_{вых} = 1$  кОм. Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи  $\beta$ , который позволит повысить входное сопротивление до 2 кОм. Определить параметры усилителя с учетом ООС.

**Задача У5.** Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов  $K_{U1} = 100$  и  $K_{U2} = 20$  охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с  $\beta = 0,02$ . Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

**Задача У6.** Рассчитать мощность источника питания и максимальную мощность  $P_K$  транзистора однотактного трансформаторного каскада усиления мощности, если  $P_{н max} = 0,5$  Вт.

**Задача У7.** Какую максимальную мощность можно получить от двухтактного каскада усиления мощности, если транзисторы работают в классе В и имеют  $P_{к доп} = 0,6$  Вт?

## 5. Расчет схем на операционных усилителях.

**Задача ОУ1.** В цепи рис. 1  
 $R_1 = 20$  кОм;  $R_2 = 10$  кОм;  
 $R_3 = 25$  кОм;  $R_{oc} = 100$  кОм;  
 $U_1 = U_2 = U_3 = 10$  мВ.  
 Определить  $U_{вых}$  и  $R_4$ .

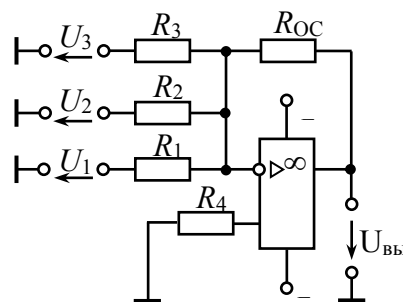


Рис. 1

Задача ОУ2. В цепи рис. 2  $R_1 = 5 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{ВХ}} = 10 \text{ мВ}$ ;  $U_{\text{ВЫХ}} = 0,11 \text{ В}$ .  
 Определить  $R_{\text{ОС}}$  и  $R_2$ .

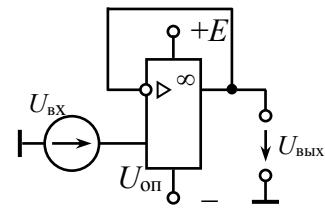


Рис. 2

Задача ОУ3. В цепи рис. 2  $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}$ .  
 Определить  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

Задача ОУ4. В цепь инвертирующего входа ОУ включен фотодиод VD. При некоторой освещенности ток фотодиода  $I_{\text{ф}} = 10 \text{ мкА}$ .

Рассчитать  $R_{\text{ОС}}$ , при котором выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}} = 1 \text{ В}$ .

Задача ОУ5. Составьте устройство на базе операционного усилителя для реализации функции

$$U_{\text{ВЫХ}} = -K_U \cdot (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}})$$

Определить параметры схемы, если известны  $R_{\text{ОС}} = 20 \text{ кОм}$ ;  $K_U = 5$ .

Задача ОУ6. Для разностного усилителя определить  $U_{\text{ВЫХ}}$ , если  $U_{\text{ВХ1}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $U_{\text{ВХ2}} = -0,3 \text{ В}$ ,  $R_{\text{ОС}} = R_3 = 400 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = R_2 = 20 \text{ кОм}$ .

Задача ОУ7. Ограничится ли выходной сигнал в инвертирующем усилителе, если  $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}$ ,  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$ ?

Максимальное выходное напряжение ОУ  $U_{\text{ВЫХ max}} = \pm 8 \text{ В}$ .

В каком режиме работает ОУ?

## 6. Реализация комбинационных устройств на логических элементах.

Задача КУ1. Составить таблицы истинности для функций, реализуемых логическими элементами 2И-НЕ, 3ИЛИ-НЕ. Начертить условное обозначение этих элементов.

Задача КУ2. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего функцию а)  $F_1 = \bar{X}_1 + X_2 + \bar{X}_3$ ;  
 б)  $F_2 = X_1 \cdot X_2 + X_3$ .

Задача КУ3. Составить функциональную схему устройства, реализующего логические функции  $F_1 = \bar{X}$ ;  $F_2 = X_1 + X_2$ ;  $F_3 = X_1 \cdot X_2$  на логических элементах а) 2И-НЕ; б) 2ИЛИ-НЕ.

Задача КУ4. Составить функциональную схему на логических элементах 2И-НЕ, реализующую функцию  $F = X_1 \cdot X_2 + \bar{X}_3 \cdot X_4$ .

Задача КУ5. На рис. 1 приведена структурная схема логического устройства. Запишите уравнение логической функции, реализуемой этим устройством. При каком наборе входных сигналов  $F = 1$ ?

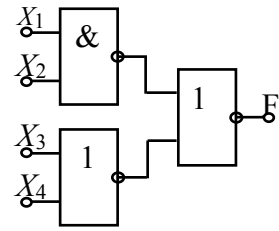


Рис. 1

Задача КУ6. Записать функцию и составить схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

Задача КУ7. Составить схему шифратора для преобразования числа из восьмеричного кода в двоичный.

Задача КУ8. Составить схему дешифратора для перевода числа из двоичного кода в восьмеричный.

Задача КУ9. Составить схему мультиплексора для передачи информации от трех источников по одной линии.

Задача КУ10. Используя схемы мультиплексора и демультиплексора, составить схему передачи информации от трех источников трем приемникам по одной линии связи.

## 7. Триггеры.

Задача Т1. Составить таблицу состояний для асинхронного  $RS$  – триггера на элементах И-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера. Привести временные диаграммы.

Задача Т2. Какой сигнал установится на выходах  $Q$  и  $\bar{Q}$   $JK$ -триггера, если к приходу синхроимпульса а)  $J = 1; K = 0$ ; б)  $K = 1; J = 0$ ; в)  $K = 1; J = 1$ ?

Задача Т3. Составить схему  $T$ -триггера на основе  $JK$ -триггера, привести временные диаграммы его работы.

Задача Т4. Составить таблицу состояний для асинхронного  $RS$  – триггера на элементах ИЛИ-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера. Привести временные диаграммы.

Задача Т4. Составить таблицу состояний для синхронного  $RS$  – триггера на элементах И-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера.

