

Лекция 3. Классификация и параметры активных электронных компонентов элементной базы телекоммуникационных систем

3.1 Полупроводниковые диоды

3.1.1 Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется прибор, который имеет два вывода и содержит один p – n -переход.

Классификация полупроводниковых диодов производится по следующим признакам [2]:

- по методу изготовления перехода диоды делятся на: сплавные, диффузионные, планарные, точечные, диоды Шоттки и др.;
- по материалу – на германиевые, кремниевые, арсенидо-галлиевые и др.;
- по физическим процессам, на которых основана работа диода – на туннельные, лавинно-пролетные, фотодиоды, светодиоды, диоды Ганна и др.;
- по назначению диоды бывают: выпрямительные, детекторные, универсальные, импульсные, стабилитроны, параметрические, смесительные, СВЧ-диоды и др.

Однако основным признаком для классификации служит назначение прибора. Некоторые типы диодов с их основными характеристиками и условно-графическими обозначениями (УГО) в соответствии с ГОСТ 2.730-73 приведены в табл. 3.1.

В электрических схемах позиционное обозначение полупроводниковых диодов принято писать как VD_1 , VD_2 и т.д.

Диоды – исторически первые полупроводниковые приборы. Экспериментально обнаруженный факт (О.В. Лосев, 1922 г.) – выпрямление слабых переменных сигналов при соприкосновении металлической иглы с кристаллами некоторых естественных минералов – стал основой их практического применения. Широкое внедрение полупроводниковых диодов в радиоэлектронику началось примерно с 1940 г., когда для целей радиолокации был впервые создан кристаллический детектор сантиметрового диапазона.

Таблица 3.1 - Основные типы полупроводниковых диодов

Наименование	УГО
Диод выпрямительный Общее обозначение	
Диод Шоттки	
Стабилитрон односторонний	
Стабилитрон двухсторонний	
Варикап	

Большинство диодов выполняют на основе несимметричных p – n -переходов. В этом случае в одной из областей концентрация примеси, определяющей тип проводимости, значительно больше, чем в другой области. Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*, и она имеет малое объемное сопротивление. Область с низкой концентрацией называют *базой*, и эта область имеет значительное объемное сопротивление. Область p является анодом, а область n катодом. Функцию эмиттера может выполнять как анод, так и катод диода, в зависимости от того, какая из областей (p или n) имеют большую концентрацию примеси.

Выпрямительные диоды

Выпрямительными обычно называют диоды, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное. В зависимости от частоты и формы переменного напряжения они делятся на низкочастотные, высокочастотные и импульсные. Низкочастотные служат для выпрямления напряжения промышленной частоты (50 или 400 Гц). В высокочастотных частота выпрямляемого напряжения составляет десятки кГц. Основой диода является обычный $p-n$ -переход. В плоскостных диодах $p-n$ -переход имеет достаточную площадь для того, чтобы обеспечить большой прямой ток. Для получения больших обратных (пробивных) напряжений диод обычно выполняется из высокоомного материала [4].

Основными параметрами, характеризующими выпрямительные диоды, являются (рис. 3.1):

- максимальный прямой ток $I_{ПР\ MAX}$;
- падение напряжения $U_{ПР}$ на диоде при заданном значении прямого тока $I_{ПР}$ (или наоборот) ($U_{ПР} \approx 0,3-0,7$ В для германиевых и $U_{ПР} \approx 0,8-1,2$ В для кремниевых диодов);
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение диода $U_{ОБР\ MAX}$;
- обратный ток $I_{ОБР}$ при заданном обратном напряжении $U_{ОБР}$ (значение обратного тока германиевых диодов на два-три порядка больше, чем у кремниевых);

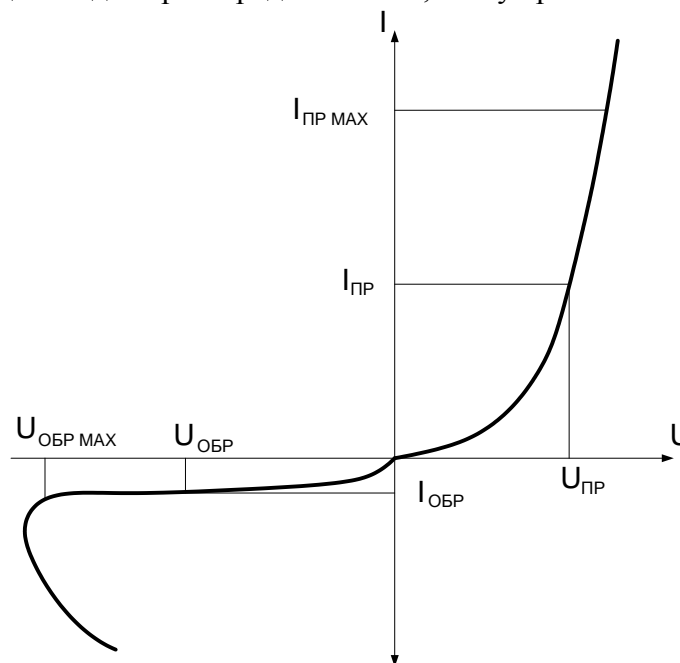


Рис. 3.1. К определению параметров выпрямительных диодов

- барьерная емкость диода при подаче на него обратного напряжения некоторой величины;
- диапазон частот, в котором возможна работа диода без существенного снижения выпрямленного тока;
- рабочий диапазон температур (германиевые диоды работают в диапазоне $-60...+70^{\circ}\text{C}$, кремниевые — в диапазоне $-60...+150^{\circ}\text{C}$, что объясняется малыми обратными токами кремниевых диодов).

Схема простейшего выпрямителя и его нагрузочной характеристики (при прямом постоянном смещении напряжения на диоде) имеют вид в соответствии с рис. 3.2 и 3.3. Схема состоит из генератора переменного напряжения, диода и последовательно включенного с диодом нагрузочного резистора. При этом напряжение генератора $U_{Г}$ делится между нагрузочным сопротивлением и диодом

$$U_{\Gamma} = U_{\text{Д}} + U_{\text{R}}. \quad (3.1)$$

Учитывая, что $U_{\text{R}} = I \cdot R$ и $U_{\text{R}} = U_{\Gamma} - U_{\text{Д}}$,

$$I = \frac{U_{\Gamma} - U_{\text{Д}}}{R}. \quad (3.2)$$

Это есть уравнение нагрузочной прямой (рис. 2.2). ВАХ диода (прямая ветвь) имеет экспоненциальный вид. Очевидно, что ток, текущий в резисторе и диоде, должен быть одинаковым. Точка А на ВАХ, для которой выполняется это условие, называется *рабочей точкой*, а величина $R_0 = U_{\text{Д}}/I_{\text{Д}}$ – *сопротивлением цепи по постоянному току*.

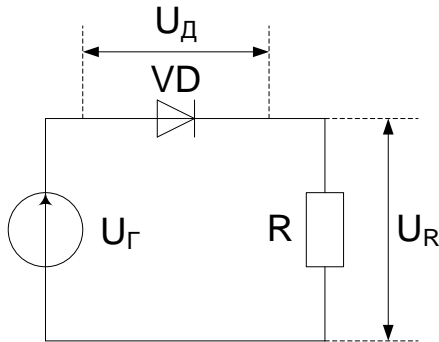


Рис. 3.2. Схема включения диода с нагрузкой

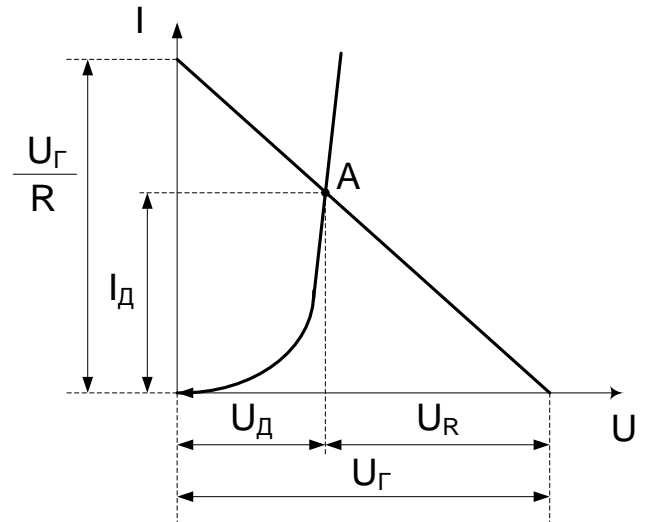


Рис. 3.3. К определению параметров схемы включения диода с нагрузкой

При работе с переменным сигналом (входное напряжение есть $U_{\Gamma}(t)$, а выходное – $U_{\text{R}}(t)$) в промежутки времени, когда к диоду приложено прямое напряжение (положительный полупериод), его сопротивление оказывается небольшим, и все входное напряжение практически будет падать на резисторе. Форма тока цепи будет повторять форму входного напряжения в соответствии с рис. 3.4.

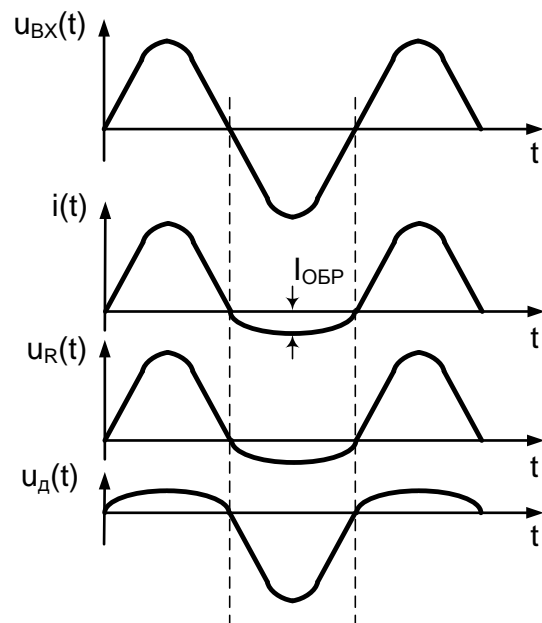
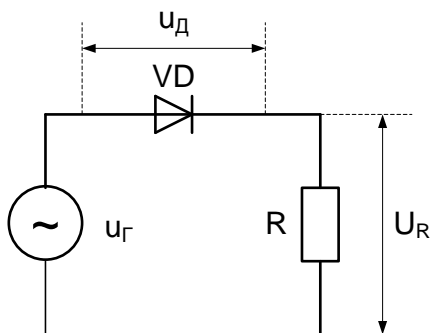


Рис. 3.4. Схема включения диода на переменном токе и эпюры напряжений и токов

При отрицательном полупериоде диод смещен в обратном направлении, его сопротивление достаточно велико, ток в цепи практически становится равным обратному току диода, и большая часть входного напряжения упадет на диоде.

Для того чтобы из пульсирующего напряжения выделить постоянную составляющую, в схему выпрямления параллельно резистору включают конденсатор. Тогда выходное напряжение при положительном полупериоде станет определяться напряжением на емкости нагрузки C_H и конденсатор при этом будет заряжаться током диода, а при отрицательном полупериоде – разряжаться. Величины C_H и R подбирают таким образом, чтобы выходное напряжение оставалось практически постоянным во времени.

При протекании больших прямых токов $I_{ПР}$ и определенном падении напряжения на диоде $U_{ПР}$ в нем выделяется большая мощность. Для отвода данной мощности диод должен иметь большие размеры $p-n$ -перехода, корпуса и выводов. Для улучшения теплоотвода используются радиаторы или различные способы принудительного охлаждения (воздушного или даже жидкостного).

Среди выпрямительных диодов следует особо выделить диод с барьером Шоттки. Этот диод характеризуется высоким быстродействием и малым падением напряжения ($U_{ПР} < 0,6$ В). К недостаткам диода следует отнести малое пробивное напряжение и большие обратные токи.

Выпрямительные диоды обычно подразделяются на диоды малой, средней и большой мощности, рассчитанные на выпрямленный ток до 0,3 А, от 0,3 А до 10 А и свыше 10 А соответственно.

Для работы с высокими напряжениями (до 1500 В) предназначены выпрямительные столбы, представляющие собой последовательно соединенные $p-n$ -переходы, конструктивно объединенные в одном корпусе. Выпускаются также выпрямительные матрицы и блоки, имеющие в одном корпусе по четыре или восемь диодов, соединенные по мостовой схеме выпрямителя и имеющие

$I_{ПР\text{ МАХ}}$ до 1 А и $U_{ОБР\text{ МАХ}}$ до 600 В.

