

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение

Высшего профессионального образования

"Пензенский государственный университет"

А.И. Нефедьев

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Пенза 2007

УДК 621.382(075.32)

ББК 32.85

Н58

Рецензент:

зам. начальника УМО, к.т.н., доцент А.И. Герасимов

Нефедьев А.И. Электроника и микропроцессорная техника: учебно-методическое пособие. – Пенза: ПГУ, 2007. – 139с.

139с. : 5 таб., 87 ил. - Библиогр.: 9 назв.

Рассмотрены устройство и принцип работы основных полупроводниковых приборов и широко используемые на их основе устройства аналоговой и цифровой электроники.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям 140607, 220400, 230202, 073000.

## **Введение**

Современный этап развития техники характеризуется все большим проникновением электроники во все сферы жизни и деятельности людей. По данным американской статистики до 80% от объема всей промышленности занимает электроника. Роль электроники трудно переоценить, и она все время возрастает в связи с применением микропроцессорной техники для обработки измерительной информации и для управления различными технологическими процессами.

Характерной чертой развития электроники сегодня является последовательное освоение широкого спектра электромагнитных колебаний (инфракрасного, видимого, рентгеновского и гамма).

Развитие электроники можно хорошо проследить по развитию электронных устройств.

Выделяют четыре поколения электронных устройств:

1 поколение (1904-1950гг). У устройств первого поколения основу элементной базы составляли электровакуумные приборы. Устройства с применением электровакуумных приборов имели большие габариты и массу, а также низкую плотность монтажа.

2 поколение (1950- начало 1960-х годов). Для устройств второго поколения основой элементной базы являлись дискретные полупроводниковые приборы. Сборка электронных устройств производилась с применением печатного монтажа.

3 поколение (1960-1980гг). Третье поколение характеризуется бурным развитием микроэлектроники. Основой элементной базы являлись интегральные схемы и микросборки. Это привело к значительному уменьшению массы электронных устройств и к уменьшению доли ручного труда при изготовлении электронных устройств.

4 поколение (с 1980 по настоящее время). Четвертое поколение характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств на базе применения больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС), часто представляющих собой отдельное готовое устройство или функциональный блок.

Сфера применения электроники непрерывно расширяется. Электронные микропроцессорные устройства используются для управления различными механизмами, в том числе широко используются в автомобилях.

Дальнейшее совершенствование электроники направлено на увеличение плотности интегральных схем, увеличение их быстродействия, снижение потребляемой мощности.

## **1 Физические свойства полупроводников**

К полупроводникам относят вещества, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Отличительным признаком полупроводников является сильная зависимость их электропроводности от концентрации примесей, температуры, воздействия светового и ионизирующего излучений.

В создании электрического тока в веществе могут принимать участие только подвижные носители электрических зарядов. Поэтому его электропроводность тем больше, чем больше в единице объема этого вещества находится подвижных носителей электрических зарядов. Например, в металлах практически все валентные электроны, являющиеся носителями элементарного отрицательного заряда, свободны, что является основой их высокой электропроводности. В диэлектриках и полупроводниках свободных носителей значительно меньше, поэтому их удельное сопротивление велико.

Характерной особенностью полупроводников является ярко выраженная температурная зависимость удельного электрического сопротивления. С повышением температуры оно уменьшается на 5...6 % на градус, а у металлов удельное электрическое сопротивление с повышением температуры растет на десятые доли процента на градус. Удельное сопротивление полупроводника также резко уменьшается при введении в него незначительного количества примеси.

В электронике широкое применение получили германий (*Ge*) и кремний (*Si*) — элементы 4-й группы периодической системы, в современных сверхвысокочастотных приборах часто используются также арсенид галлия (*GaAs*) и фосфид индия (*InP*).

### **1.1 Полупроводники с собственной электропроводностью**

Переход электрона из ковалентной связи сопровождается появлением двух электрически связанных атомов единичного положительного заряда, получившего название *дырки*, и свободного электрона. Фактически дырку можно считать подвижным свободным носителем элементарного положительного заряда, а заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи можно представить как перемещение дырки. Процесс образования пар электрон-дырка называют генерацией свободных носителей заряда.

Из-за постоянного протекания процессов генерации и рекомбинации носителей зарядов при заданной температуре в полупроводнике устанавливается равновесное состояние, при котором присутствует некоторая концентрация свободных электронов ( $n_i$ ) и дырок ( $p_i$ ). В чистом полупроводнике концентрации носителей при увеличении температуры возрастают по экспоненциальному закону.

Равенство концентраций свободных электронов  $n_i$  и дырок  $p_i$  показывает, что такой полупроводник обладает одинаковыми электронной и дырочной электропроводностями и называется полупроводником с собственной электропроводностью.

## **1.2 Полупроводники с электронной электропроводностью**

При введении в 4-валентный полупроводник примесных 5-валентных атомов ( $P$ ,  $Sb$ ) атомы примесей замещают основные атомы в узлах кристаллической решетки. Четыре электрона атома примеси вступают в связь с четырьмя валентными электронами соседних атомов основного полупроводника. Пятый валентный электрон слабо связан со своим атомом и при сообщении ему незначительной энергии активации, отрывается от атома и становится свободным. Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными.

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов превышает концентрацию дырок, называются полупроводниками с электронной электропроводностью или полупроводниками  $n$ -типа.

Подвижные носители заряда, преобладающие в полупроводнике, называют основными, а те носители заряда, которые находятся в меньшем количестве, называются неосновными для данного типа полупроводника. В полупроводнике  $n$ -типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными – дырки.

### **1.3 Полупроводники с дырочной электропроводностью**

Если в кристалле 4-валентного элемента часть атомов замещена атомами 3-валентного элемента ( $Ga$ ,  $In$ ), то для образования четырех ковалентных связей у примесного атома не хватает одного электрона. Этот электрон может быть получен от атома основного элемента полупроводника за счет разрыва ковалентной связи. Разрыв связи приводит к появлению дырки. Примеси, захватывающие валентные электроны, называют акцепторными или акцепторами. Полупроводники, в которых основными носителями заряда являются дырки, а неосновными – электроны, носят название полупроводников с дырочной электропроводностью или полупроводников  $p$ -типа.

### **1.4 Вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода**

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник, металл-диэлектрик-полупроводник. Переход между полупроводниками  $n$ -типа и  $p$ -типа называется электронно-дырочным или  $p$ - $n$ -переходом. Возможны различные исполнения  $p$ - $n$ -

перехода, отличающиеся: резкостью и уровнем изменения концентраций доноров и акцепторов на границе перехода, размером и формой самого перехода, а также наличием каких-либо неоднородностей в переходе. Все эти факторы оказывают существенное влияние на свойства  $p$ - $n$ -перехода и используются для придания реальным полупроводниковым приборам тех или иных характеристик.

Теоретическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) электронно-дырочного перехода для прямого включения приведена на рисунке 1 и описывается уравнением Эберса-Молла:

$$I_{\text{пр}} = I_s(e^{U/\varphi_T} - 1),$$

где:  $I_s$  – тепловой ток (ток дрейфа неосновных носителей),  $\varphi_T = kT/q$  — тепловой потенциал,  $U$  — напряжение на переходе.

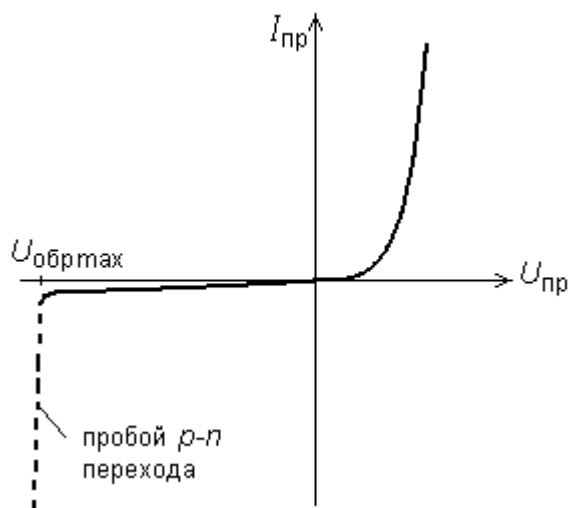


Рисунок 1

Тепловой ток зависит от типа материала перехода, степени легирования материала примесями и от температуры. Теоретически тепловой ток перехода, изготовленного на основе кремния, на 5-6 порядков меньше теплового тока перехода, изготовленного на основе германия.

Ток генерации зависит от числа генерируемых носителей. При увеличении обратного напряжения ток генерации увеличивается.

Возрастанию обратного тока способствуют также токи утечки.



При некотором обратном напряжении ( $U_{\text{обр max}}$ ) наблюдается резкое возрастание обратного тока. Это явление называют пробоем перехода. Различают четыре вида пробоев: туннельный, лавинный, тепловой и поверхностный. Туннельный и лавинный пробой представляют собой разновидности электрического пробоя и связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе. Тепловой пробой определяется перегревом перехода. Поверхностный пробой связан с поверхностным зарядом.

## 2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами. В качестве выпрямляющего электрического перехода используется электронно-дырочный  $p$ - $n$ -переход, разделяющий  $p$ - и  $n$ -области кристалла полупроводника.

ВАХ диода совпадает с ВАХ  $p$ - $n$ -перехода (рисунок 1).

Условное графическое обозначение полупроводникового диода приведено на рисунке 2,а. На рисунке 2,б приведена структура  $p$ - $n$ -перехода полупроводникового диода.

Если к выводам диода приложить прямое напряжение  $U$ , то создаваемое им электрическое поле  $E$  будет компенсировать  $E_{\text{зар}}$  и в  $n$ -область по мере возрастания напряжения  $U$  будет инжектироваться все большее количество дырок (неосновных носителей заряда для  $n$ -области), которые и образуют прямой ток диода  $I$ . Такое включение диода называют прямым.

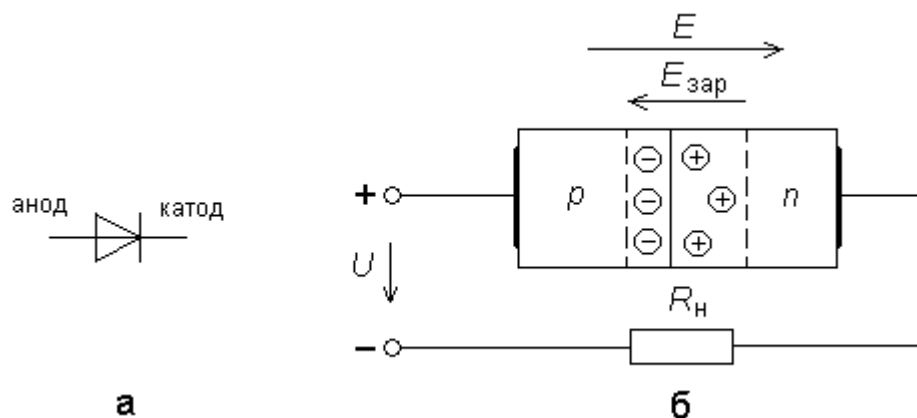


Рисунок 2

Если к выводам диода приложить обратное напряжение ( $-U$ ), то создаваемое им электрическое поле  $-E$ , совпадая по направлению с  $E_{\text{зар}}$ , повышает потенциальный барьер и препятствует переходу основных носителей заряда в соседнюю область. Таким образом, при обратной полярности напряжения  $U$  тока через диод не будет, и такое включение диода называют обратным.

## 2.1 Классификация диодов по назначению

По назначению диоды классифицируются следующим образом:

1. Выпрямительные.
2. Импульсные.
3. СВЧ-диоды.
4. Стабилитроны (стабисторы).
5. Варикапы.
6. Туннельные диоды.
7. Излучающие диоды.
8. Фотодиоды.

2.1.1 Выпрямительный диод предназначен для выпрямления низкочастотного переменного тока, и используются в источниках питания. Под выпрямлением понимают преобразование двухполярного тока в однопо-

лярный. Поскольку выпрямительные диоды требуют больших величин выпрямленных токов, то все они имеют большую площадь  $p$ - $n$ -перехода, а, следовательно, и большие значения обратного тока  $I_{обр}$  и емкости  $p$ - $n$  перехода  $C_{p-n}$ .

Основные параметры выпрямительных диодов:

- $I_{пр\ ср\ max}$  – максимально допустимый средний прямой ток. Превышение его вызывает разрушение диода от перегрева;
- $U_{пр}$  – прямое напряжение на  $p$ - $n$ -переходе при заданном прямом токе. Для германиевых диодов  $U_{пр} = 0,3 \dots 0,5В$ , для кремниевых  $U_{пр}=0,7 \dots 1В$ ;
- $I_{обр}$  – величина обратного тока при определённом обратном напряжении;
- $U_{обр}$  – максимально допустимое обратное напряжение, после которого наступает пробой диода;
- $P_{max}$  – предельно допустимая мощность, рассеиваемая диодом;
- $f_{max}$  – предельная частота выпрямления.

2.1.2 Импульсный диод предназначен для работы с импульсными сигналами (быстро изменяющимися во времени). Они широко применяются в устройствах вычислительной и измерительной техники, в широкополосных ограничителях, детекторных схемах и т.д.

Факторами, ограничивающими скорость переключения диода являются:

- а) ёмкость.
- б) скорость диффузии.
- в) время рассасывания неосновных носителей заряда.

Основные параметры импульсных диодов аналогичны параметрам выпрямительных диодов, кроме того, имеют специфические, учитывающие быстродействие переключения: ёмкость диода и время восстановления обратного сопротивления диода, которое определяется как время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности при-

ложенного напряжения достигает своего стационарного значения. В импульсных диодах высокая скорость переключения достигается уменьшением площади  $p$ - $n$ -перехода, что снижает величину ёмкости диода.

2.1.3 Сверхвысокочастотный диод (СВЧ диод) предназначен для преобразования и обработки сверхвысокочастотного сигнала (до десятков и сотен гигагерц). Сверхвысокочастотные диоды широко применяются в устройствах генерации и усиления электромагнитных колебаний СВЧ диапазона, умножения частоты, модуляции, регулирования и ограничения сигналов и т. п. К этой группе диодов относятся смесительные (используются для получения сигнала суммы или разности двух частот), детекторные (выделение постоянной составляющей СВЧ сигнала) и переключаемые (управление уровнем мощности сверхвысокочастотного сигнала). Условное графическое обозначение импульсных и СВЧ диодов аналогично обозначению выпрямительных диодов.

2.1.4 Стабилитрон и стабистор – приборы на основе  $p$ - $n$ -перехода, предназначенные для стабилизации напряжения. Стабилитрон – полупроводниковый диод, ВАХ которого имеет участок малой зависимости приложенного напряжения от тока, протекающего через него. Такой участок лежит на обратной ветви ВАХ и возникает в результате электрического пробоя диода. Условное графическое обозначение стабилитрона и его ВАХ приведены на рисунке 3.

Основные параметры стабилитронов:

- $U_{\text{ст.ном}}$  – номинальное напряжение стабилизации, при протекании номинального тока стабилизации  $I_{\text{ст.ном}}$  ;
- $\Delta U_{\text{ст}}$  – максимально допустимое отклонения напряжения стабилизации от номинального;
- $I_{\text{ст.ном}}$  – номинальный ток стабилизации,
- $I_{\text{ст.мин}}$  ,  $I_{\text{ст.мах}}$  – минимальный и максимальный допустимый постоянный

ток стабилизации;

–  $R_g$  – дифференциальное сопротивление на рабочем участке ВАХ;

–  $\alpha_{ст} = \Delta U_{ст} / (U_{ст ном} \Delta T)$  – температурный коэффициент напряжения,

где:  $\Delta U_{ст}$  – отклонение напряжения  $U_{ст}$  от номинального значения

$U_{ст ном}$  при изменении температуры в интервале  $\Delta T$ .

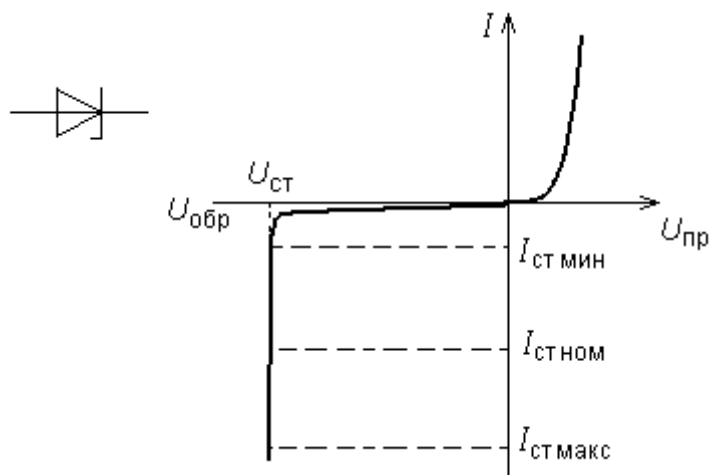


Рисунок 3

Напряжение стабилизации стабилитронов, выпускаемых отечественной промышленностью, лежит в диапазоне от 3,3 до 180 В. Номинальный ток стабилизации для разных типов стабилитронов лежит в пределах от 1 до 500 мА.

Стабистор представляет собой диод, смещённый в прямом напряжении и предназначен для стабилизации напряжения. Стабисторы используются для получения стабилизированных напряжений менее 3,2 В.

2.1.5 Варикап — полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости зарядной емкости  $C_{зар}$  от значения приложенного обратного напряжения. Это позволяет применять варикап в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. Основной характеристикой варикапа служит вольт-фарадная характеристика – зависимость емкости варикапа  $C_v$  от значения приложенного обратного напряже-

ния. Условное графическое обозначение варикапа приведено на рисунке 4,а , а его вольт-фарадная характеристика – на рисунке 4,б.

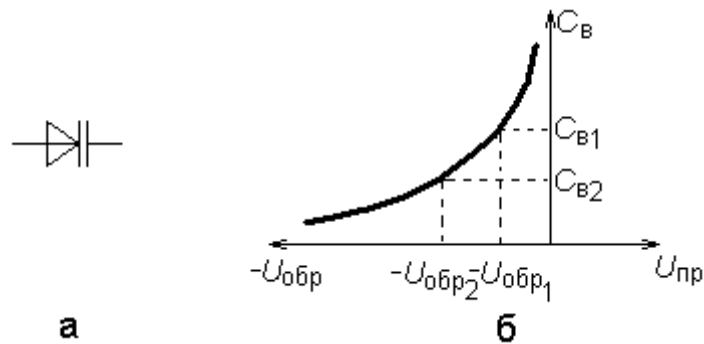


Рисунок 4

Основными параметрами варикапа являются:

- $C_B$  – емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении;
- $K_C$  – коэффициент перекрытия по емкости, равный отношению емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения:

$$K_C = C_{B \max} / C_{B \min}, \quad (K_C = 2 \dots 20);$$

- температурный коэффициент емкости:  $\text{ТКЕ}_B = \Delta C_B / (C_B \Delta T)$ ,

где:  $\Delta C_B / C_B$  – относительное изменение емкости варикапа при изменении температуры  $\Delta T$  окружающей среды;

- добротность  $Q = X_B / r_{\pi}$ ,

где:  $X_B$  – реактивное сопротивление варикапа,

$r_{\pi}$  – сопротивление активных потерь.

В выпускаемых промышленностью варикапах значение емкости  $C_B$  может изменяться от единиц до сотен пикофарад, а добротность – от нескольких десятков до нескольких сотен. Максимально допустимые напряжения находятся в диапазоне от 25 до 120В. Варикапы обычно используются для электронной перестройки резонансной частоты колебательных контуров радиоприемников.

2.1.6 Туннельный диод – диод с внутренней положительной обратной связью по напряжению и хорошими динамическими свойствами. Условное графическое обозначение туннельного диода приведено на рисунке 5,а, а его ВАХ – на рисунке 5,б.

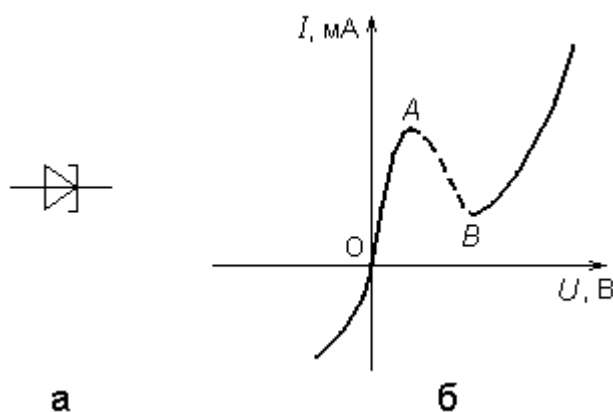


Рисунок 5

ВАХ имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления (участок АБ на рисунке). Участок с отрицательным сопротивлением позволяет использовать туннельные диоды для усиления, переключения и генерации электрических сигналов.

2.1.7 Излучающий диод — полупроводниковый диод, излучающий из области *p-n*-перехода кванты энергии. Излучение испускается через прозрачное стеклянное окно, размещенное в корпусе диода, или через прозрачный пластмассовый корпус диода.

По характеристике излучения излучающие диоды делятся на две группы: диоды с излучением в видимой области спектра, получившие название светодиоды; диоды с излучением в инфракрасной области спектра, получившие название ИК-диоды. Принцип действия диодов одинаков и базируется на самопроизвольной рекомбинации носителей заряда при прямом токе через выпрямляющий электрический переход. Рекомбинация носителей заряда сопровождается освобождением кванта энергии. Спектр

частот излучения определяется типом исходного полупроводникового материала.

Основными материалами для изготовления светодиодов служат фосфид галлия, арсенид-фосфид галлия, карбид кремния. Исходными материалами для изготовления ИК-диодов являются арсенид и фосфид галлия.

Условное графическое обозначение излучающих диодов показано на рисунке 6.

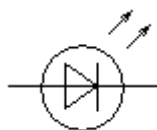


Рисунок 6

Светодиоды применяют в качестве световых индикаторов, а ИК-диоды — в качестве источников излучения в оптоэлектронных устройствах.

8. Фотодиод — полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на использовании внутреннего фотоэффекта — генерации в полупроводнике свободных носителей заряда под действием квантов света (фотонов).

Фотодиод используют для преобразования светового излучения в электрический ток. Условное графическое обозначение фотодиода его семейство ВАХ при различных значениях светового потока  $\Phi$  приведены на рисунке 7.

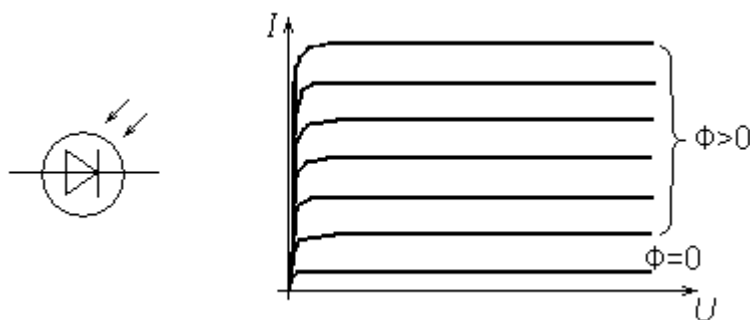




Рисунок 7

### 3. Транзисторы и тиристоры

Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими электрическими переходами и тремя (или более) выводами, и обладающий усилительными свойствами. Транзисторы предназначены для усиления и генерации электрических сигналов.

В зависимости от способа управления транзисторы делятся на две группы:

#### 1) Биполярные транзисторы:

В таких транзисторах используются носители заряда двух типов: электроны и дырки. Управление движением зарядов в этих транзисторах осуществляется током.

#### 2) Полевые (униполярные) транзисторы:

В образовании выходного тока в таких транзисторах принимают участие носители заряда одного знака (электроны или дырки). Управление движением зарядов в этих транзисторах осуществляется напряжением.

### 3.1 Биполярные транзисторы

На рисунке 8 приведено условное графическое обозначение двух типов биполярных транзисторов:  $n-p-n$  и  $p-n-p$ .

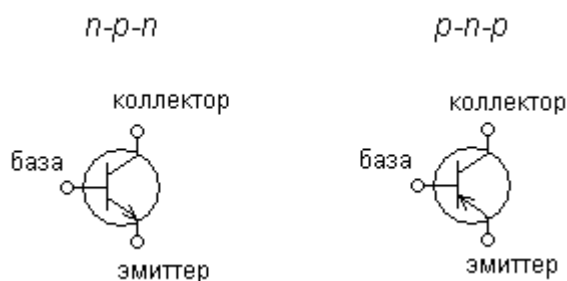


Рисунок 8

### 3.2 Принцип работы биполярного транзистора

Физическая модель биполярного транзистора и схема его включения в активном режиме приведены на рисунке 9.

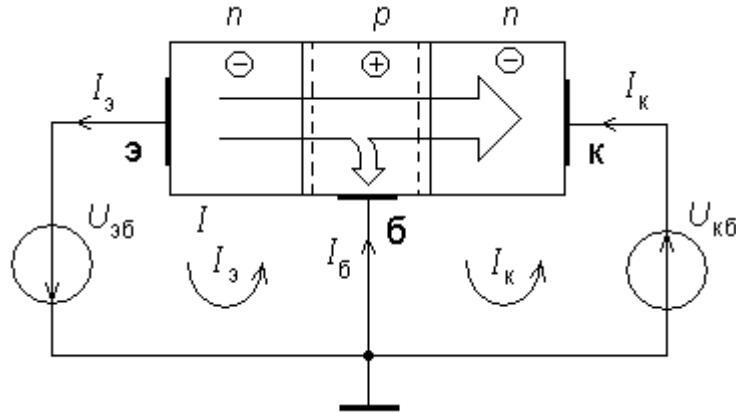


Рисунок 9

Эмиттер – выполнен из сильно легированного полупроводника и является инжектором носителей заряда для области базы. База слабо легирована примесями. Ширина базы много меньше диффузионной длины. Коллектор сильно легирован примесями и предназначен для экстракции (поглощения) носителей зарядов, инжектируемых эмиттером.

При работе в активном режиме полярности источников напряжения  $U_{зб}$ ,  $U_{кб}$  выбираются так, что эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный переход – в обратном направлении.

Основные соотношения токов в биполярном транзисторе:

1.  $I_э = I_к + I_б$ .

2.  $I_б = \alpha I_э + I_{ко}$ ,

3.  $I_к = \beta I_б$ .

где:  $I_б$  – ток базы,

$I_к$  – ток коллектора,

$I_э$  – ток эмиттера,

$\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера ( $\alpha = I_к/I_э$ ,  $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ ),

$\beta$  – коэффициент передачи тока базы,

$I_{к0}$ - собственный тепловой ток коллекторного перехода.

### 3.3 Схемы включения биполярного транзистора

Различают три схемы включения транзистора:

1) С общей базой ( $\alpha = I_k/I_3 \leq 1$ ) (рисунок 10):

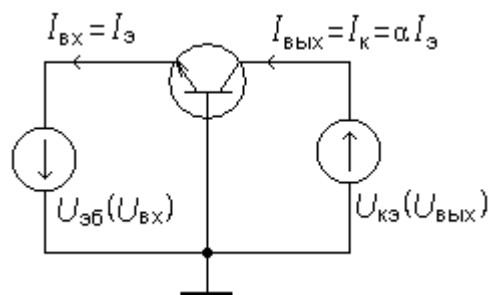


Рисунок 10

2) С общим эмиттером ( $\beta = I_k/I_б >> 1$ ) (рисунок 11):

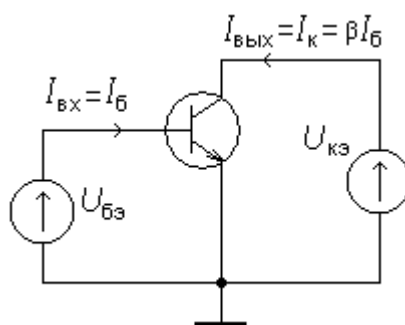


Рисунок 11

3) С общим коллектором (рисунок 12):

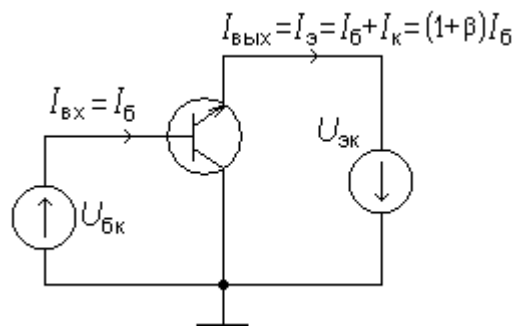


Рисунок 12

При включении с ОБ транзистор усиливает входной сигнал по напряжению и мощности, но имеет наименьшее входное и наибольшее выходное сопротивления, а также коэффициент усиления по току меньше единицы.

При включении с ОК транзистор обладает наибольшим входным и наименьшим выходным сопротивлениями, и коэффициентом усиления по току и мощности, большим единицы. Коэффициент усиления по напряжению меньше единицы.