Задача Т5. Составить схему  $D$ -триггера на основе  $JK$ -триггера, привести временные диаграммы его работы.

## **8. Цифровые счетчики и регистры: построение схем, временные диаграммы работы.**

Задача ЦСиР1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на  $D$ -триггерах с модулем счета  $K = 8$ . Начертить временные диаграммы его работы.

Задача ЦСиР2. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на  $JK$ -триггерах с модулем счета  $K = 5$ . Начертить временные диаграммы его работы. Каково состояние выходов счетчика после прихода трех импульсов?

Задача ЦСиР3. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на  $T$ -триггерах с модулем счета  $K = 12$ . Начертить временные диаграммы его работы.

Задача ЦСиР4. Привести схему последовательного регистра, в который необходимо записать число 10101. В каком состоянии окажутся триггеры регистра после подачи 3-го импульса сдвига?

Задача ЦСиР5. Привести схему параллельного регистра, в который необходимо записать число 1011. Изменится ли содержимое регистра после считывания информации.



# КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

1. Электропроводность полупроводников. Беспримесные и примесные полупроводники.
2. Образование электронно-дырочного перехода.
3. Физические процессы в  $p-n$  переходе. ВАХ. Электрический и тепловой пробой перехода.
4. Полупроводниковые резисторы, диоды, стабилитроны.
5. Биполярные транзисторы. Устройство и усилительные свойства. Схемы включения транзистора.
6. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ. Входные и выходные характеристики,  $h$ -параметры.
7. Полевые транзисторы с  $p-n$ -переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы); их вольтамперные характеристики и параметры.
8. Тиристоры. Определение. Классификация. Физические процессы в динисторе и тиристоре. ВАХ и основные параметры тиристоров.
9. Интегральные микросхемы. Классификация ИМС. Основные параметры ИМС.
10. Однофазный однополупериодный выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
11. Однофазный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
12. Трехфазный мостовой выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
13. Управляемый выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
14. Сглаживающие фильтры, назначение, типы, расчет фильтра.
15. Параметрический стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
16. Компенсационный стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
17. Элементы оптоэлектроники. Преимущества оптоэлектронных приборов. Условные изображения, структура, принцип работы фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов, светодиодов. Области их применения.
18. Усилители. Общие сведения. Классификация. Принцип построения усилительных каскадов. Режим покоя.
19. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с ОЭ. Назначение элементов схемы. Принцип работы, временная диаграмма. Статический и динамический режимы.
20. Операционные усилители. Амплитудная характеристика. Структурная схема, обозначение, общие свойства.

21. Основные аналоговые схемы на основе ОУ (инвертирующий и неинвертирующий ОУ, сумматоры, вычитатель, интегратор, дифференциатор).
22. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина. Мультивибратор.
23. Компаратор. Триггер Шмидта.
24. Основы алгебры логики. Аксиомы, законы, тождества, теоремы алгебры логики.
25. Логические функции. Логические элементы. Базовый логический элемент.
26. Комбинационные логические устройства. Устройство, принцип работы и назначение шифратора, дешифратора.
27. Комбинационные логические устройства. Устройство, принцип работы и назначение мультиплексора, демультимплексора и сумматора.
28. Триггеры. Основные определения и назначение. Классификация триггеров. Принцип работы асинхронного  $RS$ - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблица истинности.
29. Принцип работы асинхронного  $RS$ - триггера с инверсными входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
30. Принцип работы синхронного  $RS$ - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
31. Принцип работы  $D$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
32. Принцип работы  $JK$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
33. Принцип работы  $T$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
34. Счетчики на  $JK$  триггерах. Последовательные и параллельные. Принцип построения и работы. Временные диаграммы.
35. Счетчики на  $D$  триггерах. Последовательные. С произвольным коэффициентом деления.
36. Параллельные и последовательные регистры. Принцип построения. Назначение и применение.
37. Цифро-аналоговые преобразователи. Принцип работы схем.
38. Аналого-цифровые преобразователи. Принцип работы схем.
39. Структура микропроцессорной системы, назначение блоков.
40. Структура микропроцессора, назначение блоков.

## ВОПРОСЫ К ТЕСТАМ

### Вопросы к тесту №1 «Элементная база» и «Аналоговые устройства»

1. Какие носители заряда являются основными в собственном полупроводнике?
2. Какие носители заряда являются неосновными для полупроводника р-типа?
3. Какие носители заряда являются неосновными в собственном полупроводнике?
4. Назовите неосновные носители заряда для полупроводника р-типа?
5. Какие носители заряда являются неосновными для полупроводника n-типа?
6. Какие носители заряда являются основными для полупроводника n-типа?
7. Какие носители заряда являются основными для полупроводника р-типа?
8. Как изменится высота потенциального барьера р-n-перехода при приложении к нему обратного напряжения?
9. Как изменится ширина р-n-перехода при приложении к нему обратного напряжения?
10. Как изменится высота потенциального барьера р-n-перехода при приложении к нему прямого напряжения?
11. Как изменится ширина р-n-перехода при приложении к нему прямого напряжения?
12. Какая часть вольт-амперной характеристики (ВАХ) стабилитрона является рабочим участком:
13. Основное назначение полупроводникового стабилитрона:
14. Для чего применяются стабилитроны?
15. На каком физическом явлении основана работа стабилитрона?
16. На каком физическом явлении основана работа фотодиода?
17. На каком физическом явлении основана работа выпрямительного диода?
18. Для чего применяются выпрямительные диоды?
19. Какой резистор изменяет свое сопротивление под воздействием приложенного напряжения?
20. Какой резистор изменяет свое сопротивление под воздействием температуры?
21. Какой резистор изменяет свое сопротивление под воздействием падающего светового потока?
22. Как называется полупроводниковый конденсатор переменной емкости, управляемый изменением обратного напряжения?
23. Как в схеме параметрического стабилизатора напряжения включается стабилитрон по отношению к нагрузке?
24. Какими основными параметрами характеризуются полупроводниковые выпрямительные диоды?
25. Светодиоды используются для создания:
26. Фотодиоды используются для создания:
27. Структура биполярного транзистора:

28. Как называется электрод (вывод) биполярного транзистора, от которого начинают движение носители заряда?
29. Как называется электрод (вывод) биполярного транзистора, к которому движутся носители заряда?
30. Как называется управляющий электрод (вывод) биполярного транзистора?
31. Как называется электрод (вывод) полевого транзистора, от которого начинают движение носители заряда?
32. Как называется электрод (вывод) полевого транзистора, к которому движутся носители заряда?
33. Как называется управляющий электрод (вывод) полевого транзистора?
34. В каком случае биполярный транзистор находится в режиме отсечки?
35. В каком случае биполярный транзистор находится в режиме насыщения?
36. В каком случае биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (ОЭ), находится в активном режиме?
37. Что представляет собой выходная характеристика биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?
38. Что представляет собой выходная характеристика биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой?
39. Что представляет собой выходная характеристика биполярного транзистора, включенного по схеме с общим коллектором?
40. Как называется параметр  $h_{12}$  биполярного транзистора?
41. Как называется параметр  $h_{11}$  биполярного транзистора?
42. Как называется параметр  $h_{21}$  биполярного транзистора?
43. Как называется параметр  $h_{22}$  биполярного транзистора?
44. Как осуществляется управление током стока в МДП-транзисторе с встроенным n-каналом?
45. Когда возникает канал в МДП-транзисторе с индуцированным каналом n-типа?
46. Когда возникает канал в МДП-транзисторе с индуцированным каналом p-типа?
47. Когда МДП-транзистор с встроенным n-каналом работает в режиме обеднения?
48. Когда МДП-транзистор с встроенным n-каналом работает в режиме обогащения?
49. Когда МДП-транзистор с встроенным p-каналом работает в режиме обогащения?
50. Когда МДП-транзистор с встроенным p-каналом работает в режиме обеднения?
51. Что представляет собой структура динистора (диодного тиристора)?
52. Сколько выводов имеет динистор (диодный тиристор)?
53. Сколько выводов имеет тринистор (триодный тиристор)?
54. Сколько выводов имеет неуправляемый симметричный тиристор?
55. Сколько выводов имеет управляемый симметричный тиристор?

56. Каковы способы отпирания управляемого тиристора (триодного тиристора)?
57. Чем отличается симистор от диодного тиристора?
58. Каковы функции тиристора?
59. Как изменится напряжение включения тиристора при подаче на управляющий электрод большего значения тока управления?
60. Что такое оптрон?
61. Для чего применяются оптроны?
62. Какие элементы входят в состав резисторной оптопары?
63. Какие элементы входят в состав диодной оптопары?
64. Какие элементы входят в состав транзисторной оптопары?
65. Какие элементы входят в состав тиристорной оптопары?
66. Как в схеме параметрического стабилизатора напряжения подключаются стабилитроны по отношению к нагрузке?
67. Как определить, по какой схеме (ОЭ, ОК, ОБ) включен биполярный транзистор?
68. Чем отличаются полевые транзисторы от биполярных транзисторов?
69. Чем отличается МДП-транзистор с индуцированным каналом n-типа от МДП-транзистора с встроенным каналом n-типа?
70. Когда МДП-транзистор со встроенным n-каналом работает в режиме обеднения?
71. Что представляет собой структура триодного тиристора?
72. Каковы функции тиристора?
73. Назначение оптронов?
74. Что такое степень интеграции микросхемы?
75. Что такое плотность упаковки интегральной микросхемы (ИМС)?
76. Чем отличаются цифровые ИС от аналоговых ИС?
77. В каких знакоцифровых индикаторах используется явление свечения некоторых кристаллических веществ под воздействием электрического поля?
78. Какие элементы используются при создании полупроводниковых индикаторов?
79. В каких режимах могут работать транзисторы?
80. В каком режиме транзистор используется для усиления сигнала с малыми искажениями?
81. В каком режиме эмиттерный переход биполярного транзистора имеет прямое включение, а коллекторный переход — обратное:
82. В чём достоинство схемы с общим коллектором?
83. Носителями какого заряда являются электроны?
84. Носителями какого заряда являются дырки?
85. Какие виды проводимости бывают?
86. Что такое степень интеграции ИС?
87. Чем отличаются цифровые ИС от аналоговых ИС?

88. В каких знакоцифровых индикаторах используется явление свечения некоторых кристаллических веществ под воздействием электрического поля?
89. Какие параметры электрического сигнала усиливает усилитель?
90. Назовите основные характеристики усилителей.
91. Назовите основные параметры усилителей.
92. Как определить полосу пропускания усилителя?
93. Как определить граничные частоты  $f_v$  и  $f_n$ ?
94. Чему равен коэффициент усиления  $K_U$  многокаскадного усилителя?
95. Чему равен коэффициент частотных искажений  $M$  многокаскадного усилителя?
96. Чему равен угол сдвига фаз  $\phi$  между входным и выходным напряжением в многокаскадном усилителе?
97. Чем объясняется появление частотных искажений в усилителе?
98. Какие классы усиления усилительного каскада вы знаете?
99. Чем характеризуется класс усиления А усилительного каскада?
100. Чем характеризуется класс усиления В усилительного каскада?
101. В каких устройствах используется класс усиления А усилительного каскада?
102. В каких устройствах используется класс усиления В усилительного каскада?
103. В каких устройствах используется класс усиления С усилительного каскада?
104. Каким элементом в схеме усилительного каскада вводится эмиттерная температурная стабилизация?
105. Каким элементом в схеме усилительного каскада вводится коллекторная температурная стабилизация?
106. Виды обратных связей в усилителе.
107. Каково влияние отрицательной обратной связи на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя?
108. Каково влияние положительной обратной связи на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя?
109. Какой класс усиления используется в однотактном усилителе мощности?
110. Какой класс усиления используется в двухтактном усилителе мощности?
111. Какой класс усиления используется в усилителе напряжения?
112. Какой класс усиления используется в двухтактном усилителе мощности?
113. Какой класс усиления используется в избирательном усилителе или генераторе?
114. Как изменится коэффициент усиления  $K_U$  и полоса пропускания  $\Delta f$  высокочастотного избирательного усилителя при увеличении добротности  $Q$  колебательного контура?
115. Что такое операционный усилитель (ОУ)?
116. Какое устройство на ОУ выполняет функцию  $U_{вых} = K_U (U_{вх2} - U_{вх1})$ ?
117. Какое устройство на ОУ выполняет функцию  $U_{вых} = K_U (U_{вх1} + U_{вх2})$ ?

