

**Государственное автономное профессиональное  
образовательное учреждение РБ  
«Бурятский республиканский многопрофильный  
техникум инновационных технологий»**

**Геннинг О. А.**

**КУРС ЛЕКЦИЙ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
«ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические основы полупроводников. Полупроводниковые диоды.
2. Электронные усилители. Электронные генераторы.
3. Логические элементы цифровой техники. Комбинационные цифровые устройства.
4. Список источников информации.

# 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

**Полупроводники** объединяют обширный класс материалов с удельным объемным сопротивлением  $10^8$ – $10^6$  Ом · м.

Наибольшее применение нашли **кремний Si** и **германий Ge**. Рассмотрим основные процессы в полупроводниковых материалах на основе их идеализированных моделей.

В электронной структуре идеального кристалла кремния из IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева каждый из четырех валентных электронов любого атома образует связанную пару (валентную связь) с такими же валентными электронами четырех соединений атомов. Если на атомы кремния не действуют внешние источники энергии, например свет, теплота, способные нарушить его электронную структуру, то все атомы электрически нейтральны. Такой идеальный кристалл кремния не проводит электрический ток.

Однако электрические свойства идеального кристалла кремния существенно изменяются при добавлении в него примесей других химических элементов. В качестве примесей применяются обычно элементы либо из V (сурьма Sb, фосфор P), либо из III (галлий Ga, индий In) группы Периодической системы.

В электронной структуре кристалла кремния с примесью фосфора четыре валентных электрона фосфора и валентные электроны четырех соседних атомов кремния образуют четыре связанные пары. Пятый валентный электрон фосфора оказывается избыточным.

При незначительных затратах энергии от внешних источников избыточный электрон теряет связь с атомом примеси и становится свободным электроном. Атом фосфора, потеряв электрон, становится неподвижным положительным ионом. Такой полупроводник называется полупроводником

с электронной электрической проводимостью, или **полупроводником *n*-типа**, а соответствующая примесь — **донорной**.

Если в качестве примеси используется индий, имеющий три валентных электрона, то в электронной структуре кристалла кремния одна валентная связь атома индия с четырьмя соседними атомами кремния недоукомплектована и в кристалле образуется дырка. Для формирования устойчивой электронной структуры кристалла необходим дополнительный электрон. Атом индия захватывает один электрон из валентной связи между соседними атомами кремния. При этом атом индия превращается в устойчивый неподвижный отрицательный ион, а дырка перемещается на место расположения захваченного электрона. Далее на место вновь образовавшейся дырки перемещается электрон из соседней валентной связи и т. д.

Этот процесс можно представить как хаотическое движение в кристалле свободных дырок с положительным зарядом, равным заряду электрона. Такой полупроводник называется полупроводником с дырочной электрической проводимостью, или полупроводником *p*-типа, а соответствующая примесь — акцепторной.

**Полупроводниковым диодом** называется электро-преобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис.2.

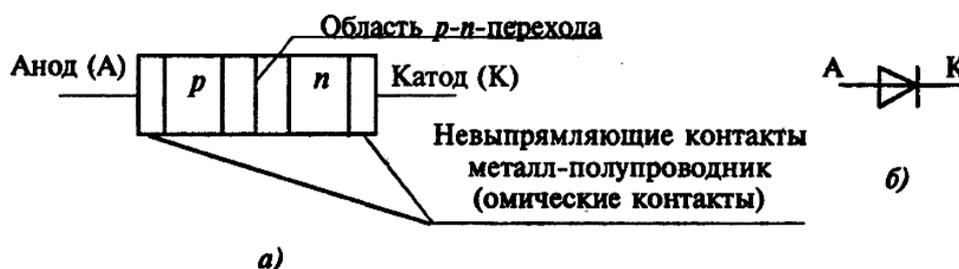


Рис. 1. Схема структуры полупроводникового диода и его графическое обозначение (б)

Буквами  $p$  и  $n$  обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно  $p$ -типа и  $n$ -типа. В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя  $p$  в слой  $n$ , причиной которой является то, что их концентрация в слое  $p$  значительно больше их концентрации в слое  $n$ . В итоге в приграничных областях слоя  $p$  и слоя  $n$  возникает так называемый обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью  $E$ . Это поле препятствует переходу дырок из слоя  $p$  в слой  $n$  и переходу электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя  $n$  в слой  $p$  и электроны из слоя  $p$  в слой  $n$ . Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величину проходящего тока.

Основные характеристики полупроводникового диода представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока  $i$ , протекающего через диод, от напряжения  $u$ , приложенного к диоду. Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рис. 2).

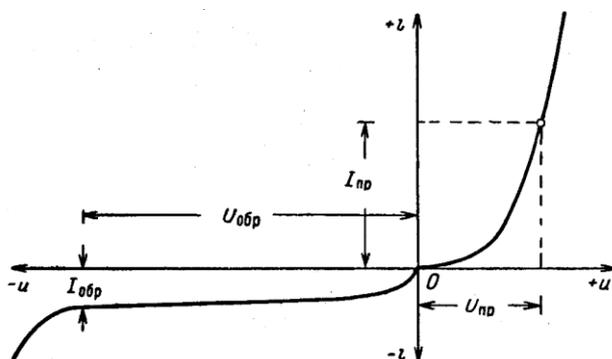


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода  
Диоды обычно характеризуются следующими параметрами:

1. обратный ток при некоторой величине обратного напряжения  $I_{обр}, мкА$ ;
2. падение напряжения на диоде при некотором значении прямого тока через диод  $U_{пр}, в$ ;
3. емкость диода при подаче на него обратного напряжения некоторой величины  $C, нФ$ ;
4. диапазон частот, в котором возможна работа без снижения выпрямленного тока  $f_{гр}, кГц$ ;
5. рабочий диапазон температур.

Техническими условиями задаются обычно максимальные (или минимальные) значения параметров для диодов каждого типа. Так, например, задается максимально возможное значение обратного тока, прямого падения напряжения и емкости диода. Диапазон частот задается минимальным значением граничной частоты  $f_{гр}$ . Это значит, что параметры всех диодов не превышает (а в случае частоты – не ниже) заданного техническими условиями значения.

**Стабилитрон.** Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 4,а.

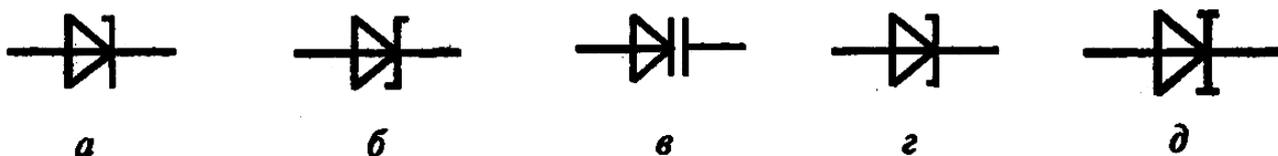


Рис. 3. Графическое изображение полупроводниковых диодов:  
 а) стабилитрон; б) диод Шоттки; в) варикап; г) туннельный диод;  
 д) обращенный диод

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует напряжение.

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы.

В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до 5,7 В) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) – лавинный пробой.

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

1.  $U_{ст}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);
2.  $I_{ст.мин}$  – минимально допустимый ток стабилизации;
3.  $I_{ст.макс}$  – максимально допустимый ток стабилизации;
4.  $r_{ст}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),  $r_{ст} = du/di$ ;
5.  $\alpha_{U_{ст}}$  (ТКН) – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Величины  $U_{ст}$ ,  $I_{ст.мин}$  и  $I_{ст.макс}$  принято указывать как положительные.

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

**Стабистор.** Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около 0,7 В) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

**Диод Шоттки.** В диоде Шоттки используется не *p-n*-переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 3, б.

В обычных условиях прямой ток, образованный электронами зоны проводимости, переходящими из полупроводника в металл, имеет очень малую величину. Это является следствием недостатка электронов, энергия которых позволила бы им преодолеть данный барьер.

Для увеличения прямого тока необходимо «разогреть» электроны в полупроводнике, поднять их энергию. Такой разогрев может быть осуществлен с помощью электрического поля.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику *n*-типа, то потенциальный барьер понизится и через переход начнет протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается весьма малым.

Диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц ( $1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ). У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) – около  $0,5 \text{ В}$ , что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение – сотни вольт.