При включении с ОЭ транзистор имеет промежуточные (между ОБ и ОК) входное и выходное сопротивления, усиливает сигнал по напряжению и по току, и как следствие, позволяет получить наибольшее усиление мощности.

Все эти характеристики учитываются при проектировании электронных устройств.

### **3.4 Режимы работы транзистора**

В зависимости от величины и полярности напряжений между выводами транзистора различают четыре режима работы транзистора:

1) Активный режим (нормальный, усилительный).  $I_{\text{блх}} = kI_{\text{вх}}$ ,  $k$  – коэффициент передачи по току. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный переход – в прямом направлении. Этот режим работы транзистора соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальные искажения усиленного сигнала. Такой режим используется в усилителях и генераторах электрических сигналов.

2) Режим отсечки коллекторного тока.

Эмиттерный и коллекторный переходы смещены в обратном направлении. В коллекторной цепи ток транзистора в режиме отсечки практиче-

ски равен нулю  $I_k = I_{k0}$  (где  $I_{k0}$  – тепловой ток коллекторного, обратного смещенного перехода). Режим отсечки используется для размыкания цепей передачи сигналов.

### 3) Режим насыщения.

Эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Режимы отсечки и насыщения применяется в ключевых схемах.

### 4) Инверсный режим.

Эмиттерный переход смещен в обратном, а коллекторный переход – в прямом направлении. Входным током является ток коллектора, а выходным – ток эмиттера. Такой режим используется в цифровых и логических схемах, а также в схемах двунаправленных переключателей.

## 3.5 Вольтамперные характеристики биполярного транзистора

Входная и выходная вольтамперные характеристики биполярного транзистора представляют собой зависимости токов от напряжений на выводах биполярного транзистора, представленные в виде семейства графиков.

Входная ВАХ биполярного транзистора  $I_b = f(U_{бэ})$  для транзистора, включенного по схеме с ОЭ приведена на рисунке 13,а, а выходная ВАХ  $I_k = f(U_{кэ})$  – на рисунке 13,б.

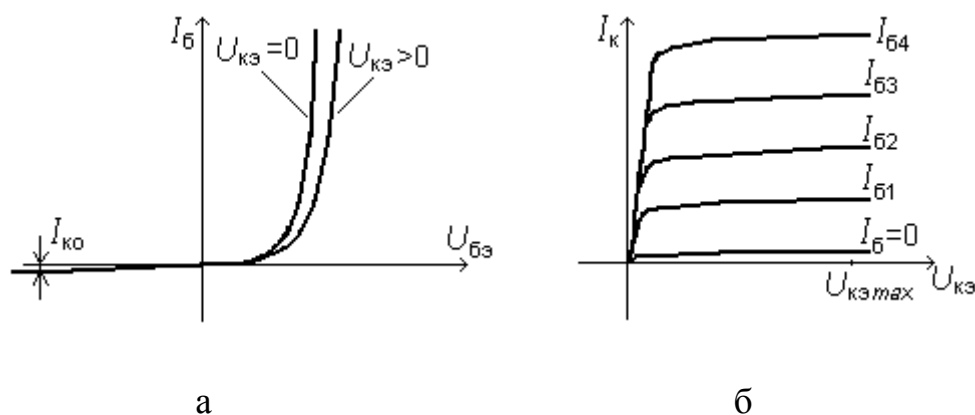


Рисунок 13

Температура оказывает существенное влияние на параметры и характеристики транзистора. Наиболее сильно она влияет на тепловой ток коллекторного перехода, который с повышением температуры значительно увеличивается.

### 3.6 Полевые транзисторы

Полевой транзистор – полупроводниковый усилительный прибор, управляемый напряжением (электрическим полем, отсюда и название – полевой), осуществляющим изменение площади поперечного сечения проводящего канала, в результате чего изменяется выходной ток транзистора. Управление электрическим полем предполагает отсутствие статического входного тока, что позволяет уменьшить мощность, требуемую для управления транзистором. Полевой транзистор можно сравнить с переменным сопротивлением, управляемым напряжением.

Управляющим электродом у полевых транзисторов является затвор. Напряжение, приложенное к нему, позволяет управлять величиной сопротивления между истоком и стоком. Большинство полевых транзисторов имеет симметричную структуру, что позволяет менять местами сток и исток.

### 3.7 Устройство и принцип работы полевого транзистора

Транзистор состоит из слаболегированного полупроводника  $n$ -типа, выполненного в виде тонкой пластинки или стержня (рисунок 14). На каждую из боковых граней канала наносится полупроводник  $p$ -типа, представляющий собой затвор. Торцы пластины  $n$ -типа снабжены электродами. Один из выводов (каналов) – исток (соединяется с общей точкой схемы), а другой – сток. На сток подают напряжение такой полярности, чтобы основные носители канала двигались к стоку, то есть в  $n$ -канальном «+», а в  $p$ -канальном – «-». Между затвором  $p^+$  и каналом  $n$  образуется  $p$ - $n$ -переход, в основном располагающийся в области каналов, поскольку он слабо легирован. На затвор относительно истока подают управляющее напряжение такой полярности, чтобы  $p$ - $n$ -переход был смещен в обратном направлении. При изменении направления в затворе, изменяется ширина  $p$ - $n$ -перехода области, объединенной носителями зарядов, а вместе с этим и ширина проводящей части канала. В результате изменяется сопротивление «сток-исток», а, следовательно, и ток стока.

В полевом транзисторе с объемным каналом площадь поперечного сечения канала меняется за счет изменения площади обедненного слоя обратнo включенного  $p$ - $n$ -перехода.

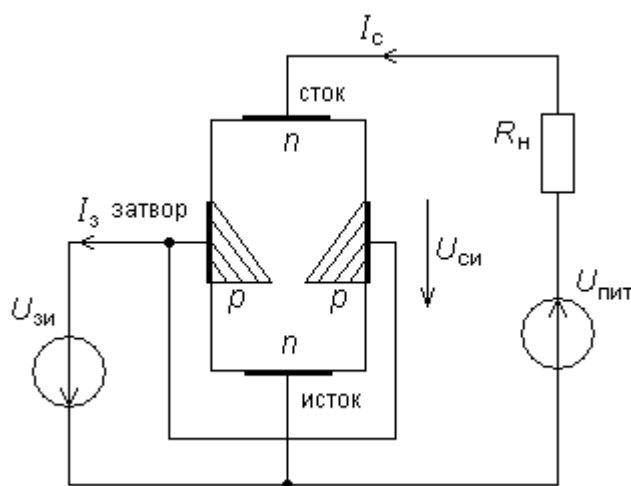


Рисунок 14

На  $p$ - $n$ -переход (затвор – исток) подается обратное напряжение  $U_{зи}$ . При его уменьшении глубина обедненного слоя (заштрихованная область) возрастает, а токопроводящее сечение канала сужается. При этом увеличивается сопротивление канала, и, следовательно, снижается выходной ток  $I_c$  транзистора.

Статические ВАХ  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом представлены на рисунке 15.

$I_c = f(U_{\tilde{н}Э})|_{U_{сЭ}=\tilde{Nonst}}$  - выходная ВАХ,  $I_c = f(U_{сЭ})|_{U_{нЭ}=\tilde{Nonst}}$  - передаточная.

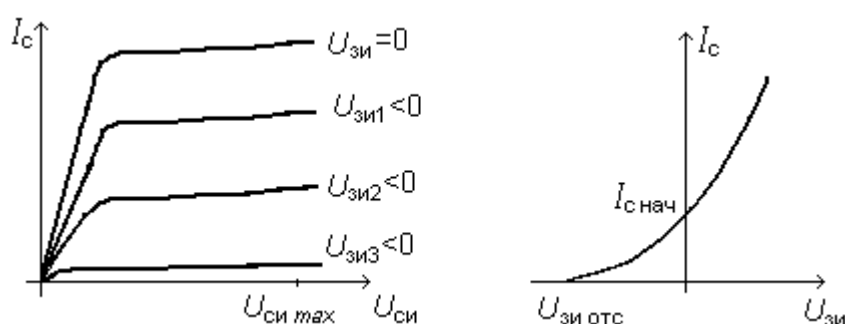


Рисунок 15

Выходную ВАХ полевого транзистора иногда называют стоковой. Передаточная характеристика характеризует процесс управления током стока при помощи входного напряжения.

### 3.8 Полевые транзисторы с изолированным затвором

В полевых транзисторах с изолированным затвором (МДП-транзисторах) металлический затвор изолирован от токопроводящего канала, образованного при поверхностном слое полупроводника, слоем диэлектрика. Принцип действия МДП-транзистора основан на управлении пространственным зарядом канала через слой диэлектрика. При изготовлении такого транзистора канал не создаётся, то есть области стока и истока отделены друг от друга. Однако при подаче на затвор положительного напряжения под действием поля в приповерхностной области затвора по-



является канал за счёт электронов, втягиваемых в эту область из объёма подложки и областей стока и истока, то есть канал индуцируется электрическим полем.

В зависимости от способа создания канала, МДП-транзисторы бывают двух видов:

- 1) МДП-транзисторы с встроенным каналом. В них канал создаётся при изготовлении транзистора.
- 2) МДП-транзистор с индуцированным каналом.

Основными параметрами, характеризующими полевой транзистор как нелинейный элемент, являются:

- Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_u = \mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи} ;$$

- Крутизна (определяется по передаточной характеристике):

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} \quad \text{при } I_c = const;$$

Крутизна  $S$  передаточной характеристики отражает степень влияния входного напряжения на выходной ток, т. е. эффективность управляющего действия затвора, и составляет 1 ... 5 мА/В.

- Дифференциальное выходное (внутреннее  $R_i$ ) сопротивление:

$$R_{вых} = R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_c \quad \text{при } U_{зи} = const;$$

- Дифференциальное сопротивление участка затвор – сток:

$$R_{зс} = \Delta U_{зс} / \Delta I_c .$$

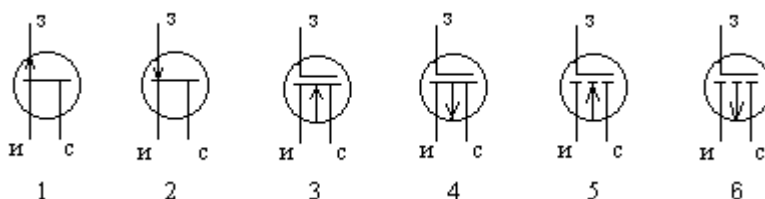
Дифференциальное сопротивление учитывает обратную связь между выходом и входом полевого транзистора.

Основными преимуществами полевого транзистора являются его большое входное сопротивление по постоянному току, большая температурная стабильность характеристик и высокая технологичность.

Условные графические обозначения полевых транзисторов приведены на рисунке 16.

Полевые транзисторы обладают рядом существенных преимуществ над биполярными:

- 1) Имеют высокое входное сопротивление. ( $10^6 \div 10^8$  Ом для транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом,  $10^{10} \div 10^{12}$  Ом – для МДП транзисторов).
- 2) Устойчивы к воздействию ионизирующего излучения.
- 3) Способны работать при низких и высоких температурах.



- 1 – полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и  $n$ -каналом;  
 2 – полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и  $p$ -каналом;  
 3 – МДП транзистор с встроенным  $n$ -каналом; 4 – полевой транзистор с встроенным  $p$ -каналом; 5 – МДП транзистор с индуцированным  $n$ -каналом; 6 – МДП-транзистор с индуцированным  $p$ -каналом.

Рисунок 16

- 4) Обладают малым уровнем собственного шума.
- 5) Имеют малую площадь, занимаемую на поверхности полупроводника, что позволяет на их основе изготавливать интегральные схемы с высокой степенью интеграции.

### 3.9 Биполярные транзисторы с изолированным затвором

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*- транзисторы, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) являются гибридными полупроводниковыми приборами. В таких транзисторах совмещены два способа управления электрическим током – управление электрическим полем (характерно для полевых транзисторов), и управление инжекцией носителей

заряда (характерно для биполярных транзисторов).

Условное графическое обозначение *IGBT*- транзистора приведено на рисунке 17,а, а его эквивалентная схема – на рисунке 17,б.

*IGBT*- транзистор можно представить как соединение трех транзисторов – полевого транзистора *VT1* с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа, мощного биполярного транзистора *p-n-p* структуры *VT3*, и паразитного транзистора *n-p-n* структуры *VT2*, появляющегося в полупроводниковой структуре при изготовлении транзистора. Из-за наличия транзистора *VT2* при больших токах иногда возникает «триггерный эффект», при котором транзистор *VT3* находится во включенном состоянии и перестает управляться транзистором *VT1*.

Преимущество *IGBT*-транзисторов перед мощными полевыми транзисторами состоит в существенно меньшем напряжении на коллекторно-эмиттерном переходе в открытом состоянии, так как снижение напряжения приводит к пропорциональному снижению мощности, рассеиваемой транзистором.

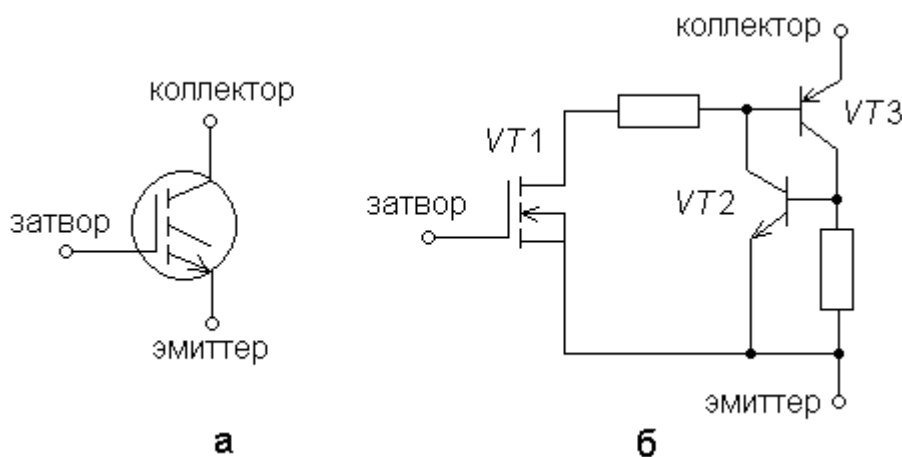


Рисунок 17

Это преимущество особенно заметно при напряжениях питания более 500В, где мощные полевые транзисторы имеют достаточно большое сопротивление цепи сток-исток в открытом состоянии.

Передаточная ВАХ *IGBT*-транзистора приведена на рисунке 18,а, а выходная ВАХ – на рисунке 18,б.

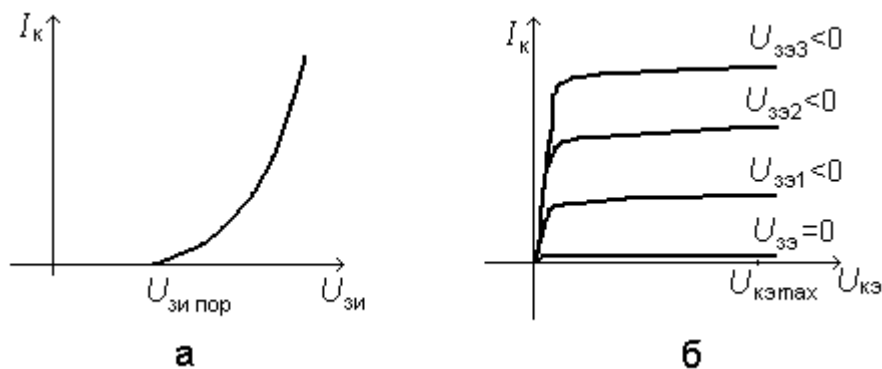


Рисунок 18

### 3.10 Маркировка транзисторов

Обозначение транзистора состоит из 6 символов:

К Т 5 0 3 А

1 2 3 4 5 6

1 – характеризует материал (Г – *Ge*, К – *Si*);

2 – функциональное назначение (Т – биполярный транзистор, П – полевой транзистор);

3 – цифра, связанная с мощностью рассеивания и его частотными свойствами.

4 и 5 – порядковый номер разработки.

6 – буква, характеризующая деление по параметрическим группам.

### 3.11 Тиристоры

Тиристоры - это полупроводниковые приборы с 3 и более *p-n*-переходами, которые предназначены для использования в качестве электрических ключей в схемах коммутации больших по величине токов при сравнительно невысоком быстродействии. В зависимости от числа выво-

дов и способов управления тиристоры делятся:

1. *Динистор* – “диодный тиристор”. Динистор является неуправляемым прибором, и при малом напряжении между анодом и катодом ( $U_{ак}$ ) он находится в закрытом состоянии. При достижении  $U_{ак}=U_{вкл}$  переключается в открытое состояние. Условное графическое обозначение динистора приведено на рисунке 19,а.

2. *Тринистор* – “триодный тиристор”. Тринистор не проводит ток в обратном направлении. Включается при прямом напряжении на аноде, при подаче импульса тока в цепь управляющего электрода. Условное графическое обозначение тринистора приведено на рисунке 19,б.

3. *Запираемый тиристор*. Включается при прямом напряжении на аноде, при подаче импульса тока в цепь управляющего электрода. Запирается при подаче импульса тока на управляющий электрод. Условное графическое обозначение запираемого тиристора приведено на рисунке 19,в.

4. *Симистор* - симметричный тиристор. Является эквивалентом двух встречно-параллельно соединённых тиристоров. Пропускает ток как в прямом, так и в обратном направлениях. Условное графическое обозначение симистора приведено на рисунке 19,г.

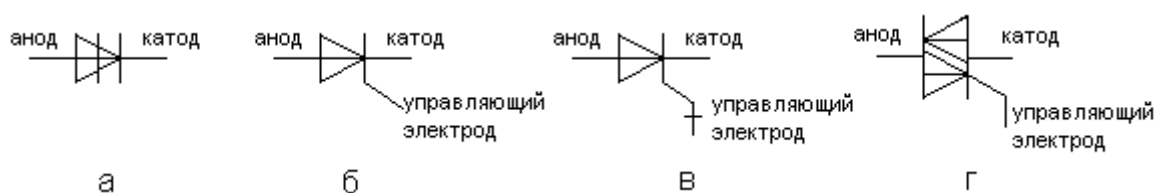


Рисунок 19

### 3.12 Принцип работы и ВАХ тринисторов

*Тринистор* представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру, в которой одна из базовых областей сделана управляю-

щей. В зависимости от того, база какого условного транзистора сделана управляющей, различают *тринисторы с анодным и катодным управлением*. Базовый вывод дает возможность управлять током близлежащего эмиттера. Для этого на управляющий электрод необходимо подать напряжение такой полярности, которая обеспечит отпирание соответствующего эмиттерного перехода.

На рисунке 20,а приведена структура тринистора, а на рисунке 20,б – его вольтамперная характеристика.

### 3.13 Основные параметры тринисторов

- $U_{\text{вкл}}$  – напряжение включения.
- $U_{\text{ост}}$  – величина напряжения на тринисторе, находящегося во включённом состоянии.

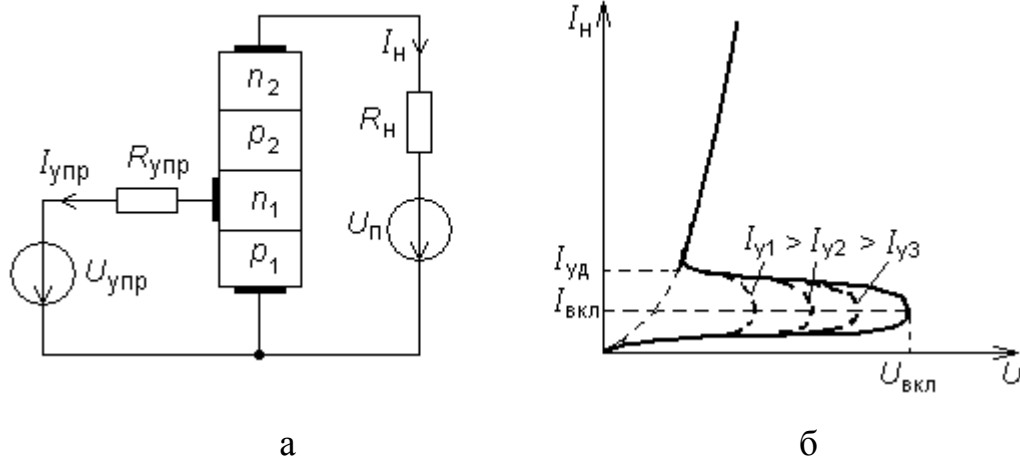


Рисунок 20

- $I_{\text{уд}}$  – ток удержания. При протекании через тринистор тока меньше этой величины тиристор выключается.
- $I_{\text{max}}$  – максимально возможный ток, протекаемый через тринистор.
- $U_{\text{обр.max}}$  – максимальное обратное напряжение, приложенное к тринисто-

ру.

- $I_{\text{обр}}(U_{\text{обр}})$  – обратный ток при максимальном обратном напряжении.
- $I_{\text{упр. max}}$  – максимально допустимый ток управляющего электрода.
- $t_{\text{вкл.}}, t_{\text{выкл.}}$  – время включения и время выключения тринистора.

Маркировка тринисторов состоит из шести элементов. Отличие от маркировки транзисторов заключается во втором элементе, который указывает на функциональное назначение полупроводникового прибора: Н – динистор, У – тринистор, симистор. Например: КН102А, КУ202Н.

Динисторы часто используют в импульсных генераторах для формирования импульсов напряжения, и в схемах управления мощными тринисторами и симисторами. Тринисторы и симисторы обычно используются в регуляторах мощности в цепях переменного тока.

#### 4. Усилители электрических сигналов

В технике часто встречается задача, когда сравнительно маломощный источник сигнала оказывается неспособным управлять работой исполнительного устройства. Для решения этой задачи между источником сигнала и исполнительным устройством (нагрузкой) помещают усилитель.

Под усилителем понимают устройство, в котором сравнительно маломощный входной сигнал управляет передачей гораздо большей мощности от источника питания в нагрузку. Эквивалентная схема усилителя приведена на рисунке 21.

В зависимости от соотношения  $R_{\Gamma}$  и  $R_{\text{вх}}$  различают следующие усилители:

1. Усилитель, управляемый током (при  $R_{\Gamma} > R_{\text{вх}}$  входным сигналом усилителя является ток).
2. Усилитель, управляемый напряжением (при  $R_{\text{вх}} > R_{\Gamma}$  усилитель

управляется напряжением).

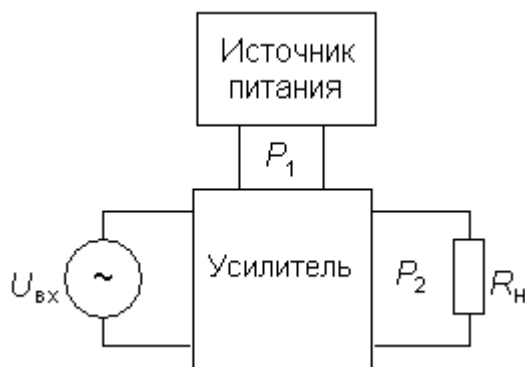


Рисунок 21

В зависимости от соотношения  $R_{в\text{ых}}$  и  $R_H$  различают:

1. Усилитель с потенциальным выходом (при  $R_{в\text{ых}} \ll R_H$  выходным сигналом является напряжение).
2. Усилитель с токовым выходом (при  $R_{в\text{ых}} \gg R_H$  выходным сигналом является ток).

Основные параметры и характеристики усилителя:

1.  $R_{вх} = U_1 / I_1$  – входное сопротивление.
2.  $R_{в\text{ых}} = U_{2\text{хх}} / I_{2\text{кз}}$ . (хх - холостой ход, кз - короткое замыкание).
3.  $K$  – коэффициент усиления:
  - а)  $K_u = U_{2m} / U_{1m}$  – по напряжению.
  - б)  $K_I = I_{2m} / I_{1m}$  – по току.
  - в)  $K_p = P_2 / P_1$  – по мощности.

Коэффициент усиления – величина безразмерная, иногда его выражают в относительных логарифмических единицах, которые называются децибелами (дБ).

4. Частотная характеристика – зависимость коэффициента передачи от частоты.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты (рисунок 22,а). Идеальный усилитель должен иметь коэффициент усиления  $K_0$  на всем диапа-



зоне частот, в реальном же усилителе коэффициент усиления на разных частотах различен.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) показывает зависимость фазового сдвига сигнала от частоты. Из графика видно, что на низких частотах фазовый сдвиг положителен, а на высоких частотах происходит запаздывание сигнала (рисунок 22,б).

5. Амплитудная характеристика — это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока):  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх.max}})$ . Амплитудная характеристика приведена на рисунке 23.

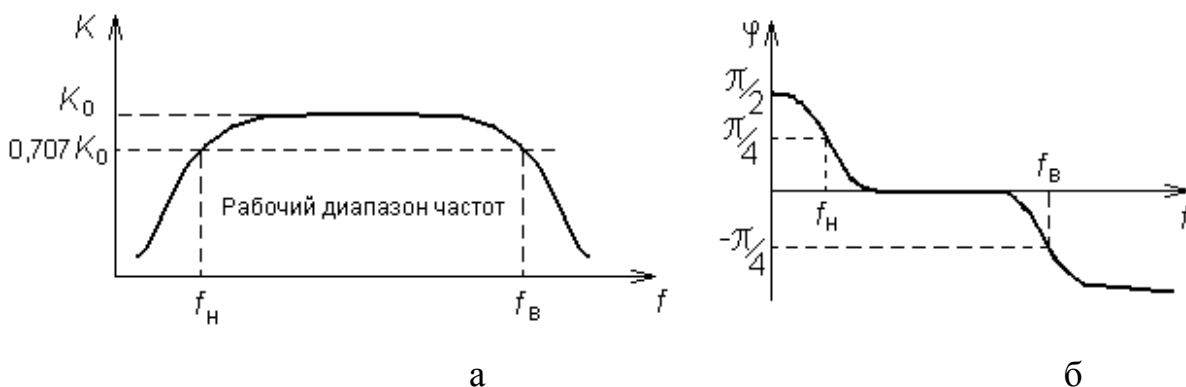


Рисунок 22

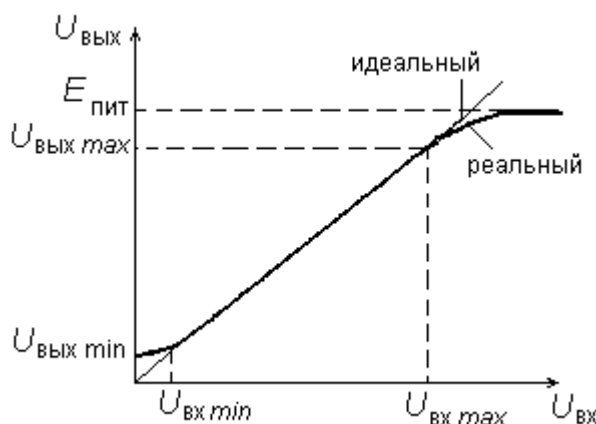


Рисунок 23

В области малых амплитуд отличие характеристики от прямолинейной состоит в том, что при отсутствии входного сигнала на выходе имеется

некоторый сигнал. Он возникает из-за наличия электромагнитных наводок на вход усилителя и собственных шумов.

В области больших амплитуд отличия характеристики от прямолинейной связаны с нелинейностью ВАХ активных элементов.

6. Динамический диапазон усилителя:  $D = U_{\text{вых max}} / U_{\text{вх max}}$ . Чем больше динамический диапазон, тем усилитель качественнее.

7. Чувствительность.

Различают номинальную чувствительность – величина входного сигнала, при котором на выходе обеспечивается номинальная мощность, и пороговую чувствительность – минимальный входной сигнал, при котором выходной сигнал однозначно определяется над уровнем шумов усилителя.

8. Коэффициент полезного действия усилителя ( $\eta$ ) определяется отношением выходной мощности ( $P_{\text{вых}}$ ) к мощности, потребляемой от источника питания ( $P_{\text{пит}}$ ):

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_{\text{пит}}$$

#### 4.1 Искажения сигналов в усилителях

Для идеального линейного усилителя форма входного и выходного сигналов должны совпадать. В реальных усилителях этого не происходит. Всякое отклонение формы сигнала на выходе от формы его на входе есть искажение, создаваемое усилителем.

Искажения бывают линейные и нелинейные.

Нелинейные искажения – это изменения формы сигнала на выходе, которые возникают за счет нелинейности ВАХ активных элементов. Количественно нелинейные искажения оценивают коэффициентом нелинейных искажений (КНИ), или коэффициентом гармоник ( $K_{\Gamma}$ ):

$$K_{\text{а}} = \frac{\sqrt{U_{2\text{м}}^2 + U_{3\text{м}}^2 + \dots + U_{\text{nm}}^2}}{U_{1\text{м}}},$$

где:  $U_{1m} \dots U_{nm}$  – амплитуды гармоник.

Линейные искажения бывает двух видов: частотные и фазовые.

Частотные искажения связаны с наличием в схеме усилителя реактивных элементов и возникают за счет неодинакового усиления различных гармонических составляющих.