3.1.2 Стабилитроны и стабисторы

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, на обратной ветви ВАХ которого имеется участок с сильной зависимостью тока от напряжения (рис. 3.5), т.е. с большим значением крутизны $\Delta I/\Delta U$ ($\Delta I = I_{СТ\text{ МАХ}} - I_{СТ\text{ МИН}}$). Если такой участок соответствует прямой ветви ВАХ, то прибор называется *стабистором*.

Стабилитроны используются для создания стабилизаторов напряжения.

Напряжение стабилизации $U_{СТ}$ соответствует напряжению электрического (лавинного) пробоя $p-n$ -перехода при некотором заданном токе стабилизации $I_{СТ}$ (рис. 3.5). Возможности получения стабильного напряжения характеризуются дифференциальным сопротивлением стабилитрона $r_D = \Delta U/\Delta I$, которое должно быть как можно меньше [2,4].

К параметрам стабилитрона относятся: напряжение стабилизации $U_{СТ}$, минимальный и максимальный токи стабилизации $I_{СТ\text{ МИН}}$, т.е. минимальный ток, соответствующий устойчивому пробоя, и $I_{СТ\text{ МАХ}}$, определяемый предельно допустимой рассеиваемой мощностью, дифференциальное сопротивление r_D , а так же температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКУ) – относительное изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{СТ}$ при изменении температуры корпуса прибора на 1 °С.

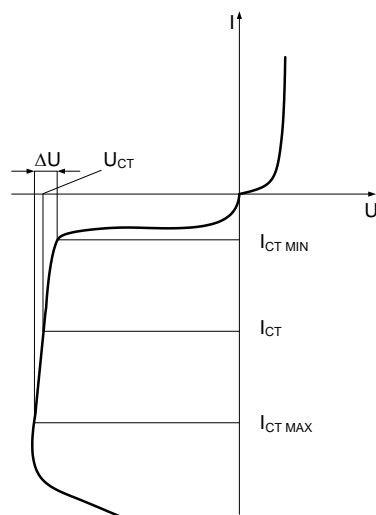


Рис. 3.5. К определению параметров стабилитронов

Промышленностью выпускаются стабилитроны с параметрами: $U_{СТ}$ от 1,5 до 180 В, $I_{СТ}$ от 0,5 мА до 1,4 А.

Выпускаются также двуханодные стабилитроны, служащие для стабилизации разнополярных напряжений и представляющие собой встречно включенные $p-n$ -переходы.

Для стабилизации напряжения стабилитрон используют согласно схеме, представленной на рис. 3.6.

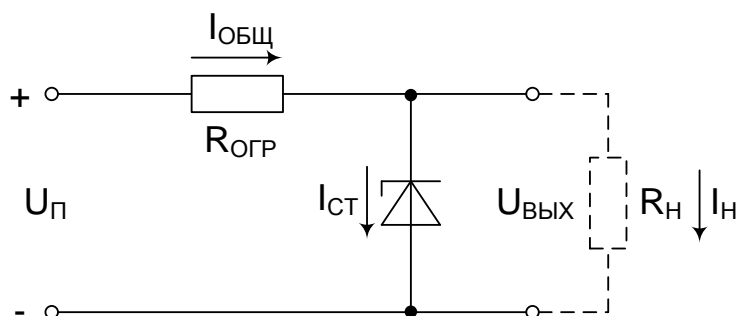


Рис. 3.6. Схема включения стабилитрона

3.1.3 Варикапы

Варикапом называется полупроводниковый диод, используемый в качестве электрически управляемой емкости с достаточно высокой добротностью в диапазоне рабочих частот. В нем используется свойство $p-n$ -перехода изменять барьерную емкость под действием внешнего напряжения (рис. 3.7).

Основные параметры варикапа: номинальная емкость C_H при заданном номинальном напряжении U_H (обычно 4 В), максимальное обратное напряжение $U_{ОБР МАХ}$ и добротность Q [2,4].

Для увеличения добротности варикапа используют барьер Шоттки; эти варикапы имеют малое сопротивление потерь, так как в качестве одного из слоев диода используется металл.

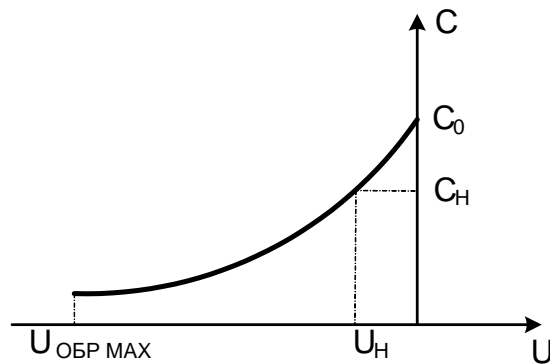


Рис. 3.7. Зависимость емкости варикапа от напряжения.

Основное применение варикапов – электрическая перестройка резонансной частоты колебательных контуров. Включение варикапа в цепь для этой цели выполняют по схеме в соответствии с рис. 3.8.

Обратное напряжение на варикап подается через высокоомный резистор R , предотвращающий шунтирование контура малым внутренним сопротивлением источника питания, и тем самым исключается снижение добротности контура. Постоянный конденсатор C необходим для того, чтобы исключить короткое замыкание варикапа индуктивностью по постоянному напряжению. Его величина всегда много больше переменной емкости варикапа. Изменяя величину обратного напряжения, можно регулировать емкость варикапа и, следовательно, резонансную частоту контура.

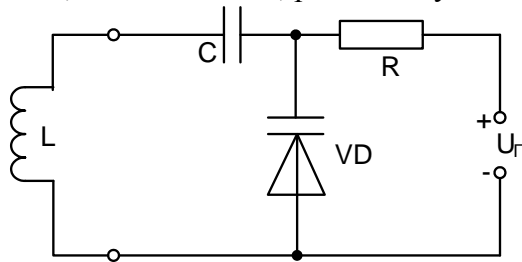


Рис. 3.8. Схема включения варикапа в колебательный контур

Параметры схемы выбирают на основе соотношений

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{ЭКВ}}} ,$$

$$\frac{1}{C_{ЭКВ}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_{VD}} . \quad (3.3)$$

Основным полупроводниковым материалом для изготовления варикапов служит кремний. Используется также арсенид галлия, обеспечивающий меньшее сопротивление базы.

В настоящее время существует несколько разновидностей варикапов, применяемых в различных устройствах непрерывного действия. Это параметрические диоды, предназначенные для усиления и генерации СВЧ-сигналов, и умножительные диоды, предназначенные для умножения частоты в широком диапазоне частот. Иногда в умножительных диодах используется и диффузионная емкость.

3.2 Полевые транзисторы

3.2.1 Общие положения

Полевыми транзисторами ПТ называют трех- или четырехэлектродные полупроводниковые приборы, в которых управление током осуществляется изменением проводимости токопроводящего канала путем воздействия электрического поля, поперечного к направлению тока. Токопроводящий канал соединяет две сильнолегированных области. Область, из которой носители заряда уходят в канал, называется истоком, а область, в которую они приходят, – стоком. Электрическое поле, изменяющее проводимость канала, создается путем подачи управляющего напряжения на электрод, называемый *затвором*. В полевых транзисторах от истока к стоку перемещаются только основные носители заряда (либо электроны, либо дырки), поэтому их часто называют униполярными [3,4].

Существует несколько разновидностей полевых транзисторов, различающихся физической структурой и способом управления проводимостью канала.

Типы ПТ с их характеристиками передачи и условными графическими обозначениями приведены в табл.3.2.

Различают полевые транзисторы с управляющим p – n -переходом, с изолированным затвором и полевой транзистор с барьером Шоттки.

Таблица 3.2 - Основные типы полевых транзисторов

Наименование	УГО	Характеристика передачи
Транзистор полевой с p – n -переходом и каналом p -типа		
Транзистор полевой с p – n -переходом и каналом n -типа		
Транзистор полевой с изолированным затвором обедненного типа с p -каналом		
Транзистор полевой с изолированным затвором обогащенного типа с p -каналом		
Транзистор полевой с изолированным затвором обедненного типа с n -каналом		

Транзистор полевой с изолированным затвором обогащенного типа с n -каналом		
Полевой транзистор с затвором Шоттки и каналом n -типа.		

Электрический переход между полупроводниками с разным типом электропроводности нашел свое применение в полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом.

В них в качестве затвора используется область полупроводника, тип электропроводности которой противоположен типу электропроводности канала, в результате чего между затвором и каналом образуется p - n -переход.

В транзисторах с изолированным затвором между металлическим затвором и проводящим каналом расположен тонкий слой диэлектрика так, что образуется структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура). Такие транзисторы обычно называют *МДП-транзисторами* [3,4].

Полевые транзисторы с p - n -переходом при одинаковых геометрических размерах с МДП ПТ могут иметь в рабочем режиме меньшие входные емкости. Это объясняется тем, что в рабочем режиме к электронно-дырочному переходу «затвор-канал» прикладывается запирающее напряжение, и, следовательно, барьерная емкость перехода (аналогично варикапу) уменьшается.

Выходное сопротивление ПТ находится в пределах десятков-сотен кОм.

Сочетание достоинств полевых транзисторов с p - n -переходом и МДП-транзисторов реализуется в транзисторах с барьером Шоттки.

В качестве статических характеристик ПТ представляются функциональные зависимости между токами и напряжениями, прикладываемыми к их электродам: *входная характеристика* $I_3 = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = const$; *характеристика обратной связи* $I_3 = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = const$; *характеристика прямой передачи* $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = const$; *выходная характеристика* $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = const$.

На практике широко используются лишь две последние характеристики, причем первую из них часто называют *передаточной характеристикой*.

Входная характеристика и характеристика обратной связи применяется редко, так как в абсолютном большинстве случаев входные токи ПТ пренебрежимо малы (от 10^{-8} до 10^{-12} А) по сравнению с токами, протекающими через элементы, подключенные к их входам.

Характеристика прямой передачи описывается формулой [3]:

$$I_C = I_{C0} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ ОТС}} \right)^2, \quad (3.4)$$

где I_{C0} – ток стока при $U_{ЗИ} = 0$.

Особенностью полевых транзисторов является наличие на их передаточной характеристике термостабильной точки, т.е. точки, в которой ток стока практически постоянен при различных температурах (точка А на рис. 3.9.). Это объясняется следующим образом.

При повышении температуры из-за уменьшения подвижности носителей удельная проводимость канала уменьшается, а, следовательно, уменьшается и ток стока. Одновременно сокращается ширина p - n -перехода, расширяется проводящая часть канала и увеличивается ток. Первое сказывается при больших токах стока, второе – при малых. Эти два противоположных процесса при определенном выборе рабочей точки могут взаимно компенсироваться.

Передаточные характеристики нормально открытого и нормально закрытого транзисторов с барьером Шоттки приведены на рис. 3.10.

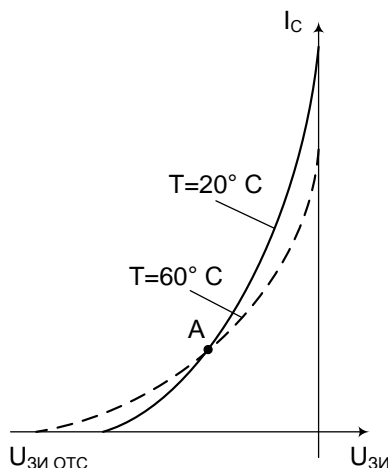


Рис. 3.9. Влияние температуры на характеристики прямой передачи ПТ

Напряжение, подаваемое на затвор такого транзистора, не должно превышать 0,4 В, чтобы в цепи затвора не появился нежелательный прямой ток.