**Варикап.** Это полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, емкость которого управляется напряжением. Условное графическое обозначение варикапа представлено на рис. 3, в.

На варикап подают обратное напряжение. Барьерная емкость варикапа уменьшается при увеличении (по модулю) обратного напряжения. Характер изменения емкости у варикапа такой же, как и у обычного диода.

**Туннельный диод.** Это полупроводниковый диод, в котором используется явление туннельного пробоя при включении в прямом направлении. Характерной особенностью туннельного диода является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Условное графическое обозначение диода представлено на рис. 3, г.

Общая емкость диода в точке минимума характеристики составляет  $0,8 \dots 1,9 \text{ пФ}$ . Полезно отметить, что проверка диода тестером не допускается. Туннельные диоды могут работать на очень высоких частотах – более  $1 \text{ ГГц}$ .

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента и в качестве основного элемента генераторов.

В настоящее время туннельные диоды используются именно в этом качестве в области сверхвысоких частот.

**Обращенный диод.** Это полупроводниковый диод, физические явления в котором подобны физическим явлениям в туннельном диоде, поэтому зачастую обращенный диод рассматривают как вариант туннельного диода. При этом участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики обращенного диода (отличающаяся очень малым падением напряжения) используется в качестве прямой ветви «обычного диода», а прямая ветвь – в качестве обратной ветви. Отсюда и название – обращенный диод.

Условное графическое обозначение обращенного диода представлено на рис. 4,д.

### **Маркировка полупроводников.**

С 1964 г. маркировка отечественных полупроводниковых приборов представляет собой буквенно-цифровой код.

**Первый элемент — исходный материал:** германий — Г, кремний — К, соединения галлия, например арсенид галлия — А, соединения индия — И.

**Второй элемент — группа приборов:** диоды — Д, транзисторы — Т, транзисторы полевые — П, стабилитроны — С, излучающие оптронные приборы — Л, оптопары — О, варисторы — В.

**Третий элемент — назначение прибора.**

**Четвертый, пятый и шестой элементы определяют порядковый номер разработки** и обозначаются цифрами от 1 до 999. Для стабилитронов четвертый и пятый элементы определяют напряжение стабилизации, шестой — последовательность разработки с буквенным обозначением от А до Я.

**Седьмой элемент — буквы от А до Я, кроме З, О и Ч, схожих по написанию с цифрами, определяет классификацию по параметрам приборов,** изгото-

товленных по единой технологии. Например, общепромышленного или специального назначения.

**Например:** КТ7315А — транзистор биполярный на основе кремния, большой мощности, низкой частоты; КС107 — стабилитрон на основе кремния, малой мощности, напряжение стабилизации 7 В.

Если габаритные размеры приборов не позволяют использовать буквенные или цифровые обозначения, то на корпус наносится **цветная маркировка** (точка или цветные полоски), смысл которой поясняется в технических условиях.

## 2. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ.

### Усилители.

Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке. Причем, мощность, требующаяся для управления, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а форма входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают (рис. 4).

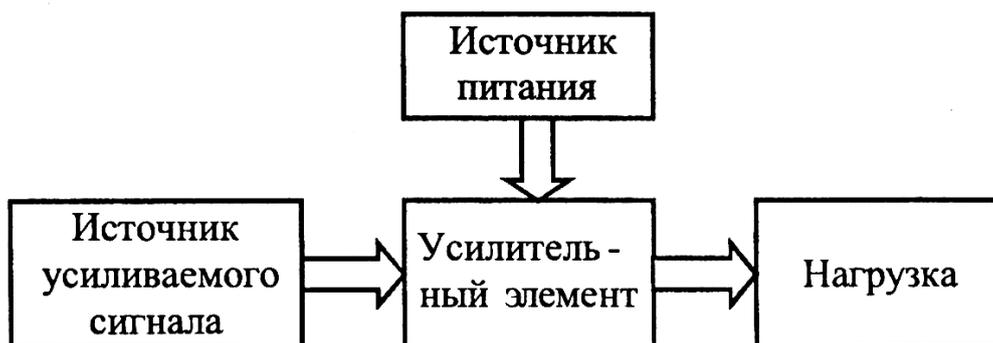


Рис.4. Функциональная схема усилителя

**Классификация.** Все усилители можно классифицировать по следующим признакам:

- по частоте усиливаемого сигнала: усилители низкой частоты (УНЧ) для усиления сигналов с частотой от  $10 \text{ Гц}$  до  $100 \text{ кГц}$ ; широкополосные усилители, усиливающие сигналы от  $1$  до  $100 \text{ МГц}$ ; избирательные усилители, усиливающие сигналы узкой полосы частот;
- по роду усиливаемого сигнала: усилители постоянного тока (УПТ), усиливающие электрические сигналы с частотой от  $0 \text{ Гц}$  и выше; усилители переменного тока, усиливающие электрические сигналы с частотой, отличной от нуля;
- по функциональному назначению: усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности (в зависимости от того, какой из параметров усиливается усилителем).

Основным качественным параметром усилителя является *коэффициент усиления*. В зависимости от функционального назначения усилителя различают коэффициенты усиления по напряжению  $K_U$ , току  $K_I$  или мощности  $K_P$ :

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \quad K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}, \quad K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}},$$

где  $U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}$  – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на входе;

$U_{\text{вых}}, I_{\text{вых}}$  – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на выходе;

$P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$  – мощности сигналов соответственно на входе и выходе.

Коэффициенты усиления часто выражаются в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_U(\text{дБ})=20\lg K_U; \quad K_I(\text{дБ})=20\lg K_I; \quad K_P(\text{дБ})=10\lg K_P.$$

Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов. Для многокаскадных усилителей его коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления его каскадов:  $K=K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$ . Если коэффициенты усиления каскадов выражены в децибелах, то общий коэффициент усиления равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K(\text{дБ})=K_1(\text{дБ})+K_2(\text{дБ})+\dots+K_n(\text{дБ}).$$

Обычно в усилителе содержатся реактивные элементы, в том числе и «паразитные», а используемые усилительные элементы обладают инерционностью. В силу этого коэффициент усиления является комплексной величиной:

$$\dot{K}_u = K_u \cdot e^{j\varphi},$$

где  $K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$  – модуль коэффициента усиления;

$\varphi$  – сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями с амплитудами

$U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

Помимо коэффициента усиления важным количественным показателем является коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{ист}}},$$

где  $P_{\text{ист}}$  – мощность, потребляемая от источника питания.

Роль этого показателя особенно возрастает для мощных, как правило, выходных каскадов усилителя.

К количественным показателям усилителя относятся также входное  $R_{\text{вх}}$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления усилителя:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}; \quad R_{\text{вых}} = \frac{|\Delta U_{\text{вых}}|}{|\Delta I_{\text{вых}}|},$$

где  $U_{\text{вх}}$  и  $I_{\text{вх}}$  – амплитудные значения напряжения и тока на входе усилителя;

$\Delta U_{\text{вых}}$  и  $\Delta I_{\text{вых}}$  – приращения амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя, вызванные изменением сопротивления нагрузки.

Рассмотрим основные характеристики усилителей.

**Амплитудная характеристика** – это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока) (рис. 9.2). Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при  $U_{\text{вх}}=0$ , точка 2 – минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различать сигнал на фоне шумов. Участок 2–3 – это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжением усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала. Степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}{U_{1m}},$$

где  $U_{1m}$ ,  $U_{2m}$ ,  $U_{3m}$ ,  $U_{nm}$  – амплитуды 1-й (основной), 2, 3 и  $n$ -ой гармоник выходного напряжения соответственно.

Величина  $D = \frac{U_{\text{ex.max}}}{U_{\text{ex.min}}}$  характеризует динамический диапазон усилителя.

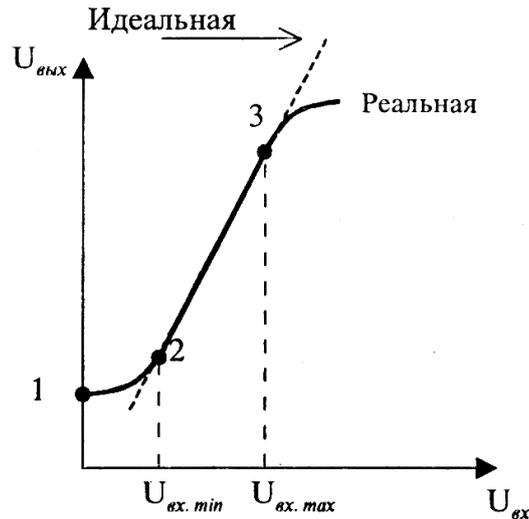


Рис. 5. Амплитудная характеристика усилителя

**Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя** – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты (рис. 6). Частоты  $f_H$  и  $f_B$  называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность  $(f_H - f_B)$  – полосой пропускания усилителя.