Фазовые искажения возникают за счет неодинакового фазового сдвига различных гармонических составляющих. Это происходит из-за наличия реактивных элементов в схеме усилителя.

## **4.2 Классификация усилителей**

Классификация усилителей может быть произведена по различным признакам:

1. По полосе пропускания и абсолютному значению усиливаемых частот:

- усилители постоянного тока (способны усиливать сигналы как постоянного, так и переменного тока);
- усилители переменного тока (способны усиливать сигналы только переменного тока).

Усилители переменного тока подразделяются на:

- усилители низких частот (усилители звуковой частоты – 20...20000 Гц);
- широкополосные усилители;
- избирательные усилители (предназначены для усиления электрических сигналов в относительно узком диапазоне частот).

2. По характеру входного сигнала:

- усилители непрерывных сигналов;
- усилители импульсных сигналов.

3. По виду используемых активных элементов:

- ламповые;
- на биполярных транзисторах;

- на полевых транзисторах;
  - на туннельных диодах;
4. По числу усилительных каскадов:
- однокаскадные;
  - многокаскадные.
5. По виду связи между каскадами:
- усилители с непосредственной гальванической связью между каскадами,
  - усилители с емкостной связью между каскадами,
  - усилители с трансформаторной связью между каскадами,
  - усилители с оптоэлектронной связью между каскадами.

### 4.3 Классификация усилительных схем

Режим работы усилительного элемента характеризуется его рабочей точкой. Под рабочей точкой понимают совокупность постоянных токов и напряжений на выводах активного элемента при отсутствии входного сигнала. Классификация усилительных схем основана на положении рабочей точки транзисторов (т.е. на величине тока, протекающего через транзистор при отсутствии входного сигнала).

Положение рабочей точки определяется:

- назначением усилителя;
- полярностью сигнала;
- диапазоном его усиления.

Различают следующие классы усилителей:

Класс *A*: транзистор работает только на линейном участке ВАХ (используется в маломощных усилителях, предусилителях).

Класс *B*: рабочая точка совпадает с точкой отсечки транзистора (*n-p-n*-транзистор усиливает только положительную полуволну, а *p-n-p*-

транзистор – только отрицательную). Используется в усилителях низкой частоты.

Класс *AB*: вводится дополнительное начальное смещение для устранения искажений перехода через ноль. Используется в усилителях низкой частоты.

Класс *C*: переход база-эмиттер смещен в обратном направлении. Используется в усилителях радиочастот.

Класс *D*: транзистор работает в ключевом режиме. Используется в усилителях низких частот для повышения КПД.

#### **4.4 Усилители с обратной связью**

Под обратной связью (ОС) понимают подачу части выходного сигнала на вход усилителя. В реальных условиях возникают три вида ОС: внутренняя, внешняя и паразитная.

Внутренняя ОС имеет место во всех активных элементах. Внешняя ОС вводится специальным путем введения в схему специальных элементов. Паразитная ОС возникает при индуктивных или емкостных связях между элементами конструкции, которые создают пути для передачи с выхода на вход.

Все виды ОС существенно влияют на параметры и характеристики усилителя. От внутренней и паразитной ОС стараются избавиться за счет рационального выбора элементов и конструкций усилителя.

Внешняя ОС легкоуправляема и позволяет:

1. Увеличить стабильность коэффициента усиления
2. Расширить диапазон усиления частот
3. Уменьшить искажения
4. Изменить величину входного и выходного сопротивления в нужном направлении

Различают следующие виды обратной связи:

1) Положительная обратная связь (ПОС).

При этом сигнал на выходе цепи обратной связи совпадает по фазе с входным сигналом, т.е. положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления. При  $\beta K=1$  усилитель превращается в генератор.

2) Отрицательная обратная связь (ООС).

При этом сигнал на выходе цепи обратной связи находится в противофазе с входным сигналом, т.е. отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя.

#### **4.5 Влияние ООС на параметры и характеристики усилителя**

Обратная отрицательная связь в усилителе:

- уменьшает коэффициент усиления, но при этом уменьшается его зависимость от различных дестабилизирующих факторов;
- увеличивает полосу пропускания усилителя;
- уменьшает нелинейные искажения усилителя;
- увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление усилителя.

#### **4.6. Типы обратной связи**

В зависимости от способа снятия сигнала обратной связи с выхода и подачи на вход различают четыре типа обратной связи (рисунок 24):

1. Последовательная по напряжению (а);
2. Параллельная по напряжению (б);
3. Последовательная по току (в);
4. Параллельная по току (г).

Коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$K_{Uoc}=K_U/(1+\beta K_U)$$

## 4.7 Влияние ООС на свойства усилителя

ОС по напряжению препятствует изменению выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки. Это означает, что введение отрицательной обратной связи по напряжению уменьшает выходное сопротивление усилителя. Характер изменения выходного сопротивления не зависит от того, какой является обратная связь - параллельной или последовательной.

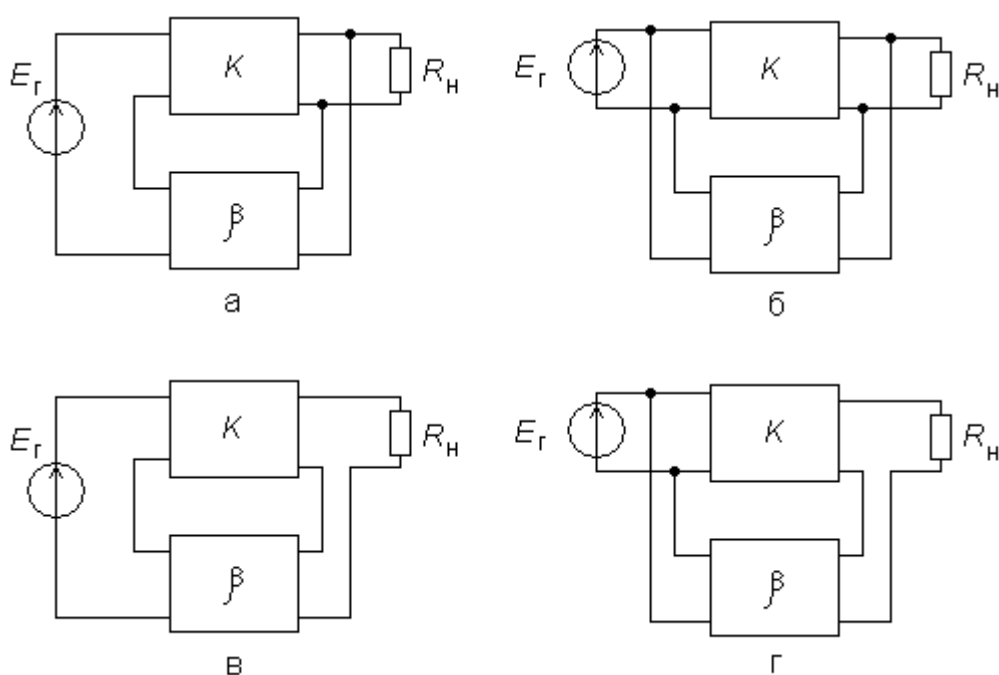


Рисунок 24

Обратная связь по току препятствует изменению выходного тока при изменении сопротивления нагрузки. Это означает, что введение отрицательной обратной связи по току увеличивает выходное сопротивление. При этом характер изменения выходного сопротивления также не зависит от того, является ли связь параллельной или последовательной.

Параллельная ОС уменьшает, а последовательная ОС увеличивает входное сопротивление усилителя. Характер изменения входного сопротивления не зависит от того, является ли обратная связь связью по току или по напряжению.

## 5. Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называется усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, имеющие дифференциальный вход и общий выход. Такие усилители обычно применяются с различными обратными связями, которые определяют параметры устройства в целом.

Некоторые современные применения ОУ лежат в областях управления процессами производства, связи, вычислительной техники. ОУ успешно применяются в источниках питания и генерации сигналов, активных фильтрах, в системах сбора, преобразования и отображения данных, в измерительных системах.

Условное обозначение ОУ приведено на рисунке 25:

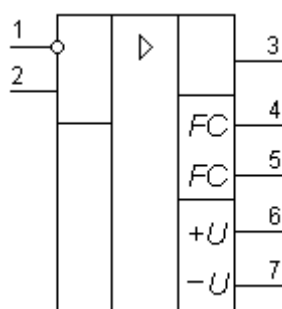


Рисунок 25

- 1 – инвертирующий вход;
- 2 – неинвертирующий вход;
- 3 – выход;
- 4, 5 – выводы подключения элементов частотной коррекции;
- 7, 8 – выводы для подключения питающих напряжений. Для питания ОУ обычно требуется двухполярное напряжение  $\pm 3 \dots \pm 15 \text{ В}$ .

Структурная схема операционного усилителя приведена на рисунке 26.



Она включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усиления.

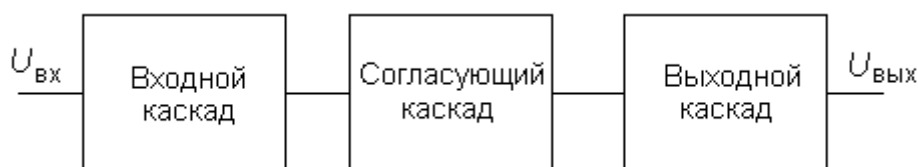


Рисунок 26

Идеальный ОУ является устройством, характеризующимся бесконечным коэффициентом усиления при разомкнутой цепи обратной связи, нулевыми входными токами (бесконечно большим входным импедансом), нулевым входным напряжением смещения, бесконечной полосой пропускания частот при единичном усилении и бесконечной скоростью нарастания выходного сигнала. Невозможность создания идеального ОУ привело к появлению различных типов (семейств) подобных устройств.

В зависимости от комплекса параметров операционные усилители подразделяются:

- 1) Универсальные (имеют средние значения параметров);
- 2) Прецизионные (предназначены для использования в контрольно-измерительной аппаратуре);
- 3) Быстродействующие (предназначены для схем, требующих широкую полосу пропускания, высокую скорость нарастания выходного напряжения (не менее 10 В/мкс) и малое время установления);
- 4) Микромощные и программируемые (низковольтные, с малым потреблением мощности или тока). В микромощных (программируемых ОУ мощность или ток потребления может регулироваться с помощью внешнего смещения, задающего ток покоя с помощью внешних резисторов;
- 5) С высоким входным сопротивлением;
- 6) Малошумящие;
- 7) Многоканальные (сдвоенные, строенные, счетверенные):

8) Мощные (с большими мощностью рассеивания и выходным током).

### 5.1 Параметры ОУ

Параметры ОУ подразделяются на статические (входные, выходные, усилительные, шумовые), динамические (скоростные, частотные, временные), эксплуатационные и максимальные.

Основные статические параметры ОУ, характеризующие его работу:

Коэффициент усиления по напряжению  $K_{U0}$  характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал:

$$K_{U0} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$$

Типовое значение коэффициента усиления ОУ составляет  $10^5 \dots 10^6$  или 100 ... 120 дБ.

Входное напряжение смещения – это напряжение, которой обусловлено, в основном, неидентичностью напряжений эмиттерных переходов транзисторов входного дифференциального усилителя. Наличие этого напряжения приводит к нарушению условия, согласно которому  $U_{\text{вых}}=0$  при  $U_{\text{вх}}=0$ .

Численно входное напряжение смещения определяется как напряжение, которое необходимо приложить к входу усилителя для того, чтобы его выходное напряжение было равно нулю. Иногда это напряжение называют напряжением сдвига нуля ( $U_{\text{см}}$ ). Типовое значение этого напряжения единицы – десятки милливольт.

Входной ток  $I_{\text{вх}}$  (входной ток смещения) – ток, протекающий во входных выводах ОУ и необходимый для обеспечения требуемого режима работы его транзисторов по постоянному току. Типовое значение этого тока единицы микроампер – сотни наноампер.

Разность входных токов  $\Delta I_{\text{вх}}$  (ток сдвига). Природа этого тока кроется, в основном, в неодинаковости коэффициентов передачи тока транзисторов входного каскада ОУ. Численно он равен модулю разности входных токов усилителя:

$$\Delta I_{\text{вх}} = | I_{\text{вх1}} - I_{\text{вх2}} |.$$

Типовое значение параметра – от единиц микроампер до десятых долей наноампера.

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$ . Различают дифференциальное входное сопротивление  $R_{\text{вх диф}}$  и синфазное входное сопротивление  $R_{\text{вх син}}$

$R_{\text{вх диф}}$  определяется как сопротивление между входами усилителя, а  $R_{\text{вх син}}$  – как сопротивление между объединенными входными выводами и нулевой шиной.

Типовое значение входного сопротивления – сотни килоОм.

Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  – это сопротивление усилителя, рассматриваемого как эквивалентный генератор. Типовое значение выходного сопротивления – сотни Ом.

Коэффициент подавления синфазного сигнала  $K_{\text{п сф}}$  определяет степень подавления (ослабления) синфазной составляющей входного сигнала. Его типовое значение – 50...70дБ.

Частота единичного усиления  $f_{\text{max}}$  – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. Обычно эта частота не превышает нескольких мегагерц.

Кроме перечисленных обычно задаются и предельно допустимые значения основных эксплуатационных параметров:

- максимально допустимое напряжение питания;
- максимально допустимый выходной ток;
- диапазон рабочих температур;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность;

- максимально допустимое входное синфазное напряжение;
- максимально допустимое входное дифференциальное напряжение и др.

Большинство перечисленных параметров сильно зависит от условий эксплуатации. Эти зависимости обычно задаются графически.

Основные *динамические* параметры ОУ:

Максимальная скорость изменения выходного напряжения ( $V_U$ ) характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах; измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы. Единица измерения скорости изменения выходного напряжения – В/мкс.

Время установления выходного напряжения  $t_{уст}$  – время, необходимое для завершения переходного процесса на выходе ОУ.

## 5.2 Основные функциональные устройства, реализованные на ОУ

В линейных устройствах ОУ всегда используются с обратными связями. Из-за разнообразия обратных связей и элементов, которые используются в них, возможно построение большого числа устройств различного назначения.

### 5.2.1 Инвертирующий усилитель на ОУ

Схема инвертирующего усилителя приведена на рисунке 27. В усилителе действует параллельная обратная отрицательная связь по напряжению.

Инвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению, равным:  $K_U = - R_2/R_1$ .

Выходное напряжение инвертирующего усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ВХ}} = (-R_2/R_1) U_{\text{ВХ}} .$$

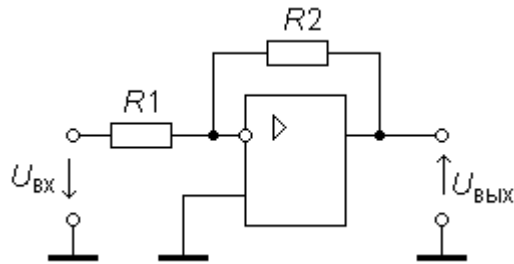


Рисунок 27

### 5.2.2 Неинвертирующий усилитель на ОУ

Схема неинвертирующего усилителя приведена на рисунке 28.

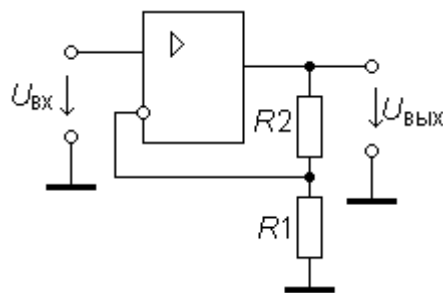


Рисунок 28

Неинвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению, равным:  $K_U = 1 + (R2/R1)$ .

Выходное напряжение инвертирующего усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ВХ}} = (1 + (R2/R1)) U_{\text{ВХ}} .$$

### 5.2.3 Повторитель напряжения на основе ОУ

Схема повторителя напряжения приведена на рисунок 29.

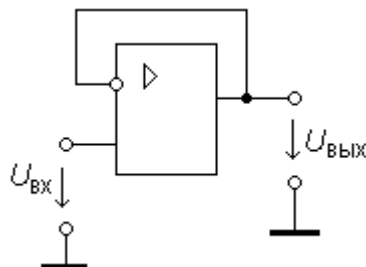


Рисунок 29

Повторитель напряжения характеризуется коэффициентом усиления по напряжению, равным:  $K_U = 1$ .

Выходное напряжение повторителя напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} .$$

Повторитель напряжения имеет очень большое входное сопротивление.

#### 5.2.4 Сумматор напряжений (инвертирующий сумматор)

Схема инвертирующего сумматора напряжений приведена на рисунке 30.

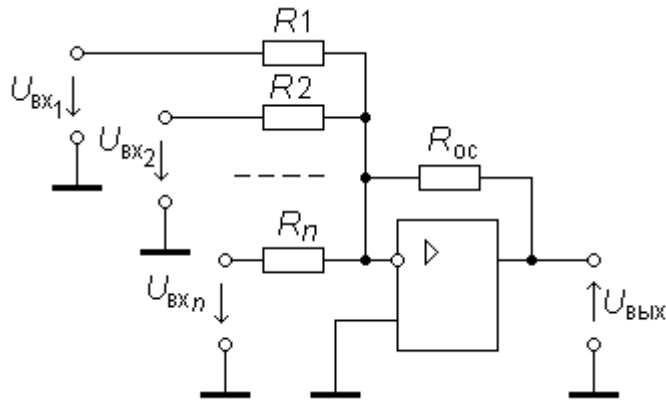


Рисунок 30

Выходное напряжение инвертирующего сумматора напряжений равно:

$$U_{\text{âüð}} = - \left( \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_{\text{âü1}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} U_{\text{âü2}} + \dots + \frac{R_{\text{oc}}}{R_n} U_{\text{âün}} \right)$$

#### 5.2.5 Дифференцирующий усилитель

Схема дифференцирующего усилителя приведена на рисунке 31.

Выходное напряжение дифференцирующего усилителя равно:

$$U_{\text{âüð}} = K \frac{du_{\text{âü}}}{dt} = -RC \frac{du_{\text{âü}}}{dt} .$$

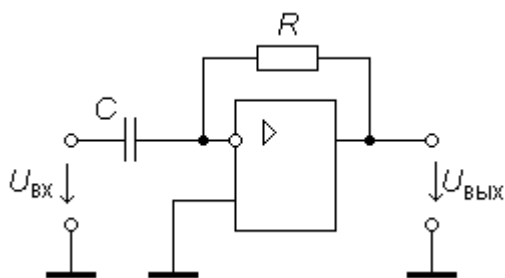


Рисунок 31

### 5.2.6 Интегрирующий усилитель

Схема интегрирующего усилителя приведена на рисунке 32.

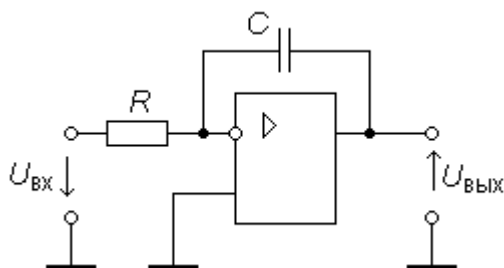


Рисунок 32

Выходное напряжение интегрирующего усилителя равно:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt.$$

### 5.2.7 Мультивибратор на ОУ

Схема мультивибратора и приведена на рисунке 33,а. Временные диаграммы напряжения на конденсаторе  $C$  и выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  приведены на рисунке 33,б.

Для возникновения колебаний необходима положительная обратная связь, образованная резисторами  $R1$  и  $R2$ . Она частотно независима. Резистор  $R$  и конденсатор  $C$  определяют частоту автоколебаний.

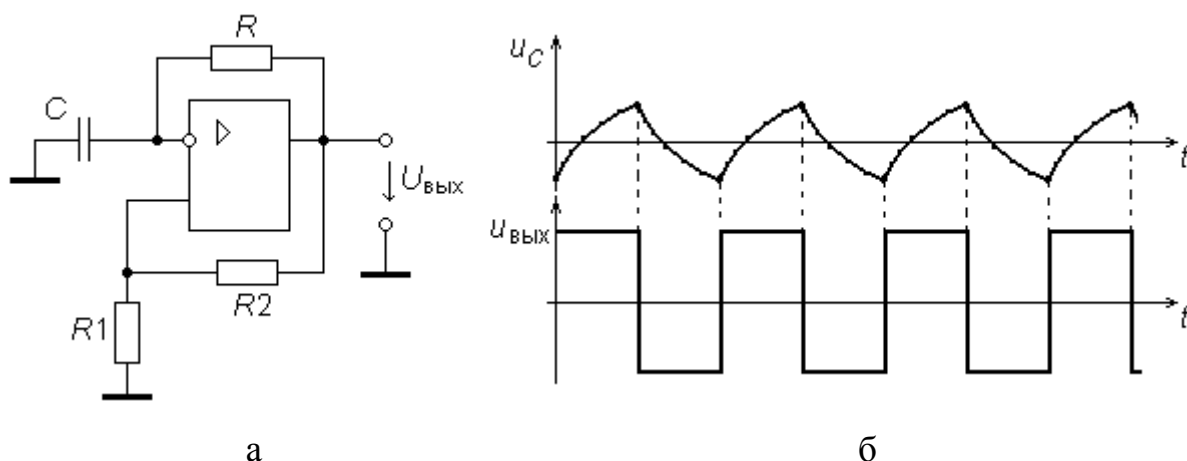


Рисунок 33

## 6. Источники питания

Вторичные источники питания предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электронных и других устройств. Вторичные источники в свою очередь получают энергию от первичных источников питания, вырабатывающих электричество — от генераторов, аккумуляторов и т. д.

Вторичные источники питания являются одними из наиболее важных устройств электроники. Например, часто надежность того или иного устройства электроники существенно зависит от того, насколько надежен его вторичный источник питания. Общепринято вторичные источники называть источниками питания.

Источники питания подразделяются на источники питания без преобразования частоты и источники питания с преобразованием частоты (импульсные источники питания).

Структурная схема источника питания без преобразования частоты приведена на рисунке 34.



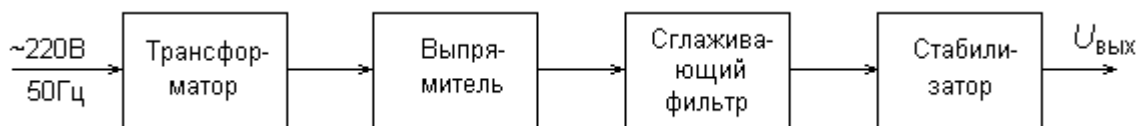


Рисунок 34

Трансформатор (обычно понижающий) предназначен для гальванической развязки питающей сети и нагрузки и изменения уровня переменного напряжения. Выпрямитель преобразует переменное напряжение в напряжение одной полярности (пульсирующее). Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Стабилизатор уменьшает изменения напряжения на нагрузке (стабилизирует напряжение), вызванные изменением напряжения сети (обычно  $\pm 10\%$ ) и изменением тока, потребляемого нагрузкой.

В последнее время все чаще используют источники с преобразованием частоты, так как они имеют значительно меньшие вес и габариты.

Структурная схема источника питания с преобразованием частоты приведена на рисунке 35.

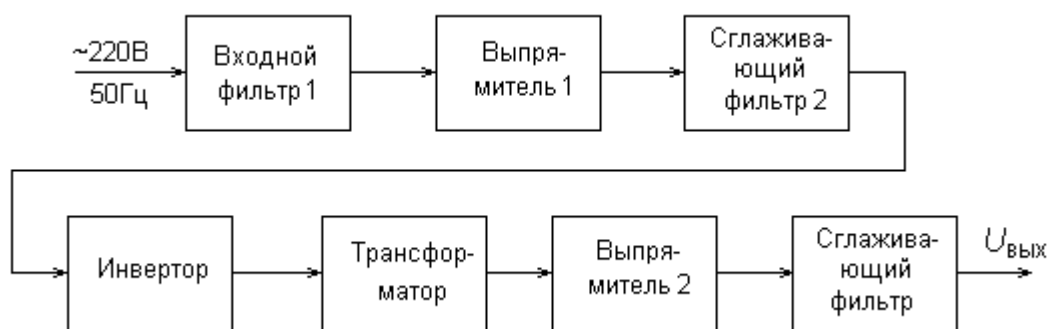


Рисунок 35

В этих источниках напряжение от сети подается непосредственно на выпрямитель 1. На выходе сглаживающего фильтра 1 создается постоянное напряжение, которое вновь преобразуется в переменное с помощью инвертора. Полученное переменное напряжение имеет высокую частоту (десятки или сотни кГц). Затем напряжение передается через высокочас-

тотный трансформатор, выпрямляется и фильтруется. В такой схеме инвертор работает как стабилизатор напряжения. В качестве активных приборов в инверторе используются транзисторы (биполярные или полевые).

Импульсные источники питания обладают значительно лучшим КПД по сравнению с источниками без преобразования частоты, и широко используются в современных устройствах электроники.

## 6.1 Выпрямители

Выпрямители предназначены для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Выпрямители имеют следующие основные параметры:

а) среднее значение выходного напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt ,$$

где  $T$  – период напряжения сети (для промышленной сети  $T=20$  мс);

б) среднее значение выходного тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt$$

в) коэффициент пульсаций выходного напряжения:

$$\varepsilon = U_m / U_{\text{ср}} ,$$

где  $U_m$  — амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителя  $U_{\text{н ср}} = f(I_{\text{н ср}})$  – это графически выраженная зависимость среднего значения выходного напряжения на нагрузке от среднего значения выходного тока (рисунок 36). Внешняя характеристика является важнейшим показателем выпрямительного устройства, определяющим его эксплуатационные возможности.

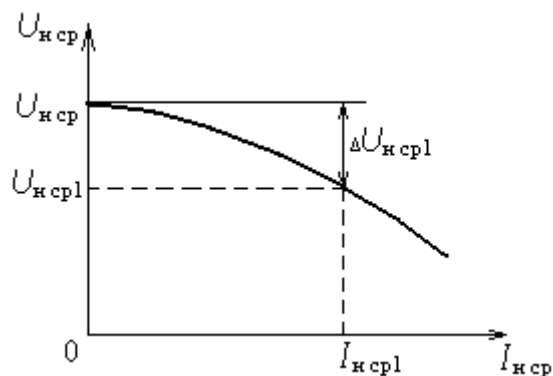


Рисунок 36

Выпрямители подразделяются на однофазные и трехфазные.

### 1. Однополупериодный однофазный выпрямитель

Схема однофазного однополупериодного выпрямителя изображена на рисунке 37, а. В таком выпрямителе ток через нагрузку протекает лишь в течение одного полупериода входного напряжения (рисунок 37,б).

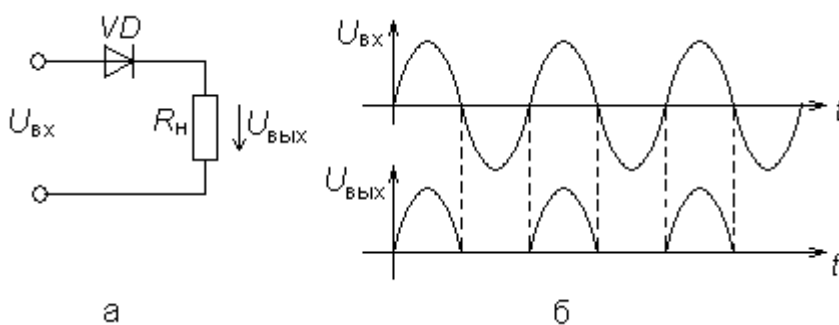


Рисунок 37

Основные параметры выпрямителя следующие:

- среднее напряжение на нагрузке:

$$U_{\text{ср}} = \sqrt{2} U_{\text{вх}} / \pi \approx 0,45 U_{\text{вх}} ;$$

- среднее значение тока выпрямителя:

$$I_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} / R_{\text{н}} ;$$

- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения:

$$\varepsilon = \pi/2 = 1,57;$$

- максимальное значение обратного напряжения на диодах:

$$U_{\text{обр max}} = \sqrt{2} U_{\text{вх}} \approx \pi U_{\text{ср}} ;$$

- максимальный ток диода:

$$I_{д\ max} = \sqrt{2} U_{вх} / R_{н} \approx \pi I_{ср} ;$$

Такой выпрямитель находит ограниченное применение в маломощных устройствах.

## 2. Двухполупериодные однофазные выпрямители

### а) мостовая схема

Схема мостового выпрямителя и графики, поясняющие работу схемы, изображены на рисунке 38. В таком выпрямителе ток через нагрузку протекает в течение всего периода входного напряжения.