118. Какое устройство на ОУ выполняет функцию

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left( \frac{1}{R_1 \cdot C_{\text{ос}}} \right) \cdot \int_0^t U_{\text{ВХ}} \cdot dt$$

119. Какое устройство на ОУ выполняет функцию  $U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{ос}} \cdot C \cdot dU_{\text{ВХ}}/dt$ ,

120. Назовите основной элемент однокаскадного усилителя с общим эмиттером (ОЭ):

121. Назовите основные характеристики усилителей.

122. Чему равен коэффициент усиления  $K_u$  многокаскадного усилителя?

123. Класс усиления А усилительного каскада характеризуется:

124. Отрицательная обратная связь:

125. Положительная обратная связь:

126. Какой режим (или класс) усиления используется в однотактном усилителе мощности?

127. Какой класс усиления используется в двухтактном усилителе мощности?

128. Как строятся высокочастотные избирательные усилители?

129. Как строятся низкочастотные избирательные усилители?

130. Какими параметрами определяется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) избирательного усилителя?

131. Что такое операционный усилитель (ОУ)?

132. Операционные усилители используются:

133. Какие блоки входят в структурную схему автогенератора?

134. Условие самовозбуждения автогенератора:

135. Какую функцию выполняет выпрямитель?

136. Назовите основные блоки, входящие в структурную схему однофазного неуправляемого выпрямителя.

137. Основной параметр (коэффициент), характеризующий работу выпрямителя:

138. Назовите основные элементы схемы однофазного неуправляемого мостового выпрямителя?

139. Какой выпрямитель является выпрямителем большой мощности?

140. Для чего применяются сглаживающие фильтры в выпрямителях?

141. Основной параметр сглаживающего фильтра.

142. Какой элемент входит в электронный фильтр?

143. Какой элемент входит в простой емкостной фильтр?

144. Какой элемент входит в простой индуктивный фильтр?

145. Типы Г-образных сглаживающих фильтров.

146. Типы П-образных сглаживающих фильтров.

147. Как подключается емкостной фильтр по отношению к нагрузке?

148. Как подключается индуктивный фильтр по отношению к нагрузке?

149. На каком принципе основана работа емкостного фильтра?

150. Какой из фильтров имеет наибольший коэффициент сглаживания?

151. Какой фильтр наиболее эффективно сглаживает пульсации?

152. Какие приборы используют в параметрических стабилизаторах тока?
153. На каких элементах строятся неуправляемые выпрямители?
154. На каких элементах строятся управляемые выпрямители?
155. Как обеспечивается постоянство напряжения в компенсационных стабилизаторах?
156. Назовите основной элемент управляемого выпрямителя.
157. Назовите основной элемент неуправляемого выпрямителя.
158. Что такое угол управления  $\alpha$  в управляемом выпрямителе?
159. Какую зависимость представляет собой характеристика управления?
160. Как изменяется выпрямленное напряжение при увеличении угла управления  $\alpha$  в управляемом выпрямителе?
161. В каких пределах может изменяться угол управления  $\alpha$  в управляемом выпрямителе?
162. При каком угле управления  $\alpha$  в схеме трехфазного управляемого выпрямителя с нейтральным выводом ток на нагрузке изменяется непрерывно?
163. Как изменится внешняя характеристика управляемого выпрямителя при увеличении угла управления  $\alpha$  в управляемом выпрямителе?
164. Что представляет собой внешняя характеристика выпрямителя?
165. Какова оптимальная форма управляющих сигналов, подаваемых на управляющий электрод тиристора?
166. Назовите основные элементы, входящие в состав трехфазного мостового управляемого выпрямителя.
167. Назовите основные элементы, входящие в состав трехфазного неуправляемого выпрямителя с нейтральным выводом.
168. Назовите основные элементы, входящие в состав трехфазного управляемого выпрямителя с нейтральным выводом.
169. Чем определяется длительность работы тиристорov в управляемом выпрямителе?

### **Вопросы к тесту №2 «Импульсная и цифровая техника»**

1. Что представляет собой импульсный (цифровой) сигнал.
2. Что такое длительность импульса?
3. Что такое длительность паузы.
4. Каким режимом работы транзистора определяется состояние "включено" транзисторного ключа?
5. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 1 и 0?
6. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 1?
7. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 0?
8. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 1 и 0?



9. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 1?
10. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ-НЕ, если на входы поданы сигналы логических 0?
11. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И, если на входы поданы сигналы логических 1 и 0?
12. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И, если на входы поданы сигналы логических 1?
13. Какой сигнал получится на выходе логического элемента И, если на входы поданы сигналы логических 0?
14. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ, если на входы поданы сигналы логических 1 и 0?
15. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ, если на входы поданы сигналы логических 1?
16. Какой сигнал получится на выходе логического элемента ИЛИ, если на входы поданы сигналы логических 0?
17. Какой сигнал получится на выходе логического элемента НЕ, если на вход подан сигнал логического 0?
18. Какой сигнал получится на выходе логического элемента НЕ, если на вход подан сигнал логической 1?
19. Какую операцию выполняет логический элемент И?
20. Какую операцию выполняет логический элемент ИЛИ?
21. Какую операцию выполняет логический элемент НЕ?
22. Какую операцию выполняет логический элемент И-НЕ?
23. Какую операцию выполняет логический элемент ИЛИ-НЕ?
24. Как запишется логическая функция F для логического элемента И?
25. Как запишется логическая функция F для логического элемента ИЛИ?
26. Как запишется логическая функция F для логического элемента ИЛИ-НЕ?
27. Как запишется логическая функция F для логического элемента И-НЕ?
28. Как запишется логическая функция F для логического элемента НЕ?
29. Как запишется логическая функция F для комбинированного логического элемента 2И-ИЛИ-НЕ?
30. В каких состояниях может находиться триггер.
31. Какой сигнал является активным для асинхронного R S - триггера на элементах ИЛИ-НЕ?
32. Какой сигнал является активным для асинхронного R S - триггера на элементах И-НЕ?
33. Назначение синхронизирующего управляющего входа в синхронных триггерах:
34. Какой сигнал является активным для асинхронного R S - триггера на элементах И-НЕ?
35. Какую функцию выполняет D-триггер?