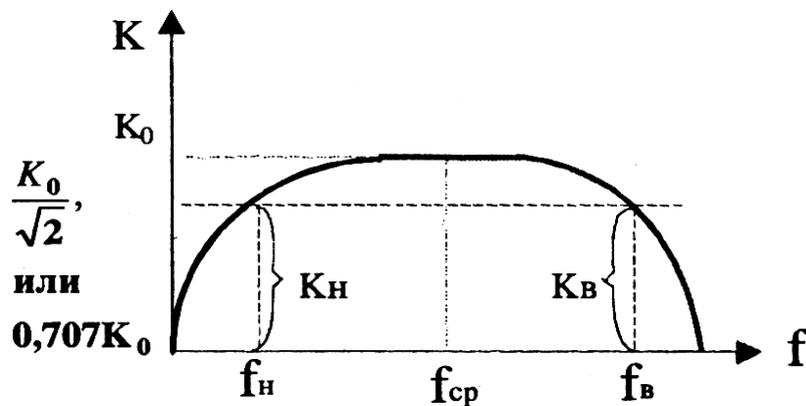


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

При усилении гармонического сигнала достаточно малой амплитуды искажения формы усиленного сигнала не возникает. При усилении сложного входного сигнала, содержащего ряд гармоник, эти гармоники усиливаются усилителем неодинаково, так как реактивные сопротивления схемы по-разному зависят от частоты, и в результате это приводит к искажению формы усиленного сигнала.

Такие искажения называются частотными и характеризуются коэффициентом частотных искажений:

$$M = \frac{K_0}{K_f},$$

где  $K_f$  – модуль коэффициента усиления на заданной частоте.

Коэффициенты частотных искажений

$$M_n = \frac{K_0}{K_n} \quad \text{и} \quad M_e = \frac{K_0}{K_e}$$

называются соответственно коэффициентами искажений на нижней и верхней граничных частотах.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе. В этом случае она называется ЛАЧХ (рис. 7), коэффициент усиления усилителя выражается в децибелах, а по оси абсцисс откладываются частоты через декаду (интервал частот между  $10f$  и  $f$ ).

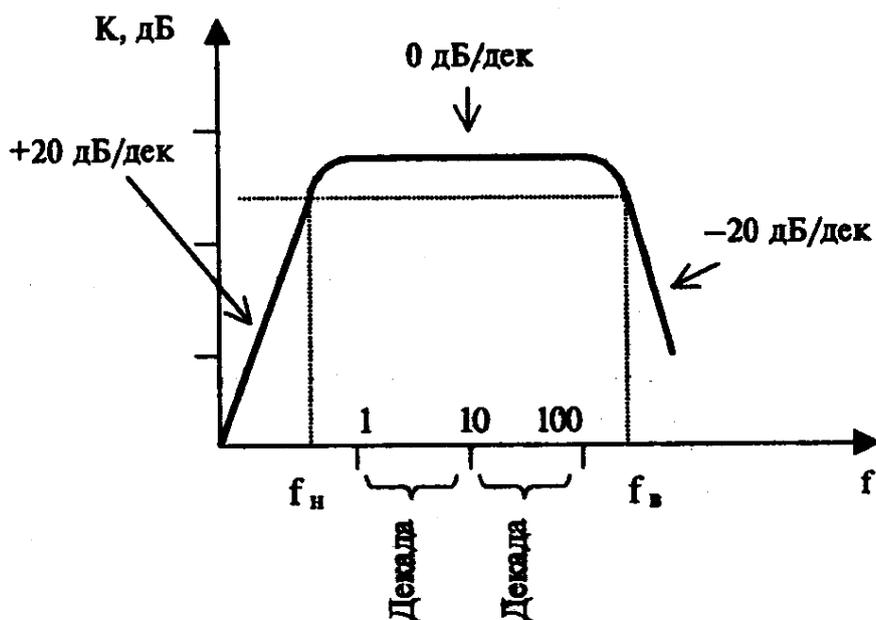


Рис. 7. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика усилителя (ЛАЧХ)

Обычно в качестве точек отсчета выбирают частоты, соответствующие  $f=10^n$ . Кривые ЛАЧХ имеют в каждой частотной области определенный наклон. Его измеряют в децибелах на декаду.

**Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя** – это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. Типовая ФЧХ приведена на рис. 8. Она также может быть построена в логарифмическом масштабе.

В области средних частот дополнительные фазовые искажения минимальны. ФЧХ позволяет оценить фазовые искажения, возникающие в усилителях по тем же причинам, что и частотные.

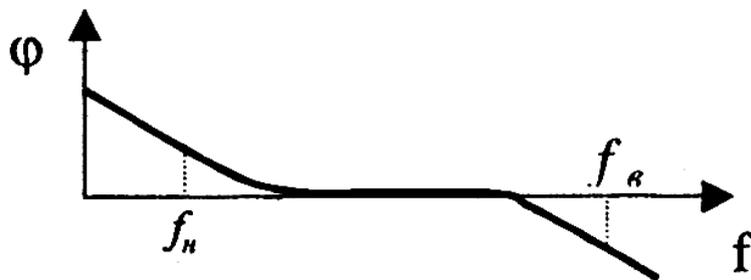


Рис. 8. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя

Пример возникновения фазовых искажений приведен на рис. 9, где показано усиление входного сигнала, состоящего из двух гармоник (пунктир), которые при усилении претерпевают фазовые сдвиги.

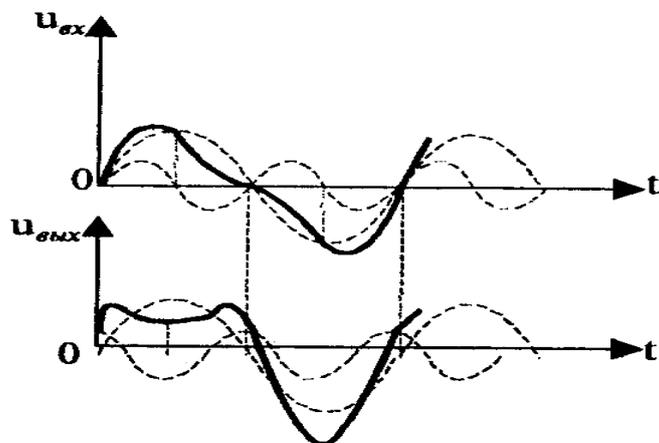


Рис. 9. Фазовые искажения в усилителе

**Переходная характеристика усилителя** – это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии (рис. 10). Частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя однозначно связаны друг с другом.

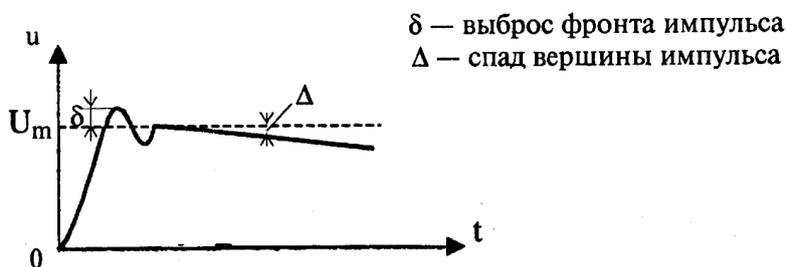


Рис. 10. Переходная характеристика усилителя

Области верхних частот соответствует переходная характеристика в области малых времен, области нижних частот – переходная характеристика в области больших времен.

### Обратная связь в усилителях

Понятие «обратная связь» (ОС) широко используется как в технике, так и в других областях знаний. Обратной связью называют влияние некоторой выходной величины на некоторую входную, которая в свою очередь существенным образом влияет на выходную величину (определяет эту

выходную величину). В усилителях, как правило, используется так называемая *отрицательная обратная связь (ООС)*. При наличии отрицательной обратной связи выходной сигнал таким образом влияет на входной, что входной сигнал уменьшается и соответственно приводит к уменьшению выходного сигнала. При этом уменьшаются искажения сигнала, расширяется частотный диапазон и т. д.