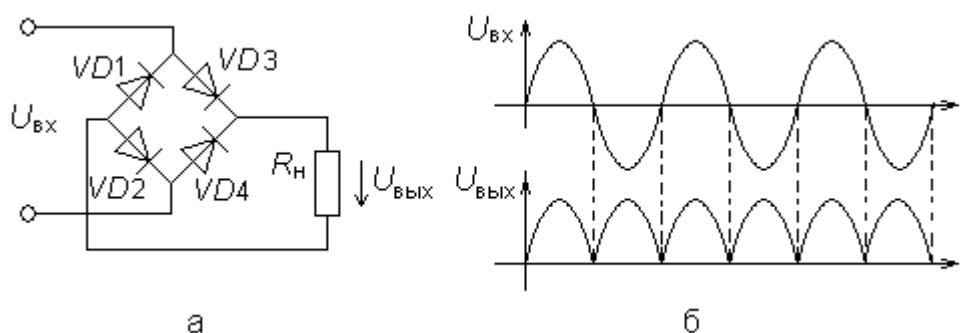


Рисунок 38

Основные параметры выпрямителя следующие:

- среднее напряжение на нагрузке:

$$U_{ср} = 2\sqrt{2} U_{вх} / \pi \approx 0,9 U_{вх};$$

- среднее значение тока выпрямителя:

$$I_{ср} = U_{ср} / R_{н};$$

- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения:

$$\varepsilon = 2/3 \approx 0,67;$$

- максимальное значение обратного напряжения на диодах:

$$U_{обр\ max} = \pi U_{ср} / 2 ;$$

- максимальный ток диода:

$$I_{д max} = \pi I_{ср} / 2;$$

Такой выпрямитель характеризуется высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике.

б) двухполупериодный выпрямитель со средней точкой.

Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой и графики, поясняющие работу схемы, изображены на рисунке 39. Особенностью такого выпрямителя является необходимость применения трансформатора, имеющего выходную обмотку со средней точкой. В этой схеме ток через нагрузку так же протекает в течение всего периода входного напряжения. Параметры данного выпрямителя такие же, как у мостовой схемы.

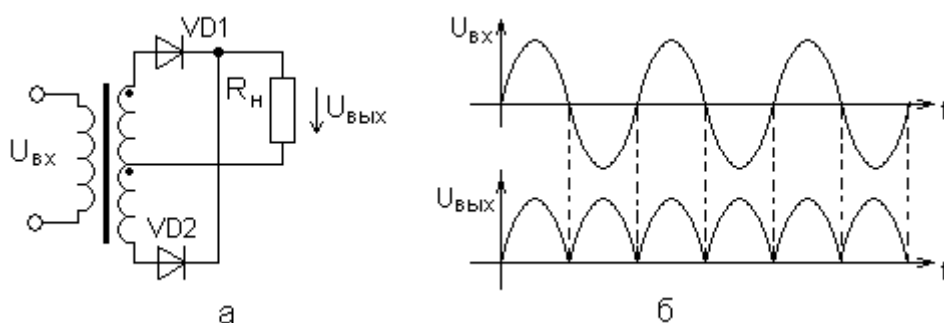


Рисунок 39

### 3. Трехфазный мостовой выпрямитель (схема Ларионова).

Схема трехфазного мостового выпрямителя изображена на рисунке 40.

Используемые в данной схеме 6 диодов выпрямляют как положительные, так и отрицательные полуволны трехфазного напряжения. Выпрямитель характеризуется высокими технико-экономическими показателями и очень широко используется на практике.

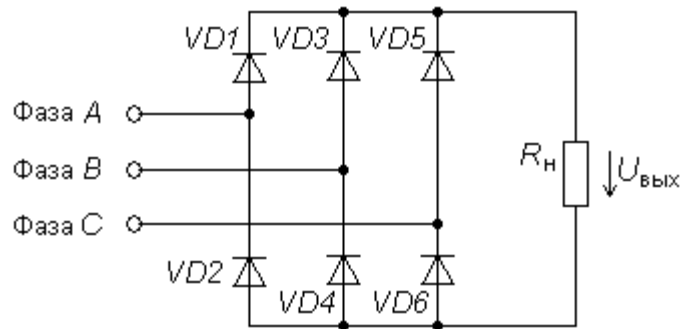


Рисунок 40

Трехфазный мостовой выпрямитель имеет следующие параметры:

- среднее значение выходного напряжения:

$$U_{\text{ср}} = 6/\pi U_{m \text{ лин}} \sin(\pi/6) = (3U_{m \text{ лин}})/\pi = (3\sqrt{3} U_{m \text{ ф}})/\pi \approx 0,955 U_{m \text{ ф}} ;$$

- максимальное обратное напряжение на диоде:

$$U_{\text{д обр}} = U_{m \text{ лин}} ;$$

- коэффициент пульсаций:

$$\varepsilon = U_m / U_{\text{ср}} \approx 0,057.$$

Применение схемы Ларионова в некоторых случаях позволяет не использовать выходной фильтр, так как коэффициент пульсаций схемы очень мал, а частота пульсаций в шесть раз выше частоты сети.

## 6.2 Сглаживающие фильтры

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения наиболее часто в качестве фильтра используют конденсатор большой емкости, подключаемый параллельно нагрузке. На рисунке 41 приведены схема однополупериодного выпрямителя с С-фильтром и временные диаграммы напряжений.

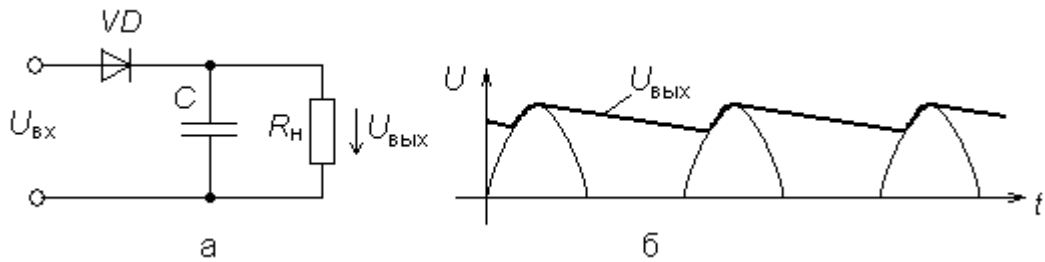


Рисунок 41

Лучшие результаты для сглаживания пульсации обеспечивает П-образный  $LC$  фильтр (рисунок 42).

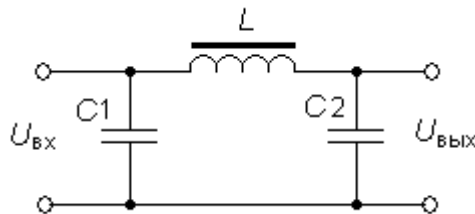


Рисунок 42

Наличие дросселя  $L$  фильтра утяжеляет конструкцию источника питания, поэтому этот фильтр применяется значительно реже.

### 6.3 Стабилизаторы постоянного напряжения

Это устройства, которые должны поддерживать постоянным выходное напряжение при изменении постоянного напряжения на входе или при изменении тока нагрузки.

Основным параметром стабилизатора, характеризующим стабильность среднего значения его выходной электрической величины, является коэффициент стабилизации:

$$K_{\bar{n}\partial U} = \frac{U_{\bar{a}\partial} / U_{\bar{a}\partial.i\bar{i}\bar{i}}}{U_{\bar{a}\bar{u}\partial} / U_{\bar{a}\bar{u}\partial.i\bar{i}\bar{i}}}.$$

В зависимости от стабилизируемой электрической величины различают коэффициенты стабилизации по напряжению  $K_{\text{ст}U}$ , току  $K_{\text{ст}I}$  или мощности  $K_{\text{ст}P}$ .

По принципу действия стабилизаторы делятся на:

- 1) параметрические;
- 2) компенсационные:
  - а) параллельного типа;
  - б) последовательного типа.

#### 6.4 Параметрические стабилизаторы напряжения

Параметрический стабилизатор обеспечивает поддержание выходного напряжения за счет собственной нелинейности используемого полупроводникового элемента. Примером такого стабилизатора является устройство, выполненное на основе стабилитрона (рисунок 43).

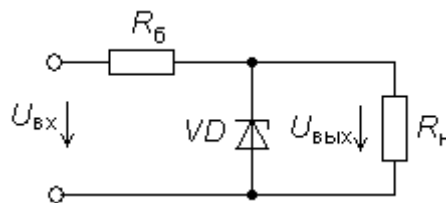


Рисунок 43

Нагрузка и стабилитрон  $VD$  соединены параллельно, и на них одно и то же напряжение:  $U_{\text{вых}} = U_{VD}$ . Балластный резистор  $R_b$  предназначен для ограничения тока, текущего от источника питания через стабилитрон  $VD$  и нагрузку. Коэффициент стабилизации данного устройства рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ст}} = (1 + R_b / R_{\text{диф}}) \approx 10$$

где:  $R_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I|_{U_{\text{ст.ном}}}$  - дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Параметрические стабилизаторы применяются только для маломощных (высокоомных) нагрузок.

#### 6.5 Компенсационные стабилизаторы

Компенсационный стабилизатор является замкнутой системой авто-



матического регулирования, в которой коэффициент передачи звена, включенного в цепь передачи электрической величины, зависит от разности входного и некоторого эталонного сигнала. В таких стабилизаторах выходное напряжение поддерживается постоянным за счет изменения сопротивления регулирующего элемента, специально вводимого в схему. В стабилизаторах последовательного типа регулирующий элемент включается последовательно с нагрузкой.

Структурная схема стабилизатора последовательного типа приведена на рисунке 44.

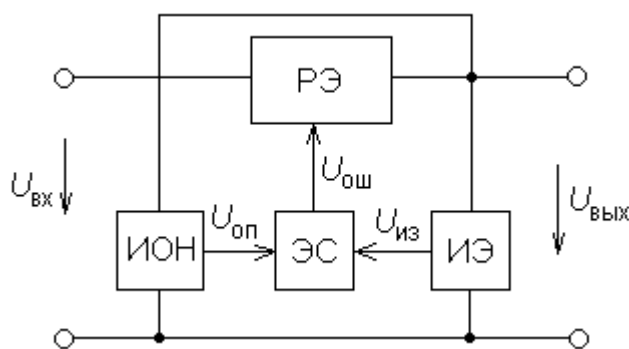


Рисунок 44

Принцип работы компенсационного стабилизатора основан на использовании цепи ООС. Для реализации указанного принципа устройство кроме регулирующего элемента (РЭ) должно содержать измерительный элемент (ИЭ), элемент сравнения (ЭС) и источник опорного напряжения (ИОН).

Выходное напряжение измерительного элемента, пропорциональное стабилизируемому параметру, сравнивается в элементе сравнения с опорным напряжением, и полученный сигнал ошибки:  $U_{ош} = U_{оп} - U_{из}$  — управляет коэффициентом передачи РЭ. Увеличение сигнала ошибки, вызванное уменьшением выходного напряжения стабилизатора, увеличивает коэффициент передачи РЭ, что ведет к восстановлению исходного значения вы-

ходного напряжения. И наоборот, увеличение выходного напряжения, уменьшая сигнал ошибки, уменьшает коэффициент передачи РЭ.

Для улучшения характеристик в стабилизаторах используют ОУ. Принципиальная схема стабилизатора, содержащего ОУ, приведена на рисунке 45.

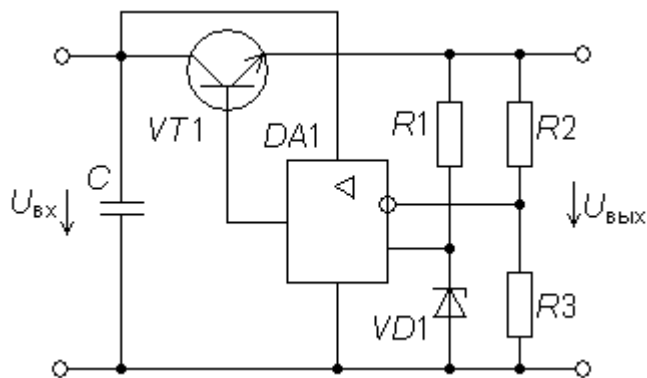


Рисунок 45

где:  $VT1$  – регулирующий элемент (РЭ) стабилизатора.

$R1$ ,  $VD1$  – параметрический стабилизатор напряжения, является источником опорного напряжения (ИОН).

$DA1$  – ОУ, выполняющий функции элемента сравнения (ЭС) и усилителя сигнала ошибки.

$R2$ ,  $R3$  – делитель напряжения, выполняющий функции измерительного элемента (ИЭ).

Структурная схема стабилизатора параллельного типа приведена на рисунке 46.

Особенностью данного типа стабилизаторов является то, что регулирующий элемент РЭ включен параллельно нагрузке. Для ограничения тока служит балластный резистор БР, включенный последовательно с нагрузкой.

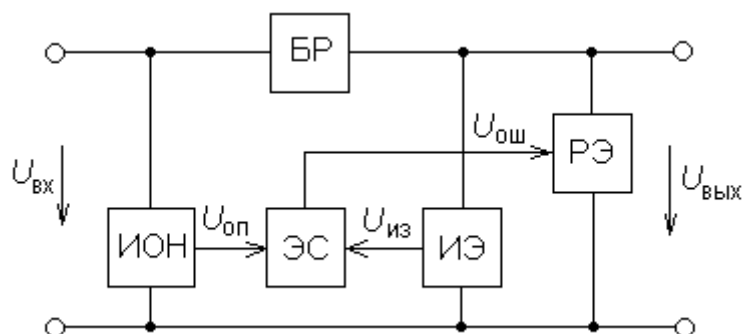


Рисунок 46

Так как через балластный резистор протекает ток нагрузки и ток регулирующего элемента, то на нем рассеивается значительная мощность. Поэтому стабилизаторы параллельного типа применяются для маломощных нагрузок.

Компенсационные стабилизаторы точны и обеспечивают хорошую стабилизацию выходного напряжения. Недостатком компенсационных стабилизаторов является невысокий КПД. Это связано с тем, что регулирующий элемент работает в активном режиме (класса  $A$ ), на нем падает значительное напряжение и выделяется большая мощность.

## 7. Логические элементы

### 7.1 Основные положения и законы алгебры логики

Основным математическим аппаратом, используемым при анализе и синтезе дискретных элементов и устройств, является алгебра логики (булева алгебра). В алгебре логики широко используется понятие “высказывание”. Высказыванием будем называть простое повествовательное положение, о котором можно сказать, что оно ложно или истинно, но не то и другое одновременно. Любое высказывание можно обозначить символом  $X$  и считать, что  $X=1$ , если высказывание истинно, а  $X=0$ , если высказывание ложно. То есть, логическая (булева) переменная – такая переменная  $X$ , которая может принимать только два значения:  $X=\{0,1\}$ . Из двух простых

высказываний  $X_1$  и  $X_2$  можно образовать более сложные высказывания, используя операции “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. Сложные высказывания также принимают значения “истинно” или “ложно”, т.е. 1 или 0. Смысл логических операций над простыми высказываниями  $X_1$  и  $X_2$  и значениями сложных высказываний можно представить в виде таблиц истинности: “ИЛИ”, “И”, “НЕ” соответственно.

Ниже приведены аксиомы булевой алгебры относительно дизъюнкции, конъюнкции и отрицания.

1. Аксиомы конъюнкции:  $0 \cdot 0 = 0$  ;  $1 \cdot 1 = 1$  ;  $0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$ ;
2. Аксиомы дизъюнкции:  $0 + 0 = 0$  ;  $1 + 1 = 1$  ;  $0 + 1 = 1 + 0 = 1$ ;
3. Аксиомы отрицания: если  $X = 0$  , то  $\bar{X} = 1$ ;  
если  $X = 1$  , то  $\bar{X} = 0$ ;

Следующие 5 правил обычно называют теоремами булевой алгебры. Особенностью теорем булевой алгебры является то, что для их доказательства пользуются простой подстановкой значений булевых переменных. Это обусловлено тем, что переменные могут принимать только 2 значения - 0 и 1.

4. Операции с константами:

$$\begin{array}{lll} \text{а) } X \cdot 1 = X & \text{б) } X \cdot 0 = 0 & \text{в) } X + 1 = 1 \\ \text{г) } X + 0 = X & \text{д) } \bar{0} = 1 & \text{е) } \bar{1} = 0 \end{array}$$

5. Идемпотентность (тавтология, повторение):

$$\begin{array}{ll} \text{а) } XX = X & \text{б) } X + X = X \end{array}$$

Для  $n$  переменных:

$$\begin{array}{ll} \text{а) } XX \dots X = X & \text{б) } X + X + \dots + X = X \end{array}$$

6. Противоречие:  $X \cdot \bar{X} = 0$

7. Правило "исключенного третьего":  $X + \bar{X} = 1$

8. Двойное отрицание (инволюция):  $\overline{\bar{X}} = X$

Следующие 4 правила обычно называют законами или тождествами булевой алгебры.

9. Ассоциативность (ассоциативный закон):

а)  $X_1(X_2X_3)=(X_1X_2)X_3$

б)  $(X_1+X_2)+X_3= X_1+(X_2+X_3)$

10. Коммутативность (коммутативный закон):

а)  $X_1X_2= X_2X_1$

б)  $X_1+X_2= X_2+X_1$

11. Дистрибутивность (дистрибутивный закон):

а) конъюнкции относительно дизъюнкции:

$$X_1(X_2+X_3)=X_1X_2+X_1X_3$$

б) дизъюнкции относительно конъюнкции:

$$X_1+(X_2X_3)=(X_1+X_2)(X_1+X_3)$$

12. Законы де Моргана (законы инверсии или отрицания):

а)  $\overline{X_1X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$

б)  $\overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \overline{X_2}$

Расширенный закон де Моргана:

а)  $\overline{X_1X_2...X_n} = \overline{X_1} + \overline{X_2} + ... + \overline{X_n}$

б)  $\overline{\overline{X_1} + \overline{X_2} + ... + \overline{X_n}} = \overline{X_1} \overline{X_2} ... \overline{X_n}$

Следующие 3 правила доказываются на основе законов дистрибутивности, противоречия и "исключенного третьего".

13. Поглощение (элиминация):

а)  $X_1+X_1X_2=X_1$

б)  $X_1(X_1+X_2)=X_1$

14. Закон Блейка-Порецкого:

а)  $X_1 + \overline{X_1} X_2 = X_1 + X_2$

б)  $X_1 (\overline{X_1} + X_2) = X_1 X_2$

15. Склеивание (объединение):

а)  $(X_1 + X_2)(X_1 + \overline{X_2}) = X_1$

б)  $X_1X_2 + X_1\overline{X_2} = X_1$

При проектировании цифровых схем, обеспечивающих выполнение заданной функции, необходимо провести минимизацию, то есть преобразовать заданную функцию с целью уменьшения общего числа переменных и операций. Процесс минимизации имеет большое значение при технической реализации дискретных устройств, так как при этом уменьшается общее количество элементов, увеличивается надежность, и устройства становятся более экономичными.

Приведенные аксиомы, теоремы и тождества булевой алгебры позволяют осуществлять любые преобразования булевых функций, получая в результате переключательные схемы нужной структуры и свойств.

## 7.2 Классификация и основные параметры

Классификация логических элементов построена с учетом того, какие электронные приборы являются основными в соответствующих интегральных схемах, и с учетом особенностей использованных схемотехнических решений.

Можно выделить следующие *классы* логических элементов:

- резисторно-транзисторная логика (РТЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа  $p$  ( $p$ -МДП);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа  $n$  ( $n$ -МДП);
- логика на основе комплементарных ключей на МДП-транзисторах (КМДП, КМОП);
- интегральная инжекционная логика  $I^2L$ ;
- логика на основе полупроводника из арсенида галлия  $GaAs$ .

В настоящее время широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП, ЭСЛ. Для новых разработок рекомендуется использовать КМОП-логику, а также логику на основе *GaAs*.

Логические элементы и другие цифровые электронные устройства выпускаются в составе серий микросхем. *Серия* микросхем – это совокупность микросхем, характеризуемых общими технологическими и схемотехническими решениями, а также уровнями электрических сигналов и напряжения питания.

Приведенная классификация применима не только к логическим элементам, но и микропроцессорам.

В качестве примера приведем следующие серии микросхем: ТТЛ – К155, КМ155, К133, КМ133; ТТЛШ – 530, КР531, КМ531, КР1531, 533, К555, КМ555, 1533, КР1533; ЭСЛ – 100, К500, К1500; КМОП – 564, К561, 1564, КР1554; *GaAs* – К6500.

Каждая серия микросхем, несмотря на то, что она обычно содержит самые разнообразные цифровые устройства, характеризуется некоторым набором параметров, дающих достаточно точное представление об этой серии. При определении этих параметров ориентируются именно на основные логические элементы.

Наиболее важными являются следующие параметры:

- быстродействие характеризуют временем задержки распространения сигнала  $t_{зр}$  и максимальной рабочей частотой  $f_{max}$ .
- нагрузочная способность характеризуется коэффициентом объединения по входу  $K_{об}$  (число логических входов, типичное значение  $K_{об} = 2...8$ ), и коэффициентом разветвления по выходу  $K_{раз}$  (максимальное число однотипных логических элементов, которые могут быть подключены к выходу данного логического элемента, типичное значение  $K_{раз} = 4...10$ ). Для элементов с повышенной нагрузочной способностью  $K_{раз} = 20... 30$ .

– статическая помехоустойчивость характеризуется напряжением  $U_{\text{пст}}$ . Это максимально допустимое напряжение статической помехи на входе, при котором еще не происходит изменение выходных уровней логического элемента.

Важным параметром является мощность, потребляемая микросхемой от источника питания. Если эта мощность различна для двух логических состояний, то часто указывают среднюю потребляемую мощность для этих состояний.

Также важными являются следующие параметры:

- входные пороговые напряжения высокого и низкого уровня  $U_{\text{вх1 пор}}$  и  $U_{\text{вх0 пор}}$ ; соответствующие изменению состояния логического элемента;
- выходные напряжения высокого и низкого уровней  $U_{\text{вых1}}$  и  $U_{\text{вых0}}$ ;
- диапазон напряжений питания.

В устройствах цифровой электроники используются сигналы двух уровней напряжения – высокого (соответствующего уровню логической 1, и низкого, соответствующего уровню логического 0). Например, для серий ТТЛ и ТТЛШ уровень логической 1 находится в пределах  $2,4 \div 5\text{В}$ , а уровень логического 0 составляет  $0 \div 0,4\text{В}$ . Микросхемы серии КМОП работают в широком диапазоне напряжений питания, как правило  $+3 \dots +15\text{В}$ . Уровень логической 1 таких микросхем находится в пределах  $0,6U_{\text{п}} \div U_{\text{п}}$ , а уровень логического 0  $0 \div 0,4U_{\text{п}}$ .

## **7.3 Основные логические элементы**

### **7.3.1 Буфер**

Буфер не изменяет логического состояния цифрового сигнала, т.е. логическая 1 (или 0) на входе вызывает логическую 1 (или 0) на выходе. Таким образом, буфер является повторителем сигнала. Буферы обычно применяются для повышения нагрузочной способности по току, а также



для более точного формирования логических уровней. На рисунке 47 приведено условное графическое обозначение буфера и таблица истинности.

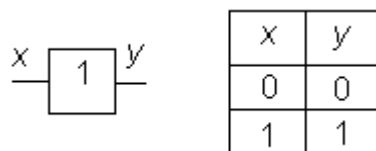


Рисунок 47

### 7.3.2 Инвертор

Инвертор осуществляет инвертирование логического сигнала, т.е. логическая 1 на входе вызовет логический 0 на выходе, и наоборот. Кроме того, инверторы усиливают сигнал по току.

На рисунке 48 приведено условное графическое обозначение инвертора и таблица истинности.

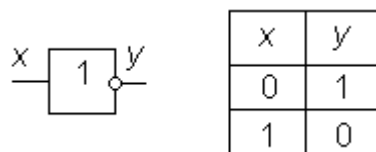


Рисунок 48

### 7.3.3 Элемент И

Элемент И выполняет функцию логического умножения. На выходе элемента И логическая 1 появляется, если только все входы находятся в состоянии логической 1. Все остальные комбинации входных сигналов приводят к появлению на выходе логического 0.

На рисунке 49 приведено условное графическое обозначение элемента 2И и таблица истинности.

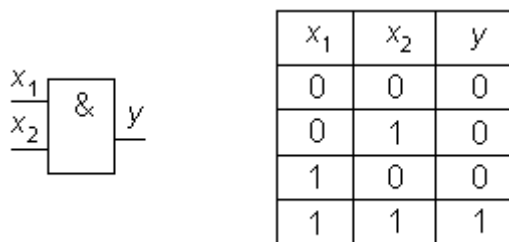


Рисунок 49

#### 7.3.4 Элемент И-НЕ

Элемент И-НЕ выполняет функцию логического умножения и инверсии. На выходе элемента И-НЕ образуется логический 0, когда все входы находятся в состоянии логической 1. Любая другая комбинация входных сигналов приводят к появлению на выходе логической 1.

На рисунке 50 приведено условное графическое обозначение элемента 2И-НЕ и таблица истинности.

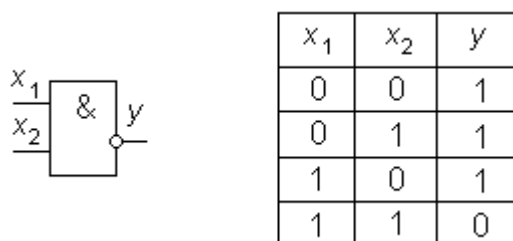


Рисунок 50

#### 7.3.5 Элемент ИЛИ

Элемент ИЛИ выполняет функцию логического сложения. На выходе элемента ИЛИ появляется логическая 1, если хотя бы один из входов находится в состоянии логической 1.

На рисунке 51 приведено условное графическое обозначение элемента 2ИЛИ и таблица истинности.

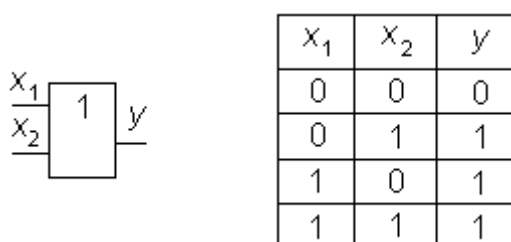


Рисунок 51

### 7.3.6 Элемент ИЛИ-НЕ

Элемент ИЛИ-НЕ выполняет функцию логического сложения и инверсии. На выходе элемента ИЛИ-НЕ появляется логическая 1, когда все входы находятся в состоянии логического 0. Любая другая комбинация входных сигналов приводят к появлению на выходе логического 0.

На рисунке 52 приведено условное графическое обозначение элемента 2ИЛИ-НЕ и таблица истинности.

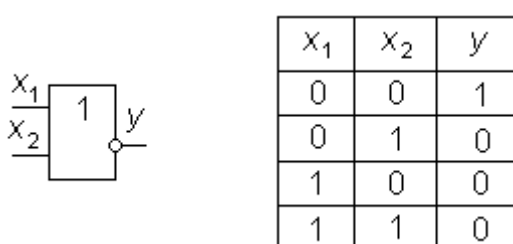


Рисунок 52

### 7.3.7 Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Этот элемент представляет собой сумматор по модулю 2. На выходе элемента ИЛИ-НЕ появляется логический 0, когда все входы находятся в состоянии логического 0 или логической 1. Любая другая комбинация входных сигналов приводят к появлению на выходе логической 1.

На рисунке 53 приведено условное графическое обозначение элемента исключающее ИЛИ-НЕ и таблица истинности.

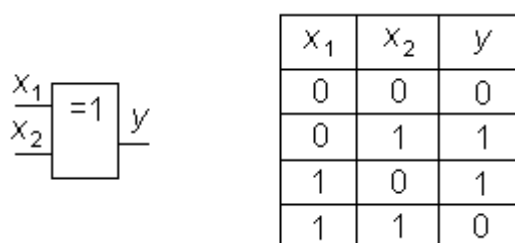


Рисунок 53

## 8. Последовательностные логические элементы

## 8.1 Триггеры

*Триггер* – простейшее последовательностное устройство, которое может находиться в одном из двух возможных состояний и переходить из одного состояния в другое под воздействием входных сигналов. Триггер является базовым элементом последовательностных логических устройств. Входы триггера разделяют на информационные и управляющие (вспомогательные). Это разделение в значительной степени условно. Информационные входы используются для управления состоянием триггера. Управляющие входы обычно используются для предварительной установки триггера в некоторое состояние и для синхронизации.

Триггеры могут иметь 2 выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

Триггеры классифицируют по следующим признакам:

- способу приема информации;
- принципу построения;
- функциональным возможностям.

Различают асинхронные и синхронные триггеры.

Асинхронный триггер изменяет свое состояние непосредственно в момент появления соответствующего информационного сигнала.

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы только при наличии соответствующего сигнала на входе синхронизации  $C$  (от англ. *clock*).

Синхронные триггеры в свою очередь подразделяются на статические и динамические. Статические триггеры воспринимают информационные сигналы при подаче на вход  $C$  логической единицы (прямой вход) или логического нуля (инверсный вход). Динамические триггеры воспринимают информационные сигналы при изменении (перепаде) сигнала на входе

$C$  от 0 к 1 (прямой динамический вход  $C$ ) или от 1 к 0 (инверсный динамический вход  $C$ ).