36. Чему равно время задержки появления входного сигнала на выходе D-триггера?
37. Как построить D-триггер на базе JK-триггера?
38. Когда изменяется состояние одноступенчатого асинхронного T-триггера?
39. Когда изменяется состояние двухступенчатого асинхронного T-триггера?
40. Особенность J-K-триггера:
41. По какому фронту импульса переключается одноступенчатый T-триггер?
42. По какому фронту импульса переключается двухступенчатый T-триггер?
43. Для создания каких цифровых устройств используются T-триггеры?
44. Для создания каких цифровых устройств используются RS-, D-, JK-триггеры?
45. Для чего предназначены мультивибраторы?
46. На каком принципе основана работа автоколебательного мультивибратора?
47. Для чего предназначены блокинг-генераторы?
48. Какое максимальное количество импульсов  $N$  может сосчитать счетчик, состоящий из 3-х T-триггеров, если  $N=2^n$ ?
49. Сколько T-триггеров должен содержать счетчик импульсов с модулем счета  $N=16$ ?
50. Сколько T-триггеров должен содержать счетчик импульсов с модулем счета  $N=8$ ?
51. Сколько T-триггеров должен содержать счетчик импульсов с модулем счета  $N=32$ ?
52. Сколько T-триггеров должен содержать счетчик импульсов с модулем счета  $N=4$ ?
53. В чем особенность работы асинхронных счетчиков?
54. Какие состояния принимают T-триггеры двоично-десятичного счетчика, если на вход счетчика поступил 1 импульс?
55. Какие состояния принимают T-триггеры двоично-десятичного счетчика, если на вход счетчика поступило 2 импульса?
56. Какие состояния принимают T-триггеры двоично-десятичного счетчика, если на вход счетчика поступило 3 импульса?
57. Какие состояния принимают T-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 4 импульса?
58. Какие состояния принимают T-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 5 импульсов?
59. Какие состояния принимают T-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 6 импульсов?
60. Какие состояния принимают T-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 7 импульсов?
61. Какие состояния принимают T-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 8 импульсов?

62. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 9 импульсов?
63. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 10 импульсов?
64. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 11 импульсов?
65. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 12 импульсов?
66. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 13 импульсов?
67. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 14 импульсов?
68. Какие состояния принимают Т-триггеры двоичного счетчика, если на вход счетчика поступило 15 импульсов?
69. Как получить из частоты на входе счетчика 16кГц частоту на выходе 2кГц?
70. Для чего предназначены регистры ?
71. Сколько импульсов надо подать на вход сдвигового регистра, чтобы записать трехразрядное число 011?
72. Сколько импульсов надо подать на вход сдвигового регистра, чтобы записать четырехразрядное число 1011?
73. Сколько импульсов надо подать на вход сдвигового регистра, чтобы записать пятиразрядное число 10101?
74. Где используются параллельные регистры?
75. Функции параллельно-последовательного регистра.
76. Назначение дешифратор (декодера)?
77. Назначение шифратора (кодера)?
78. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 8?
79. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 1?
80. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 2?
81. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 6?
82. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 9?
83. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 10?
84. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 11?
85. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 14?

86. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0111?
87. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0001?
88. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0011?
89. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0100?
90. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0110?
91. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 1001?
92. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 1100?
93. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 1101?
94. Для чего предназначены мультиплексоры?
95. На чем основан принцип действия ЦАП (цифроаналоговый преобразователь)?
96. Назначение АЦП.
97. Назначение ЦАП.
98. Какое число получится после преобразования десятичного числа 25 в двоичное?
99. Какое число получится после преобразования десятичного числа 21 в двоичное?
100. Какое число получится после преобразования десятичного числа 19 в двоичное?
101. Какое число получится после преобразования десятичного числа 29 в двоичное?
102. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11001101 в десятичное?
103. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11001110 в десятичное?
104. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11001101 в десятичное?
105. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11110110 в шестнадцатеричное?
106. Какое число получится после преобразования двоичного числа 1111 в шестнадцатеричное?
107. Какое число получится после преобразования двоичного числа 1100 в шестнадцатеричное?
108. Какое число получится после преобразования двоичного числа 1011 в шестнадцатеричное?