**Классификация обратных связей в усилителях** представлена на рис. 11.

В соответствии с рисунком 11 обратные связи подразделяются на:

- последовательная по напряжению (а);
- параллельная по напряжению (б);
- последовательная по току (в);
- параллельная по току (г).

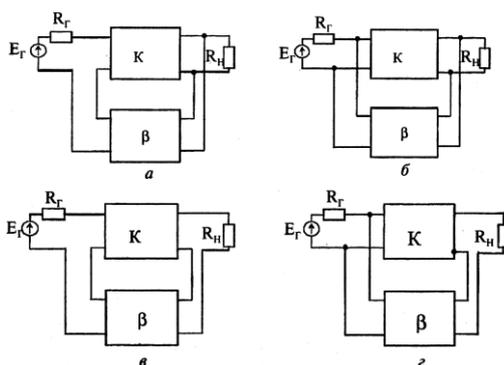


Рис.11. Классификация обратных связей усилителя:

$K$  – коэффициент прямой передачи, или коэффициент усиления усилителя без обратной связи;  $\beta$  – коэффициент передачи цепи обратной связи

Для определения вида обратной связи (ОС) нужно «закоротить» нагрузку. Если при этом сигнал обратной связи обращается в нуль, то это ОС по напряжению, если сигнал ОС не обращается в нуль – то это ОС по току. При обратной связи по напряжению сигнал обратной связи, поступающий с выхода усилителя на вход, пропорционален выходному напряжению. При обратной связи по току сигнал обратной связи пропорционален выходному току. При последовательной обратной связи (со сложением напряжений) в качестве

сигнала обратной связи используется напряжение, которое вычитается (для отрицательной обратной связи) из напряжения внешнего входного сигнала. При параллельной обратной связи (со сложением токов) в качестве сигнала обратной связи используется ток, который вычитается из тока внешнего входного сигнала.

**Обратной связью (ОС)** в усилителе называется передача части энергии с его выхода на вход.

Обратная связь **отрицательная**, если уменьшает коэффициент усиления усилителя, в противном случае она **положительная**.

Обратные связи бывают **полезными**, если создаются целенаправленно, и **паразитными** (вредными), если возникают самопроизвольно.

По месту нахождения обратные связи могут быть **внутренними**, если осуществляются внутри цепи самого усилительного каскада, и **внешними**, если их цепи охватывают усилительный каскад снаружи.

В общем случае цепь внешней ОС представляет собой пассивный четырехполюсник, который своими выводами подключается к выходной и входной цепям ОУ.

**Положительная ОС** в усилителях практически не применяется, но лежит в основе работы различного рода автогенераторов синусоидальных колебаний и регенеративных устройств.

**Отрицательная ОС** используется в усилителях очень широко. Она позволяет создавать устройства различного функционального назначения, а также улучшает параметры усилителей: уменьшает значение выходного сопротивления, увеличивает значение граничной частоты  $f_{гр}$ , а следовательно, и полосу частот  $0 \leq f \leq f_{гр}$  усиления сигналов, уменьшает нелинейные искажения напряжения на выходе и зависимость значений параметров усилителя от дестабилизирующих факторов (обычно температуры).

**Усилитель мощности** обычно является последним каскадом в цепи усиления сигнала. К его выходу подключается приемник большой мощности. Поэтому одним из важных параметров усилителя мощности является его КПД.

### **Выпрямители.**

Преобразовательные электронные устройства осуществляют преобразование напряжения и тока источника энергии в напряжение и ток, необходимые приемнику энергии.

В зависимости от видов напряжений и токов источника и приемника различают:

- **выпрямители** - для преобразования синусоидальных напряжений и токов в постоянные;
- **инверторы** - для преобразования постоянных напряжений и токов в синусоидальные;
- **конверторы** - для преобразования постоянных напряжений и токов в постоянные — других значений.

Комбинирование выпрямителя и инвертора реализует преобразование синусоидальных напряжения и тока одной частоты в синусоидальные напряжения и ток другой частоты.

Преобразователи большой мощности (до сотен и более киловатт) применяются в электроприводе, устройствах электросварки, электротермии и т. п., малой мощности (до нескольких десятков ватт) — в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры.

**Выпрямитель** можно представить в виде обобщенной структурной схемы (рис. 12) и структурной схемы с протекающими в нем напряжениями и токами (рис. 13), в которую входят:

- силовой трансформатор (СТ),
- вентильный блок (ВБ),
- фильтрующее устройство (ФУ),

· цепь нагрузки (Н), в которую может входить стабилизатор напряжения (СН).

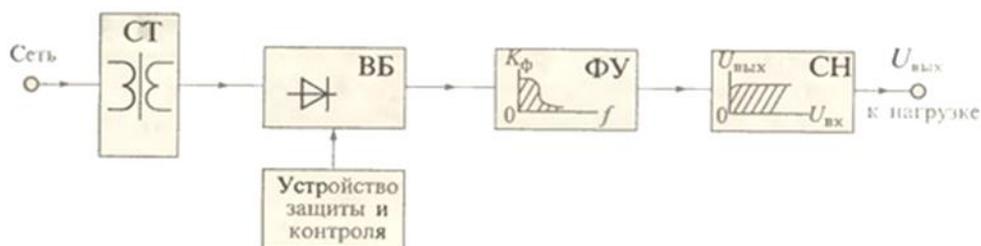


Рис. 12. Обобщенная структурная схема выпрямителя.

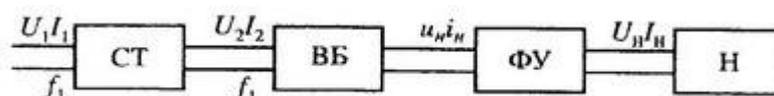


Рис. 13. Структурная схема выпрямителя с протекающими в нем напряжениями и токами.

**Силовой трансформатор** служит для согласования входного и выходного напряжений выпрямителя. Возможны различные соединения обмоток трансформатора соответственно с различными схемами выпрямления. Напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  определяет значение выпрямленного напряжения  $U_n$  (или  $U_d$ ).

**Трансформатор** позволяет одновременно гальванически развязать питающую сеть  $U_1, I_1$  с частотой  $f_1$ , и цепь нагрузки с  $U_n, I_n$  (или  $U_d, I_d$ ). В последнее время в связи с появившейся возможностью разрабатывать и изготавливать высоковольтные инверторы, работающие на высокой частоте и при непосредственном выпрямлении напряжения сети, используются бестрансформаторные схемы выпрямления, в которых вентильный блок присоединяется непосредственно к первичной питающей сети.

**Вентильный блок** выпрямляет переменный ток, подключая вторичное напряжение соответствующей фазы трансформатора к цепи постоянного тока. В вентильном блоке используются, как правило, полупроводниковые диоды или сборки на их основе. На выходе вентильного блока получают

знакопостоянное напряжение с высоким уровнем пульсаций, определяемым только числом фаз питающей сети и выбранной схемой выпрямления.

**Фильтрующее устройство** обеспечивает требуемый уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки. В качестве ФУ используются последовательно включаемые резистор или сглаживающий дроссель и параллельно включаемые конденсаторы. Иногда ФУ строится по более сложным схемам. В выпрямителях малой мощности установка резистора или дросселя не обязательна.

При использовании многофазных (чаще всего трехфазных) схем выпрямления уровень пульсаций естественно снижается, и облегчаются условия работы ФУ.

**Стабилизатор напряжения** служит для уменьшения внешних воздействий, таких как: изменение напряжения питающей сети, изменение температуры, частоты и т.д.

Работа выпрямителя (вентильной группы) основана на свойствах вентилях - нелинейных двухполюсников, пропускающих ток преимущественно в одном (прямом) направлении.

В качестве вентилях используют обычно полупроводниковые диоды. Вентиль, обладающий нулевым сопротивлением для прямого тока и имеющий бесконечно большое сопротивление для обратного тока, называют идеальным.

Вольт-амперные характеристики реальных вентилях приближаются к в. а. х. идеального вентиля.