Статические триггеры в свою очередь подразделяют на одноступенчатые (однотактные) и двухступенчатые (двухтактные). В одноступенчатом триггере имеется одна ступень запоминания информации, а в двухступенчатом – две такие ступени. Вначале информация записывается в первую ступень, а затем переписывается во вторую и появляется на выходе. Двухступенчатый триггер обозначают через  $TT$ .

По функциональным возможностям триггеры разделяют на следующие классы:

- с раздельной установкой состояния 0 и 1 ( $RS$ -триггеры);
- универсальные ( $JK$ -триггеры);
- с приемом информации по одному входу ( $D$ -триггеры);
- со счетным входом ( $T$ -триггеры).

Входы триггеров обычно обозначают следующим образом:

$S$  – вход для установки в состояние «1»;

$R$  – вход для установки в состояние «0»;

$J$  – вход для установки в состояние «1» в универсальном триггере;

$K$  – вход для установки в состояние «0» в универсальном триггере;

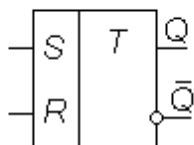
$T$  – счетный (общий) вход;

$D$  – вход для установки в состояние «1» или в состояние «0»;

$V$  – дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (иногда используют букву  $E$  вместо  $V$ ).

#### 8.1.1 Асинхронный $RS$ -триггер.

Условное графическое обозначение асинхронного  $RS$ -триггера и таблица переходов (таблица истинности), описывающая закон функционирования триггера, приведены на рисунке 54. Триггер имеет два информационных входа:  $S$  и  $R$ .



$S$	$R$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	Режим
0	0	0	0	Хранение
		1	1	
0	1	0	0	Установка 0
		1	0	
1	0	0	1	Установка 1
		1	1	
1	1	—	—	Неопределенность

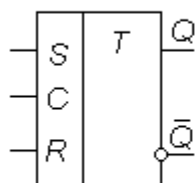
Рисунок 54

Асинхронный  $RS$ -триггер изменяет свое состояние в момент прихода информационных сигналов на входы  $S$  и  $R$ . Комбинация входных сигналов  $S=1, R=1$  является запрещенной, так как после нее триггер оказывается в состоянии (1 или 0), предсказать которое заранее невозможно.

#### 8.1.2 Синхронный $RS$ -триггер.

Условное графическое обозначение синхронного  $RS$ -триггера и таблица переходов приведены на рисунке 55. Триггер кроме двух информационных входов  $S$  и  $R$  имеет вход синхронизации  $C$ .

Изменение состояний выходов триггера происходит в момент прихода импульса на вход синхронизации  $C$ .

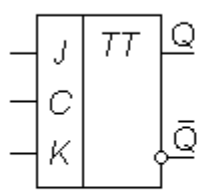


$C$	$S$	$R$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	Режим
1	0	0	0	0	Хранение
			1	1	
1	0	1	0	0	Установка 0
			1	0	
1	1	0	0	1	Установка 1
			1	1	
1	1	1	—	—	Неопределенность

Рисунок 55

#### 8.1.3 $JK$ -триггер.

Условное графическое обозначение  $JK$ -триггера и таблица переходов приведены на рисунке 56. Триггер имеет два информационных входа  $J$  и  $K$ , и вход синхронизации  $C$ , т. е.  $JK$ -триггеры являются синхронными.



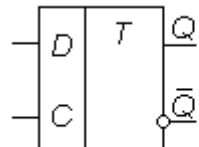
$J$	$K$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	Режим
0	0	0	0	Хранение
		1	1	
0	1	0	0	Установка 0
		1	0	
1	0	0	1	Установка 1
		1	1	
1	1	0	1	$Q^{t+1} = \bar{Q}^t$
		1	0	

Рисунок 56

Отличие  $JK$ -триггера от  $RS$ -триггера состоит в том, что  $JK$ -триггер не имеет неопределенных состояний.

#### 8.1.4 $D$ -триггер.

Условное графическое обозначение  $D$ -триггера и таблица переходов приведены на рисунке 57. Хранение информации в  $D$ -триггерах обеспечивается за счет синхронизации, поэтому все реальные  $D$ -триггеры имеют два входа: информационный  $D$  и синхронизации  $C$ . В этом триггере сигнал на входе по сигналу синхронизации записывается и передается на выход.



$C$	$D$	$Q^{t+1}$
1	0	0
1	1	1

Рисунок 57

Так как информация на выходе остается неизменной до прихода очередного импульса синхронизации,  $D$ -триггер называют также триггером с запоминанием информации или триггером-защелкой.

### 8.1.5 $T$ -триггер (счетный триггер).

$T$ -триггер изменяет свое логическое состояние на противоположное по каждому активному сигналу на информационном входе  $T$ . Условное графическое обозначение двухступенчатого  $T$ -триггера и таблица переходов приведены на рисунке 58.

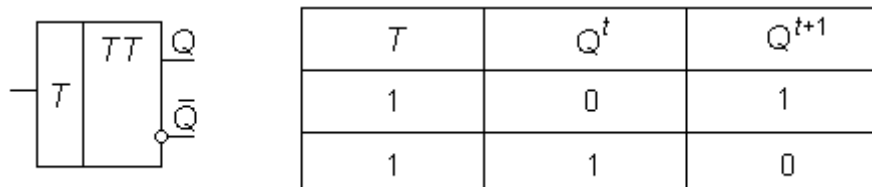


Рисунок 58

## 8.2 Счетчики

Счетчиком называется последовательностное устройство, предназначенное для счета входных импульсов и фиксации их числа в двоичном коде.

Счетчики строятся на основе одноступенчатых связанных между собой триггеров и некоторой комбинационной схемы, предназначенной для формирования сигналов управления триггером.

Основным статическим параметром счетчика является модуль счета  $M$ , который характеризует максимальное число импульсов, после прихода которых счетчик устанавливается в исходное состояние.

Основным динамическим параметром, определяющим быстродействие счетчика, является время установления выходного кода  $t_k$ , характеризующее временной интервал между моментом подачи входного сигнала и моментом установления нового кода на выходе.

По значению модуля счета счетчики подразделяют на:

- двоичные, модуль счета которых равен целой степени числа 2 ( $M=2^n$ );
- двоично-кодированные, в которых модуль счета может принимать любое, не равное целой степени числа 2, значение.



По направлению счета счетчики подразделяют на:

- суммирующие, выполняющие операцию инкремента над хранящимся кодовым словом;
- вычитающие, выполняющие операцию декремента над хранящимся кодовым словом;
- реверсивные, выполняющие в зависимости от значения управляющего сигнала над хранящимся кодовым словом либо операцию декремента, либо инкремента.

По способу организации внутренних связей счетчики делятся на:

- счетчики с последовательным переносом, в которых переключение триггеров разрядных схем осуществляется последовательно один за другим;
- счетчики с параллельным переносом, в которых переключение всех триггеров разрядных схем осуществляется одновременно по сигналу синхронизации;
- счетчики с комбинированным последовательно-параллельным переносом, при котором используются различные комбинации способов переноса.

#### 8.2.1 Суммирующий счетчик.

Суммирующим называется счетчик, выходной код которого увеличивается на 1 с приходом каждого синхроимпульса.

Электрическая схема суммирующего счетчика приведена на рисунке 59. Временные диаграммы, поясняющие алгоритм работы суммирующего счетчика, приведены на рисунке 60. В счетчике используются три *JK*-триггера, каждый из которых работает в режиме *T*-триггера (триггера со счетным входом).

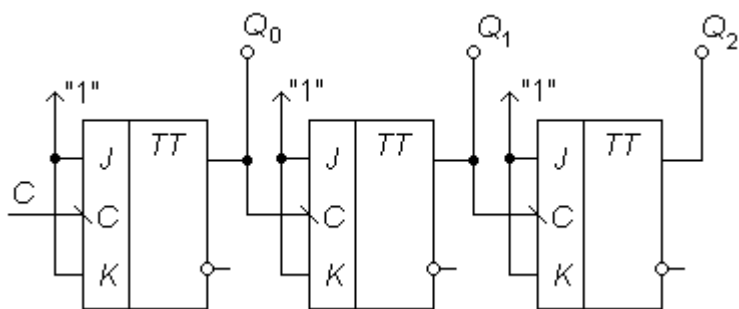


Рисунок 59

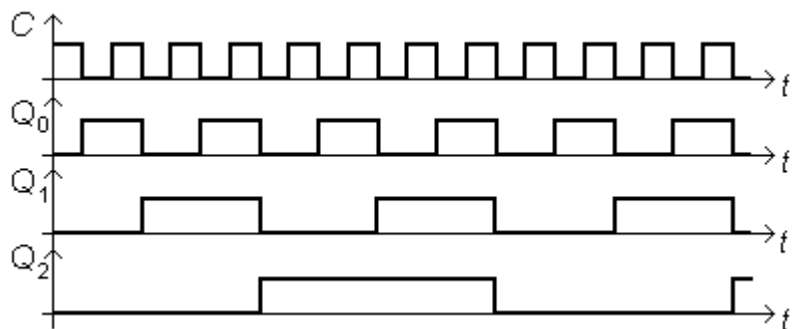


Рисунок 60

Из временных диаграмм видно, что частота каждого последующего импульса в два раза меньше, чем предыдущая, т. е. каждый триггер делит частоту входного сигнала на два, что и используется в делителях частоты.

### 8.2.2 Вычитающий счетчик

Вычитающим называется счетчик, выходной код которого уменьшается на 1 с приходом каждого синхроимпульса.

Электрическая схема вычитающего счетчика приведена на рисунке 61. Временные диаграммы, поясняющие алгоритм работы вычитающего счетчика, приведены на рисунке 62.

В счетчике используются три *JK*-триггера, каждый из которых также работает в режиме *T*-триггера.

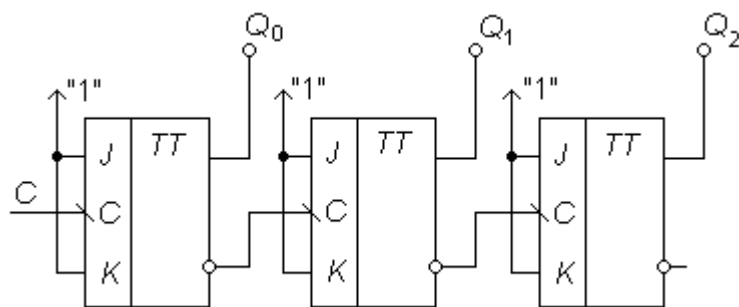


Рисунок 61

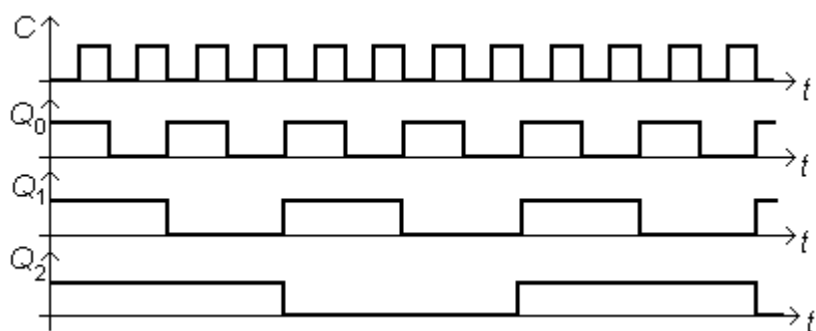


Рисунок 62

### 8.3 Мультиплексоры и демультиплексоры

Мультиплексором называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким информационным входам ( $X_1 \dots X_n$ ) на один выход ( $Y$ ). Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы ( $A$ ) и, как правило, разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу.

Условное графическое изображение двухвходового мультиплексора и таблица состояний приведены на рисунке 63. Работа мультиплексора описывается следующим уравнением:  $Y = X_1 \bar{A} + X_2 A$ .

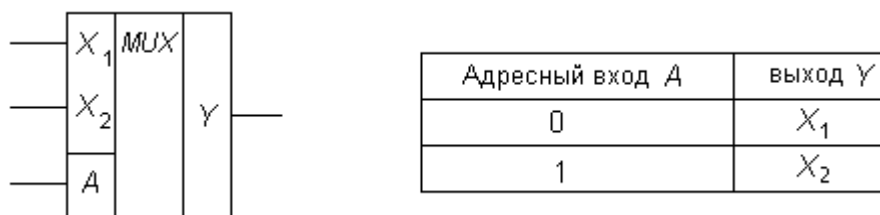


Рисунок 63

Мультиплексоры являются универсальными логическими устройствами и могут использоваться в делителях частоты, триггерных устройствах, сдвигающих устройствах, а также для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный.

Демультиплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа ( $X$ ) поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам ( $Y_1 \dots Y_n$ ) в зависимости от кода на адресных шинах ( $A$ ). Таким образом, демультиплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору.

На рисунке 64 показаны условное графическое обозначение демультиплексора и таблица состояний.

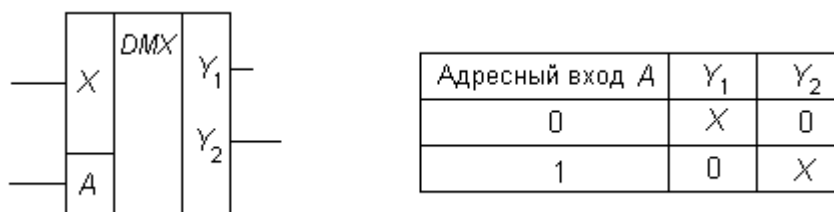


Рисунок 64

## 8.4 Сумматоры

Сумматоры – это комбинационные устройства, предназначенные для сложения чисел. Условное графическое обозначение четырехразрядного сумматора К155ИМ3 приведено на рисунке 65.

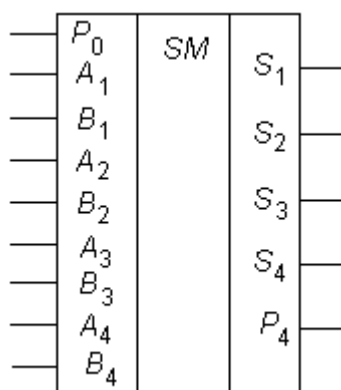


Рисунок 65

У сумматора имеются входы  $A_1 \dots A_4$  и  $B_1 \dots B_4$  для подачи разрядов суммируемых чисел, выходы  $S_1 \dots S_4$  суммы чисел, вход переноса  $P_0$  и выход переноса  $P_4$ .

Сумматоры могут также использоваться для вычитания двоичных чисел. В этом случае операция вычитания заменяется сложением уменьшаемого с вычитаемым, представленным в дополнительном коде.

В виде интегральных микросхем выпускаются одноразрядные, двухразрядные и четырехразрядные двоичные сумматоры.

## 8.5 Регистры

Регистр – это последовательностное логическое устройство, используемое для хранения  $n$ -разрядных двоичных чисел и выполнения преобразований над ними. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Условное графическое обозначение регистра К155ИР15 приведено на рисунке 66.

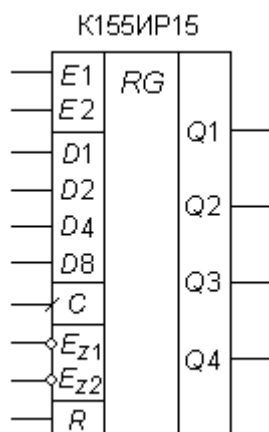


Рисунок 66

У регистра K155IP15 имеются информационные входы  $D_1 \dots D_4$ , выходы  $Q_1 \dots Q_4$ , вход синхронизации  $C$ , вход сброса триггеров в нулевое состояние  $R$ , входы управления режимом работы  $E_1$  и  $E_2$ , входы перевода выходов регистра в высокоимпедансное состояние  $E_{z1}$  и  $E_{z2}$ .

Регистры классифицируются по следующим видам:

- накопительные (регистры памяти, хранения);
- сдвигающие.

В свою очередь сдвигающие регистры делятся:

- по способу ввода-вывода информации:
  - параллельные,
  - последовательные,
  - комбинированные;
- по направлению передачи информации:
  - однонаправленные,
  - реверсивные.

## 8.6 Дешифраторы

Дешифратор – комбинационное устройство, предназначенное для преобразования  $n$ -разрядного двоичного кода в логический сигнал, появляющийся на том выводе, десятичный номер которого соответствует двоичному коду. Также существуют дешифраторы, преобразующие  $n$ -

разрядный двоичный код в логические сигналы, предназначенные для управления семисегментным цифровым индикатором.

На рисунке 67 приведено условное графическое изображение дешифратора К155ИД6.

У дешифратора имеются адресные входы  $A_1 \dots A_4$  и инверсные выходы  $\bar{Y}_0 \dots \bar{Y}_9$ .

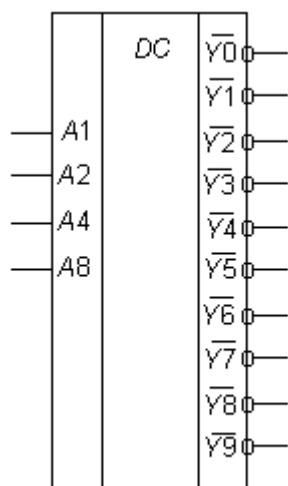


Рисунок 67

## 9. Микропроцессоры

### 9.1 Причины широкого распространения микропроцессоров

Цифровые микросхемы к настоящему времени достигли впечатляющего быстродействия при приемлемом токе потребления. Наиболее быстрые из цифровых микросхем обладают скоростью переключения порядка

3..5 нс (серия микросхем 74ALS). В то же время приходится платить за быстродействие микросхем повышенным током потребления. Исключением являются микросхемы, построенные на основе КМОП технологии (например, микросхемы серий 1564, 74НС, 74АНС). В этих микросхемах потребляемый ток прямо пропорционален скорости переключения логических вентилей в микросхеме, т.е. микросхема автоматически увеличивает ток потребления, если от нее требуется большее быстродействие. В настоящее время подавляющее большинство микросхем выпускается именно по этой технологии.

Часто цифровые устройства выполняют достаточно сложные задачи. Для этого стараются максимально увеличить быстродействие микропроцессоров - это позволяет реализовывать все более сложные устройства в одном и том же объеме.

Еще одной причиной широкого распространения микропроцессоров стало то, что микропроцессор – это универсальная микросхема, которая может выполнять практически любые функции. Универсальность обеспечивает широкий спрос на эти микросхемы, а значит массовость производства. Стоимость же микросхем обратно пропорциональна массовости их производства, то есть микропроцессоры становятся дешевыми микросхемами, и тем самым еще больше увеличивают спрос.

В наибольшей степени все вышеперечисленные свойства проявляются в однокристалльных микро-ЭВМ, или как их чаще называют по области применения, микроконтроллерах. В микроконтроллерах на одном кристалле объединяются все составные части компьютера: микропроцессор (часто называют ядро микроконтроллера), ОЗУ, ПЗУ, таймеры и порты ввода-вывода.

Микроконтроллеры позволяют реализовывать схему управления практически любой сложности на одной универсальной микросхеме.



Микроконтроллеры позволяют реализовывать аппаратуру с минимальной стоимостью, габаритами и током потребления.

Срок разработки аппаратуры на микроконтроллерах минимален, а модернизация аппаратуры часто заключается только в смене управляющей программы.

## **9.2 Классификация микропроцессоров**

В современном мире трудно найти область техники, где не применялись бы микропроцессоры. Они применяются при вычислениях, они выполняют функции управления, они используются при обработке звука и изображения. В зависимости от области применения микропроцессора меняются требования к нему. Это накладывает отпечаток на внутреннюю структуру микропроцессора.

По области применения определилось три направления развития микропроцессоров:

- микроконтроллеры
- универсальные микропроцессоры
- сигнальные микропроцессоры

По внутренней структуре существует два основных принципа построения микропроцессоров:

- Гарвардская архитектура
- Архитектура Фон-Неймана

По системе команд микропроцессоры отличаются огромным разнообразием, зависящим от фирмы-производителя. Тем не менее, можно определить две крайние политики построения микропроцессоров:

- Аккумуляторные микропроцессоры
- Микропроцессоры с регистрами общего назначения

В микропроцессорах с регистрами общего назначения математические операции могут выполняться над любой ячейкой памяти. В зависимости от типа операции команда может быть одноадресной, двухадресной или трехадресной.

Принципиальным отличием аккумуляторных процессоров является то, что математические операции могут производиться только над одной особой ячейкой памяти - аккумулятором. Для того, чтобы произвести операцию над произвольной ячейкой памяти ее содержимое необходимо скопировать в аккумулятор, произвести требуемую операцию, а затем скопировать полученный результат в произвольную ячейку памяти.

В настоящее время в чистом виде не существует ни та, ни другая система команд. Все выпускаемые в настоящее время процессоры обладают системой команд с признаками как аккумуляторных процессоров, так и микропроцессоров с регистрами общего назначения.

В Гарвардской архитектуре принципиально различаются два вида памяти:

- память программ,
- память данных.

В Гарвардской архитектуре принципиально невозможно производить операцию записи в память программ, что исключает возможность случайного разрушения управляющей программы в случае неправильных действий над данными. Кроме того, в ряде случаев для памяти программ и памяти данных выделяются отдельные шины обмена данными. Эти особенности определили области применения этой архитектуры построения микропроцессоров. Гарвардская архитектура применяется в микроконтроллерах, где требуется обеспечить высокую надежность работы аппаратуры и в сигнальных процессорах, где эта архитектура кроме обеспечения высокой надежности работы устройств позволяет обеспечить высокую скорость

выполнения программы, за счет одновременного считывания управляющих команд и обрабатываемых данных, а так же запись полученных результатов в память данных.

Отличие архитектуры Фон Неймана заключается в принципиальной возможности работы над управляющими программами точно так же как над данными. Это позволяет производить загрузку и выгрузку управляющих программ в произвольное место памяти процессора, которая в этой структуре не разделяется на память программ и память данных. Любой участок памяти может служить как памятью программ, так и памятью данных. Причем в разные моменты времени одна и та же область памяти может использоваться и как память программ и как память данных. Для того, чтобы программа могла работать в произвольной области памяти, ее необходимо модернизировать перед загрузкой, то есть работать с ней как с обычными данными. Эта особенность архитектуры позволяет наиболее гибко управлять работой микропроцессорной системы, но создает принципиальную возможность искажения управляющей программы, что понижает надежность работы аппаратуры. Эта архитектура используется в универсальных компьютерах и в некоторых видах микроконтроллеров.

### **9.3 Архитектура микропроцессора**

Структурная схема любого микропроцессора содержит: процессорный элемент, память, интерфейсы ввода/вывода (ИВВ) и устройства ввода-вывода (УВВ).

Память и ИВВ для разных типов МП могут быть как внутренними, т. е. размещаться на том же кристалле, что и процессорный элемент, так и внешними. Процессорный элемент содержит регистры, арифметико-логическое устройство (АЛУ), устройство управления и выполняет функции обработки данных и управления процессами обмена информацией. Память

обеспечивает хранение данных и кодов команд программы. Интерфейсы ввода/вывода предназначены для связи с УВВ, например, с клавиатурой, дисплеем, печатающими устройствами, датчиками. Все элементы структурной схемы соединены с помощью шин.

Структурная схема типичного микропроцессора приведена на рисунке 68. Схема процессора содержит устройство управления, АЛУ и регистры: адреса, данных, команд, а также состояния, аккумулятор, указатель команд и указатель стека.

Устройство управления вырабатывает управляющие сигналы для всех блоков структурной схемы МП в соответствии с кодами команд, внешними управляющими сигналами и сигналами синхронизации, а также управляет обменом информацией между МП, памятью и УВВ. Устройство управления реализует такие функции: начальная установка МП, синхронизация, прерывания, согласование быстродействия модулей МПС.

Функция начальной установки МП. Внешний сигнал начальной установки процессора RESET формируется при включении источника питания МП или при нажатии кнопки RESET. При появлении этого сигнала устройство управления обеспечивает загрузку нулевого значения в указатель команд, который инициирует выборку из памяти байта команды с нулевым адресом. В конце выборки содержимое указателя команд увеличивается на единицу, и выбирается байт команды со следующим адресом. Так выполняется вся записанная в памяти программа.

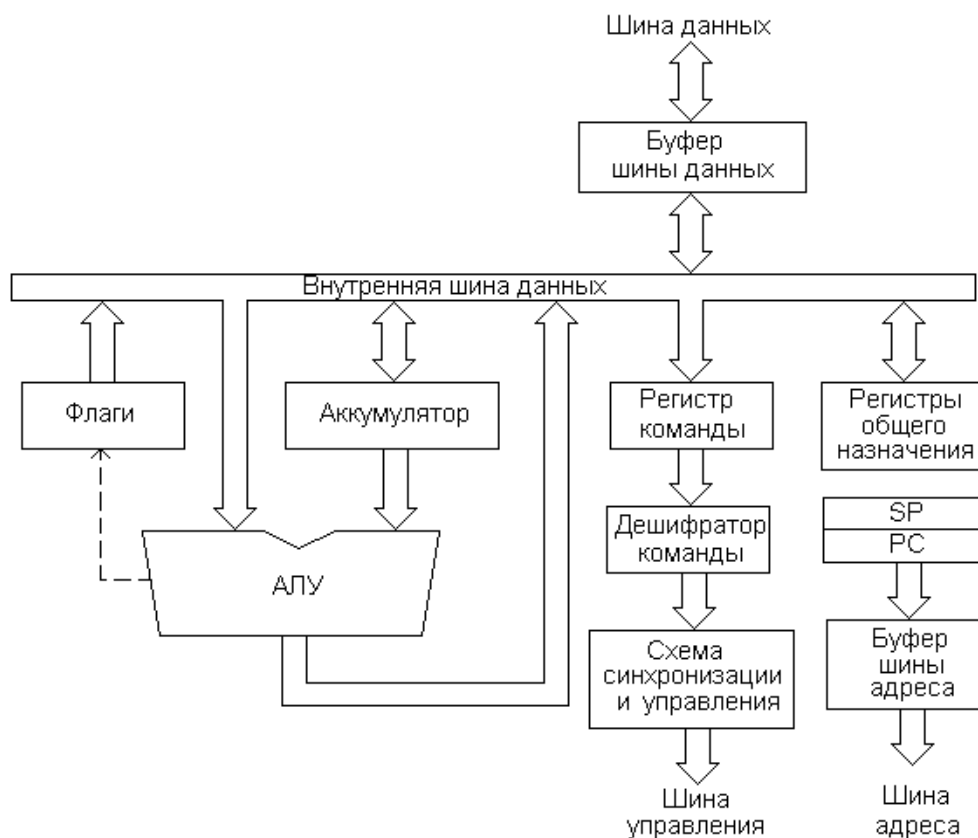
Функция синхронизации. В соответствии с внешними управляющими сигналами и сигналами синхронизации устройство управления синхронизирует работу всех блоков МП.

Функция прерываний. С поступлением сигнала прерывания устройство управления инициирует выполнение подпрограммы обработки соответствующего прерывания. Потребность в реализации функций прерываний воз-

никает тогда, когда во время выполнения основной программы надо перевести МП на решение другой задачи, например, обработки аварийной ситуации или работы с УВВ.

Функция согласования быстродействия модулей микропроцессорной системы. Во время обслуживания памяти и УВВ, быстродействие которых значительно меньше, чем у МП, согласование быстродействия реализуется генерацией тактов ожидания МП. Во время обслуживания устройств с большим быстродействием, чем у МП, используется режим прямого доступа к памяти.

Арифметико-логическое устройство представляет собой комбинационную схему на основе сумматора, которая сигналами с выходов устройства управления настраивается на выполнение определенной арифметической или логической операции: сложение, вычитание, логическое И, логическое ИЛИ, логическое НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, сдвиг, сравнение, десятичная коррекция.



## Рисунок 68

Таким образом, АЛУ выполняет арифметические или логические операции над операндами, которые пересылаются из памяти и/или регистров МП. Операнд – это объект в виде значения данных, содержимого регистров или содержимого ячейки памяти, с которым оперирует команда. Например, в команде сложения операндами являются слагаемые. Операнд может задаваться в команде в виде числа либо находиться в регистре или ячейке памяти. Полученный после выполнения команды в АЛУ результат пересылается в регистр или ячейку памяти.

Регистры предназначены для хранения  $n$ -разрядного двоичного числа. Они представляют собой  $n$  триггеров со схемами управления чтением/записью и выборки. Регистры создают внутреннюю память МП и используются для хранения промежуточных результатов вычислений.

Аккумулятор – это регистр, в котором хранится один из операндов. После выполнения команды в аккумуляторе вместо операнда размещается результат операции. В 8-разрядных процессорах аккумулятор принимает участие во всех операциях АЛУ. В 16-разрядных МП большинство команд выполняется без участия аккумулятора, однако в некоторых командах (ввод, вывод, умножение, деление) аккумулятор действует так же, как и в 8-разрядных МП, т. е. сохраняет один из операндов, а после выполнения команды – результат операции.