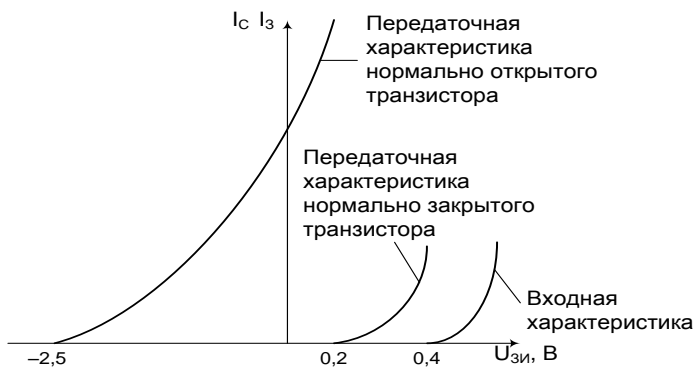


Рис. 3.10. Характеристики ПТ с барьером Шоттки

Выходные характеристики МДП ПТ не содержат область возникновения прямых токов затвора. Однако следует заметить, что аналогичная область будет иметь место и у МДП ПТ, если их подложка соединена с истоком. В этом случае при обратной полярности напряжения сток-исток возникают прямые токи подложки. Выходные характеристики таких транзисторов имеют вид в соответствии с рис. 3.11.

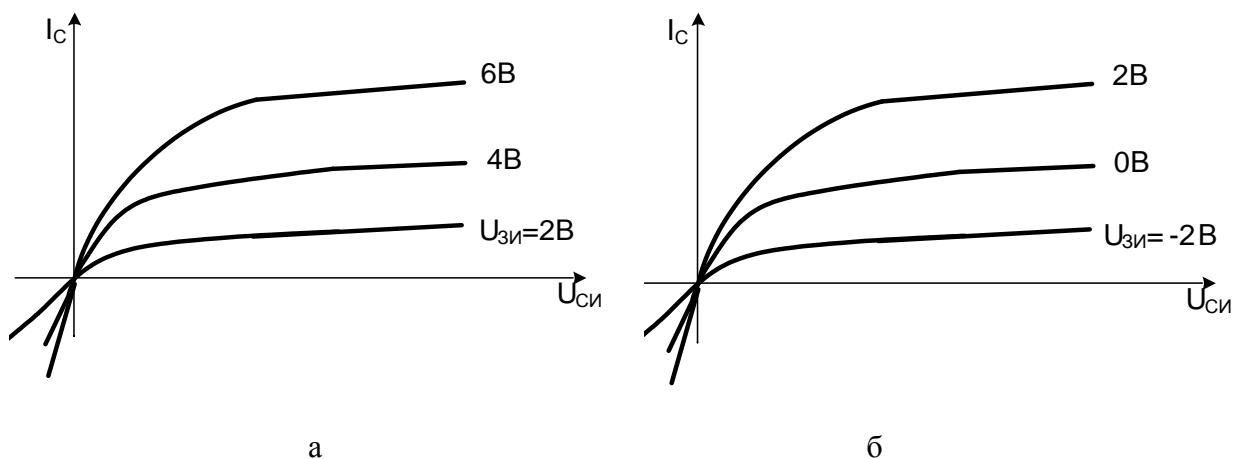


Рис. 3.11. Выходные характеристики ПТ:
а) с индуцированным n -каналом; б) со встроенным n -каналом

3.2.2 Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором (БТ) называется трехэлектродный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p - n -переходами, предназначенный для усиления электрических колебаний по току, напряжению или мощности. Слово «биполярный» означает, что физические процессы в БТ определяются движением носителей заряда обоих знаков (электронов и дырок). Взаимодействие переходов обеспечивается тем, что они располагаются достаточно близко – на расстоянии, меньшем диффузионной длины [3,4]. Два p - n -перехода образуются в результате чередования областей с разным типом электропроводности. В зависимости от порядка чередования областей различают БТ типа n - p - n (или со структурой n - p - n) и типа p - n - p (или со структурой p - n - p). Крайние области называются *эмиттер* и *коллектор*, а средняя – *база*. Условные изображения таких структур и условные графические обозначения на принципиальных схемах показаны на рис. 3.12. Контакты с областями БТ обозначены буквами: Э – эмиттер; Б – база; К – коллектор.

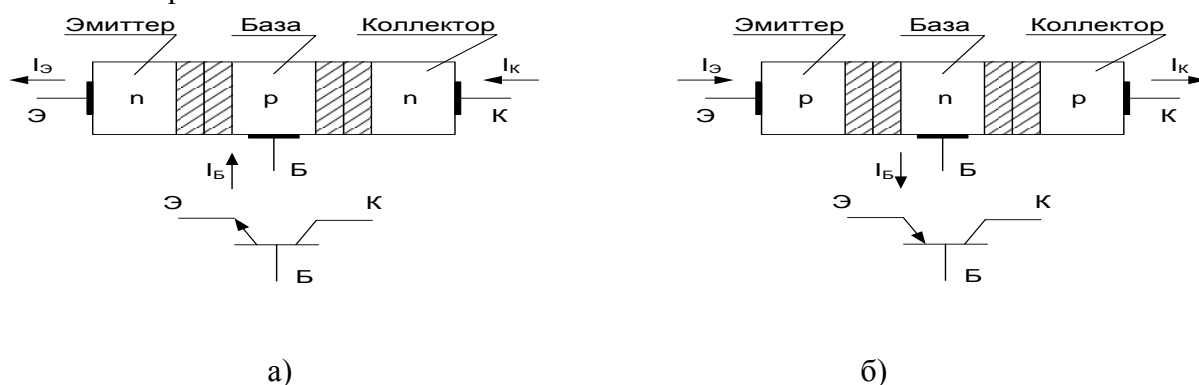


Рис. 3.12. Структуры БТ: а) типа n - p - n ; б) типа p - n - p

Упрощенное устройство планарного транзистора (т.е. выводы сделаны в одной плоскости) типа n - p - n изображено на рис. 3.12. Обязательным условием работы транзистора является то, что эмиттерная область выполняется с высокой концентрацией примесей и обозначена верхним индексом «+» (n^+). Поэтому БТ является асимметричным прибором. Область n -является коллектором. Соответственно, область p -является базой (или базой).

Область n^+ под выводом коллектора служит для создания омического контакта между выводом и телом коллектора. Переход n^+ - p между эмиттером и базой называют

эмиттерным, а $p-n$ между базой и коллектором – коллекторным. Стрелки на условных изображениях БТ указывают (рис. 3.12) направление прямого тока эмиттерного перехода.

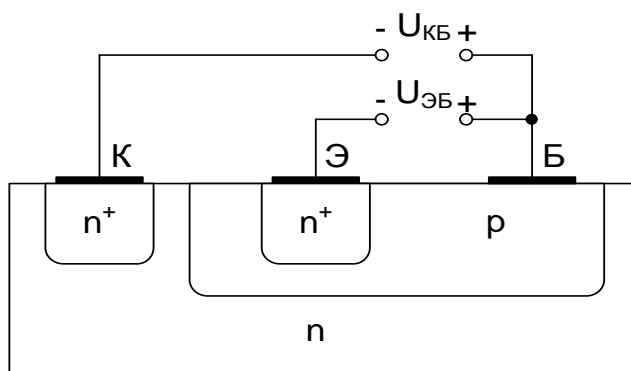


Рис. 3.12. Структура БТ типа $n-p-n$

Транзисторы характеризуются эксплуатационными параметрами, предельные значения которых указывают на возможности их практического применения. При работе в качестве усилительных приборов используются рабочие области характеристик биполярных и полевых транзисторов [3,4].

К основным эксплуатационным параметрам относятся:

- максимально допустимый выходной ток, обозначаемый для биполярных транзисторов как $I_{K\text{ MAX}}$. Превышение $I_{K\text{ MAX}}$ приводит к тепловому пробое коллекторного перехода и выходу транзистора из строя. Для полевых транзисторов этот ток обозначается $I_{C\text{ MAX}}$. Он ограничивается максимально допустимой мощностью, рассеиваемой стоком транзистора;

- максимально допустимое напряжение между выходными электродами:

$U_{KЭ\text{ MAX}}$ для биполярных транзисторов $U_{СИ\text{ MAX}}$ для полевых транзисторов.

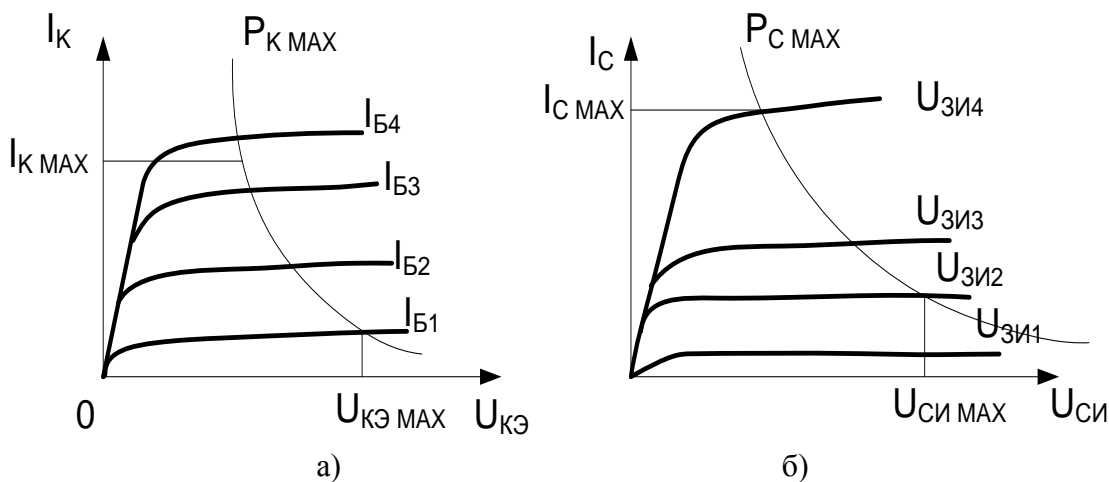


Рис.3.13. Предельные параметры транзисторов:
а) биполярные транзисторы; б) полевые транзисторы

Это напряжение определяется значениями пробивного напряжения коллекторного перехода биполярных транзисторов и пробивного напряжения участка «сток-затвор» полевых транзисторов;

- максимально допустимая мощность, рассеиваемая выходным электродом транзистора. В биполярном транзисторе это мощность $P_{K\text{ MAX}}$, рассеиваемая коллектором и бесполезно расходуемая на нагревание транзистора. В случае ПТ это мощность $P_{C\text{ MAX}}$, рассеиваемая стоком транзистора.

У биполярных транзисторов при недостаточном теплоотводе разогрев коллекторного перехода приводит к резкому увеличению I_K . Процесс имеет лавинообразный характер, и транзистор необратимо выходит из строя.

При повышении температуры окружающей среды мощность $P_{K\text{ MAX}}$ уменьшается, поэтому БТ нуждаются в схемах температурной стабилизации режима. Полевые транзисторы имеют заметные преимущества по температурной стабильности по сравнению с БТ.

3.2.3 Тиристоры

Тиристором называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три или более $p-n$ -перехода, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот [3,4].