109. Какое число получится после преобразования двоичного числа 1010 в шестнадцатеричное?
110. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11110010 в шестнадцатеричное?
111. Какое число получится после преобразования двоичного числа 11111010 в шестнадцатеричное?
112. На каких элементах строятся статические ОЗУ?
113. На каких элементах строятся динамические ОЗУ?
114. Для чего используется генератор тактовых импульсов (ГТИ) в схеме микропроцессорной системы?
115. Что является средством подключения внешних устройств к МП?
116. Какой элемент используется в качестве первичной ячейки памяти в динамических ОЗУ?
117. Какой элемент используется в качестве первичной ячейки памяти в статических ОЗУ?
118. Единица измерения информации.
119. Сколько бит содержит один байт?
120. Что представляет собой порт ввода-вывода?
121. Что входит в понятие интерфейса?
122. Чем определяется количество проводников в шине данных?
123. Какое свойство МП-системы определяет тактовая частота генератора тактовых импульсов (ГТИ)?
124. Назначение шины адреса.
125. Назначение шины данных.
126. Назначение шины управления.
127. Чем определяется количество проводников в шине данных?
128. Логическая функция F для комбинированного логического элемента 2И - НЕ – ИЛИ:
129. Чему равна сумма двух двоичных чисел 1011 и 1110?
130. Чему равна сумма двух двоичных чисел 0011 и 1110?
131. Сколько триггеров входит в состав регистра, который предназначен для хранения двоичного восьмиразрядного числа?
132. Сколько триггеров входит в состав регистра, который предназначен для хранения двоичного четырехразрядного числа?
133. Переведите десятичные числа 8 и 9 в двоичные коды. Определите сумму полученных двоичных чисел?
134. Если на входы логического элемента И-НЕ поданы сигналы логических 1 и 0, то какой сигнал получится на выходе?
135. Если на входы логического элемента И-НЕ поданы сигналы логических 1, то какой сигнал получится на выходе?
136. Если на входы логического элемента И-НЕ поданы сигналы логических 0, какой сигнал получится на выходе?

137. Если на входы логического элемента ИЛИ-НЕ поданы сигналы логических 1 и 0, какой сигнал получится на выходе?
138. Если на входы логического элемента ИЛИ-НЕ поданы сигналы логических 1, какой сигнал получится на выходе?
139. Если на входы логического элемента ИЛИ-НЕ поданы сигналы логических 0, какой сигнал получится на выходе?
140. Если на входы логического элемента И поданы сигналы логических 1 и 0, какой сигнал получится на выходе?
141. Если на входы логического элемента И поданы сигналы логических 1, какой сигнал получится на выходе?
142. Если на входы логического элемента И поданы сигналы логических 0, какой сигнал получится на выходе?
143. Если на входы логического элемента ИЛИ поданы сигналы логических 1 и 0, какой сигнал получится на выходе?
144. Если на входы логического элемента ИЛИ поданы сигналы логических 1, какой сигнал получится на выходе?
145. Если на входы логического элемента ИЛИ поданы сигналы логических 0, какой сигнал получится на выходе?
146. Если на входы логического элемента НЕ подан сигнал логического 0, какой сигнал получится на выходе?
147. Если на вход логического элемента НЕ подан сигнал логической 1, какой сигнал получится на выходе?
148. Счетчик импульсов, который считает до 16, содержит сколько Т-триггеров?
149. Счетчик импульсов, который считает до 8, содержит сколько Т-триггеров?
150. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 8?
151. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 1?
152. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 5?
153. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 7?
154. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 12?
155. Каково состояние входов дешифратора, если на выходе вырабатывается сигнал, соответствующий десятичному числу 13?
156. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0111?
157. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 0110?
158. Какому числу соответствует состояние дешифратора на выходе, если на вход поданы сигналы 1001?

159. Двоичный эквивалент десятичного числа 18:
160. Шестнадцатеричный эквивалент двоичного числа 1111.

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Согласно учебному плану учреждения высшего образования на изучение дисциплины отведено всего 200 ч. (трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц), в том числе 102 ч. аудиторных занятий, из них лекции - 51 ч., практические занятия - 17 ч., лабораторные занятия - 34 ч.

Ниже представлены разделы учебной программы: содержание учебного материала, учебно–методическая карта дисциплины, список рекомендуемой литературы.

### СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Содержание лекционных занятий

#### Раздел I. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

##### Тема 1.1. Полупроводники и их свойства

Полупроводниковые материалы. Электропроводность полупроводников: собственная, примесная ( $p$ - и  $n$  типа).  $P$ - $n$  переход: образование; физические процессы; полная ВАХ, виды пробоя.

##### Тема 1.2. Полупроводниковые диоды

Выпрямительные диоды. Стабилитроны. Варикапы, фотодиоды, светодиоды, туннельные диоды. Их основные характеристики и параметры, условное графическое обозначение, применение.

##### Тема 1.3. Тиристоры

Тиристоры (динисторы, тринисторы, симисторы): структура, принцип работы; вольт-амперные характеристики и параметры, эквивалентные схемы, применение.

##### Тема 1.4. Биполярные транзисторы

Транзисторы биполярные ( $n$ - $p$ - $n$ ,  $p$ - $n$ - $p$ ). Структура, условное графическое обозначение, схемы включения транзистора. Основные характеристики транзистора для схемы включения с общим эмиттером и его  $h$ -параметры.

##### Тема 1.5. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы (ПТ) с управляющим  $p$ - $n$  переходом. Структура, условное графическое обозначение, принцип работы, основные характеристики и параметры. МДП или МОП-транзисторы с встроенным и индуцированным каналом, принцип работы, основные характеристики.

**Тема 1.6. Элементы электронных устройств. Полупроводниковые резисторы. Интегральные микросхемы. Оптоэлектронные приборы.**



Интегральные микросхемы (ИМС): пленочные, гибридные, полупроводниковые (особенности изготовления, достоинства и недостатки). Основные параметры. Маркировка и обозначение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Фотоэлектрические и светоизлучающие устройства. Конструкция оптронов, параметры и характеристики. Разновидности оптронов, структура, применение. Преимущества и недостатки. Назначение.

## **Раздел II. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА**

### **Тема 2.1. Однофазные неуправляемые выпрямители**

Структура источников вторичного питания. Однофазные выпрямители: однополупериодный, двухполупериодный с выводом средней точки трансформатора, мостовой. Основные параметры и соотношения для выбора трансформаторов, вентиля и нагрузки выпрямителей.

Сглаживающие фильтры: простые однозвенные, сложные составные, активные; коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания.

### **Тема 2.2. Трехфазные выпрямители**

Трехфазные выпрямители: схемы, принцип работы. Коэффициент пульсаций. Внешняя характеристика.

### **Тема 2.3. Стабилизаторы**

Стабилизаторы тока и напряжения: параметрический и компенсационный. Назначение, схемы, принцип работы.

### **Тема 2.4. Управляемые выпрямители**

Особенности выпрямителей мощных энергетических установок. Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Режимы прерывистого и непрерывного токов. Основные характеристики: регулировочные, внешние.