Для работы в выпрямителях **вентили выбирают по эксплуатационным параметрам**, к которым относятся:

- **наибольший (прямой) рабочий ток  $I_{срmax}$**  - предельно допустимое среднее значение выпрямленного тока, протекающего через вентиль при его работе в однополупериодной схеме на активную нагрузку (при нормальных для данного вентиля условиях охлаждения и температуры, не превышающей предельного значения),

- **наибольшее допустимое обратное напряжение (амплитуда)**  $U_{обр\max}$  - обратное напряжение, которое вентиль выдерживает в течение длительного времени. Как правило, напряжение  $U_{обр\max}$  равно половине напряжения пробоя,

- **прямое падение напряжения**  $U_{пр}$  - среднее значение прямого напряжения в однополупериодной схеме выпрямления, работающей на активную нагрузку при номинальном токе.

- **обратный ток**  $I_{обр}$  - значение тока, протекающего через вентиль, при приложении к нему допустимого обратного напряжения,

- **максимальная мощность**  $P_{\max}$  - максимально допустимая мощность, которая может быть рассеяна вентилем.

Основными параметрами **выпрямителей** являются:

- $U_{н.ср}$  — среднее выпрямленное напряжение на нагрузке;
- $I_{н.ср}$  — средний выпрямленный ток в нагрузке;
- $p = U_{осн\max}/U_{н.ср}$  — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (здесь  $U_{осн\max}$  — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения);

- $f_{п}$  — частота основной гармоники выпрямленного напряжения (напряжения пульсации).

### **Пример решения типовых задач.**

**Задача 1.** Согласно справочным данным выпрямительный столб 2Ц103А имеет при токе 40 мА прямое падение напряжения 7 В, а при обратном напряжении 2 000 В обратный ток составляет 0,1 мкА. Вычислите прямое и обратное сопротивления диода.

**Решение.** Приведенные данные позволяют определить статическое сопротивление для прямой и обратной ветвей высоковольтного выпрямительного столба в соответствии с законом Ома. Прямое сопротивление

$$R_{пр} = U_{пр}/I_{пр} = 7 \text{ В}/0,04 \text{ А} = 175 \text{ Ом},$$

обратное сопротивление

$$R_{\text{обр}} = U_{\text{обр}}/I_{\text{обр}} = 2\,000 \text{ В}/(0,1 \cdot 10^{-6} \text{ А}) = 2 \cdot 10^{10} \text{ Ом}.$$

Расчеты показывают, что прямое сопротивление высоковольтного выпрямительного столба может составлять сотни ом, в то время как обратное сопротивление исчисляется десятками гигаом ( $1 \text{ ГОм} = 10^9 \text{ Ом}$ ).

**Ответ.** Прямое сопротивление выпрямительного столба 2Ц103А равно 175 Ом, обратное сопротивление —  $2 \cdot 10^{10}$  Ом. Таким образом, обратное сопротивление более чем в  $10^8$  раз больше прямого.

**Задача 2.** Для работы электродвигателя постоянного тока ДПМ-30-Н2 от промышленной сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц используется выпрямитель. Двигатель с возбуждением от постоянных магнитов имеет следующие основные электрические параметры:  $U_{\text{н}} = 27 \text{ В}$ ;  $I_{\text{н}} = 0,7 \text{ А}$ . Выберите схему выпрямителя и рассчитайте параметры его основных элементов.

**Решение.** В данном случае для питания электродвигателя достаточно иметь лишь два элемента: трансформатор и вентиль. Это связано с тем, что при значительном моменте инерции ротора высокая частота пульсаций выпрямленного напряжения практически не оказывает влияния на рабочие характеристики двигателя. Он реагирует лишь на среднее выпрямленное напряжение  $U_{\text{н.ср}}$ .

Исходя из характеристик двигателя выбираем в качестве вентиля выпрямительный блок КЦ402 с мостовой схемой соединения, имеющий следующие параметры:  $U_{\text{обр max}} = 100 \text{ В}$ ,  $I_{\text{пр max}} = 1\,000 \text{ мА}$ . Двигатель может быть включен непосредственно в диагональ моста с пульсирующим напряжением, в то время как вторая диагональ подключается к вторичной обмотке трансформатора

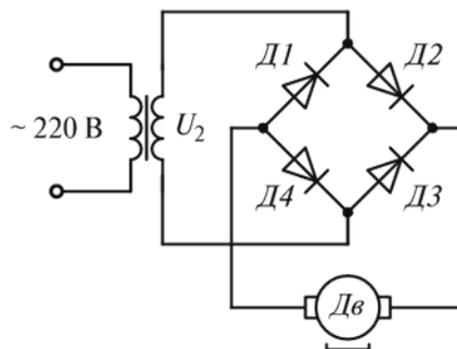


Рис.14. Схема питания электродвигателя

Поскольку для двухполупериодного однофазного выпрямителя  $U_{н.ср} = 0,9 U_2$ , действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2 = U_{н.ср}/0,9 = 27/0,9 = 30$  В.

Таким образом, для работы выпрямителя необходим трансформатор с первичным напряжением  $U_1 = 220$  В и вторичным  $U_2 = 30$  В. Номинальная мощность трансформатора  $P_{ном} = U_2 I_n = 30 \cdot 0,7 = 21$  Вт.

**Ответ.** Для работы двигателя постоянного тока от источника переменного напряжения 220 В целесообразно использовать выпрямительный блок КЦ402, работающий в комплексе с трансформатором, вторичное напряжение которого составляет 30 В, а номинальная мощность — 21 Вт.

### 3. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА.

Логический элемент (логический вентиль) – это электронная схема, выполняющая некоторую простейшую логическую операцию. На рис. 15 приведены примеры условных графических обозначений некоторых логических элементов.

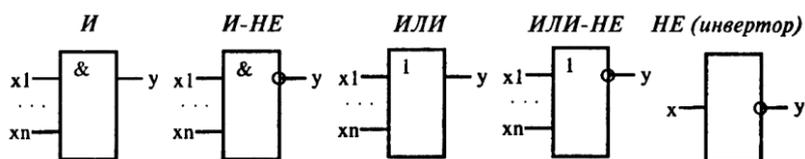


Рис. 15. Логические элементы

Логический элемент может быть реализован в виде отдельной интегральной схемы. Часто интегральная схема содержит несколько логических элементов.

Логические элементы используются в устройствах цифровой электроники (логических устройствах) для выполнения простого преобразования логических сигналов.

**Классификация логических элементов.** Выделяются следующие классы логических элементов (так называемые логики):

- резисторно-транзисторная логика (ТРЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-транзисторная 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 наиболее широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП, ЭСЛ. Логические элементы и другие цифровые электронные устройства выпускаются в составе серий 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.

Наиболее важные параметры логических элементов:

- Быстродействие характеризуется временем задержки распространения сигнала  $t_{зр}$  и максимальной рабочей частотой  $F_{макс}$ . Время задержки принято определять по перепадам уровней  $0,5U_{вх}$  и  $0,5\Delta U_{вых}$ . Максимальная рабочая частота  $F_{макс}$  – это частота, при которой сохраняется работоспособность схемы.

- Нагрузочная способность характеризуется коэффициентом объединения по входу  $K_{об}$  (иногда используют термин «коэффициент объединения по выходу»). Величина  $K_{об}$  – это число логических входов, величина  $K_{раз}$  – максимальное число однотипных логических элементов, которые могут быть подключены к выходу данного логического элемента. Типичные значения их таковы:  $K_{об} = 2...8$ ,  $K_{раз} = 4...10$ . Для элементов с повышенной нагрузочной способностью  $K_{раз} = 20...30$ .

- Помехоустойчивость в статическом режиме характеризуется напряжением  $U_{нст}$ , которое называется статической помехоустойчивостью. Это такое максимально допустимое напряжение статической помехи на входе, при котором еще не происходит изменение выходных уровней логического элемента.

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

- Напряжение питания.
- Входные пороговые напряжения высокого и низкого уровня  $U_{вх.1порог}$  и  $U_{вх.0порог}$ , соответствующие изменению состояния логического элемента.
- Выходные напряжения высокого и низкого уровней  $U_{вых1}$  и  $U_{вых0}$ .  
Используются и другие параметры.

**Особенности логических элементов различных логик.** Для конкретной серии микросхем характерно использование типового электронного узла – базового логического элемента. Этот элемент является основой построения самых разнообразных цифровых электронных устройств.

- **Базовый элемент ТТЛ** содержит многоэмиттерный транзистор, выполняющий логическую операцию И, и сложный инвертор (рис. 16).