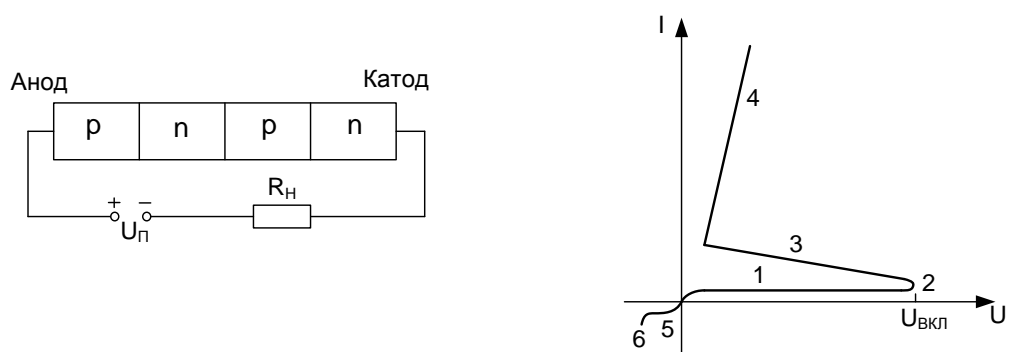
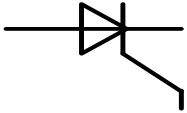
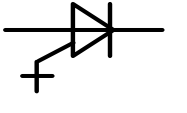
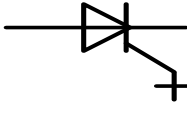
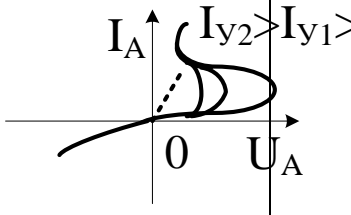
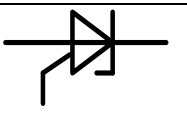
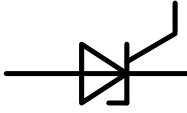
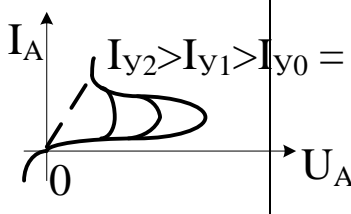
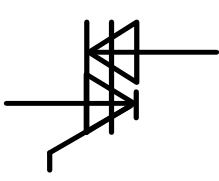
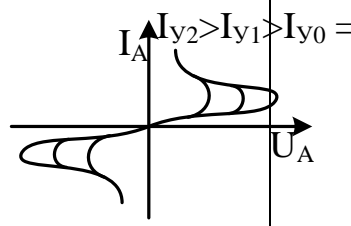


Рис. 3.14. Структура тиристора и его ВАХ

Основные характеристики и УГО тиристоров приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Основные типы тиристоров

Наименование	УГО	Характеристика
Тиристор диодный, запираемый в обратном направлении		
Тиристор диодный, проводящий в обратном направлении		
Тиристор диодный симметричный		
Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении, с управлением: - по аноду - по катоду		

		
Тиристор триодный выключеный, запираемый в обратном направлении, с управлением: - по аноду - по катоду	 	
Тиристор триодный, проводящий в обратном направлении, с управлением: - по аноду - по катоду	 	
Тиристор триодный симметричный – триак		

Простейшим тиристором является *динистор* – неуправляемый переключающий диод, представляющий собой четырехслойную структуру типа *p–n–p–n*, как и у других типов тиристоров, крайние *p–n*-переходы называются *эмиттерными*, а средний *p–n*-переход – *коллекторным*. Внутренние области структуры, лежащие между переходами, называются *базами*. Электрод, обеспечивающий электрическую связь с внешней *n*-областью, называется *катодом*, а с внешней *p*-областью – *анодом*.

Тиристоры имеют широкий диапазон применений (управляемые выпрямители, генераторы импульсов и др.), выпускаются с рабочими токами от долей ампера до тысяч ампер и с напряжениями включения от единиц до тысяч вольт.

3.2.4 Элементы аналоговых устройств

Аналоговыми называются устройства, у которых сигналы являются непрерывными функциями времени. К основным классам аналоговых устройств относятся: усилители, генераторы, фильтры, электронные регуляторы, аналоговые перемножители напряжений, преобразователи, вторичные источники питания [1,3,4].

В зависимости от конкретной области применения аналоговые устройства подразделяются на измерительные, телевизионные, радиоприемные, телефонные, радиовещательные и др. Дополнительными признаками для классификации являются диапазон рабочих частот и потребляемая мощность. В зависимости от массы и объема аналоговые устройства подразделяются на носимые, бортовые и стационарные. В зависимости от используемой элементной базы аналоговые устройства подразделяются на электровакуумные, транзисторные и интегральные. Наиболее перспективными являются

интегральные аналоговые устройства, обладающие высокой надежностью, экономичностью, малой массой и объемом.

Усилители

Основные понятия

Важным назначением электронных приборов является усиление электрических сигналов. Устройства для решения этой задачи называются усилителями.

Структурная схема усилителя имеет вид в соответствии с рис. 3.15.

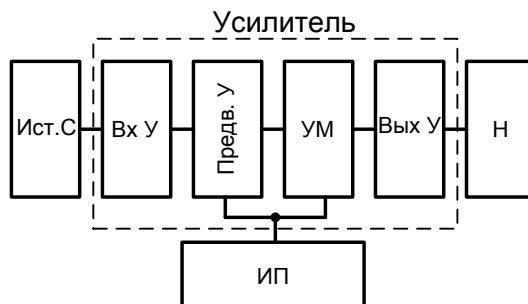


Рис. 3.15. Структурная схема усилителя

Устройство содержит входное устройство (Вх. У) для передачи сигнала от источника сигнала (Ист. С) ко входу первого каскада (предварительного усилителя). Его применяют, когда непосредственное подключение источника сигнала ко входу усилителя невозможно или нецелесообразно. Обычно входное устройство выполняется в виде трансформатора или RC-цепочки, предотвращающих прохождение постоянной составляющей тока от источника к усилителю, или наоборот.

Предварительный усилитель (Предв. У) состоит из одного или нескольких каскадов усиления. Он служит для усиления входного сигнала до величины, достаточной для работы усилителя мощности. Наиболее часто в качестве предварительных усилителей используют усилители напряжения на транзисторах. Усилитель мощности (УМ) служит для отдачи в нагрузку необходимой мощности сигнала. В зависимости от отдаваемой мощности он содержит один или несколько каскадов усиления. Выходное устройство (Вых. У) используется для передачи усиленного сигнала из выходной цепи усилителя мощности в нагрузку (Н). Оно применяется в тех случаях, когда непосредственное подключение нагрузки к усилителю мощности невозможно или нецелесообразно. Роль выходного устройства могут выполнять разделительный конденсатор или трансформатор, не пропускающие постоянную составляющую тока с выхода усилителя в нагрузку. При использовании трансформатора добиваются согласования сопротивления выхода усилителя и нагрузки с целью достижения максимальных значений КПД и малых нелинейных искажений. В усилителях на основе интегральных схем избегают применения трансформаторов вследствие их больших габаритных размеров и технологических трудностей изготовления.

Источник питания (ИП) обеспечивает питание активных элементов усилителя.

Основными признаками для классификации усилителей являются диапазон рабочих частот и параметры, характеризующие его усилительные способности: напряжение, ток, мощность на выходе. Важнейшими техническими показателями усилителя являются: коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления, диапазон усиливаемых частот, динамический диапазон, нелинейные, частотные и фазовые искажения. Усилители мощности характеризуются выходной мощностью и КПД.

Для реализации высоких значений коэффициента усиления используют последовательное включение нескольких каскадов. Для многокаскадных усилителей (содержащих n каскадов) общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$K = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (3.5)$$

Первый каскад определяет входное сопротивление усилителя $R_{ВХ}$

$$R_{BX} = U_{BX} / I_{BX}. \quad (3.6)$$

Если этот каскад работает при слабых входных сигналах, то к нему предъявляются жесткие требования по уровню собственных шумов.

Выходной каскад усилителя обычно является усилителем мощности. Он характеризуется выходным сопротивлением $R_{ВЫХ} = U_{ВЫХ} / I_{ВЫХ}$. Важным показателем является полезная мощность $P_{ПОЛ}$ в нагрузке R_H

$$P_{ПОЛ} = U_{ВЫХ}^2 / R_H = I_{ВЫХ}^2 R_H, \quad (3.7)$$

где $U_{ВЫХ}$ и $I_{ВЫХ}$ – действующие значения выходного напряжения и тока соответственно.

Коэффициент полезного действия η , % определяется отношением полезной мощности в нагрузке $P_{ПОЛ}$ к мощности, потребляемой усилителем от всех источников питания $P_{ПОТ}$, %

$$\eta = \frac{P_{ПОЛ}}{P_{ПОТ}} 100. \quad (3.8)$$

При больших амплитудах сигналов из-за нелинейности характеристик усилительных элементов возникают нелинейные искажения. Поэтому в практике используют понятие номинальной выходной мощности – максимальной мощности при искажениях, не превышающих допустимое значение. Степень нелинейных искажений усилителя оценивают величиной коэффициента гармоник K_G , %

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100, \quad (3.9)$$

где U_2, U_3, U_n – действующие значения напряжений гармоник, возникших в результате нелинейного усиления; U_1 – действующее напряжение первой гармоники.

Общая величина коэффициента гармоник $K_{Г ОБЩ}$ многокаскадного усилителя зависит от нелинейных искажений, вносимых отдельными каскадами, и определяется по формуле

$$K_{Г ОБЩ} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}. \quad (3.10)$$

В электросвязи нелинейность усилителей принято оценивать затуханием нелинейности A в децибелах:

$$A = 20 \lg(U_1 / \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}). \quad (3.11)$$

Наличие в усилителях реактивных элементов (емкостей и индуктивностей) приводит к возникновению частотных искажений и не позволяет получить постоянный коэффициент усиления в широкой полосе частот. Примерный вид АЧХ усилителя имеет вид в соответствии с рис. 3.16, а.

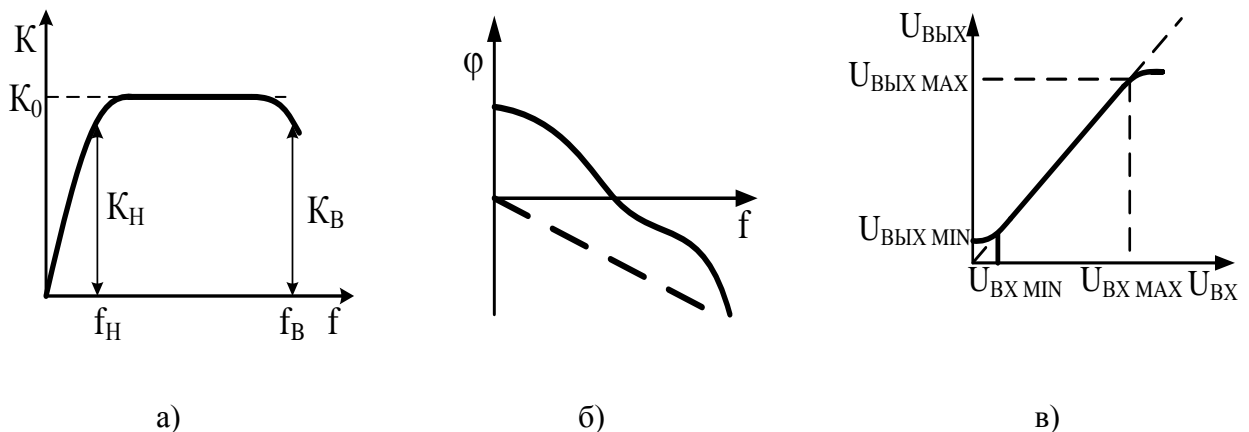


Рис. 3.16. Характеристики усилителя: а) АЧХ; б) ФЧХ; в) амплитудная

Степень искажений на отдельных частотах оценивается коэффициентом частотных искажений M , равным отношению коэффициента усиления K_0 на средней частоте f_0 к коэффициенту усиления K_f на данной частоте f :

$$M = K_0/K_f. \quad (3.12)$$

Обычно наибольшие частотные искажения возникают на границах диапазона рабочих частот: нижней f_H и верхней f_B . Коэффициенты частотных искажений в этом случае $M_H = K_0/K_H$, $M_B = K_0/K_B$. Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов:

$$M_{(PA3)} = M_1 M_2 \dots M_n. \quad (3.13)$$

Обычно коэффициент частотных искажений выражают в децибелах:

$$M_{(дБ)} = 20 \lg M_{(раз)} = M_{1(дБ)} + M_{2(дБ)} + \dots + M_{n(дБ)}. \quad (3.14)$$

Частотные искажения в усилителе сопровождаются появлением сдвига фаз между входным и выходным напряжениями, что приводит к фазовым искажениям. Фазовые искажения, вносимые усилителем, оцениваются по его ФЧХ (рис.3.16, б). Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты [1,3].

Идеальная АЧХ представляет собой прямую, параллельную оси частот (штриховая линия на АЧХ рис. 3.16, а).

Идеальная ФЧХ – прямая, начинающаяся из начала координат (штриховая линия на рис. 3.16, б). Идеальная амплитудная характеристика усилителя показана штриховой линией на амплитудной характеристике (рис. 3.16, в). В реальных усилителях наблюдаются отклонения от идеальной характеристики при слабых и больших входных сигналах. В первом случае это объясняется наличием собственных шумов усилителя, во втором – ограниченностью линейного участка характеристик усилительных каскадов (обычно последнего).

Отношение амплитуд наиболее сильного и наиболее слабого сигнала на входе усилителя называют его динамическим диапазоном D , дБ:

$$D = 20 \lg (U_{BX \max} / U_{BX \min}). \quad (3.15)$$

В качестве базового узла предварительных усилителей наиболее широко применяется усилительный каскад на БТ, включенный по схеме с общим эмиттером.

Различные способы включения биполярных и полевых транзисторов в простейших схемах усилителей выполнены в соответствии с рис. 3.17 и рис. 3.18.