Указатель команд или программный счетчик предназначен для хранения адреса ячейки памяти, которая содержит код следующей команды. Программа действий МП записана в памяти в виде последовательности кодов команд. Для перехода к следующей команде содержимое счетчика увеличивается на единицу в момент выборки команды из памяти. Таким образом, в

конце выполнения команды в счетчике команд хранится адрес следующей команды.

Указатель стека – это регистр, который хранит адрес последней занятой ячейки стека. Стеком или стековой памятью называется область памяти, которая организована по принципу "последним пришел – первым вышел".

Регистр команд хранит код команды на протяжении всего времени выполнения команды.

Регистр адреса и регистры данных предназначены для хранения адресов и данных, используемых во время выполнения текущей команды в МП.

Регистр состояния или регистр флагов (признаков) предназначен для хранения информации о результате операции в АЛУ и представляет собой несколько триггеров, выходы которых находятся в единичном или нулевом состоянии. Например, флаг нуля устанавливается в единицу при нулевом результате операции.

#### **9.4 Однокристалльные микроконтроллеры с RISC-архитектурой**

*CISC*-контроллеры характеризуются довольно развитой системой команд, например, микроконтроллеры серии *i80x51* имеют 111 команд. Анализ программ показал, что всего лишь 20% команд используются в 80% случаев. Выполненный на кристалле дешифратор команд, таким образом, используется не в полной мере, а занимает более 70% площади кристалла. Поэтому у разработчиков однокристалльного микроконтроллера возникла идея сократить количество команд, придать им единый формат, и уменьшить площадь кристалла, т. е. использовать *RISC (Reduced Instruction Set Computing)* архитектуру.

Особенностью контроллеров, выполненных по RISC-архитектуре, является то, что все команды выполняются за один-три такта, тогда как в *CISC*-контроллерах – за один-три машинных цикла, каждый из которых состоит из нескольких тактов (например, для *i80x51* – из 12 тактов). Поэтому *RISC* -

контроллеры имеют значительно большее быстродействие. Но более полная система команд *CISC*-контроллеров в некоторых случаях приводит к экономии времени выполнения отдельных фрагментов программы и к экономии памяти программ.

### 9.5 Однокристалльные *PIC*- микроконтроллеры

Типичными представителями *RISC*-процессоров являются *PIC* - контроллеры (*Peripheral Interface Controller*, контроллеры периферийных интерфейсов) производства фирмы *Microchip*. *PIC*-контроллеры применяются в системах высокоскоростного управления автомобильными и электрическими двигателями, приборах бытовой электроники, телефонных приставках с АОН, системах охраны с оповещением по телефонной линии, мини-АТС. Отдельные БИС (отличаются разрядностью ПЗУ: от 12 до 14 бит в серии *PIC16Cxx*, 16 бит — в серии *PIC17Cxx*. Благодаря сокращенному числу команд (от 33 до 35) все команды занимают в памяти одно слово. Время выполнения каждой команды, кроме команд разветвления, составляет четыре такта, т. е. один машинный цикл (200 нс на частоте 20 МГц). Оперативное запоминающее устройство выполнено по схеме с произвольной выборкой с возможностью непосредственной адресации к любой ячейке памяти. Стек реализован аппаратно и имеет глубину 2, 8 или 16 ячеек. Почти во всех *PIC*-контроллерах есть система прерываний, источниками прерываний для которой могут служить переполнения таймеров или изменения состояний сигналов на некоторых входах БИС. В *PIC*-контроллерах предусмотрен бит защиты ПЗУ, который предотвращает нелегальное копирование содержимого памяти.

Контроллеры семейства *PIC16* имеют встроенные ПЗУ емкостью от 0,5 до 4 килослов и ОЗУ емкостью от 32 до 256 байт. Контроллеры *PIC* имеют ПЗУ однократно программируемое, с ультрафиолетовым стиранием, или с электрическим стиранием. Кроме того, *PIC*-контроллеры имеют от од-



ного до трех таймеров/счетчиков, встроенную систему сброса, сторожевой таймер с отдельным встроенным *RC*-генератором, программно выбираемый внутренний тактовый генератор, работающий от встроенного 4 МГц резонатора или внешнего кварцевого или керамического резонатора, который может запускаться как от кварцевого резонатора, так и от *RC*-цепи в широком диапазоне частот — 0÷25 МГц. Количество разрядов портов составляет от 12 до 33. Каждый разряд порта можно запрограммировать на ввод или на вывод. Некоторые *PIC*-контроллеры дополнительно имеют выход ШИМ, с помощью которого можно реализовать ЦАП разрядностью до 16 разрядов, а также последовательный двунаправленный синхронный порт с интерфейсами *SPI*, *I2C*, *SCI/UART*, а также внутренний 8-разрядный АЦП с устройством выборки/хранения и входным аналоговым мультиплексором, встроенный аппаратный 8-разрядный умножитель, выходы ШИМ. Также имеется два режима пониженного энергопотребления (200мкА, 3В при отключенном генераторе и активных аналоговых схемах и 5мкА, 3В при отключенных генераторе и аналоговых схемах).

## 9.6 Однокристальные *AVR*-микроконтроллеры

Однокристальные *AVR* микроконтроллеры представляют 8-разрядные высокопродуктивные *RISC*-контроллеры общего назначения. Они были созданы группой разработчиков исследовательского центра фирмы *Atmel Corp.* (Норвегия), инициалы которых и сформировали марку *AVR*. Особенностью *AVR* - микроконтроллеров является их широкая номенклатура, которая позволяет пользователю выбрать микроконтроллер с минимальной аппаратной избыточностью и, следовательно, наименьшей стоимости. Так, например, в номенклатуру группы *AT90S* входят приборы с ПЗУ объемом от 1 до 8 Кбайт, с самыми разными наборами периферии и в корпусах с количеством выводов от 8 до 48. В данное время в серийном производстве находят-

ся три семейства *AVR* — *Tiny*, *Classic* и *Mega*. Микроконтроллеры *Tiny* — наиболее дешевые и простые, *Mega* — наиболее мощные, а *Classic* занимают промежуточное место между ними.

*AVR*-микроконтроллер содержит Гарвардский процессор, регистровый файл, память программ, память данных и различные интерфейсные схемы (периферию).

Гарвардский процессор реализует полное логическое и физическое разделение не только адресных пространств, но и информационных шин для обращения к памяти программ и к памяти данных, причем способы адресации и доступа к этим массивам памяти также разные. Подобное построение уже более близко к структуре цифровых сигнальных процессоров и обеспечивает повышение производительности. Процессор работает одновременно как с памятью программ, так и с памятью данных, а разрядность шины памяти программ расширена до 16 бит. В микроконтроллерах *AVR* используется технология конвейеризации, вследствие чего цикл "выборка — выполнение" команды существенно сокращен. Для сравнения, у микроконтроллеров семейства *MCS51* короткая команда выполняется за 12 тактов генератора (1 машинный цикл), на протяжении которого процессор последовательно считывает код операции и выполняет ее. В *PIC*-контроллерах фирмы *Microchip*, где уже реализован конвейер, короткая команда выполняется на протяжении 8 периодов тактовой частоты (2 машинных цикла). За это время последовательно дешифруется и считывается код операции, выполняется команда, фиксируется результат и одновременно считывается код следующей операции (одноуровневый конвейер). Поэтому в общем потоке команд одна короткая команда реализуется за 4 периода тактовой частоты или за один машинный цикл. В микроконтроллерах *AVR* тоже используется одноуровневый конвейер при обращении к памяти программ, и короткие команды в общем потоке выполняются, как и в *PIC*-контроллерах, за 1 машинный

цикл. Главное отличие заключается в том, что в микроконтроллерах *AVR* машинный цикл составляет всего один период тактовой частоты.

## 9.7 Сигнальные микропроцессоры

Сигнальные процессоры относятся к классу специализированных микропроцессоров. Они разработаны для решения задач цифровой обработки сигналов, примерами которой являются:

- фильтрация сигнала;
- свертка двух сигналов;
- вычисление значений корреляционной функции двух сигналов;
- вычисления автокорреляционной функции;
- прямое/обратное преобразование Фурье, и т. п.

Задачи цифровой обработки решаются в аппаратуре связи и передачи данных, средствах гидро- и радиолокации, медицинском оборудовании и робототехнике, управлении двигателями, в автомобильной электронике, телевидении, измерительной технике и т. п.

Отличительной особенностью задач цифровой обработки сигналов является потоковый характер обработки больших объемов данных в реальном режиме времени. Работа в реальном времени требует повышенного быстродействия МП, а обработка больших массивов данных – аппаратных средств интенсивного обмена с внешними устройствами.

Высокое быстродействие сигнальных МП достигается благодаря:

- применению модифицированной *RISC*-архитектуры;
- проблемно-ориентированной системе команд, например, включению в систему команд таких операций, как умножение с накоплением с указанным в команде числом выполнений в цикле и с правилом изменения индексов элементов массивов;

- методам сокращения продолжительности командного цикла, таким как конвейеризация команд;
- размещению операндов большинства команд в регистрах;
- использованию теневых регистров для сохранения состояния вычислений при переключении задач;
- наличию аппаратного умножения, позволяющего выполнять умножение двух чисел за один командный такт.
- аппаратной поддержке программных циклов.

Сигнальные процессоры разных компаний-производителей образуют два класса процессоров: более простые и дешевые микропроцессоры обработки данных в формате с фиксированной запятой и более дорогие микропроцессоры, которые аппаратно поддерживают операции над данными в формате с плавающей запятой.

## **10. Полупроводниковые запоминающие устройства**

Микросхемы полупроводниковых запоминающих устройств предназначены для хранения последовательностей команд и изменяющейся информации (данных), используемой в процессе обработки. Выпускается много разновидностей микросхем полупроводниковой памяти. Некоторые из них обеспечивают постоянное хранение программ и данных, поэтому их называют энергонезависимыми. В энергозависимой памяти при выключении питания ее содержимое теряется.

Несмотря на то, что в некоторых специализированных микропроцессорах (рассчитанных, например, на простые и дешевые системы управления) предусматривается небольшая внутренняя память для программ и данных, для большинства микропроцессоров обычно требуется внешняя память. Напомним, что такая память подразделяется на ЗУПВ и ПЗУ.

Память, в которую можно записывать и из которой можно считывать, - это ЗУПВ. Иными словами, мы сами изменяем ее содержимое. Из ПЗУ же можно только считывать информацию; попытка записать в такую память не изменяет ее содержимого. Примерами ПЗУ и ЗУПВ служат компакт-диски, используемые для записи данных.

В микропроцессорных системах для хранения данных применяется малогабаритная и быстродействующая полупроводниковая память. Выпускается несколько типов микросхем ПЗУ для различных целей. В термине ЗУПВ слова «произвольная выборка» просто означают, что в такой памяти одинаково легко осуществляется обращение к любым хранимым в ней данным. В отличие от ЗУПВ имеется память с последовательным доступом, например на магнитной ленте.

### **10.1 Постоянные запоминающие устройства**

Энергонезависимая память в микропроцессорных системах необходима для хранения управляющих программ, операционных систем и интерпретаторов языков программирования высокого уровня. Именно на такие применения и рассчитаны ПЗУ. Если требуется сменить управляющую программу или перейти к другой версии операционной системы, микросхему ПЗУ следует заменить.

В ПЗУ 8-битного микрокомпьютера примерно 4К. байт отводятся для операционной системы, которая обеспечивает ввод с клавиатуры, управляет выводом на дисплей, внешним накопителем и т. п.

Программируемые маской ПЗУ. Если микропроцессорная система рассчитывается на массовый выпуск, например домашний компьютер, наиболее целесообразно применять ПЗУ, программируемые маской или фотошаблоном. Запись в такие устройства осуществляется в процессе производства - хранящиеся данные определяются применяемой маской,

Разработчик системы сообщает спецификации содержимого ПЗУ фирме-изготовителю. Поскольку заказ оказывается выгодным только для партии в десятки тысяч микросхем, разработчик должен быть полностью уверен в том, что данные и программы; безошибочны и не потребуют изменений.

Программируемые ПЗУ с плавкими перемычками. Такие ПЗУ (ППЗУ) оказываются экономичными при среднем объеме производства, и их программирует сам разработчик. Внутри микросхемы находится матрица из нихромовых или поликремниевых перемычек, которые можно расплавить, подав импульс тока с соответствующими параметрами. Программирование занимает значительное время, но сам прибор (программатор) оказывается простым и относительно недорогим. Довольно часто опытные образцы микропроцессорных систем поставляются с ППЗУ, которые после выявления ошибок и при переходе к массовому выпуску заменяются на ПЗУ.

Стираемые ППЗУ. После программирования изменить содержимое рассмотренных выше микросхем ППЗУ нельзя, т. е. они не допускают стирания содержимого и повторного программирования. В то же время стираемые ППЗУ (СППЗУ) обеспечивают многократное стирание их содержимого и программирование.

В корпусе СППЗУ сделано «окно», через которое на матрицу записываемых элементов попадает свет. При экспонировании ультрафиолетовым светом в течение нескольких минут хранимые данные стираются. После этого в микросхему при помощи программатора можно записать новую информацию.

Электрически стираемые ППЗУ. В относительно новых микросхемах электрически стираемых (изменяемых) ППЗУ в отличие от СППЗУ можно стереть содержимое электрическими импульсами, при этом мик-

росхемы не нужно вынимать из гнезд. К сожалению, такие микросхемы довольно дороги и пока не получили широкого распространения, тем более что имеются экономичные КМОП-ЗУПВ, оправдывающие использование батарейного резервного питания.

## **10.2 Запоминающие устройства с произвольной выборкой**

Такие устройства необходимы в любой микропроцессорной системе. Часть их памяти используется операционной системой для хранения системных переменных и в качестве рабочей области. Кроме того, ЗУПВ также требуется операционной системе и управляющей программе в целях организации стека для временного хранения данных. Еще одна область ЗУПВ необходима пользователю для его программ и данных. Кроме того, при наличии растрового дисплея часть ЗУПВ выделяется для экранной памяти; обычно при этом применяется точечное отображение, т. е. каждый бит экранного ЗУПВ соответствует конкретной точке на экране (пикселу).

Биполярные ЗУПВ. Основу биполярных ЗУПВ образует обычный транзисторный триггер. Такая память потребляет значительную мощность, поэтому емкость ее ограничена. Однако быстродействие биполярных ЗУПВ очень высоко, что объясняет их применение в высокопроизводительных системах и в качестве буферов между быстродействующими устройствами и обычной более медленной памятью

Статическая  $n$ -МОП-память. Основным запоминающим элементом статической  $n$ -МОП-памяти также является триггер. Такая память потребляет значительно меньшую мощность, чем биполярные ЗУПВ, что позволяет достичь намного большей плотности упаковки.

Статическая КМОП-память. Запоминающий элемент статической КМОП-памяти аналогичен элементу статической  $n$ -МОП-памяти. В режи-

ме пассивного хранения данных КМОП-память потребляет ничтожную мощность, поэтому она применяется в тех системах, которые должны работать от батарейного питания.

Динамическая  $n$ -МОП-память. Принцип действия динамической  $n$ -МОП-памяти основан на хранении заряда на конденсаторе, а не на применении триггера. Заряд, имеющийся на конденсаторе, необходимо периодически регенерировать. Процесс регенерации заключается в периодическом считывании хранимых данных с их последующей записью. Регенерацию осуществляет либо микропроцессор, либо микросхема контроллера регенерации динамической памяти.

### **10.3 Программируемые логические интегральные микросхемы**

Вследствие быстрого роста сложности электронных систем все чаще требуется применение высокоинтегрированных специализированных интегральных микросхем. Разработка и изготовление таких схем по заказу представляет собой длительный и дорогостоящий процесс, который экономически оправдан только при достаточно большом объеме выпуска. При малой потребности (до 10 000 шт. в год) более выгодно использование стандартных ИМС, специализируемых в сфере потребления после их изготовления. Поскольку для всех ИМС используются одни и те же фотошаблоны, то для изготовителя эти ИМС являются стандартными изделиями. К числу таких изделий микроэлектроники относятся программируемые пользователем логические ИМС (ПЛИС) или программируемые логические приборы - ПЛП (*PLD - Programmable Logic Devices*). Программирование ПЛИС осуществляется самим пользователем, конструктором аппаратуры. В результате программирования в схему вносятся обратимые или необратимые (с точки зрения возможности последующего перепрограммирования) изменения исходной структуры ПЛИС.



Основное преимущество ПЛИС перед другими специализированными схемами - малое время изготовления требуемых заказных вариантов схем. Изделие в готовом виде всегда имеется на складе, и нет необходимости обращаться к изготовителям ИМС для нанесения металлической маски и установки кристалла в корпус. Достаточно включить соответствующие средства программирования и через несколько секунд или минут заказная схема будет готова.

Основное назначение ПЛИС - замена логических серий интегральных микросхем с малой и средней степенями интеграции. В зависимости от уровня сложности одна современная ПЛИС может функционально заменить до 100 и более интегральных микросхем с малой и средней степенями интеграции. Такая замена обеспечивает значительное уменьшение размеров электронных устройств, их более низкую стоимость, а также сокращение времени разработки.

Программируемые логические интегральные микросхемы широко используются в качестве интерфейсных схем, в микропроцессорных системах для организации обмена различными БИС между собой и устройствами ввода-вывода. На базе ПЛИС могут быть изготовлены логические блоки и системы, преобразователи кодов, периферийные контроллеры, микропрограммные устройства управления, конечные автоматы, а также другие специализированные устройства типа умножителей, небольших процессоров и процессоров быстрого преобразования Фурье.

Программируемые логические интегральные микросхемы развиваются в направлении совершенствования архитектуры, технологии, увеличения функциональной сложности и возможностей, быстродействия и числа термов произведений, снижения мощности потребления, в основном за счет перехода на КМОП-технологии, обеспечивающую и большую плотность упаковки элементов.

Создание ПЛИС было стимулировано необходимостью сокращения разрыва в степени интеграции между ИС ЗУ и произвольной логикой. Поэтому и возникла идея построения ПЛП по принципу, аналогичному ЗУ. Эти приборы должны были выполнять функции произвольной логики со многими переменными и использоваться там, где применение для этих целей ЗУ неэффективно.

Первые ПЛИС были изготовлены по биполярной технологии и как программируемые постоянные ЗУ (ППЗУ) программировались пережиганием плавких перемычек. Затем появилась КМОП-технология ПЛИС с плавкими перемычками, были созданы репрограммируемые ПЛИС с ультрафиолетовым и электрическим стиранием записанных логических функций (СПЛИС и ЭСПЛИС), использующие технологию репрограммируемых ППЗУ. Также были созданы ПЛИС, изготовленные по технологии КМОП статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ).

#### 10.4 Структура ПЛИС

Наиболее широко распространенными и известными разновидностями ПЛМ являются ПЛП с плавкими перемычками: программируемые логические матрицы (ПЛМ) - *FPLA* фирмы *Signetics Corporation* и программируемая матричная логика (ПМЛ) — *PAL* фирмы *MMI*.

Архитектура ПЛМ строится таким образом, чтобы на каждом имеющемся вентиле И образовывать как можно больше произведений в пределах возможности прибора. Поэтому логическую схему И называют также термом произведения. Логическое произведение затем выводится на выход через программируемую или фиксированную матрицу ИЛИ. Каждый терм произведения потенциально может использоваться для реализации логических функций и управления внутри ПЛИС.

При всей гибкости ПЛМ они считаются достаточно сложными для большинства потребителей с точки зрения их проектирования. Кроме того, наличие плавких перемычек обеих матрицах влечет за собой их относительно большие размеры по сравнению с ПМЛ и меньшее быстродействие.

Введением своей программируемой матричной логики фирма MMI упростила ПЛМ, закрепив термы произведений за специальными выходами. Наличие одной программируемой матрицы И, а также фиксированной ИЛИ привело к уменьшению размеров ПЛИС и времени распространения сигнала через кристалл, упрощению программирования схем.

Интегральные микросхемы ПМП выпускаются многими фирмами, например *MMI*, *Advanced Micro Devices (AMD)*, *National Semiconductor Corporation (NSC)*, *Texas Instruments (TI)* и др.

В результате усовершенствования ПМЛ и ПЛМ в них были введены дополнительные элементы - триггеры и регистры, связывающие обратной связью выходы и входы. Это позволило использовать матрицы в последовательностных устройствах, в которых новое состояние зависит от предыдущего и новых условий на выходе.

Наряду с традиционными (ПМЛ и ПЛМ) созданы другие приборы программируемой логики с плавкими перемычками.

Программируемые пользователем вентильные матрицы - ППВМ (*FPGA*) построены на концепции, подобной ПМЛ, но имеют более ограниченную гибкость, так как программируемая матрица состоит из простой матрицы И.

Интегральная логика с плавкими перемычками (*IFL*) соединяет многие концепции ПЛМ, ПМЛ и устройств, задающих последовательность (секвенсоры), и обеспечивает высокий уровень гибкости.

В настоящее время создано большое количество типов ПЛИС, имеющих различные наименования, структуры и особенности. Структурная схема ПЛИС приведена на рисунке 69.

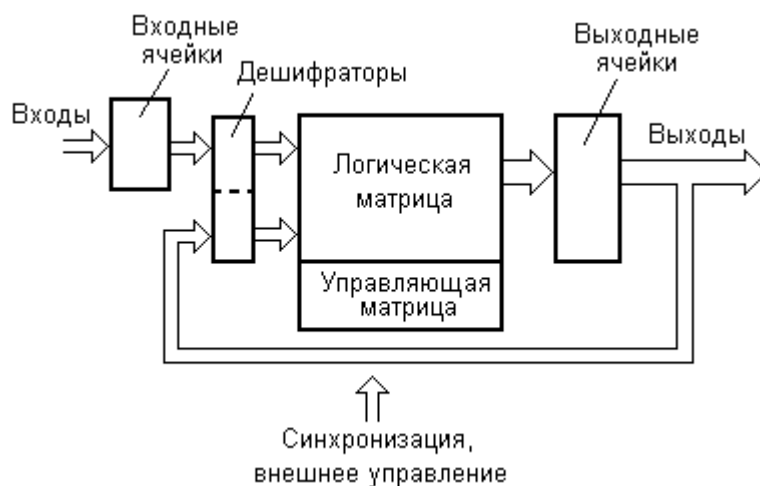


Рисунок 69

Каждый входной сигнал проходит через входную ячейку, которая может содержать элементы памяти, а затем поступает на входной дешифратор. В большинстве ПЛИС он является одноразрядным. Имеются ПЛИМ также с многоразрядными дешифраторами. Логическая матрица может быть полной матрицей И-ИЛИ (ПЛИМ), матрицей с однотипными вентилями, или матрицей с фиксированными или частично программируемыми ИЛИ (ПМЛ). Параллельно логической матрице включена управляющая матрица. Эта матрица предназначена для выбора функции многофункциональных выходных ячеек. Используется множество типов выходных ячеек, в том числе с запоминанием и без запоминания. Некоторые выходные ячейки имеют плавкие перемычки, что позволяет, например, шунтировать элементы запоминания. Ячейки также могут иметь обратную связь с логической и управляющей матрицами, что позволяет создавать синхронные или асинхронные последовательные машины.

## 10.5 Репрограммируемые ПЛИС

Репрограммируемые ПЛИС относятся к новому поколению программируемой логики. Их архитектура направлена на устранение недостатков ранее разработанных ПЛМ с целью повышения конкурентной способности. Во многом этому способствует КМОП-технология, потенциально обеспечивающая меньшую потребляемую мощность и большую степень интеграции. Кроме того, повышению степени интеграции способствуют меньшие по сравнению с плавкими перемычками размеры программируемых структур репрограммируемых ПЛИС.

Особенностью многих КМОП ПЛИС является сверхнизкая мощность потребления в резервном режиме. Это означает, что энергия от источника питания потребляется только тогда, когда изменяются входные сигналы. Хотя это приводит к дополнительной задержке сигнала, но она получается относительно малой. Например, у ПЛИС серии *EP* фирмы *Altera* типовой ток потребления уменьшается с  $15 \div 50$  мА в активном режиме (10 МГц) до 10 мкА в резервном. Эта особенность используется при ограниченных возможностях источника питания.

Репрограммируемые логические интегральные микросхемы и особенно ЭСПЛИС считаются наиболее перспективными для использования в аппаратуре. Изменение их конфигурации и повторное использование может быть осуществлено непосредственно в аппаратуре. В условиях производства и эксплуатации ЭСПЛИС наиболее полно позволяют реализовать преимущества сокращения номенклатуры складских запасов и универсальности программируемой конфигурации.

Один кристалл ЭСПЛИС позволяет осуществлять модификацию, обслуживание, модернизацию и функциональные изменения в аппаратуре в условиях ее эксплуатации.

Технология КМОП обеспечивает репрограммируемым ПЛИС высокую помехоустойчивость и большой диапазон рабочих напряжений.

## **11. Устройства ввода-вывода информации**

### **11.1 Организация ввода/вывода микропроцессоров**

Вводом/выводом (ВВ) называется передача данных между микропроцессором и памятью и внешними устройствами (ВУ). Архитектура ВВ (режимы работы, особенности прерываний, скорость обмена и др.) является решающим фактором эффективности всей системы в целом. Критическую роль средства ВВ играют в управляющих ЭВМ, и часто определяют выбор машины для конкретного применения.

### **11.2 Подключение внешних устройств**

Подключение внешних устройств к системной шине осуществляется посредством электронных схем-контроллеров ввода/вывода (ВВ), предназначенных для согласования электрических параметров и ввода/вывода данных и управляющей информации.

В процессе ввода/вывода передается информация двух видов: команды управления и собственно данные. Команды от процессора инициируют действия, связанные непосредственно с передачей данных или же служебные действия - запуск устройства, запрещение прерываний и т.п. Внешние устройства сигнализируют о своём состоянии с помощью слов состояния; они содержат информацию об определенных режимах работы, например о готовности устройства к передаче данных, о наличии ошибок при обмене и т.п. Состояние обычно представляется в некоторой кодированной форме - один бит для каждого признака либо код ошибки.

Регистр, содержащий группу бит, к которому процессор обращается в операциях ВВ, образует порт ВВ. Внешнее устройство, которое может выполнять ввод и вывод, содержит следующие регистры ВВ: регистр выходных данных (выходной порт), регистр входных данных (входной порт), регистр управления и регистр состояния. Каждый из этих регистров имеет однозначный адрес, который идентифицируется дешифратором адреса. В зависимости от особенностей устройства регистры состояния и управления могут объединяться в один регистр, в устройстве ввода или вывода может использоваться только регистр входных или выходных данных, для ввода и вывода может использоваться двунаправленный порт.

Непосредственные действия, связанные с вводом/выводом, реализуются одним из двух способов, различающихся адресацией регистров ВВ.

Интерфейс с "изолированными шинами" характеризуется отдельной адресацией памяти и внешних устройств при обмене информацией. Изолированный ВВ предполагает наличие специальных команд ввода/вывода, например *i80x86*. При выполнении команды ввода содержимое адресуемого входного регистра *PORT* передается в аккумулятор процессора, а при выполнении команды *OUT* содержимое аккумулятора передается в выходной порт *PORT*. В процессоре могут быть и другие команды, относящиеся к ВВ и связанные с проверкой и модификацией содержимого регистра управления и состояния.

В случае совмещенной шины устройства ВВ делят с памятью одно адресное пространство, в котором некоторый небольшой сегмент отводится устройствам ВВ. Специальных команд для организации ввода/вывода при этом не используется, и доступ идет аналогично доступу к памяти. Для адресации адресных пространств используются 2 управляющих сигнала: считывание данных из памяти и запись данных в память.

В операционных системах ЭВМ имеется набор подпрограмм (драйверов ВВ), управляющих операциями ВВ стандартных внешних устройств.

## **12. Интерфейсы**

Интерфейсом называется устройство, предназначенное для связи двух устройств между собой. Интерфейсы подразделяются на последовательные и параллельные. В последовательном интерфейсе данные передаются по одному проводу с помощью определенной последовательности битов. В параллельном интерфейсе данные передаются по нескольким проводам одновременно.

Для соединения со стороны компьютера используется интерфейс, называемый *COM*-порт (*COMmunication port*, или коммуникационный порт). Этот порт обеспечивает асинхронный обмен и реализуется на микросхемах универсальных асинхронных приемопередатчиков (*UATR, Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), совместимых с семейством *i8250*. Хотя стандарт *RS-232C* предусматривает и асинхронный, и синхронный режимы обмена, *COM*-порт компьютера поддерживает только асинхронный режим. Для реализации синхронного обмена применяются специальные адаптеры.

### **12.1 Интерфейс *RS-232***

Из-за простоты и низких аппаратных требований (в сравнении, например, с параллельным интерфейсом), последовательные интерфейсы активно используются в электронной промышленности. В настоящее время наиболее распространенным является стандарт, разработанный Ассоциацией промышленных средств связи (*TIA, Telecommunication Industry Association*) и Ассоциацией электронной промышленности (*EIA, Electronic In-*



dustries Alliance) "*EIA/TIA-232-E*", более известный под названием "*RS-232*".