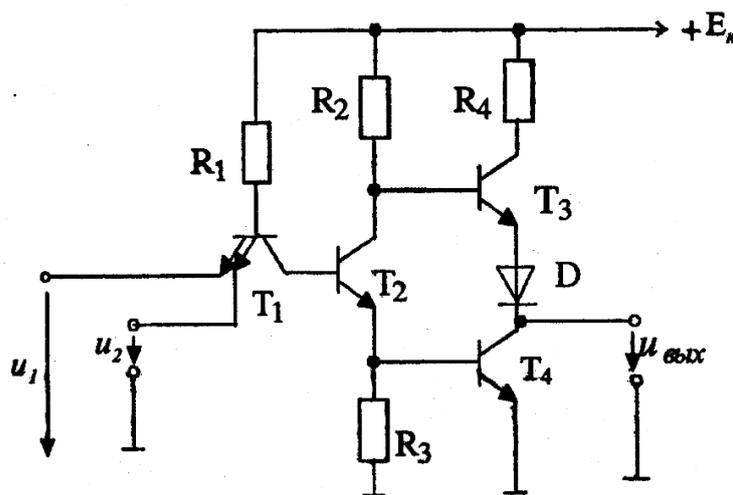


Рис. 16. Базовый элемент ТТЛ

Если на один или оба входа одновременно подан низкий уровень напряжения, то многоэмиттерный транзистор находится в состоянии насыщения и транзистор  $T_2$  закрыт, а следовательно, закрыт и транзистор  $T_4$ , т. е. на выходе будет высокий уровень напряжения. Если на обоих входах одновременно действует высокий уровень напряжения, то транзистор  $T_2$  открывается и входит в режим насыщения, что приводит к открытию и насыщению транзистора  $T_4$  и запирающему транзистора  $T_3$ , т. е. реализуется

функция И-НЕ. Для увеличения быстродействия элементов ТТЛ используются транзисторы с диодами или транзисторами Шоттки.

- **Базовый логический элемент ТТЛШ (на примере серии К555).**

В качестве базового элемента серии микросхем К555 использован элемент И-НЕ (рис. 17 а), а на рис. 17,б показано графическое изображение транзистора Шоттки.

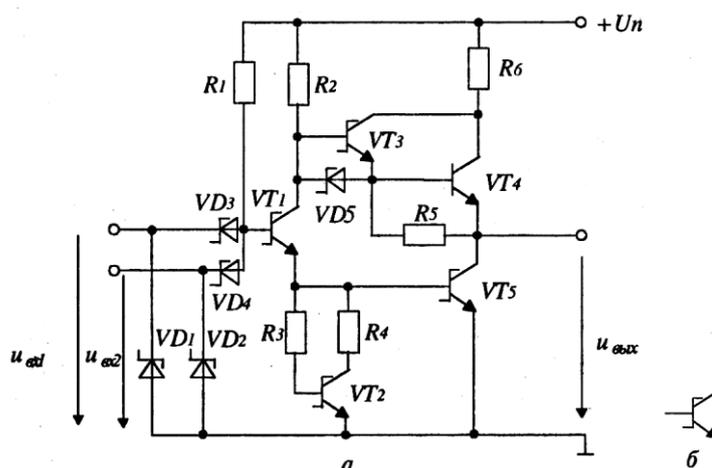


Рис.17. Логический элемент ТТЛШ

Транзистор VT4 – обычный биполярный транзистор. Если оба входных напряжения  $u_{вх1}$  и  $u_{вх2}$  имеют высокий уровень, то диоды VD3 и VD4 закрыты, транзисторы VT1, VT5 открыты и на выходе имеет место напряжение низкого уровня. Если хотя бы на одном входе имеется напряжение низкого уровня, то транзисторы VT1 и VT5 закрыты, а транзисторы VT3 и VT4 открыты, и на входе имеет место напряжение низкого уровня. Микросхемы ТТЛШ серии К555 характеризуются следующими параметрами:

- напряжение питания +5 В;
- выходное напряжение низкого уровня не более 0,4 В;
- выходное напряжение высокого уровня не менее 2,5 В;
- помехоустойчивость – не менее 0,3 В;
- среднее время задержки распространения сигнала 20 нс;
- максимальная рабочая частота 25 МГц.

**Особенности других логик.** Основой базового логического элемента ЭСЛ является токовый ключ, схема которого подобна схеме дифференциального усилителя. Микросхема ЭСЛ питается отрицательным напряжением ( $-4 В$  для серии К1500). Транзисторы этой микросхемы не входят в режим насыщения, что является одной из причин высокого быстродействия элементов ЭСЛ.

В микросхемах  $n$ -МОП и  $p$ -МОП используются ключи соответственно на МОП-транзисторах с  $n$ -каналами и динамической нагрузкой и на МОП-транзисторах с  $p$ -каналом. Для исключения потребления мощности логическим элементом в статическом состоянии используются комплементарные МДП-логические элементы (КМДП или КМОП-логика).

Логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs характеризуется наиболее высоким быстродействием, что является следствием высокой подвижности электронов (в 3...6 раз больше по сравнению с кремнием). Микросхемы на основе GaAs могут работать на частотах порядка 10 ГГц.

### **Комбинационные цифровые устройства**

Логические устройства разделяют на два класса: комбинационные и последовательностные.

Устройство называют комбинационным, если его выходные сигналы в некоторый момент времени однозначно определяются входными сигналами, имеющими место в этот момент времени.

Иначе устройство называют последовательностным или конечным автоматом (цифровым автоматом, автоматом с памятью). В последовательностных устройствах обязательно имеются элементы памяти. Выходные сигналы последовательностных устройств определяются не только сигналами, имеющимися на входах в данный момент времени, но и состоянием элементов памяти. Таким образом, реакция последовательностного устройства на определенные входные сигналы зависит от предыстории его работы.

**Шифратор** – это комбинационное устройство, преобразующее десятичные числа в двоичную систему счисления, причем каждому входу может быть поставлено в соответствие десятичное число, а набор выходных логических сигналов соответствует определенному двоичному коду. Число входов и выходов в полном шифраторе связано соотношением  $n=2^m$ , где  $n$  – число входов,  $m$  – число выходов. Шифратор для преобразования десятиразрядного единичного кода (десятичных чисел от 0 до 9) в двоичный код. Условное изображение такого шифратора и таблица соответствия кода приведены на рис. 18. Используя данную таблицу соответствия, запишем логические выражения, включая в логическую сумму те входные переменные, которые соответствуют единице некоторой выходной переменной. Так, на выходе  $y_1$  будет логическая «1» тогда, когда логическая «1» будет или на входе  $X_1$ , или  $X_2$ , или  $X_5$ , или  $X_7$ , или  $X_9$ , т.е.  $y_1=X_1+X_2+X_5+X_7+X_9$ .



Рис. 18. Схема шифратора и таблица соответствия кода

Представим на рис. 19 схему такого шифратора, используя элементы ИЛИ.

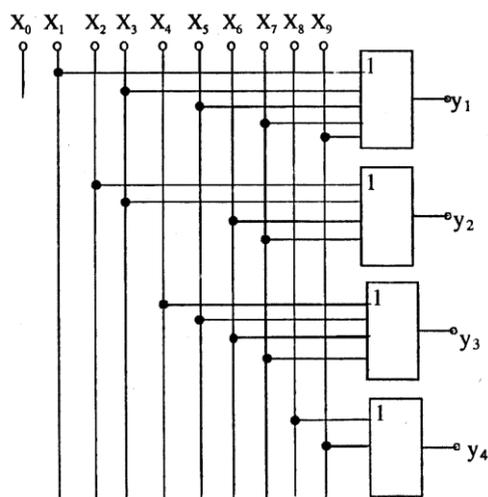


Рис. 19. Шифратор на логических элементах ИЛИ

Если на всех входах – логическая единица, то на всех выводах также логическая единица, что соответствует числу 0 в так называемом инверсном коде (1111). Если хотя бы на одном входе имеется логический ноль, то состояние выходных сигналов определяется наибольшим номером входа, на котором имеется логический ноль, и не зависит от сигналов на входах, имеющих меньший номер.

Основное назначение шифратора – преобразование номера источника сигнала в код (например, номера нажатой кнопки некоторой клавиатуры).

**Дешифратором** называется комбинационное устройство, преобразующее  $n$ -разрядный двоичный код в логический сигнал, появляющийся на том выходе, десятичный номер которого соответствует двоичному коду. Число входов и выходов в так называемом полном дешифраторе связано соотношением  $m=2^n$ , где  $n$  – число входов, а  $m$  – число выходов. Если в работе дешифратора используется неполное число выходов, то такой дешифратор называется неполным. Так, например, дешифратор, имеющий 4 входа и 16 выходов, будет неполным, а если бы выходов было только 10, то он являлся бы полным.