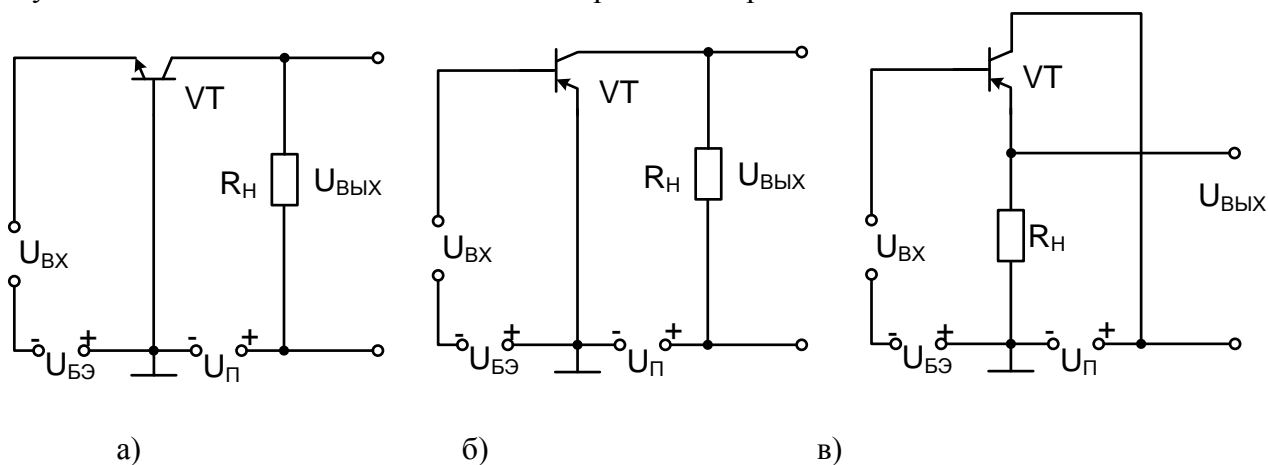


Рис. 3.17. Схемы включения БТ: а) с общей базой; б) с общим эмиттером; в) с общим коллектором

Основным показателем усилителей является коэффициент усиления по напряжению $K_U = \Delta U_{VЫX} / \Delta U_{BX}$. В усилителях на БТ обычно используют также коэффициенты

усиления по току K_I и мощности K_P : $K_I = \Delta I_{B\Delta X} / \Delta I_{B\Delta}$; $K_P = \Delta P_{B\Delta X} / \Delta P_{B\Delta} = K_I \cdot K_U$. В низкочастотных усилителях на ПТ значения K_I и K_P очень велики, и их обычно не рассчитывают.

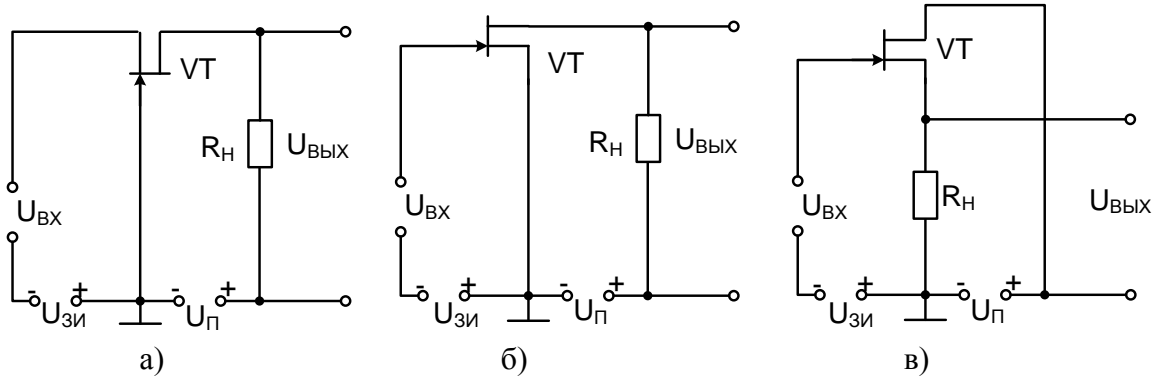


Рис. 3.18. Схемы включения ПТ: а) с общим затвором; б) с общим истоком; в) с общим стоком

Усилители на основе ПТ, включенных по схемам с общим истоком и общим стоком имеют чрезвычайно большое входное сопротивление при работе на постоянном токе и низких частотах.

При использовании сопротивлений нагрузки, существенно меньших выходного сопротивления транзистора, коэффициенты усиления по напряжению для схем с общим истоком и стоком определяются по формулам

$$K_{U \text{ ОИ}} = S \cdot R_H, \quad (3.16)$$

$$K_{U \text{ ОС}} = S \cdot R_H / (1 + S \cdot R_H), \quad (3.17)$$

где S – крутизна транзистора в рабочей точке.

При включении транзистора по схеме с общим стоком усилитель выполняет функции повторителя напряжения и имеет низкое выходное сопротивление, близкое к значению $R_{B\Delta X} = 1/S$.

Усилитель на БТ, включенный по схеме с ОБ, имеет низкое входное сопротивление и коэффициент передачи тока меньше 1. Наилучшими усилительными свойствами обладают усилители с включением транзисторов по схемам с общим эмиттером и общим истоком. При включении БТ по схеме с общим коллектором усилитель работает как повторитель напряжения ($K_U \rightarrow 1$), имеет высокое входное и низкое выходное сопротивления.

Основные показатели усилителей на основе БТ сведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 - Усилительные характеристики БТ для различных схем включения

Схема включения	K_I	K_U	K_P
С общей базой	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} = \alpha$	$\frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_{\mathcal{E}} \cdot R_{B\Delta X.B}} = \frac{\alpha \cdot R_H}{R_{B\Delta X.B}}$	$\frac{\alpha^2 \cdot R_H}{R_{B\Delta X.B}}$
С общим эмиттером	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta$	$\frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_B \cdot R_{B\Delta X.\mathcal{E}}} = \frac{\beta \cdot R_H}{R_{B\Delta X.\mathcal{E}}}$	$\frac{\beta^2 \cdot R_H}{R_{B\Delta X.\mathcal{E}}}$
С общим коллектором	$\frac{\Delta I_{\mathcal{E}}}{\Delta I_B} = \beta + 1$	$\frac{\Delta I_{\mathcal{E}} \cdot R_H}{\Delta I_B \cdot R_{B\Delta X.K}} = (\beta + 1) \frac{R_H}{R_{B\Delta X.K}}$	$(\beta + 1)^2 \frac{R_H}{R_{B\Delta X.K}}$

3.2.5 Интегральные операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют высококачественный интегральный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и одноканальным выходом, предназначенным для работы в схемах с обратной связью. Название усилителя связано с первоначальным применением – выполнением различных математических операций с аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, логарифмирование, интегрирование, дифференцирование и др.). В настоящее время ОУ выполняют более ста функций в разнообразных устройствах. Они применяются для усиления, ограничения, перемножения, частотной фильтрации, генерирования сигналов в аналоговых и цифровых устройствах.

Условное графическое обозначение ОУ приведено на рис. 3.19, где наряду с инверсным (Вх 1) и прямым (Вх 2) входами и выходом используются также цепи частотной коррекции, и балансировки (FC , NC), и два источника питания: U_1 , у которого минус соединен с общим проводом, и U_2 , у которого на общем проводе плюс. Использование двух источников питания позволяет получить двухполярный сигнал на выходе [4].

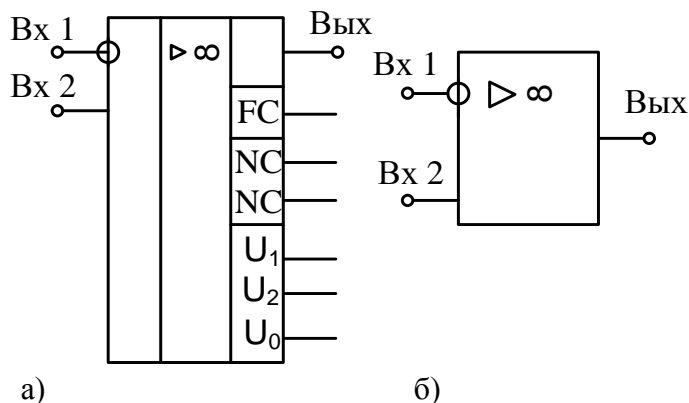
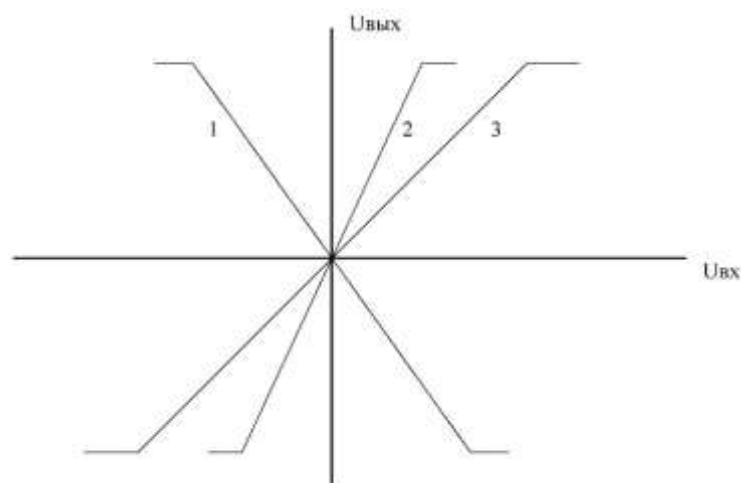


Рис. 3.19. Условные обозначения ОУ: а) полное; б) упрощенное

Для достаточной устойчивости и выполнения математических операций над сигналами с высокой точностью реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

- 1) высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и по постоянному;
- 2) малым напряжением смещения нуля;
- 3) малыми входными токами;
- 4) высоким входным и низким выходным сопротивлением;
- 5) высоким коэффициентом ослабления синфазной составляющей (КОСС);
- 6) амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот - 20дБ/дек.

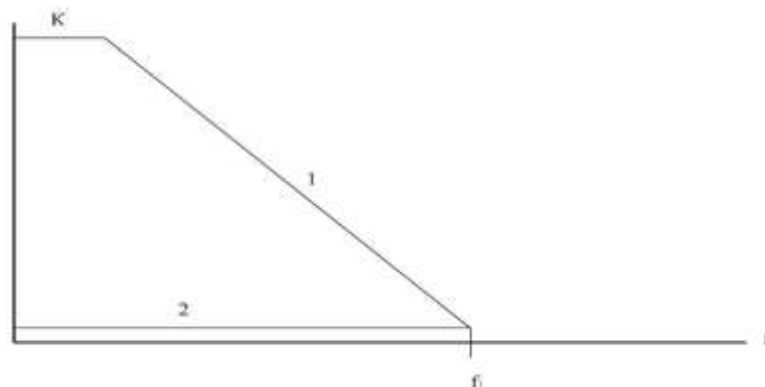
Виды амплитудных характеристик ОУ представлены на рисунке 3.20.



- 1 – для инвертирующего усилителя;
 2 – для неинвертирующего усилителя;
 3 – для повторителя напряжения.

Рис.3.20. Амплитудные характеристики

Виды амплитудно-частотных характеристик представлены на рисунке 3.21



- 1 – для неинвертирующего усилителя;
 2 – для повторителя напряжения

Рис.3.21. Амплитудно-частотные характеристики

Основные параметры ОУ приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 - Основные параметры ОУ

Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
K_U	∞	$(10-1000) \cdot 10^3$
R_{BX} , кОм	∞	$10-10^3$ (БТ), 10^3-10^{12} (ПТ)
$R_{BЫX}$, Ом	0	1-1000
f_1 , МГц	∞	0,1-100
$K_{ОС\ СФ}$, дБ	∞	40-110

В данной таблице: K_U – коэффициент усиления ОУ $K_U = U_{BЫX} / (U_{BX2} - U_{BX1})$, R_{BX} – входное сопротивление (БТ – входной каскад выполнен на биполярных транзисторах, ПТ – а полевых транзисторах), $R_{BЫX}$ – выходное сопротивление, f_1 – частота единичного усиления, т.е. частота, на которой коэффициент усиления снижается до единицы, $K_{ОС\ СФ}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ОС\ СФ} = K_U / K_{У\ СФ}$; $K_{У\ СФ} = U_{BЫX} / U_{BX\ СФ}$; $U_{BX\ СФ} = U_{BX1} = U_{BX2}$.