Стандарт *RS-232* (его официальное название "*Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Termination Equipment Employing Serial Binary Data Interchange*") предназначен для подключения аппаратуры, передающей или принимающей данные, к оконечной аппаратуре каналов данных. Стандарт описывает управляющие сигналы интерфейса, пересылку данных, электрический интерфейс и типы разъемов.

Интерфейс *RS-232* используется и во многих устройствах обычного персонального компьютера, начиная с "мыши" и модема до ключей аппаратной защиты. И хотя уже все компьютеры имеют интерфейс *USB*, интерфейс *RS-232* еще жив и активно применяется.

Согласно стандарту *RS-232*, сигнал (последовательность битов) передается напряжением. Передатчик и приемник являются *несимметричными*: сигнал передается относительно общего провода (в отличие от симметричной передачи протокола *RS-485* или *RS-422*). Логическому нулю на входе приемника соответствует диапазон +3...+12 В, а логической единице соответствует диапазон -12...-3 В. Диапазон -3...+3 В — зона нечувствительности, обеспечивающая гистерезис приемника (передатчика). Уровни сигнала на выходах должны быть в диапазоне -12...-5 В для представления логической единицы и +5...+12 В для представления логического нуля.

Стандарт *RS-232* состоит из трех частей. Первая часть, стандарт *RS-232C*, была принята в 1969 году и содержит описание электрических цепей и сигналов несимметричной последовательной связи. Вторая часть, стандарт *RS-232D*, принята в 1987 году и определяет дополнительные линии тестирования, а также формально описывает разъем *DB-25*. Третья часть, *RS-232E*, принята в 1991 году.

На рисунке 70 представлена схема соединения компьютера с удаленным сканером.



Рисунок 70

*DTE (Data Terminal Equipment)* – оконечное оборудование, передающее или принимающее данные. В качестве *DTE* может выступать компьютер, принтер, плоттер или другое периферийное оборудование. *DCE (Data Communications Equipment)* – аппаратура канала данных. Функция *DCE* состоит в обеспечении возможности передачи информации между двумя или большим числом *DTE*. Для этого *DCE* должно обеспечить соединение с *DTE*, с одной стороны, и с каналом передачи, с другой стороны. Роль *DCE* чаще всего выполняем модем. Он оказывается соединительным звеном в последовательной цепочке между компьютером и сканером.

## 12.2 Сигналы интерфейса RS-232

Последовательный порт *RS-232C* имеет форму 25-контактного разъема типа *D*.

Функции сигнальных линий интерфейса *RS-232* приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер контакта	Сокращение	Направление	Полное название
1	<i>FG</i>	—	Основная или защитная земля
2	<i>TD (TXD)</i>	к <i>DCE</i>	Передаваемые данные
S	<i>RD (RXD)</i>	к <i>DTE</i>	Принимаемые данные

4	<i>RTS</i>	к <i>DCE</i>	Запрос передачи
5	<i>CTS</i>	к <i>DTE</i>	Сброс передачи
6	<i>DSR</i>	к <i>DTE</i>	Готовность модема
7	<i>SC</i>	—	Сигнальная земля
8	<i>DCD</i>	к <i>DTE</i>	Обнаружение несущей данных
9	—	к <i>DTE</i>	(Положительное контрольное напряжение)
10	—	к <i>DTE</i>	(Отрицательное контрольное напряжение)
11	<i>QM</i>	к <i>DTE</i>	Режим выравнивания
12	<i>SDCD</i>	к <i>DTE</i>	Обнаружение несущей вторичных данных
13	<i>SCTS</i>	к <i>DTE</i>	Вторичный сброс передачи
14	<i>STD</i>	к <i>DCE</i>	Вторичные передаваемые данные
15	<i>TC</i>	к <i>DTE</i>	Синхронизация передатчика
16	<i>SRD</i>	к <i>DTE</i>	Вторичные принимаемые данные
17	<i>RC</i>	к <i>DTE</i>	Синхронизация приемника
18	<i>DCR</i>	к <i>DCE</i>	Разделенная синхронизация приемника
19	<i>SRTS</i>	к <i>DCE</i>	Вторичный запрос передачи
20	<i>DTR</i>	к <i>DCE</i>	Готовность терминала
21	<i>SQ</i>	к <i>DTE</i>	Качество сигнала
22	<i>RI</i>	к <i>DTE</i>	Индикатор звонка
23	—	к <i>DCE</i>	(Селектор скорости данных)
24	<i>TC</i>	к <i>DCE</i>	Внешняя синхронизация передатчика
25	—	к <i>DCE</i>	(Занятость)

### 12.3 Классы сигналов

Сигналы интерфейса *RS-232C* подразделяются на следующие классы.

Последовательные данные (например, *TXD*, *RXD*). Интерфейс *RS-232C* обеспечивает два независимых последовательных канала данных: первичный (главный) и вторичный (вспомогательный). Оба канала могут работать в дуплексном режиме, т. е. одновременно осуществляют передачу и прием информации.

Управляющие сигналы квитирования (например, *RTS*, *CTS*). Сигналы квитирования — это средство, с помощью которого обмен сигналами позволяет *DTE* начать диалог с *DCE* до фактической передачи или приема данных по последовательной линии связи.

Сигналы синхронизации (например, *TC*, *RC*). В синхронном режиме (в отличие от более распространенного асинхронного) между устройствами необходимо передавать сигналы синхронизации, которые упрощают синхронизм принимаемого сигнала в целях его декодирования.

### 12.4 Виды сигналов в интерфейсе *RS-232*

В большинстве систем, содержащих интерфейс *RS-232C*, данные передаются асинхронно, т. е. в виде последовательности пакетов данных. Каждый пакет содержит один символ кода *ASCII* (американский стандартный код для обмена информацией), причем информация в пакете достаточна для его декодирования без отдельного сигнала синхронизации.

Символы кода *ASCII* представляются семью битами, например буква А имеет код 1000001. Чтобы передать букву А по интерфейсу *RS-232C*, необходимо ввести дополнительные биты, обозначающие начало

и конец пакета. Кроме того, желательно добавить лишний бит для простого контроля ошибок по паритету (четности).

Наиболее широко распространен формат, включающий в себя один стартовый бит, один бит паритета и два стоповых бита. Эквивалентный ТТЛ-сигнал при передаче буквы А показан на рисунке 71. Начало пакета данных всегда отмечает низкий уровень стартового бита. После него следует 7 бит данных символа кода *ASCII*. Бит паритета содержит 1 или 0 так, чтобы общее число единиц в 8-битной группе было нечетным (нечетный паритет - нечетность) или четным (четный паритет - четность). Последними передаются два стоповых бита, представленных высоким уровнем напряжения.

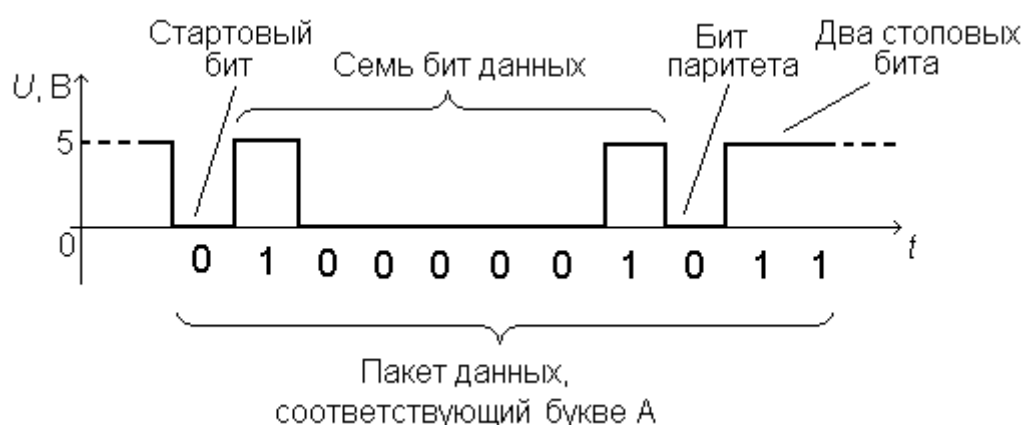


Рисунок 71

Таким образом, полное асинхронно передаваемое слово данных состоит из 11 бит (фактические данные содержат только 7 бит) и записывается в виде 01000001011. Здесь использован четный паритет, поэтому девятый бит содержит 0.

Используемые в интерфейсе *RS-232C* уровни сигналов отличаются от уровней сигналов, действующих в микрокомпьютере. Логический "0" представляется положительным напряжением в диапазоне от +3 до +25В, а логическая "1" - отрицательным напряжением в диапазоне от -3 до -25В. На рисунке 72 показан сигнал пакета данных для кода буквы А в

том виде, в каком он существует на линиях *TXD* или *RXD* интерфейса *RS-232C*.

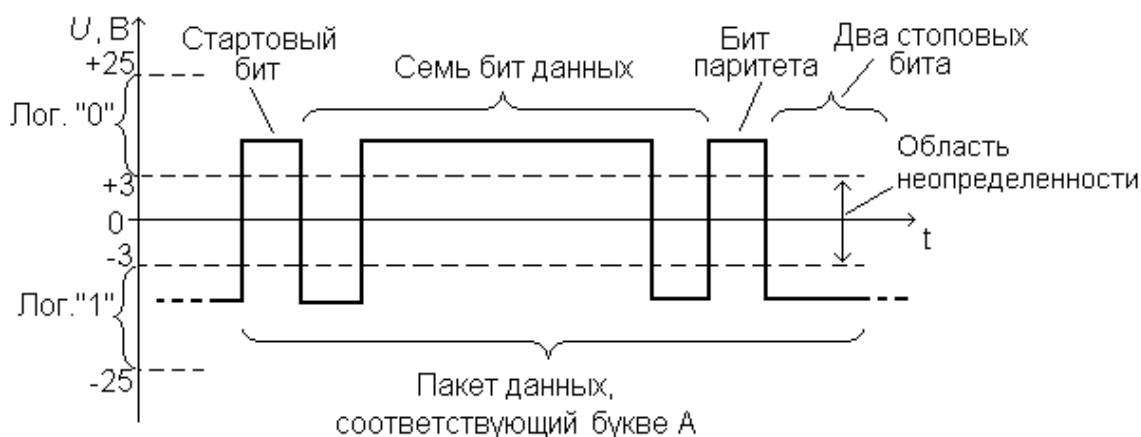


Рисунок 72

Сдвиг уровня, т. е. преобразование ТТЛ-уровней в уровни интерфейса *RS-232C* и наоборот, производится специальными микросхемами драйвера линии и приемника линии.

## 12.5 Интерфейс *RS-485*

Полное название этого стандарта *TIA/EIA-485A* (аналогичный стандарт описывается в *ISO 8482*). Он определяет требования к электрическим характеристикам формирователей и приемников и является основой многих промышленных стандартов. *RS-485* является аппаратной "разновидностью" *RS-232*, но требует дополнительных программных решений.

Несмотря на распространенность, протокол *RS-232* имеет несколько существенных недостатков:

- необходимость трехпроводной линии;
- длина соединяющих проводов не может превышать 10÷15 метров;
- к одному порту компьютера может быть подключен только один абонент.

Избавиться от этих недостатков помогает специальный интерфейс *RS-485*, для реализации которого достаточно двухпроводной линии, длина кабеля может достигать 1 км (для низких скоростей передачи до 3 км), а количество подключаемых к одному порту устройств ограничено 32 абонентами.

Обычная система, основанная на стандарте *RS-485*, содержит несколько приемников, несколько формирователей и согласующих резисторов. Физически такая сеть представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары – двух скрученных проводов. Сигнал передается с помощью разности потенциалов между двумя проводами: по одному проводу идет оригинальный сигнал, а по второму – его инверсная копия (этот принцип называется дифференциальной (балансной) передачей данных). Другими словами, если на одном проводе 1, то на другом 0, и наоборот. Таким образом, между двумя проводами витой пары всегда есть разность потенциалов: при 1 она положительна, при 0 – отрицательна. Такой способ передачи обеспечивает высокую помехоустойчивость, т. к. помеха действует практически одинаково на оба провода, оставляя разницу потенциалов неизменной.

Аппаратная часть этой системы представляет собой микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам *UART*-контроллера).

Интерфейс *RS-485* представляет собой полудуплексный интерфейс. Прием и передача ведутся по одной паре проводов с разделением по времени. Во время приема отключается передатчик, а во время передачи – приемник. Для переключения приема и передачи используется один из управляющих сигналов порта. Этот сигнал подается на вход "разрешение приемника", а его инвертированное значение – на вход "разрешение передатчика".

Все устройства подключаются к витой паре одинаково: прямые выходы к одному проводу, а инверсные – к другому проводу.

Количество подключаемых устройств ограничивается входным сопротивлением со стороны линии. Обычно эта величина составляет 12 кОм, и, с учетом согласующих резисторов, ограничивает сеть 32 абонентами.

## **12.6 Универсальная приборная шина *IEEE-488***

Шина *IEEE-488*, называемая также приборной шиной *Hewlett-Packard*, широко применяется для соединения микрокомпьютерных контроллеров в автоматическом испытательном оборудовании *ATE*. Большинство современных электронных приборов, включая цифровые вольтметры и генераторы сигналов, оснащаются интерфейсом *IEEE-488*. Последний позволяет подключать приборы к микрокомпьютерному контроллеру, который управляет работой приборов и обрабатывает передаваемые ими данные.

Стандарт *IEEE-488* определяет следующие типы устройств:

- приемники, получающие информационные и управляющие сигналы от других устройств, подключенных к шине, но не передающие данные. Типичным примером приемника служит генератор сигналов;
- передатчики, которые только помещают данные на шину, но не принимают данные. Отметим, что в любой момент времени активным является лишь один передатчик, но получать данные могут несколько приемников одновременно;
- передатчик-приемник, принимающий данные с шины и передающий их на шину. Типичным примером такого устройства является цифровой мультиметр. Данные поступают в прибор для выбора требуемого диапазона и возвращаются на шину в виде цифровых отсчетов напряжения, тока или сопротивления;



- контроллер, применяющийся для управления передачами данных по шине и их обработки. Контроллером в системе *IEEE-488* почти всегда является микрокомпьютер; во многих системах используются персональные компьютеры фирмы *IBM*, но и другими фирмами выпускаются специализированные микропроцессорные контроллеры.

Шина *IEEE-488* обладает восемью многофункциональными двуправленными линиями данных. Они применяются для передач данных, адресов, команд и байт состояния. Кроме того, имеются пять линий управления шиной и три линии квитирования.

О наличии команд на шине сигнализирует низкий уровень на линии *ATN*. Затем контроллер помещает на шину команды, которые передаются в отдельные устройства, идентифицируемые адресами на пяти младших линиях шины данных. Можно выдавать также («широковещательные») команды для всех устройств.

Так как физические расстояния между устройствами невелики, скорость передачи данных довольно высока (от 50 до 250 кбайт/с). На практике скоростью передачи данных управляет самый медленный приемник.

### 13. Контрольные задания

#### 13.1. Однофазный мостовой выпрямитель с емкостным фильтром

Рассчитать однофазный мостовой выпрямитель с емкостным фильтром, представленный на рисунке 73. Входное напряжение  $U_1$ , напряжение на нагрузке  $U_n$ , ток нагрузки  $I_n$ , коэффициент пульсаций  $\varepsilon$  и внутреннее

сопротивление выпрямителя  $r$  ( $r=0,1R_n$ ) приведены в таблице 2. Определить параметры выпрямителя: среднее значение тока через одну пару тиристор - диод  $I_{cp}$ , амплитудное значение тока через одну пару тиристор - диод  $I_m$ , максимальное значение напряжения, приложенное к одной паре тиристор - диод  $U_{обр\ max}$ ; параметры трансформатора: ток первичной обмотки  $I_1$ , ток вторичной обмотки  $I_2$ , коэффициент трансформации  $k_m$ , полная мощность трансформатора  $S_m$  и емкость фильтра  $C$ .

Таблица 2

№ вар.	$U_1$ , В	$U_n$ , В	$\alpha$ , град	$I_n$ , мА	$\varepsilon$	№ вар.	$U_1$ , В	$U_n$ , В	$\alpha$ , град	$I_n$ , мА	$\varepsilon$
1	220	24	0	8	0,05	26	220	15	60	3	0,08
2	220	18	30	6	0,06	27	380	18	90	4,5	0,09
3	220	12	15	4	0,07	28	660	24	0	8	0,10
4	220	20	60	3	0,07	29	127	15	25	7,5	0,11
5	220	24	90	8	0,09	30	220	18	15	6	0,11
6	380	60	0	12	0,10	31	380	24	45	4,8	0,10
7	380	40	30	8	0,11	32	660	30	35	5	0,09
8	380	30	45	6	0,10	33	127	18	90	4,5	0,08
9	380	50	60	10	0,09	34	220	24	60	8	0,07
10	380	50	0	10	0,06	35	380	35	0	7	0,06
11	127	20	15	10	0,06	36	660	48	15	12	0,05
12	127	20	15	10	0,06	37	127	24	25	4	0,04
13	127	15	20	705	0,05	38	220	36	35	18	0,05
14	127	12	30	6	0,04	39	380	48	45	12	0,06
15	127	9	45	4,5	0,05	40	660	60	60	20	0,07
16	660	18	60	4,5	0,06	41	127	35	90	7	0,08

17	660	24	90	6	0,07	42	220	48	60	8	0,09
18	660	36	60	9	0,08	43	380	60	45	10	0,10
19	660	48	45	12	0,09	44	660	50	35	10	0,11
20	660	60	30	15	0,10	45	127	9	25	3	0,10
21	127	9	0	4,5	0,11	46	220	12	15	3	0,09
22	220	12	15	4	0,04	47	380	18	0	4,5	0,08
23	380	15	25	3,75	0,05	48	660	24	45	8	0,07
24	660	18	35	3,6	0,06	49	127	12	25	6	0,06
25	127	12	45	2	0,07	50	220	25	60	5	0,05

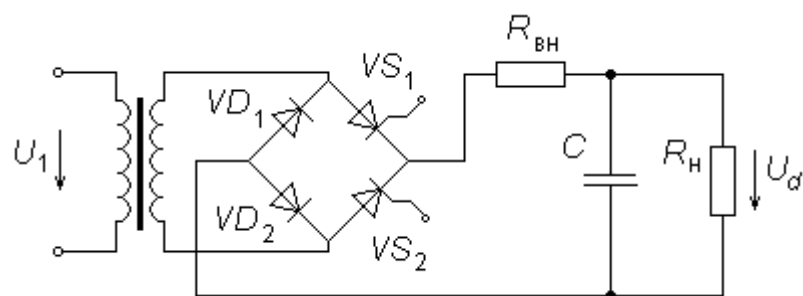
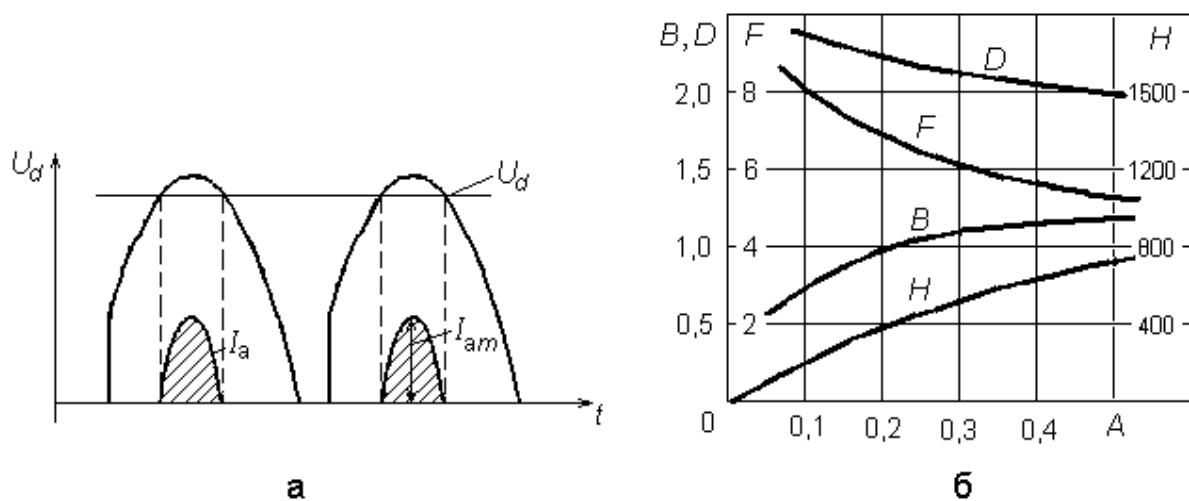


Рисунок 73



## Рисунок 74

### 13.1.1 Методические указания

При расчете выпрямителя с  $C$ -фильтром пренебрегают пульсациями выходного напряжения, считая, что выпрямитель работает на неизменную противо-ЭДС  $U_H$  (рисунок 74,а).

1. Найти величину сопротивления нагрузки:

$$R_H = U_H / I_H$$

2. Определить величину внутреннего сопротивления выпрямителя (суммарное сопротивление переходов тиристора, диода и вторичной обмотки трансформатора):

$$r = 0,1R_H$$

3. По известным  $R_H$  и  $r$  определить расчетный коэффициент  $A$ :

$$A = \pi \cdot r / 2R_H$$

4. Используя коэффициент  $A$ , по графикам рисунка 74,б находим вспомогательные коэффициенты  $B$ ,  $F$  и  $D$ , являющиеся функциями коэффициента  $A$ .

5. Найти действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_2 = B \cdot U_H$$

6. Найти величину обратного максимального напряжения  $U_{обр\ max}$ , приложенного к р-п переходам пары диод-тиристор:

$$U_{обр\ max} = \sqrt{2} \cdot U_2$$

7. Рассчитать среднее значение тока  $I_{cp}$  одну пару тиристор - диод:

$$I_{cp} = I_H / 2$$

8. Определить амплитудное значение выпрямленного тока:

$$I_m = F \cdot I_{cp}$$

9. Определить действующее значение выпрямленного тока:

$$I = D \cdot I_n / 2$$

10. Найти среднее значение выпрямленного напряжения для заданного угла открывания тиристора:

$$U_{n\alpha} = U_{n0}(1 + \cos\alpha)/2$$

При угле открывания тиристора  $\alpha=0$  среднее значение выпрямленного напряжения находится по формуле:

$$U_{i0} = \frac{2U_{2m}}{\pi} = 0,9U_2$$

где:  $U_2$  – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

11. Определить действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = 1,414D \cdot I_{cp}$$

12. Определить коэффициент трансформации трансформатора:

$$k_T = U_2 / U_1$$

13. Найти действующее значение тока первичной обмотки трансформатора:

$$I_1 = k_T I_2$$

14. Определить расчетную мощность трансформатора:

$$P_T = 1,23P_n$$

15. Определить полную мощность трансформатора:

$$S_T = 1,4P_n$$

16. Рассчитать величину емкости конденсатора фильтра, необходимого для получения коэффициента пульсаций  $\epsilon$ , заданного в таблице 1.

$$C = H / \epsilon \cdot r$$

где:  $C$  – емкость фильтра выпрямителя (мкФ),

$r = 0,1R_n$  – внутреннее сопротивление выпрямителя (Ом).

### 13.2. Устройство на операционных усилителях.

Рассчитать параметры устройства на операционных усилителях (ОУ), функциональная схема которого приведена на рисунке 75, и обеспечивающего:

- 1) усиление напряжения  $u_1$  с коэффициентом передачи по напряжению  $k_1$ ,
- 2) сложение напряжений  $u_2$  и  $u_3$  с коэффициентами передачи по напряжению  $k_2$  и  $k_3$  соответственно;
- 3) выпрямление напряжения  $u_4$  после сумматора с коэффициентом передачи по напряжению  $k_4$ .

Определить для заданных напряжений  $u_1$  и  $u_3$  средневывпрямленное выходное напряжение  $U_0$ .

Значения  $u_1$ ,  $u_3$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$  приведены в таблице 3.

Для нечетных вариантов использовать однополупериодное выпрямление, а для четных вариантов - двухполупериодное.

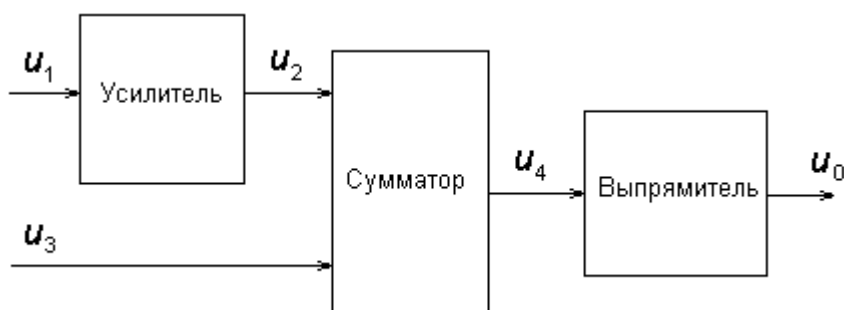


Рисунок 75

#### 13.2.1 Методические указания

Для расчета устройства на ОУ необходимо использовать следующие каскады:

##### 13.2.1.1 Инвертирующий усилитель на ОУ.

Схема инвертирующего усилителя на ОУ приведена на рисунке 76.

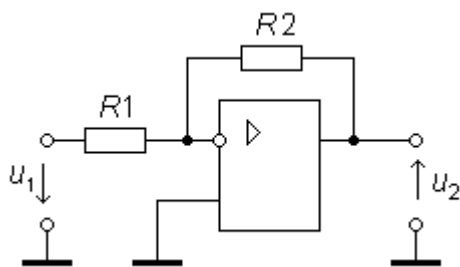


Рисунок 76

Выходное напряжение инвертирующего усилителя равно:  $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$ . Коэффициент усиления инвертирующего усилителя отрицательный, и равен:  $K = -R2/R1$ .

Для расчета инвертирующего усилителя необходимо задать сопротивление резистора R1 в пределах 10÷20кОм.

### 13.2.1.2 Неинвертирующий усилитель на ОУ.

Схема неинвертирующего усилителя на ОУ приведена на рисунке 77.

Таблица 3

№ вар.	$u_1$ , В	$u_3$ , В	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
1	2	3	4	5	6	7
1	$1\sin\omega t$	$1\sin(\omega t+90)$	1,5	2	2,5	1
2	$1,5\sin(\omega t+90)$	$3\sin\omega t$	4	1,5	-1	1
3	$0,5\sin\omega t$	$5\sin(\omega t+90)$	3	-2	1,5	1
4	$2\sin(\omega t+90)$	$2,5\sin\omega t$	2	-1,5	-2	1
5	$1,7\sin\omega t$	$3\sin(\omega t+90)$	-2	3	2	1
6	$1\sin(\omega t+90)$	$2\sin\omega t$	-3	2	-1,5	1
7	$1,2\sin\omega t$	$4\sin(\omega t+90)$	-2	-1,5	1	1
8	$0,5\sin(\omega t+90)$	$1,5\sin\omega t$	-4	-3	-3	1
9	$2\sin\omega t$	$2\sin(\omega t+90)$	2,5	1	2	1
10	$3,5\sin(\omega t+90)$	$1\sin\omega t$	2	1,5	-6	1
11	$2,5\sin\omega t$	$4\sin(\omega t+90)$	4	-1	1,5	1

12	$0,8\sin(\omega t+90)$	$0,5\sin\omega t$	4	-1,5	-8	1
13	$3\sin\omega t$	$0,6\sin(\omega t+90)$	-2,5	1	5	1
14	$1,8\sin(\omega t+90)$	$3,5\sin\omega t$	-2	1	-1	1
15	$0,5\sin\omega t$	$1,2\sin(\omega t+90)$	-3	-4	5	1
16	$4\sin(\omega t+90)$	$3\sin\omega t$	-2,5	-1	-2	1
17	$1\sin\omega t$	$0,8\sin(\omega t+90)$	3	2	5	1
18	$0,4\sin(\omega t+90)$	$2,5\sin\omega t$	5	4	-2	1
19	$1,5\sin\omega t$	$1\sin(\omega t+90)$	6	-1	4	1
20	$2,2\sin(\omega t+90)$	$2\sin\omega t$	2	-1	-3	1
21	$2\sin\omega t$	$0,5\sin(\omega t+90)$	-4	1	7	1
22	$0,8\sin(\omega t+90)$	$1,5\sin\omega t$	-3,5	2	-3	1
23	$2,5\sin\omega t$	$1,5\sin(\omega t+90)$	-2	-1	3	1
24	$1,8\sin(\omega t+90)$	$1\sin\omega t$	-4	-2	-6	1
25	$3\sin\omega t$	$4\sin(\omega t+90)$	2	1	1,5	1
26	$2,4\sin(\omega t+90)$	$1,5\sin\omega t$	-2	-1	3	1
27	$1\sin\omega t$	$3,5\sin(\omega t+90)$	2	2,5	-2	1

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
28	$1,2\sin(\omega t+90)$	$0,5\sin\omega t$	-3	-3	10	1
29	$2\sin\omega t$	$2,2\sin(\omega t+90)$	2	-1,6	-3	1
30	$0,8\sin(\omega t+90)$	$1\sin\omega t$	3	2	5	1
31	$3\sin\omega t$	$4\sin(\omega t+90)$	-2,5	-1	-2	1
32	$1,8\sin(\omega t+90)$	$0,6\sin\omega t$	2	-2	8	1
33	$2\sin\omega t$	$1\sin(\omega t+90)$	-3	1,2	-6	1
34	$4\sin(\omega t+90)$	$2,5\sin\omega t$	3	-1	3	1
35	$0,5\sin\omega t$	$0,8\sin(\omega t+90)$	5	-2	-8	1
36	$2\sin(\omega t+90)$	$2\sin\omega t$	2,5	1	2	1
37	$1,5\sin\omega t$	$0,4\sin(\omega t+90)$	-4	-1,5	-10	1
38	$1\sin(\omega t+90)$	$1\sin\omega t$	1,5	3	3,5	1
39	$2,5\sin\omega t$	$2\sin(\omega t+90)$	2	-1,5	-2,5	1
40	$4\sin(\omega t+90)$	$3\sin\omega t$	2	1	1,5	1



41	$1,2\sin\omega t$	$0,8\sin(\omega t+90)$	-1,5	2	-6	1
42	$1\sin(\omega t+90)$	$1,5\sin\omega t$	5	-1	5	1
43	$2,2\sin\omega t$	$0,4\sin(\omega t+90)$	3	2	-15	1
44	$3\sin(\omega t+90)$	$3,5\sin\omega t$	-1	3	2	1
45	$2\sin\omega t$	$0,9\sin(\omega t+90)$	-3	1	-5	1
46	$0,5\sin(\omega t+90)$	$2\sin\omega t$	-6	2	5	1
47	$1\sin\omega t$	$1,8\sin(\omega t+90)$	-4	-2	-6	1
48	$0,6\sin(\omega t+90)$	$3\sin\omega t$	-5	2	3	1
49	$3\sin\omega t$	$1,5\sin(\omega t+90)$	2	1,5	-4	1
50	$1,5\sin(\omega t+90)$	$2,5\sin\omega t$	-3	-1	2	1

Выходное напряжение инвертирующего усилителя равно:  $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$ . Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя положительный, и равен:  $K = 1 + (R2/R1)$ .