Обратимся для примера к дешифратору К555ИД6 серии К555 (рис. 20).

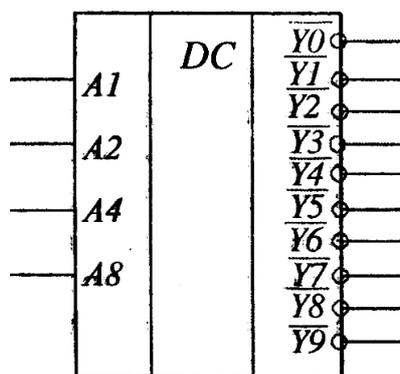


Рис. 20. Схема дешифратора

Дешифратор имеет 4 прямых входа, обозначенных через A1, ..., A8. Аббревиатура A обозначает «адрес». Указанные входы называют адресным. Цифры определяют значения активного уровня (единицы) в соответствующем разряде двоичного числа. Дешифратор имеет 10 инверсных выходов  $\overline{Y0}, \dots, \overline{Y9}$ . Цифры определяют десятичное число, соответствующее заданному двоичному числу на входах.

Дешифратор – одно из широко используемых логических устройств. Его применяют для построения различных комбинационных устройств. Шифраторы и дешифраторы являются примерами простейших преобразователей кодов.

**Преобразователями кодов** называют устройства, предназначенные для преобразования одного кода в другой, при этом часто они выполняют нестандартные преобразования кодов. Преобразователи кодов обозначают через X/Y.

Рассмотрим особенности реализации преобразователя на примере преобразователя трехэлементного кода в пятиэлементный по таблице соответствия кодов, приведенной на рис. 21.

N	Трехэлементный код			Пятиэлементный код				
	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	0	1	0	0	1
3	0	1	1	1	0	0	0	1
4	1	0	0	0	1	1	0	0
5	1	0	1	1	0	1	0	0
6	1	1	0	1	1	0	0	0
7	1	1	1	0	0	1	1	0

Рис. 21. Таблица соответствия кодов для преобразователя кодов

Здесь через N обозначено десятичное число, соответствующее входному двоичному коду. Преобразователи кодов создают по схеме дешифратор – шифратор. Дешифратор преобразует входной код в некоторое десятичное число, а затем шифратор формирует выходной код. Схема преобразователя, созданного по такому принципу, приведена на рис. 22.

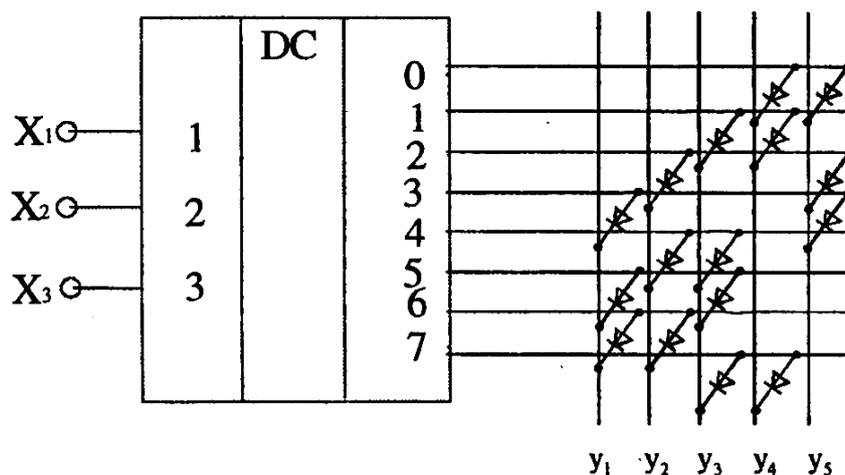


Рис. 22. Схема преобразователя кодов

**Мультиплексором** называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через MUX, а также через MS. Функционально мультиплексор можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких входов (их называют информационными) к одному выходу устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются

адресные входы и разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов  $n$  и числом адресных входов  $m$  действует соотношение  $n=2^m$ , то такой мультиплексор называют полным. Если  $n < 2^m$ , то мультиплексор называют неполным.

Рассмотрим функционирование двухвходового мультиплексора ( $2 \rightarrow 1$ ), который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов  $X_1$ ,  $X_2$  и выхода  $Y$  приведено в таблице (рис. 23).

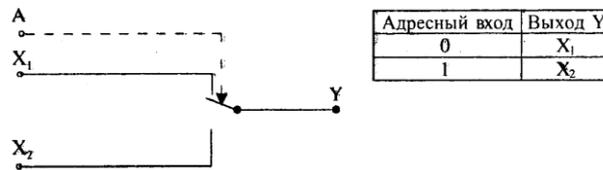


Рис. 23. Двухвходовый мультиплексор

Исходя из таблицы, можно записать следующее уравнение:

$$Y = X_1 \cdot \bar{A} + X_2 \cdot A.$$

На рис.24 показаны реализация такого устройства и его условное графическое обозначение. Основой данной схемы является являются две схемы совпадения на элементах И, которые при логическом уровне «1» на одном из своих входов повторяют на выходе то, что есть на другом входе.

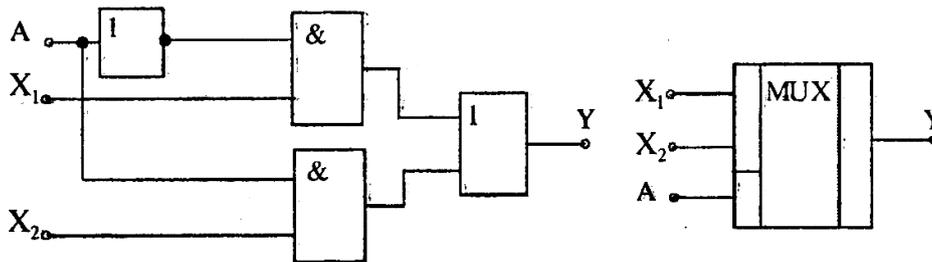


Рис. 24. Реализация двухвходового мультиплексора на логических элементах И

Мультиплексоры являются универсальными логическими устройствами, на основе которых создают различные комбинационные и последовательностные схемы. Мультиплексоры могут использовать в

делителях частоты, триггерных устройствах, сдвигающих устройствах, для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и др.

**Демультимплексором** называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультимплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультимплексоры обозначают через DMX или DMS.

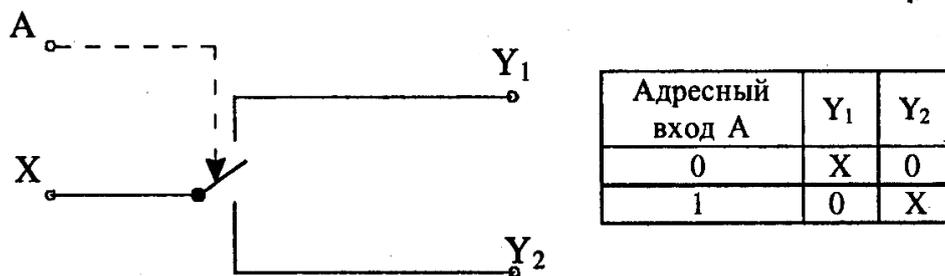


Рис. 25. Функциональная схема демультимплексора с двумя выходами

Если соотношение между числом выходов  $n$  и числом адресных входов  $m$  определяется равенством  $n=2^m$ , то такой демультимплексор называют полным, при  $n < 2^m$  демультимплексор является неполным.

Рассмотрим функционирование демультимплексора с двумя выходами, который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов приведено в таблице (рис. 26). Из этой таблицы следует:  $Y_1 = X \cdot \bar{A}$ ;  $Y_2 = X \cdot A$ , т.е. реализовать такое устройство можно так, как показано на рис. 16.9.