На практике ОУ обычно используют с цепями обратной связи (ОС). Под ОС понимают полную или частичную передачу сигнала с выхода усилителя на его вход в

соответствии с рис. 3.22. Если сигнал ОС суммируется с входным сигналом – положительная ОС (ПОС), если вычитается из входного сигнала – отрицательная ОС (ООС).

В качестве цепей ОС используются пассивные цепи, коэффициенты преобразования и частотные характеристики которых существенно влияют на свойства усилителя.

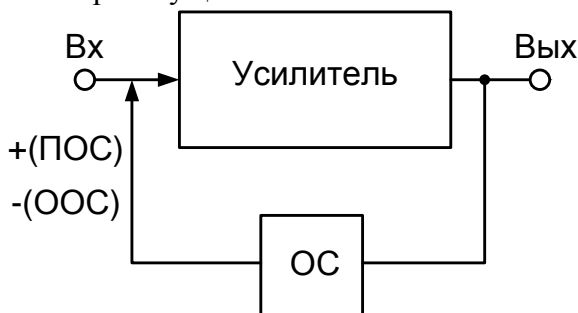


Рис.3.22. ОС в усилителе

ООС широко используют в усилителях на основе ОУ.

В зависимости от способа получения сигнала ОС различают: ОС по напряжению, по току и комбинированную. В зависимости от способа введения сигнала ОС во входную цепь различают: последовательную, параллельную и комбинированную. Последовательную ООС по напряжению и параллельную по току выполняют в соответствии с рис. 3.23.

Для количественной оценки ОС используют коэффициент β , который показывает, какая часть выходного сигнала поступает на вход усилителя.

Обратная связь оказывает влияние на все основные характеристики усилителя.

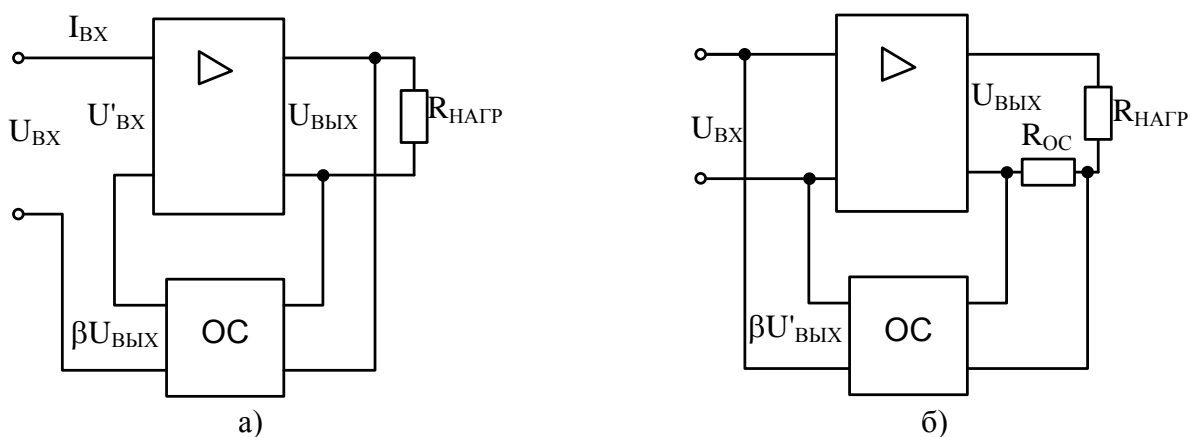


Рис. 3.23. Виды ОС: а) последовательная ООС по напряжению; б) параллельная ООС по току

3.2.6 Фильтры

В современных радиотехнических устройствах наблюдается тенденция широкого использования ИМС на основе полевых транзисторов (ПТ) для микромощных устройств, так как они потребляют значительно меньшую мощность в цепях смещения. Интерес представляет режим управляемого сопротивления при отсутствии источников питания стоковых цепей. Как известно, при малых напряжениях на стоке дифференциальное сопротивление сток-исток постоянно, и прибор можно представить в виде линейного резистора, сопротивление которого зависит от потенциала затвора [1,4].

Применение полевых транзисторов дает возможность конструировать активные фильтры с регулируемой частотой среза, резонанса, добротности.

Принципиальная схема фильтра нижних частот второго порядка с регулируемой частотой среза приведена на рис. 3.24.

В схеме резисторы заменены согласованными полевыми транзисторами с управляющим p - n -переходом. Частота среза такого фильтра определяется по формуле

$$f_{CP} = \frac{1 - U_{УПР} / U_{ЗИ ОТС}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot (R_{СИ})_{U_{ЗИ}=0}} \quad (3.18)$$

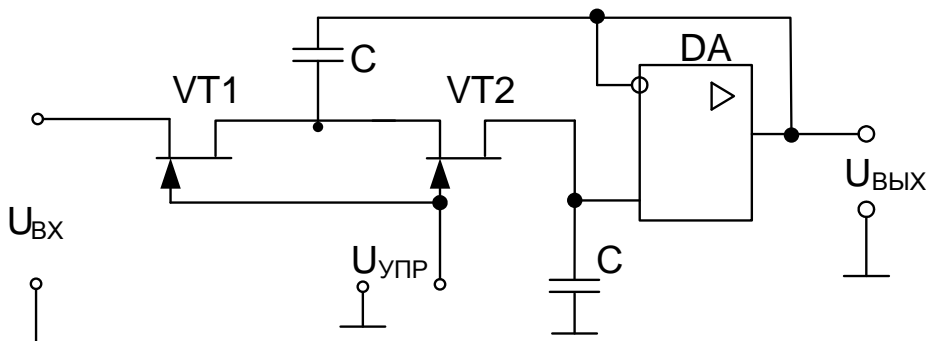


Рис. 3.24. Активный НЧ-фильтр с регулируемой частотой среза

Управлять частотой среза, не изменяя затухания, можно одновременным изменением сопротивлений сток-исток ПТ1 и ПТ2 так, чтобы $R_{СИ1} = R_{СИ2}$.

На рис. 3.25 изображена схема полосового высокودобротного фильтра. Если изменять сопротивления каналов транзисторов VT_1 и VT_2 , то можно регулировать резонансную частоту, которая определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_5}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_{СИ1} \cdot R_{СИ2}}} \quad (3.19)$$

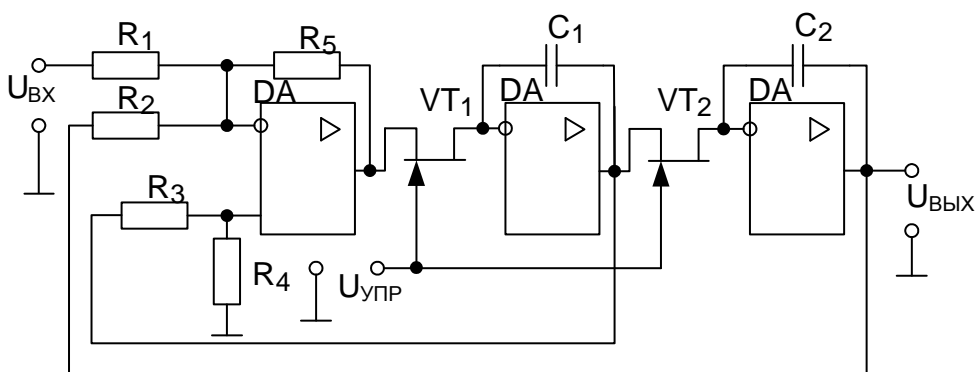


Рис. 3.25. Полосовой высокودобротный фильтр

При необходимости управлять добротностью активных фильтров можно заменить сопротивления R_2 и R_5 полевыми транзисторами. Добротность регулируется изменением коэффициента усиления операционного усилителя, что достигается регулировкой глубины обратной связи.

3.2.7 Импульсные устройства

Общие сведения

Наряду с аналоговыми устройствами, в которых сигналы представляют собой непрерывные функции времени, широко распространены импульсные устройства, у которых

сигналы являются дискретными функциями (кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой).

Импульсные устройства удобно классифицировать по форме используемых сигналов. В соответствии с рис. 3.26 формы основных типов импульсов имеют вид: прямоугольный, пилообразный, экспоненциальный, колоколообразный, ступенчатый, трапециидальный, а также последовательность периодических импульсных и высокочастотных колебаний, называемых *радиоимпульсами*.

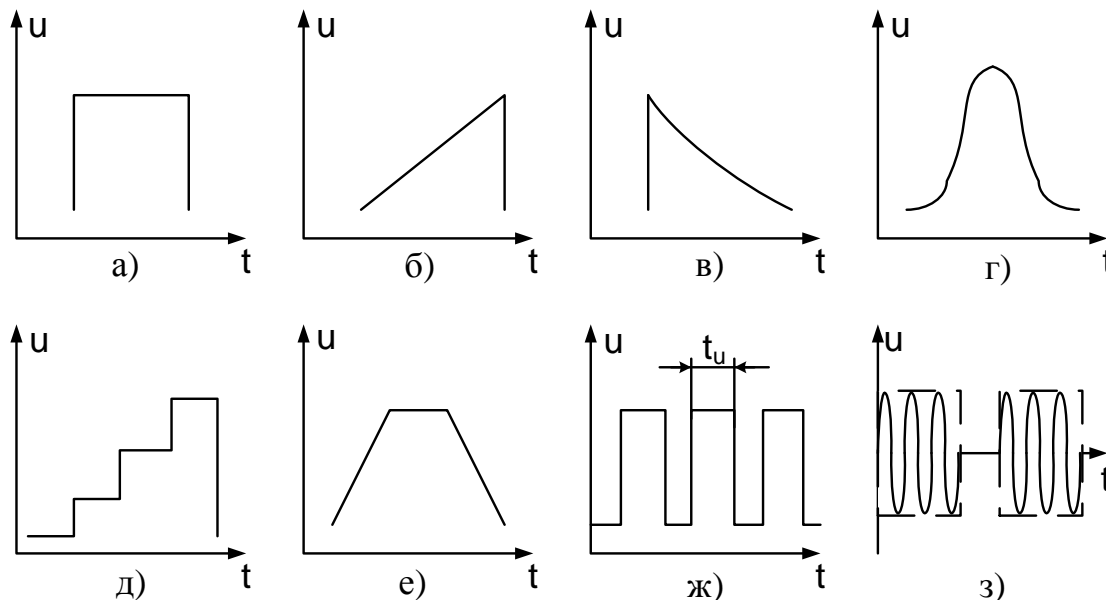


Рис. 3.26. Формы импульсов

Для усиления сигналов импульсной формы требуются широкополосные усилители (обозначаемые УК), повторители напряжения (УЕ) и специальные импульсные усилители (УИ).

Группа импульсных устройств, работающих с одиночными прямоугольными импульсами или с последовательностями прямоугольных импульсов, выделилась (в силу большой значимости в современной электронике) в самостоятельный класс цифровых устройств.

Импульсные устройства, как правило, используют ключевой режим работы транзисторов, в отличие от активного режима, используемого в аналоговых устройствах. Импульсный режим работы имеет ряд преимуществ перед активным режимом, что обеспечивает следующие достоинства импульсных устройств:

- в импульсном режиме достигается большая мощность во время действия импульсов при малом значении средней мощности устройства. Поэтому импульсные устройства обладают меньшими массой и габаритными размерами;
- при использовании импульсного режима может быть расширен температурный интервал работы полупроводниковых приборов и снижены требования к разбросу их параметров. Первое объясняется уменьшением энергии, выделяемой в полупроводниковых элементах устройства, второе – использованием ключевого режима. Разброс параметров может привести к некоторому искажению формы импульсов, однако это не является существенным, если в данном случае не искажается информация, заключенная в определенном сочетании импульсов. Указанная особенность объясняет повышенную помехоустойчивость импульсной электронной аппаратуры;
- для реализации импульсных устройств любой сложности требуются однотипные элементы, легко выполняемые методами интегральной технологии.

В аналоговых устройствах нередко используется режим малого сигнала, а устройства, в которых применяется такой режим работы, являются *линейными*. В линейных устройствах амплитуды переменных составляющих напряжений и токов существенно меньше значений

постоянного тока и постоянного напряжения, используемых для установки режима транзисторов. При этом параметры усилительных приборов считают неизменными, так как используются линейные участки ВАХ.