Для расчета неинвертирующего усилителя необходимо задать сопротивление резистора R1 в пределах 10÷20кОм.

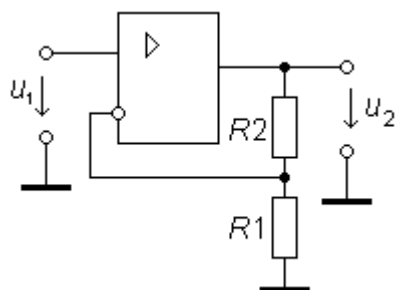


Рисунок 77

### 13.2.1.3 Инвертирующий сумматор

Схема инвертирующего сумматора на ОУ приведена на рисунке 78.

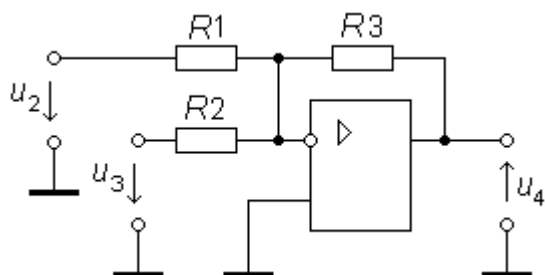


Рисунок 78

Для расчета коэффициента передачи инвертирующего сумматора необходимо выбрать значение сопротивления резистора  $R3$  в цепи отрицательной обратной связи в пределах  $100 \div 200$  кОм. Тогда коэффициент передачи по входу 2 будет равен:  $K1 = -R3/R1$ , а по входу 3:  $K2 = -R3/R2$ .

Так как входные напряжения синусоидальные, то и выходное напряжение  $U_{4m}$  сумматора также будет синусоидальным. Для нахождения амплитуды выходного напряжения  $U_{4m}$  и угла фазового сдвига  $\varphi$  записать напряжение  $u_4$  через сумму мгновенных значений  $u_2$  и  $u_3$ . Полученное выражение представить в виде комплекса амплитудного значения. Записать мгновенное значение напряжения  $u_4$  на выходе сумматора.

#### 13.2.1.4 Неинвертирующий сумматор

Схема неинвертирующего сумматора на ОУ приведена на рисунке 79.

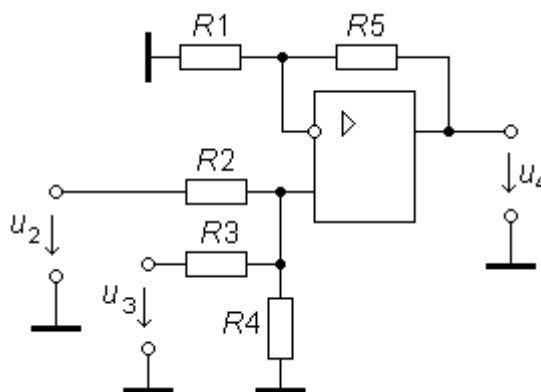


Рисунок 79

Для правильной работы неинвертирующего сумматора должно быть выполнено условие баланса: коэффициент передачи инвертирующей части схемы должен быть равен коэффициенту передачи неинвертирующей части схемы.

$$R5/R1 = (R4/R2 + R4/R3).$$

Необходимо произвольно задать значение сопротивления резистора  $R_4$  в пределах  $100 \div 200 \text{ кОм}$ .

Для определения значения сопротивления  $R_1$  необходимо произвольно выбрать значение сопротивления цепи обратной отрицательной связи (ООС) по инвертирующему входу  $R_5$  ( $100 \div 200 \text{ кОм}$ ). Произвести проверку соблюдения баланса по входам сумматора.

Для нахождения амплитуды выходного напряжения  $U_{4m}$  и угла фазового сдвига  $\varphi$  записать напряжение  $U_4$  через сумму усиленных мгновенных значений  $U_2$  и  $U_3$ . Полученное выражение представить в виде комплекса амплитудного значения. Записать мгновенное значение напряжения  $u_4(t)$  на выходе сумматора.

#### 13.2.1.5 Схема сложения-вычитания на ОУ

Схема сложения-вычитания на ОУ приведена на рисунке 80.

Для расчета схемы необходимо выбрать сопротивление резистора обратной связи  $R_4$  в пределах  $100 \div 200 \text{ кОм}$ .

Рассчитать сопротивление резисторов  $R_2$  и  $R_3$  по формулам:

$$R_2 = R_4 / k_2 ; \quad R_3 = R_4 / k_3 .$$

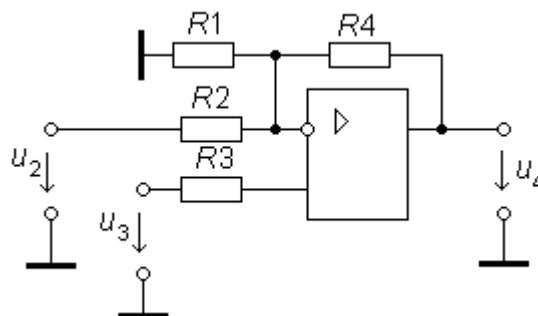


Рисунок 80

Для расчета сопротивления резистора  $R_1$  необходимо определить проводимость  $G_-$  и  $G_+$  для инвертирующего и неинвертирующего входов ОУ по формулам:

$$G_- = 1/R_2 + 1/R_4;$$

$$G_+ = 1/R_3$$

Сопротивление резистора  $R_1$  рассчитывается по формуле:

$$R_1 = 1/(G_- + G_+)$$

#### 13.2.1.6 Однофазный однополупериодный выпрямитель на основе ОУ

Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на ОУ приведена на рисунке 81.

Однофазный однополупериодный выпрямитель построен на основе инвертирующего ОУ с диодами  $VD1$  и  $VD2$  в цепи обратной связи.

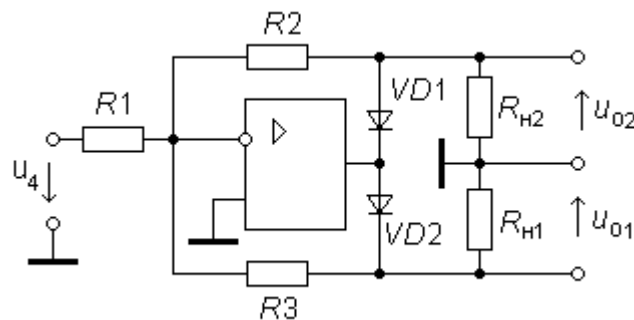


Рисунок 81

При положительной полярности входного напряжения  $u_4$  будет открыт диод  $VD1$  и обратная связь замыкается через резистор  $R_2$ . При отрицательной полярности входного напряжения  $u_4$  будет открыт диод  $VD2$  и обратная связь замыкается через резистор  $R_3$ . Таким образом, на выходе каскада будут присутствовать импульсы напряжения положительной полярности ( $U_{01}$ ) и отрицательной полярности ( $U_{02}$ ), то есть имеет место однополупериодное выпрямление по двум выходам. При  $U_4 > 0$  получим  $U_{01} = 0$  и  $U_{02} = -U_4 (R_2/R_1)$ , а при  $U_4 < 0$  получим  $U_{02} = 0$  и  $U_{01} = U_4 (R_3/R_1)$ .

Для обеспечения равенства коэффициента передачи по двум полярностям выходного напряжения необходимо выполнить условие:

$R2/R1=R3/R1$ . Для этого величины сопротивлений резисторов  $R2$  и  $R3$  необходимо выбирать одинаковыми в пределах  $100\div 200\text{кОм}$ .

Средневыпрямленное напряжение на выходе выпрямителя рассчитывается по формуле:  $|U_{01(02)}| = U_{4m}/\pi$

### 13.2.1.7 Однофазный двухполупериодный выпрямитель на основе ОУ

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя на ОУ приведена на рисунке 82.

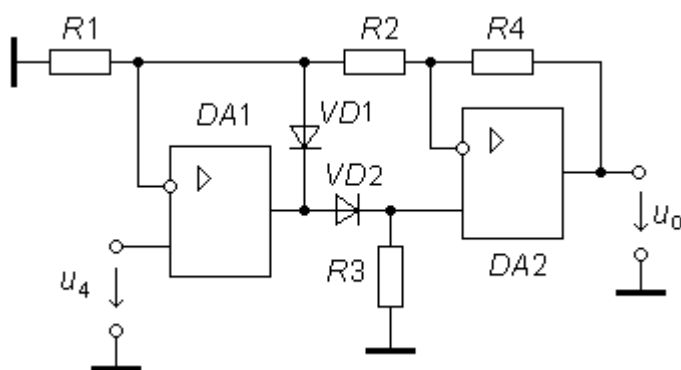


Рисунок 82

При  $U_4 > 0$  (положительная полуволна входного напряжения) сигнал проходит через ОУ  $DA1$ , диод  $VD2$  и усилитель на ОУ  $DA2$ , а отрицательная обратная связь замыкается через резисторы  $R2$  и  $R4$ . При этом выходное напряжение равно:  $U_0 = U_4 (R1+R2+R4)/R1$ .

При  $U_4 < 0$  (отрицательная полуволна входного напряжения) открывается диод  $VD1$ , а диод  $VD2$  закрывается. В этом случае выходное напряжение формируется усилителем  $DA2$ . При этом выходное напряжение равно:

$$U_0 = U_4 (R4/R2)$$

Постоянство модуля коэффициента передачи  $K_4=1$  будет достигаться при равенстве:  $(R1+R2+R4)/R1=R4/R2$ , тогда  $U_0 = |U_4|$ .

Если  $R1 \gg R2$  и  $R4$ , то  $R2 = R4$ , а тогда, и  $|U_0 = U_4|$ .

Полагая, что инвертирующий вход  $DA1$  имеет бесконечно большое сопротивление относительно «земли», необходимо выбрать сопротивления резисторов  $R2=R4=(100\div 200\text{кОм})$  кОм. Значение сопротивления резистора  $R3$  в цепи неинвертирующего входа  $DA2$  равно:  $R3=R4/2$ .

Средневыпрямленное напряжение на выходе выпрямителя рассчитывается по формуле:  $U_0=2U_{4m}/\pi$ .

### 13.3. Логические устройства

Используя основные законы и тождества алгебры логики:

1. Провести минимизацию заданной логической функции

$$Y=f(X_1X_2X_3).$$

2. Составить схему логического устройства, реализующего минимизированную логическую функцию.

3. Составить таблицу истинности логического устройства на основе данных таблицы 4.

#### 13.3.1 Методические указания

Рассмотрим решение задачи на примере логической функции:

$$Y = \bar{X}_1X_2X_3 + X_1\bar{X}_2X_3 + X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Можно создать устройство, которое непосредственно реализует эту функцию. В этом случае для выполнения инверсий потребуется два элемента НЕ, для логического умножения – три трехходовых элемента И, для логического сложения – один трехходовый элемент ИЛИ.

Всего потребуется шесть логических элементов. Функцию  $Y$  можно минимизировать (упростить), используя основные законы и тождества алгебры логики.

Для этого преобразуем функцию на основе тождества  $X+X=X$  и вынесем за скобки общие члены:

$$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 X_3 = X_2 X_3 (\bar{X}_1 + X_1) + X_1 X_3 (\bar{X}_2 + X_2)$$

Для выражения в скобках применим тождество  $\bar{X}_1 + X_1 = 1$ . В результате получим:

$$Y = X_2 X_3 + X_1 X_3 = X_3 (X_1 + X_2) \quad (2)$$

Таблица 4

№ вар.	Логическая функция	№ вар.	Логическая функция
1	2	3	4
1	$Y = \bar{X}_1 X_2 + X_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3$	26	$Y = \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_3 X_1 + \bar{X}_2 \bar{X}_1$
2	$Y = X_1 X_2 \bar{X}_3 + X_2 X_3 + X_1 X_2 X_3$	27	$Y = X_3 + \bar{X}_1 + X_1 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
3	$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3$	28	$Y = \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 + X_2 X_1 + X_1 X_2 X_3$
4	$Y = X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 X_3$	29	$Y = \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3$
5	$Y = X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_1 X_2 + X_2 X_3$	30	$Y = X_1 X_2 + X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_3$
6	$Y = (X_1 + X_2) \bar{X}_3 + (X_2 + X_3) X_1$	31	$Y = X_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$
7	$Y = X_1 X_2 X_3 + X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_3$	32	$Y = \bar{X}_1 X_3 + X_2 X_3 + X_1 + \bar{X}_2$
8	$Y = \bar{X}_2 X_3 (X_1 + \bar{X}_2) + X_1 X_2 X_3$	33	$Y = X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_3 X_1 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3$
9	$Y = X_1 X_2 + X_1 X_3 + X_2 \bar{X}_3$	34	$Y = \bar{X}_1 + \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3 + X_2$
10	$Y = X_1 X_3 + (X_2 + X_3) \bar{X}_1 + X_1 X_3$	35	$Y = X_2 + \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 + X_1 X_2 X_3$
11	$Y = (X_1 + \bar{X}_3) X_2 + X_1 X_2 + X_2 X_3$	36	$Y = X_1 \bar{X}_2 X_3 (X_2 + X_1) + X_1 \bar{X}_2 X_3$
12	$Y = \bar{X}_1 X_3 + \bar{X}_2 X_1 + X_1 \bar{X}_2 X_3$	37	$Y = \bar{X}_2 X_3 + X_2 X_1 + \bar{X}_3 X_2$
13	$Y = X_1 (X_2 + X_3) X_2 + X_1 X_2 \bar{X}_3$	38	$Y = \bar{X}_1 + \bar{X}_1 X_2 X_3 + \bar{X}_2 \bar{X}_3$
14	$Y = X_1 X_2 + \bar{X}_2 + X_2 (X_1 + \bar{X}_3)$	39	$Y = X_2 X_3 + X_1 X_2 + X_1 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2$
15	$Y = \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 X_2 + X_1 + \bar{X}_2$	40	$Y = X_1 X_2 + X_3 + X_1 \bar{X}_2 X_3$

16	$Y = \overline{X}_1 X_2 X_3 + X_1 \overline{X}_2 X_3 + X_1 X_2$	41	$Y = X_2 X_1 + X_1 \overline{X}_2 X_3 + X_1 \overline{X}_3 + X_2$
17	$Y = X_2 X_3 (\overline{X}_1 + X_2) + X_1 X_2 X_3$	42	$Y = \overline{X}_1 X_3 + \overline{X}_1 \overline{X}_2 + \overline{X}_1 + \overline{X}_2$
18	$Y = \overline{X}_1 X_3 + \overline{X}_2 \overline{X}_3 + \overline{X}_1 X_2 \overline{X}_3$	43	$Y = X_2 \overline{X}_3 + X_3 X_1 + \overline{X}_2 X_1 + X_1 X_2$
19	$Y = X_1 \overline{X}_2 X_3 + X_1 + X_3 + X_2 X_3$	44	$Y = X_1 + \overline{X}_3 + X_2 + \overline{X}_1 + X_1 X_2 X_3$
20	$Y = X_1 + \overline{X}_3 + X_1 X_3 + \overline{X}_1 X_2$	45	$Y = X_2 X_3 + \overline{X}_2 X_1 + \overline{X}_1 X_2 \overline{X}_3$
21	$Y = \overline{X}_1 X_3 + \overline{X}_3 X_2 + X_1 \overline{X}_2 X_3$	46	$Y = X_1 X_2 + X_1 X_3 + X_2 X_3 + \overline{X}_1$
22	$Y = X_2 X_3 + \overline{X}_1 + X_1 X_3 + X_2$	47	$Y = \overline{X}_2 X_3 + X_1 + X_2 + X_1 \overline{X}_2 X_3$

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4
23	$Y = \overline{X}_1 X_2 + \overline{X}_1 X_3 + X_2 \overline{X}_3 + X_1$	48	$Y = X_2 + X_1 \overline{X}_2 X_3 + X_2 \overline{X}_3 + \overline{X}_1$
24	$Y = \overline{X}_1 + \overline{X}_3 + X_2 + \overline{X}_1 X_2 X_3$	49	$Y = \overline{X}_2 + \overline{X}_3 + \overline{X}_1 \overline{X}_2 \overline{X}_3 + X_1 X_2$
25	$Y = \overline{X}_1 \overline{X}_2 + \overline{X}_2 \overline{X}_3 + (\overline{X}_2 + X_3)$	50	$Y = X_1 + X_1 X_2 X_3 + X_2 X_3 + X_1 X_2$

Минимизированная функция (2) принимается для реализации. Схема логического устройства содержит теперь только два логических элемента: И и ИЛИ (рисунок 83).

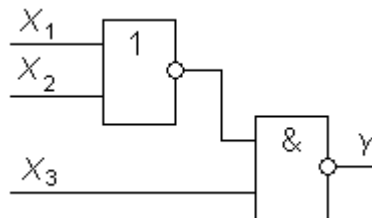


Рисунок 83

Любое устройство может быть реализовано только на элементах И-НЕ. Это сокращает номенклатуру применяемых логических элементов. Так, операция НЕ может быть осуществлена на схеме И-НЕ, в которой на каждом из входов находится переменная  $X_1$ . Тогда  $Y = \overline{X_1 X_1} = \overline{X_1}$ . Соответствующая схема приведена на рисунке 84,а.



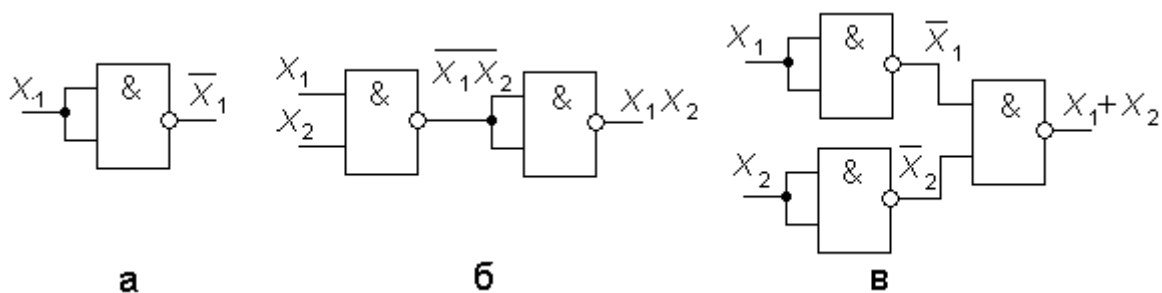


Рисунок 84

Операция И выполняется по схеме рисунке 84,б, т.к. согласно тождеству  $\overline{\overline{X}} = X$  имеем:  $Y = \overline{\overline{X_1 X_2}} = X_1 X_2$ .

Операция ИЛИ осуществляется по схеме рисунке 84,в в соответствии с тождеством  $\overline{\overline{X}} = X$  и формулой де Моргана:

$$\overline{X_1} + \overline{X_2} + \overline{X_3} = \overline{X_1 X_2 X_3},$$

откуда:

$$X_1 + X_2 = \overline{\overline{X_1}} + \overline{\overline{X_2}} = \overline{\overline{X_1} + \overline{X_2}}.$$

Реализация логического устройства по уравнению (2) представлена на рисунке 85.

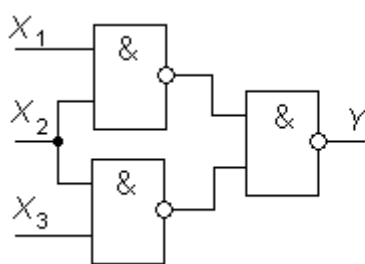


Рисунок 85

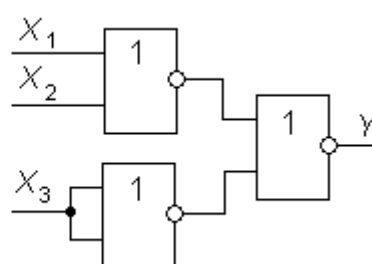


Рисунок 86

Уравнение (2) можно реализовать только на элементах ИЛИ-НЕ (рисунок 86). Здесь операция НЕ выполняется по схеме рисунке 87,а:

$\overline{X_1 + X_1} = \overline{X_1}$ . Операция ИЛИ реализуется схемой на рисунке 87,б:

$$\overline{X_1 + X_2} = X_1 + X_2.$$

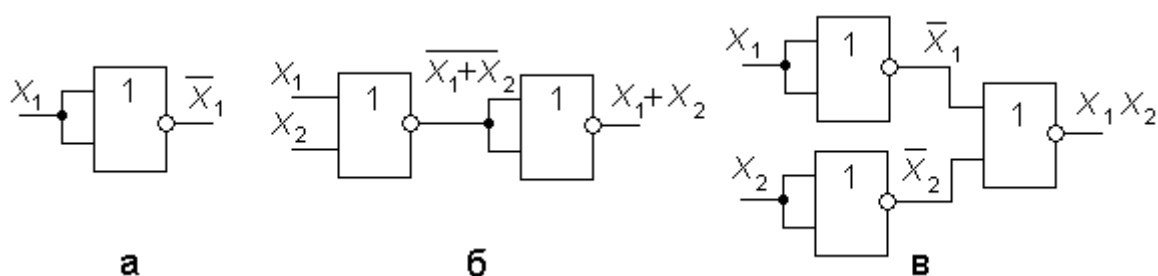


Рисунок 87

Операция И выполняется по схеме на рисунке 87,в на основе тождества  $\overline{\overline{X}} = X$  и формулы де Моргана:  $\overline{X_1 X_2 X_3} = \overline{X_1} + \overline{X_2} + \overline{X_3}$ . Откуда:

$$\overline{\overline{X_1} \overline{X_2}} = \overline{\overline{X_1} + \overline{X_2}}.$$

Таблица истинности логического устройства, синтезированного по уравнению (2), может быть представлена в виде таблицы 5.

По таблице истинности проверяется правильность реализации и работы логического устройства.

Таблица 5

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

#### 14. Контрольные вопросы

1. Полупроводники и их физические свойства.
2. Полупроводники с собственной электропроводностью, с электронной электропроводностью и дырочной электропроводностью.
3. Вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода.
4. Полупроводниковые диоды, ВАХ, понятие потенциального барьера.
5. Классификация диодов по их назначению.
6. Выпрямительные диоды. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
7. Импульсные. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
8. Сверхвысокочастотные диоды. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
9. Стабилитроны (стабисторы). УГО, ВАХ, параметры, область применения.
10. Варикапы. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
11. Туннельные диоды. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
12. Излучающие диоды. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
13. Фотодиоды. УГО, ВАХ, параметры, область применения.
14. Биполярный транзистор. УГО, ВАХ, устройство и принцип работы, основные параметры, область применения.
15. Полевой транзистор. УГО, ВАХ, устройство и принцип работы, основные параметры, область применения.

16. Схемы включения биполярного транзистора.
17. Режимы работы транзистора: активный режим (нормальный, уси-  
тельный), режим отсечки коллекторного тока, режим насыщения, ин-  
версный режим.
18. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора.
19. *IGBT*-транзисторы. УГО, схема замещения, ВАХ.
20. Тиристоры: разновидности, УГО, ВАХ, устройство и принцип работы,  
основные параметры, область применения.
21. Усилители электрических сигналов. Коэффициент усиления. Ампли-  
тудно-частотная характеристика (АЧХ). Фазо-частотная характери-  
стика (ФЧХ)
22. Амплитудная характеристика. Чувствительность. Коэффициент полез-  
ного действия усилителя.
23. Линейные и нелинейные искажения сигналов в усилителях. Фазовые  
искажения.
24. Классификация усилителей. Классы усилителей: *A, AB, B, C, D*.
25. Обратная связь в усилителях. Виды ОС. Влияние ООС на параметры и  
характеристики усилителя.
26. Операционные усилители. УГО, Классификация.
27. Статические и динамические параметры ОУ.
28. Инвертирующий усилитель на ОУ. Электрическая схема и параметры.
29. Неинвертирующий усилитель на ОУ. Электрическая схема и парамет-  
ры.
30. Повторитель напряжения на основе ОУ. Электрическая схема и пара-  
метры.
31. Сумматор напряжений (инвертирующий сумматор). Электрическая  
схема и параметры.
32. Дифференцирующий усилитель. Электрическая схема и параметры.

33. Интегрирующий усилитель. Электрическая схема и параметры.
34. Мультивибратор на ОУ. Электрическая схема и параметры.
35. Источники питания. Классификация. Параметры.
36. Выпрямители. Назначение, основные параметры и характеристики.
37. Однополупериодный однофазный выпрямитель. Электрическая схема и параметры.
38. Мостовая схема однофазного выпрямителя. Электрическая схема и параметры.
39. Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой. Электрическая схема и параметры.
40. Трехфазный мостовой выпрямитель (схема Ларионова). Электрическая схема и параметры.
41. Стабилизаторы постоянного напряжения. Классификация. Коэффициент стабилизации.
42. Параметрические стабилизаторы напряжения. Схема, параметры.
43. Компенсационные стабилизаторы. Схема, параметры.
44. Логические элементы. Классификация и основные параметры.
45. Основные логические элементы: буфер, инвертор, элемент И, элемент ИЛИ, элемент И-НЕ, элемент ИЛИ-НЕ, элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. УГО и таблицы истинности.
46. Триггеры:  $RS$ ,  $JK$ ,  $D$ ,  $T$ . Назначение входов, таблицы истинности.
47. Счетчики. УГО. Основные параметры и классификация счетчиков.
48. Мультиплексоры и демультиплексоры. УГО. Назначение, принцип работы.
49. Сумматоры. УГО. Назначение, принцип работы.
50. Регистры. УГО. Назначение, принцип работы.

51. Дешифраторы. УГО. Назначение, принцип работы.
52. Микропроцессоры. Классификация, Причины широкого распространения микропроцессоров.
53. Однокристальные *PIC*- микроконтроллеры. Особенности построения и область применения.
54. Однокристальные *AVR*-микроконтроллеры. Особенности построения и область применения.
55. Сигнальные микропроцессоры. Особенности построения и область применения.
56. Постоянные запоминающие устройства. Классификация.
57. Программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС). Назначение. Области применения.
58. Устройства ввода-вывода информации. Подключение внешних устройств.
59. Интерфейс *RS-232*. Виды сигналов в интерфейсе *RS-232*. Область применения.
60. Интерфейс *RS-485*. Область применения.

## Литература

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов. Под. ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 768с.
2. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: Учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: изд-во "Феникс", 2002. – 576с.
3. Красько А.С., Скачко К.Г. Промышленная электроника. – Мн.: Выш. шк., 1984.
4. Алексеенко А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пос. для вузов – М.: Высш. шк., 1991.
6. Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320с.
7. Угрюмов Е.П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ. – М.: Высшая школа, 1987. – 318с.
8. Калабеков Б.А. Микропроцессоры и их применение в системах передачи и обработки сигналов. – М: Радио и связь, 1988.
9. Лапин. А.А. Интерфейсы. Выбор и реализация. – М.: Техносфера, 2005. – 168 с.