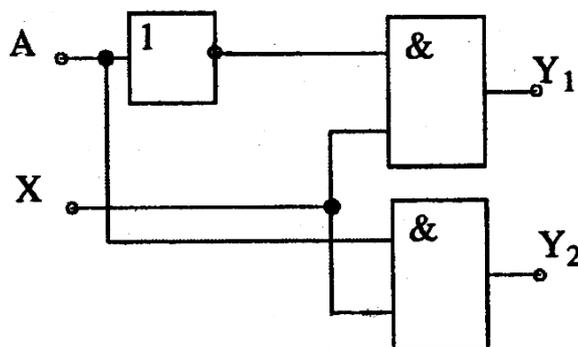


Рис. 26. Реализация демультимплексора с двумя выходами на логических элементах И

Функции демультиплекторов сходны с функциями дешифраторов. Дешифратор можно рассматривать как демультиплексор, у которого информационный вход поддерживает напряжение выходов в активном состоянии, а адресные входы выполняют роль входов дешифратора. Поэтому в обозначении как дешифраторов, так и демультиплекторов используются одинаковые буквы – ИД. Выпускают дешифраторы (демультиплексоры) К155ИД3, К531ИД7 и др.

**Сумматоры** – это комбинационные устройства для сложения чисел. Рассмотрим сложение двух одноразрядных двоичных чисел, для чего составим таблицу сложения (таблицу истинности), в которой отразим значения входных чисел А и В, значение результата суммирования S и значение переноса в старший разряд P (рис. 27). Работа устройства, реализующего таблицу истинности, описывается следующими уравнениями:  $S = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$ ;  $P = A \cdot B$ . Очевидно, что по отношению к столбцу S реализуется логическая функция «исключающее ИЛИ», т.е.  $S = A \oplus B$ .

A	B	P	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Рис. 27. Таблица истинности

Устройство, реализующее таблицу (рис. 27), называют полусумматором, и оно имеет логическую структуру, изображенную на рис. 28. Поскольку полусумматор имеет только два входа, он может использоваться для суммирования лишь в младшем разряде.

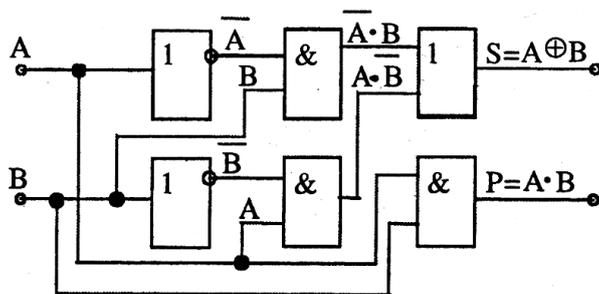


Рис. 28. Схема полусумматора

При суммировании двух многоразрядных чисел для каждого разряда (кроме младшего) необходимо использовать устройство, имеющее дополнительный вход переноса.

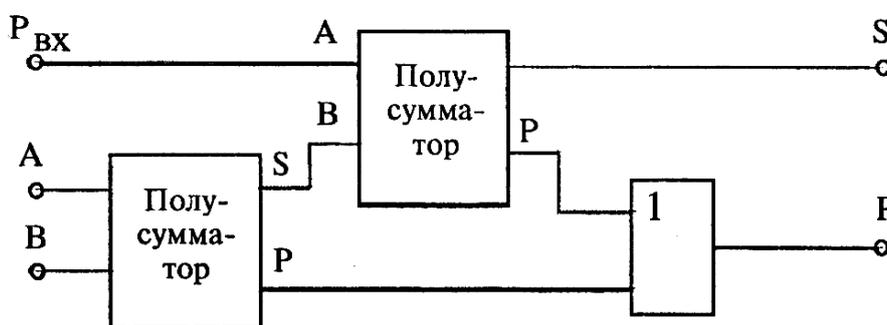


Рис. 29. Схема полного сумматора

Такое устройство (рис. 29) называют полным сумматором и его можно представить как объединение двух полусумматоров ( $P_{вх}$  – дополнительный вход переноса). Сумматор обозначают через SM.

### Последовательные цифровые устройства

**Триггер** – простейшее последовательное 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 последовательных логических устройств.

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  $C$  (строб).

По функциональным возможностям триггеры разделяются на следующие классы:

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

Входы триггеров обычно обозначают следующим образом:

$S$  – вход для установки состояния «1»;

$R$  – вход для установки состояния «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  $V$ ).

Рассмотрим асинхронный RS-триггер, имеющий условное графическое обозначение, приведенное на рис. 30. Триггер имеет два информационных входа:  $S$  и  $R$ . Закон функционирования триггеров удобно описывать таблицей переходов (таблицей истинности) (рис. 31). Через  $S^t$ ,  $R^t$ ,  $Q^t$  обозначены соответствующие логические сигналы, имеющие место в некоторый момент времени  $t$ , а через  $Q^{t+1}$  – выходной сигнал в следующий момент времени  $t+1$ .

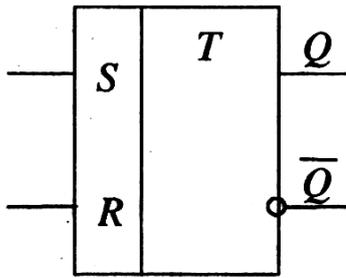


Рис. 30. RS-триггер

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

Рис. 31. Таблица истинности

Комбинацию входных сигналов  $S^t=1, R^t=1$  часто называют запрещенной, так как после нее триггер оказывается в состоянии (1 или 0), предсказать которое заранее невозможно. Подобных ситуаций следует избегать.

Рассмотренный триггер может быть реализован на двух элементах ИЛИ-НЕ (рис. 32). Микросхема К564ТР2 содержит 4 асинхронных RS-триггера и один управляющий вход (рис. 33). При подаче на вход V низкого уровня выходы триггеров отключаются от выводов микросхем и переходят в третье, так называемое высокоимпедансное, состояние. При подаче на вход V логического сигнала «1» триггеры работают в соответствии с таблицей истинности (рис. 34).

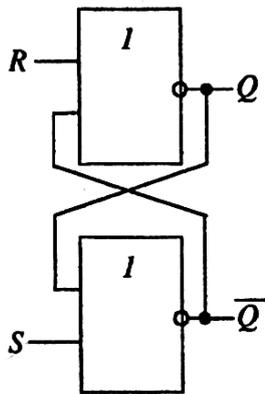


Рис. 33. Триггер на элементах ИЛИ-НЕ

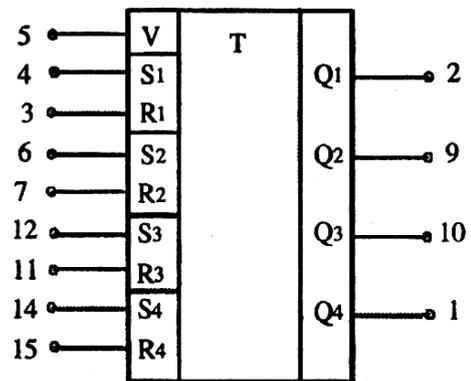


Рис. 34. Микросхема К564ТР2

**Счетчики импульсов** – это последовательностное цифровое устройство, обеспечивающее хранение слова информации и выполнение над ним микрооперации счета, заключающейся в изменении значения числа в счетчике

на 1. По существу счетчик представляет собой совокупность соединенных определенным образом триггеров. Основным параметром счетчика – модуль счета. Это максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Счетчики обозначаются через СТ.

Счетчики классифицируют:

*по модулю счета:*

- двоично-десятичные;
- двоичные;
- с произвольным постоянным модулем счета;
- с переменным модулем счета;

*по направлению счета:*

- суммирующие;
- вычитающие;
- реверсивные;

по способу формирования внутренних связей:

- с последующим переносом;
- с параллельным переносом;
- с комбинированным переносом;
- кольцевые.

**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.

Типичными являются следующие операции:

- прием слова в регистр;

- передача слова из регистра;
- поразрядные логические операции;
- сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов;
- преобразование последовательного кода слова в параллельный и обратно;
- установка регистра в начальное состояние (сброс).

Фактически любое цифровое устройство можно представить в виде совокупности регистров, соединенных друг с другом при помощи комбинационных цифровых устройств.

Регистры классифицируются по следующим видам:

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

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника/М.В.Немцов, М.Л.Немцова. — М.: Издательский центр «Академия», 2017.
2. Кравченко В. Б., Бородкин Е. А., Электроника и схемотехника.- М.: Издательский центр «Академия», 2020.
3. Прошин В. М. Электротехника / В. М. Прошин. — М.: Изд. центр «Академия», 2012.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

**СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП**

Сертификат 603332450510203670830559428146817986133868576030

Владелец Михалев Андрей Павлович

Действителен с 10.03.2022 по 10.03.2023