На практике находят применение и устройства, работающие в режиме больших сигналов. В этих устройствах используется практически вся область ВАХ электронных приборов. При этом параметры приборов не остаются постоянными, а меняются в значительных пределах. Устройства, работающие в режиме больших сигналов, являются *нелинейными*. Простейшими, уже знакомыми примерами нелинейных устройств являются усилители мощности при больших амплитудах входного напряжения, а также электронные ключи цифровых сигналов.

Основными типами нелинейных устройств являются: ограничители, выпрямители, детекторы – устройства для выделения требуемого сигнала из сигнала более сложной формы, умножители частоты, преобразователи частоты, модуляторы.

Особую группу составляют устройства, у которых в процессе работы параметры меняются не только в зависимости от электрического режима, но и от времени. Такие устройства получили название *нелинейно-параметрических*.

К нелинейно-параметрическим относят устройства, использующие нелинейно-параметрические резисторы, емкости и индуктивности.

Общей отличительной особенностью нелинейных устройств является резкое отличие спектра выходного сигнала от спектра входного сигнала. Эта особенность позволяет решать задачи умножения, преобразования, модуляции и детектирования сигналов.

3.3 Элементы цифровых устройств

3.3.1 Общие положения

Цифровыми называются устройства, в которых обрабатываемая информация имеет вид электрических сигналов с ограниченным множеством дискретных значений. В настоящее время в цифровых системах наибольшее распространение получили цифровые устройства, работающие с двоичным кодированием информации. Электрические сигналы в таких системах обычно имеют вид прямоугольных импульсов, характеризующихся двумя значениями уровней, высоким и низким [1,4].

Теоретической основой проектирования цифровых систем является алгебра логики или булева алгебра (по имени ее основоположника Д. Буля). В алгебре логики переменные величины и функции от них могут принимать только два значения 0 и 1 и называются логическими переменными и логическими функциями. Устройства, реализующие логические функции, называются логическими или цифровыми.

Цифровые устройства имеют принципиальные схемотехнические отличия от аналоговых устройств, обусловленные следующими факторами: менее жесткими требованиями к точности, стабильности параметров и характеристик элементов; возможностью синтеза систем любой сложности с помощью ограниченного набора базовых логических элементов и элементов памяти; возможностью сопряжения функциональных узлов без специальных согласующих элементов (благодаря использованию гальванической связи между функциональными узлами); простотой расширения функциональных возможностей путем набора требуемых сочетаний интегральных микросхем.

Различают два основных класса цифровых устройств: комбинационные устройства и последовательные автоматы. В комбинационных устройствах определенному сочетанию входных сигналов (набору) соответствует определенный выходной сигнал. Они, как правило, не обладают памятью. В последовательных автоматах такая однозначность отсутствует. В них выходной сигнал зависит от совокупности входных сигналов, как в текущий, так и в предыдущие моменты времени. Эти автоматы обладают памятью.

В комбинационных устройствах наиболее широкое применение находят такие цифровые устройства, как дешифраторы, преобразователи кодов, сумматоры и др. В последовательных автоматах широко используются цифровые устройства с двумя устойчивыми состояниями — триггеры. На их основе строят регистры, счетчики, схемы памяти.

По способу соединений элементов цифровые устройства делятся на два типа: на устройства со статическими (потенциальными) связями между элементами и устройствами с динамическими (импульсными и импульсно-потенциальными) связями между элементами. Учитывая широкое распространение в интегральной схемотехнике элементов с потенциальными связями, в дальнейшем будем ориентироваться только на элементы этого класса.

Элементы, используемые для обработки цифровых сигналов, называют логическими элементами. Различают логические элементы, работающие в положительной и отрицательной логиках. К положительной логике относятся логические элементы, работающие с цифровыми сигналами, у которых максимальный потенциальный уровень соответствует логической 1, а минимальный потенциальный уровень логическому 0 (рис. 6.1). К отрицательной логике относят элементы, у которых максимальный потенциальный уровень соответствует логическому 0, а минимальный потенциальный уровень — логической 1.

Современные логические элементы и цифровые устройства выполняются на основе интегральных микросхем и обычно используют положительную логику.

Параметры, соответствующие размерности напряжения:

- напряжение питания U_H ;
- напряжение, соответствующее логическому «0»;
- напряжение, соответствующее логической «1»;
- логический перепад напряжений $\Delta U = U^1 - U^0$.

При позитивной логике низкий уровень напряжения U^0 соответствует логическому 0, а высокий уровень U^1 — логической 1 в соответствии с рис. 3.27.

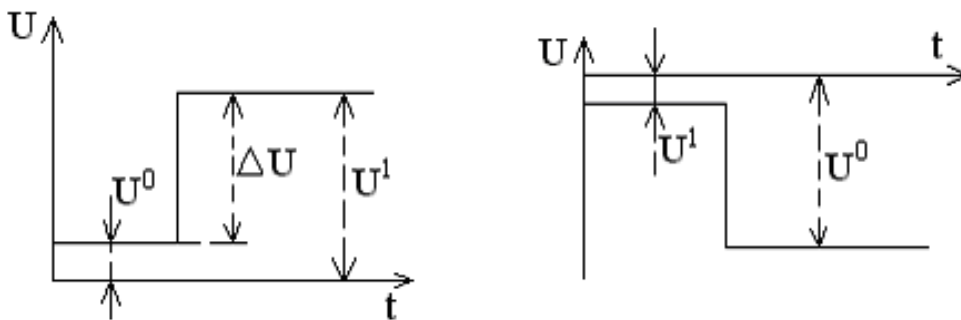


Рис. 3.27. К определению параметров, имеющих размерность напряжения

3.3.2 Электронные ключи на транзисторах

Транзисторы широко используются в электронных устройствах в качестве ключа, функцией которого является замыкание и размыкание электрической цепи. Имея малое сопротивление во включенном состоянии и большое — в выключенном, транзистор достаточно полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ключевым элементам.

Электронный ключ можно рассматривать как устройство, в котором реализуется два состояния логической переменной (0 и 1).

Транзисторные ключи служат для коммутации цепей нагрузки под воздействием внешних сигналов. Состояние «включено (замкнуто)» должно характеризоваться минимально возможным падением напряжения на ключе, а состояние «выключено (разомкнуто)» — минимально возможным током через ключ в непроводящем состоянии.

Электронный ключ на биполярном транзисторе

Схема ключа на биполярном транзисторе показана на рис. 3.28. Во входной цепи действуют источник смещения U_{CM} , создающий обратное напряжение на эмиттерном переходе, источник управляющих импульсов прямого напряжения U_{BX} и ограничительный резистор R_B . Резистор в цепи базы R_B служит для выбора необходимого тока базы. Обычно $R_B \gg h_{11Э}$. В коллекторную цепь включены сопротивление нагрузки R_K и источник питания $U_{П}$.

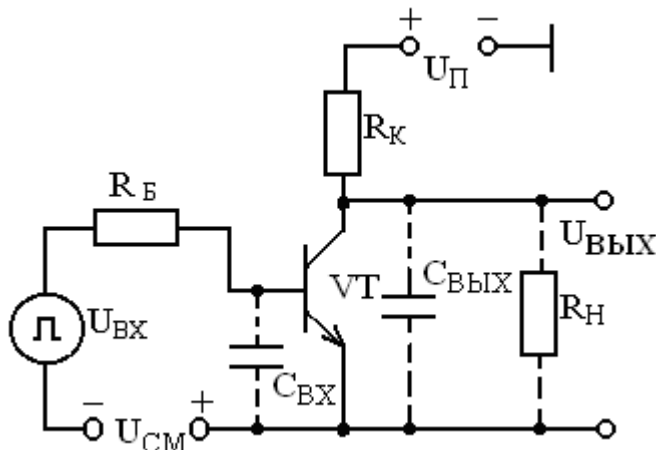


Рис. 3.28. Электронный ключ на биполярном транзисторе.

Резистор R_K является внутренней нагрузкой ключа, резистор R_H является внешней нагрузкой ключа. Величина внешней нагрузки в реальных условиях может меняться в широких пределах. При $R_H = \infty$ ключ работает в режиме холостого хода. Показанные на схеме пунктиром конденсаторы C_{BX} и $C_{ВЫХ}$ являются паразитными и определяются в основном барьерными емкостями эмиттерного и коллекторного переходов транзистора, а также монтажными емкостями и емкостной составляющей нагрузки.

Данная схема отличается малой мощностью, затрачиваемой на управление состояниями ключа, и малым падением напряжения на ключе во включенном состоянии.

Электронные ключи на полевых транзисторах

Схема простейшего ключа с *резистивной нагрузкой на основе ПТ* приведена на рис. 3.29.

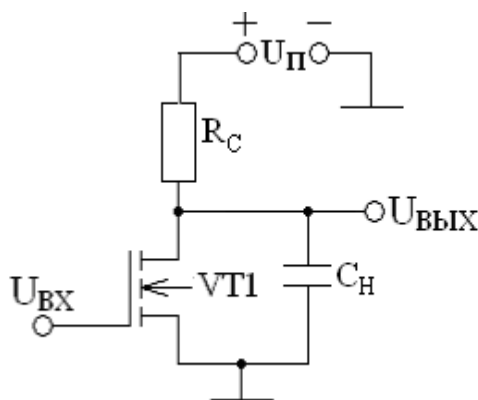


Рис. 3.29. Электронный ключ на полевом транзисторе

В качестве ключевого элемента используется МДП ПТ с индуцированным каналом n -типа.

Такой ключ имеет очевидные преимущества перед рассмотренным выше ключом на БТ:

- нет необходимости в источнике запирающего напряжения на входе транзистора;

- ключ потребляет крайне малую мощность от источника управляющего сигнала, так как транзистор обладает большим входным сопротивлением;
- полярность управляющего напряжения такая же, как и полярность коммутируемого напряжения, что позволяет осуществлять гальваническое соединение нескольких однотипных ключей между собой.

В зависимости от типа применяемых элементов и особенностей схемотехники различают следующие базовые логические элементы семейства ЦИМС: ТЛНС – транзисторная логика с непосредственной (гальванической) связью; РТЛ – резисторно-транзисторная логика; РЕТЛ – резисторно-емкостная логика; ДТЛ – диодно-транзисторная логика; ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика; И²Л – интегральная инжекционная логика; ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика; МДП – логические схемы на основе МДП транзисторов; КМДП – логические схемы на основе комплементарных МДП транзисторов. Чтобы правильно выбрать тип ЦИМС, необходимо представлять внутреннюю структуру базовых логических элементов, знать функциональные возможности и основные параметры логических элементов разных семейств.

Комбинационные устройства

Микросхемы, выпускаемые промышленностью, содержат не только микросхемы, выполняющие простейшие логические операции И-НЕ, ИЛИ-НЕ и др., но и микросхемы, выполняющие более сложные логические операции: дешифраторы, демультиплексоры и мультиплексоры, сумматоры и т.д.

3.3.3 Дешифраторы

Полным дешифратором называется комбинационная схема (КС), имеющая n входов и 2^n выходов. В полном дешифраторе каждой комбинации значений входных сигналов соответствует сигнал, равный 1, только на одном из выходов. Структурная схема дешифратора, имеющего два входа X_0 и X_1 и четыре выхода $Y_0 - Y_3$ (дешифратор 2x4) имеет вид в соответствии с рисунком 3.30, а.

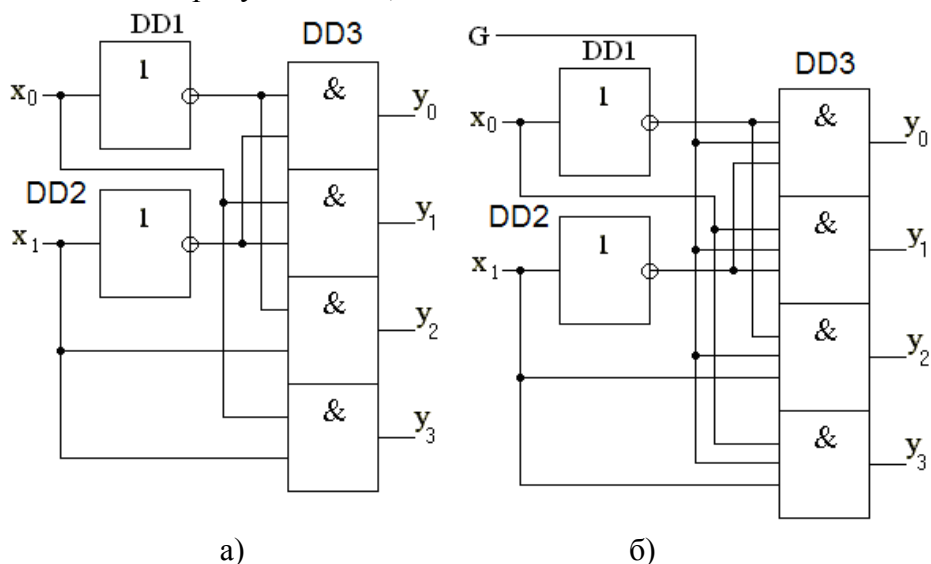


Рис. 3.30. Структурные схемы дешифратора и демультиплексора:
а) дешифратор; б) демультиплексор

Таблица истинности приведена ниже. Комбинации значений входных сигналов X_1 и X_0 соответствует сигнал, равный 1 только на выходе, номер которого, указанный в четырех правых столбцах, совпадает с двоичным числом на входе.