### **Тема 2.5. Инверторы. Импульсные источники питания**

Инверторы автономные и ведомые сетью. Принцип инвертирования. Схемы, особенности работы, применение. Структурная схема импульсного источника питания, назначение блоков, принцип работы. Схема для бесперебойного питания аппаратуры.

### **Тема 2.6. Усилители переменного сигнала**

Усилительный каскад на биполярном транзисторе. Устройство, принцип действия, назначение элементов схемы. Основные параметры и характеристики.

### **Тема 2.7. Обратные связи в усилителях**

Разновидности обратных связей и способы их организации. Влияние на работу усилителя.

### **Тема 2.8. Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов**

Схемы температурной стабилизации усилителей: эмиттерная и коллекторная температурная стабилизация. Классы усиления. Особенности режимов работы усилителей (классов усиления А, В, АВ, С).

### **Тема 2.9. Усилители мощности**

Общие сведения о многокаскадных усилителях, межкаскадные связи, параметры и характеристики.

Выходные каскады: однотактные и двухтактные, трансформаторные и бестрансформаторные схемы. Их параметры, достоинства и недостатки.

### **Тема 2.10. Усилители постоянного тока**

Принципы построения усилителей постоянного тока. Дрейф нуля в усилителях постоянного тока и методы его устранения. Балансные схемы в усилителях постоянного тока. Операционные усилители. Характеристики и параметры. Использование ОУ для выполнения математических операций: инвертирующий и неинвертирующий усилители, сумматор, интегратор, дифференциатор, разностный усилитель; их параметры и расчет. Импульсные устройства на ОУ: компаратор, триггер Шмита.

### **Тема 2.11. Избирательные усилители**

Особенности избирательных усилителей. Основные параметры и характеристики. Избирательные усилители с  $RC$ - и  $LC$ - цепями. Применение избирательных усилителей.

### **Тема 2.12. Генераторы гармонических колебаний**

Условия самовозбуждения генераторов.  $LC$ - и  $RC$ - автогенераторы. Принципы построения. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина. Стабилизация частоты. СВЧ генераторы.

## **Раздел III. ИМПУЛЬСНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА**

### **Тема 3.1. Представление информации в импульсной форме Генераторы импульсов**

Способы представления информации в импульсной форме. Виды и параметры импульсных сигналов. Простейшие формирователи импульсов, принцип работы.

Автоколебательные и ждущие мультивибраторы на транзисторах и интегральных микросхемах. Блокинг-генераторы. Генераторы линейно изменяющегося напряжения. Схемы, принцип работы, применение.

### **Тема 3.2. Логические элементы**

Логические переменные, логические функции, основные законы и тождества алгебры логики. Логические элементы (ЛЭ) И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, исключающее ИЛИ и т.п. Их микросхемная реализация (транзисторно-транзисторная, эмиттерно-связанная, КМДП-транзисторная логики и др.). Таблицы истинности, логические функции.

### **Тема 3.3. Триггеры**

Логические последовательностные элементы и устройства. Основные типы триггеров и их реализация: *RS*-, *D*-, *T*-, *JK*-триггеры (асинхронные и синхронные). Статические и динамические, одноктактные и двухтактные, асинхронные и синхронные триггеры. Схемы, принципы работы, временные диаграммы, таблицы истинности. Применение.

### **Тема 3.4. Счетчики и регистры**

Элементы памяти. Оперативное запоминающее устройство.

Двоичные, двоично-десятичные счетчики импульсов и счетчики с произвольным коэффициентом счета. Простые (суммирующие и вычитающие) и реверсивные счетчики.

Регистры памяти и сдвига. Последовательные и параллельные регистры. Временные диаграммы, обозначение ИМС, применение.

### **Тема 3.5. Комбинационные устройства**

Синтез и проектирование логических комбинационных устройств. Комбинационные логические схемы: шифратор, дешифратор, мультиплексор, демультиплексор, программируемая логическая матрица, сумматор; их реализация на ЛЭ. Таблицы состояний, устройство, обозначение, маркировка и примеры соответствующих ИМС.

### **Тема 3.6. Аналогово-цифровой и цифроаналоговый преобразователи.**

Классификация. Принцип цифро-аналогового преобразования. Многополюсные цифро-аналоговые преобразователи: схемы, принцип работы, применение. Принцип аналого-цифрового преобразования. Схемы аналого-цифровых преобразователей последовательного и параллельного типов.

### **Тема 3.7. Микропроцессорные системы и микропроцессоры**

Архитектура и структура микропроцессорной системы. Назначение основных ее блоков и их особенности. Понятие интерфейса.

Архитектура и структура микропроцессора. Назначение блоков и их функционирование. Прохождение и выполнение команд в микропроцессоре.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**очная форма получения высшего образования**

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<b>3 семестр</b>	<b>51</b>	<b>17</b>		<b>34</b>			
1	Полупроводниковые приборы							
1.1.	Полупроводники и их свойства	2						
1.2.	Полупроводниковые диоды	2	2		2			Защита лабораторной работы
1.3.	Тиристоры	2						
1.4	Биполярные транзисторы	2	2		2			Защита лабораторной работы
1.5	Полевые транзисторы	2						
1.6	Полупроводниковые резисторы. Интегральные микросхемы. Оптоэлектронные приборы	2			2			
2	Аналоговые устройства							
2.1	Однофазные неуправляемые выпрямители	2	2		2			Защита лабораторной работы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.2	Трехфазные выпрямители	2			2			Защита лабораторной работы
2.3	Стабилизаторы	2			2			Защита лабораторной работы
2.4	Управляемые выпрямители	2			2			Защита лабораторной работы
2.5	Инверторы. Импульсные источники питания	2						
2.6	Усилители переменного сигнала	2	2		2			Защита лабораторной работы
2.7	Обратные связи в усилителях	2						
2.8	Температурная стабилизация усилителей. Режимы работы усилительных каскадов	2						
2.9	Усилители мощности	2						
2.10	Усилители постоянного тока	2	2		4			Защита лабораторной работы
2.11	Избирательные усилители	2						
2.12	Генераторы гармонических колебаний	2						
3	Импульсные и цифровые устройства							
3.1	Представление информации в импульсной форме. Генераторы импульсов	2						
3.2	Логические элементы	2	2		2			Защита лабораторной работы
3.3	Триггеры	2	2		2			Защита лабораторной работы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.4	Счетчики и регистры	2			2			Защита лабораторной работы
3.5	Комбинационные устройства	2	3		2			Защита лабораторной работы
3.6	Аналогово-цифровой и цифроаналоговый преобразователи	2			2			
3.7	Микропроцессорные системы и микропроцессоры	3			4			
	Итого за семестр	51	17		34			Экзамен
	Всего аудиторных часов	102						

## Список литературы

### Основная литература

1. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. – Москва: КНОРУС, 2013 – 800с.
2. Бладыко, Ю.В. Сборник задач по электротехнике и электронике. Учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Ю.В.Бладыко, Т.Т.Розум, Ю.А.Куварзин [и др.]; под ред. Ю.В.Бладыко. – Мн.: Выш.шк., 2014. – 478 с.
3. Матвеевко, И.П. Электроника: электронный учебно-методический комплекс/ И.П. Матвеевко, Т.А. Костикова. – Государственный регистр информационных ресурсов. Регистрационное свидетельство №1511606305 от 14.01.2016 г.
4. Электроника: практикум: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования / Ю. В. Бладыко. - Минск: ИВЦ Минфина, 2016. – 188с.
5. Матвеевко, И.П. Основы электроники и микропроцессорной техники / Лабораторный практикум. И.П. Матвеевко. - Центр учебной книги и средств обучения РИПО, Минск, РИПО, 2015 – 131с.
6. Лачин, В.И. Электроника / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. 7-е издание. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 704с.

### Дополнительная литература

1. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
2. Бабич, Н.П. Основы цифровой схемотехники: Учебное пособие / Н.П. Бабич, И.А.Савелов. – Москва: Издательский дом «Додека-XXI», 2007. – 480с.
3. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 768 с.
4. Прянишников, В.А. Электроника: курс лекций / В.А. Прянишников. – Санкт-Петербург, Москва: Корона-Принт: Бином-Пресс, 2006. – 416с.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**Валентная связь** - взаимное притяжение атомов, приводящее к образованию молекул и кристаллов. Принято говорить, что в молекуле или в кристалле между соседними атомами существуют химическая связь. Валентность атома показывает число связей, образуемых данным атомом с соседними атомами.

**Акцепторные примеси** - атомы химических элементов, внедренные в кристаллическую решетку полупроводника и создающие дополнительную концентрацию дырок. Акцепторными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с большей, чем у примеси, валентностью.

**Донорные примеси** - атомы химических элементов: - внедренные в кристаллическую решетку полупроводника; и - создающие дополнительную концентрацию свободных электронов. Донорными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с меньшей, чем у примеси, валентностью.

**Диффузия** - явление самопроизвольного проникновения одного вещества в другое вещество, обусловленное тепловым движением атомов, молекул, ионов и других частиц. Скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры

**Объемный заряд** - атом примеси, потерявший один электрон, превращается в неподвижный положительный ион, связанный в узле кристаллической решетки, т.е. происходит ионизация атомов примеси. Положительный заряд иона примеси компенсируется отрицательным зарядом свободного электрона, и слой полупроводника с примесью остается электрически нейтральным, если свободный электрон не уходит из этого слоя. В случае ухода электрона в другие слои полупроводникового кристалла неподвижные заряды ионов примеси образуют нескомпенсированный положительный объемный заряд.

**Катод** – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с отрицательным полюсом источника электрического тока.



**Анод** – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с положительным полюсом источника электрического тока.

**Инжекционная электролюминесценция** - возникает при прямом включении  $p$  -  $n$  – перехода. В  $n$ -область инжектируются избыточные дырки, а в  $p$  - область — электроны, т. е. часть носителей проникает в переход и прилегающие к нему области и рекомбинирует с носителями заряда противоположного знака, испуская при этом кванты света. Рекомбинация может происходить также с участием уровней примеси. При рекомбинации электронов и дырок в этом слое возникает свечение. Цвет свечения при инжекционной электролюминесценции зависит от материала-основы и природы примесей.

**Внутренний фотоэффект** в кристаллических полупроводниках и некоторых диэлектриках состоит в том, что под действием света электропроводимость этих веществ увеличивается за счет возрастания в них числа свободных носителей тока - электронов проводимости, то есть происходит переход электрона из одной энергетической зоны (валентной) в другую (проводимости)

**Внешний фотоэффект** – испускание электронов из одной среды в другую под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

**Динатронный эффект** – изменение тока в электровакуумных приборах, обусловленное возникновением вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов под воздействием электронной бомбардировки.

**Дрейф носителей заряда** – движение электронов и дырок под воздействием электрического поля.

**Инжекция электронов** – введение (вбрасывание) избыточных электронов в полупроводник под воздействием электрического поля.

**Эмиттер** – (лат. emittere испускать, излучать)1) излучатель;2) электрод, который является источником электронов при воздействии внешних причин (нагревание, электрическое поле и т. д.).

**Коллектор** – (от позднелат. collector собиратель), электрод биполярного транзистора, принимающий носители заряда

**Эмиттерный переход** – *p-n* переход в транзисторе между эмиттером и базой.

**Коллекторный переход** – *p-n* переход в транзисторе между базой и коллектором.

**Каскад** – схема одноступенчатого усилителя, построенная на одном усилительном элементе (лампа, биполярный или полевой транзистор).

**ОЭ, ОК, ОБ** – включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой.

**ОИ, ОС, ОЗ** – включение полевого транзистора по схеме с общим истоком, общим стоком, общим затвором.

**ОК, ОА, ОС** – включение лампы по схеме с общим катодом, общим анодом, общей сеткой.