Таблица 3.6 - Таблица истинности дешифратора

X_1	X_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	0	0	1

0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Дешифраторы могут быть неполными, реализующими $N < 2^n$ выходов. Такие дешифраторы используются, например, для преобразования двоично-десятичного кода в код, предназначенный для управления десятичным индикатором (дешифраторы 4x10). Дешифраторы являются преобразователями кодов, выполняющих преобразование двоичного и двоично-десятичного кодов в унитарный код. Унитарный код двоичного n -разрядного числа представляется 2^n разрядами, только один из разрядов которого равен 1.

Шифраторы выполняют функцию, обратную дешифраторам, т. е. преобразуют унитарный код в двоичный или двоично-десятичный.

На основе полных дешифраторов строятся дешифраторы-мультиплексоры, т. е. используется дополнительный вход G , сигнал с которого подается на все ЛЭ И полного дешифратора в соответствии с рисунком 6.39, б. Этот сигнал G появляется на том из выходов, код которого установлен на адресных входах X .

3.3.4 Мультиплексоры

Мультиплексором называется КС, имеющая n информационных входов D и один выход Y , где m - число адресных входов X . Принципиальная схема четырехканального мультиплексора, имеющего два адресных входа X_0 и X_1 и четыре информационных входа $D_0 - D_3$, имеет вид в соответствии с рис. 3.31.

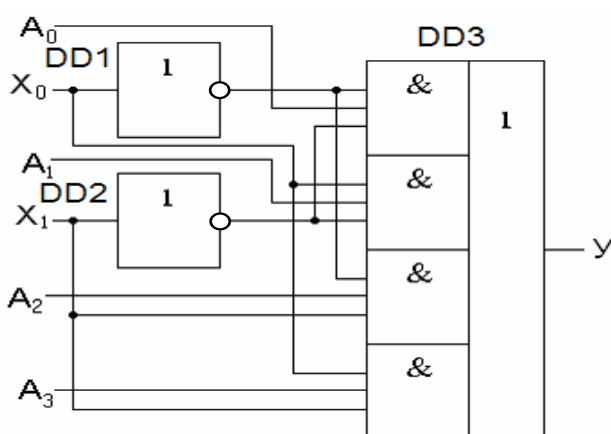


Рис. 3.31. Структурная схема мультиплексора

Каждому адресу X с номером i соответствует свой информационный вход D_i , сигнал с которого при данном адресе проходит на выход. Основным назначением мультиплексора является коммутация входных сигналов на один выход Y . В настоящее время промышленностью выпускаются серии микросхем, в состав которых входят мультиплексоры, имеющие число адресных входов $m = 2, 3$ и 4. Причем при числе адресных входов $m = 2$ выпускаются вдвоенные четырехканальные мультиплексоры, число входных информационных сигналов которых равно $4 + 4 = 8$.

Исключающие ИЛИ

В сумматорах, в схемах сравнения, определения четности и нечетности и т.д. используется схема *исключающее ИЛИ* либо она же «сумматор по модулю два». Приведем ее определение и основные свойства. Эта операция обозначается символом \oplus .

$$Y = X1 \oplus X2 = X1 \cdot \overline{X2} + \overline{X1} \cdot X2$$

Таблица истинности, один из способов реализации этой функции на элементах И-НЕ, а также УГО приведены на рисунке 3.32.

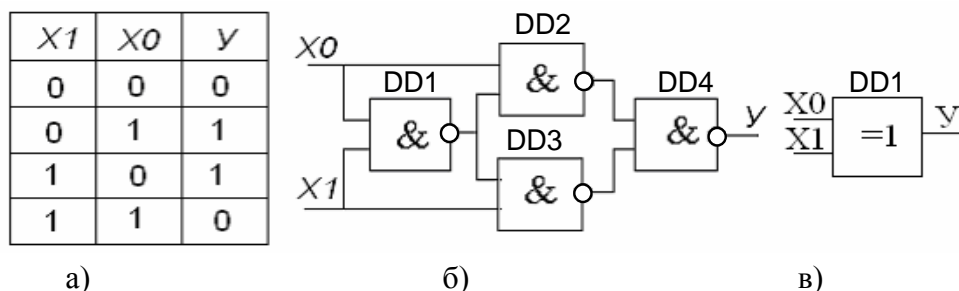


Рис. 3.32. К работе элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ:
а) таблица истинности; б) структурная схема; в) УГО

3.3.5 Сумматоры

Способы выполнения арифметических операций сложения и вычитания с помощью КС будем рассматривать только для целых двоичных чисел, что значительно облегчает изложение методики их синтеза. Целые положительные n -разрядные двоичные числа будем обозначать через X_n и Y_n , вход переноса P_n .

Операция сложения положительных двоичных чисел определяется правилами двоичной арифметики. Принцип работы одноразрядного двоичного сумматора приведен в таблице 3.7.

Таблица 3.7- Принцип работы одноразрядного двоичного сумматора

X	Y	P	S	P	X	Y	P	S	P
n	n	n	n	$n+1$	n	n	n	n	$n+1$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1

Значение суммы S равно 1, если нечетное число величин X_n , Y_n и P_n равно 1. Значение выхода переноса P_{n+1} в $(n+1)$ -й разряд равно 1, если две или три величины из X_n , Y_n и P_n равны 1.

Понятно, что значение переноса в первый разряд всегда равно 0. В общем случае необходимо производить сложение и вычитание как положительных, так и отрицательных чисел. Это основывается на правилах двоичной арифметики.

3.3.6 Цифровые компараторы

Это устройство выдает результат сравнения n -разрядных двоичных или двоично-десятичных чисел. Цифровой компаратор можно построить на основе сумматора, подавая на один суммирующий вход прямой код числа **A**, на другой – инверсный код числа **B** (рисунок 6.7, б). На численном примере легко убедиться, что при **A=B** в четырех младших разрядах сумматора формируются логические единицы, а при **A>B** единица формируется на выходе переноса [4].

Компаратор, определяющий равнозначность кодов **A** и **B**, можно выполнить по схеме, приведенной на рисунке 3.33. При совпадении кодов во всех разрядах формируются логические нули на выходах элементов ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и логический элемент ИЛИ-НЕ формирует на выходе логическую 1. Другой вариант использует логический элемент И.

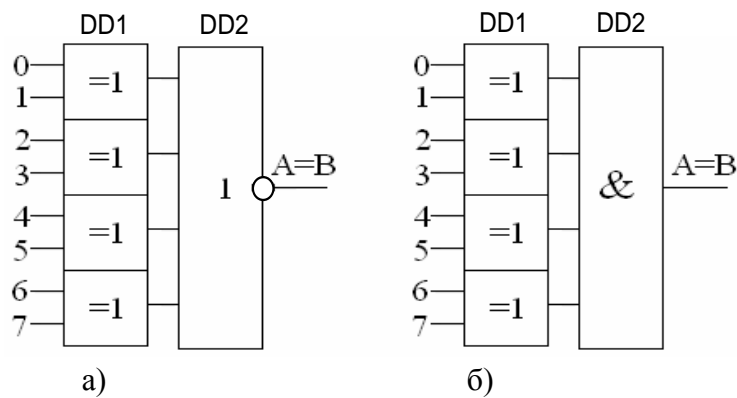


Рис. 3.33. Схемы равнозначности кодов:
а) с использованием схемы ИЛИ-НЕ; б) с использованием схемы И

Схемы определения четности и нечетности

Контроль четности и нечетности используется для обнаружения однократных ошибок при приеме информации по каналам связи. На передающей стороне к n -разрядному слову добавляется разряд с таким значением, чтобы сумма единиц была бы четной. На приемной стороне производится контроль на четность. Если число единиц в принятом слове нечетно, фиксируется ошибка в принятом сообщении.

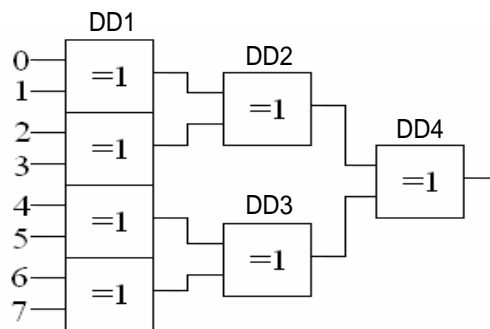


Рис. 3.34. Схема определения четности восьмиразрядного кода

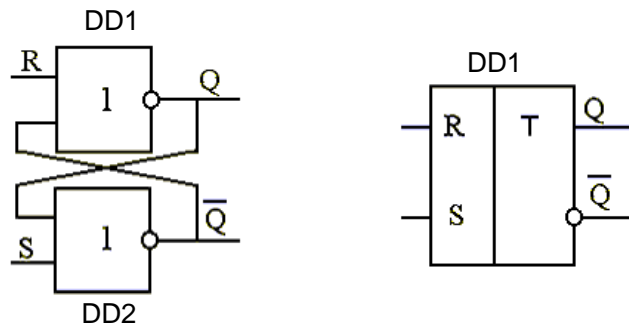
Для контроля восьмиразрядного слова используется схема, приведенная на рисунке 3.34. Если в принятом слове число единиц четно, то на выходе последней логической схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ формируется логический 0. В противном случае формируется 1 и запрещается прием сообщения.

3.3.7 Триггеры

RS-триггер

RS-триггер с отдельной установкой состояний логического нуля и единицы [4]. Он имеет два информационных входа R и S и два выхода Q и \bar{Q} , соответственно прямой и инверсный. По входу S триггер устанавливается в состояние $Q = 1$, ($\bar{Q} = 0$), а по входу R – в состояние $Q = 0$, ($\bar{Q} = 1$).

Условное графическое обозначение приведено на рисунке 3.35, б.



а) б)

Рис. 3.35. RS-триггер на элементах ИЛИ-НЕ
а) структурная схема б) УГО

Таблица 3.8 - Таблица истинности RS – триггера

Входы		Состояние на выходах	
S	R	Q	\bar{Q}
0	0	Режим хранения	
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	Запрещенная комбинация	

Синхронный RS –триггер

Синхронный RS –триггер (рисунок 3.36) может изменять свое состояние только с приходом тактового импульса на вход C .

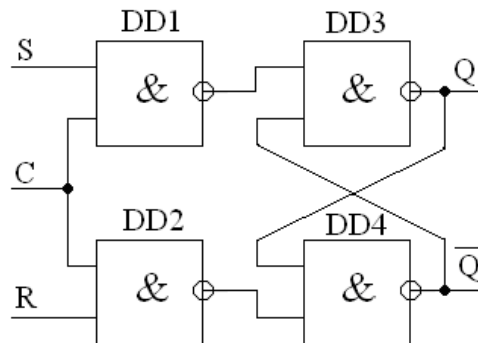


Рис. 3.36. Синхронный RS- триггер

При совпадении логических единиц на входах S и C на выходе $DD1$ логический 0, который переводит триггер в единичное состояние $Q=1$. При совпадении единичных уровней на входах R и C триггер сбрасывается в нулевое состояние [4].

D-триггер

D-триггером называется триггер с одним информационным входом, работающим так, что сигнал на выходе после переключения равен сигналу на входе D до переключения, т.е. $Q^{n+1} = D^n$. Основное назначение D-триггеров – задержка поданного на вход D , т.е. входной сигнал синхронизирован с тактовыми импульсами. Он имеет информационный вход D (вход данных) и вход тактовых импульсов или вход синхронизации C [4].

Структурная схема D – триггера имеет вид в соответствии с рисунком 3.37, а.

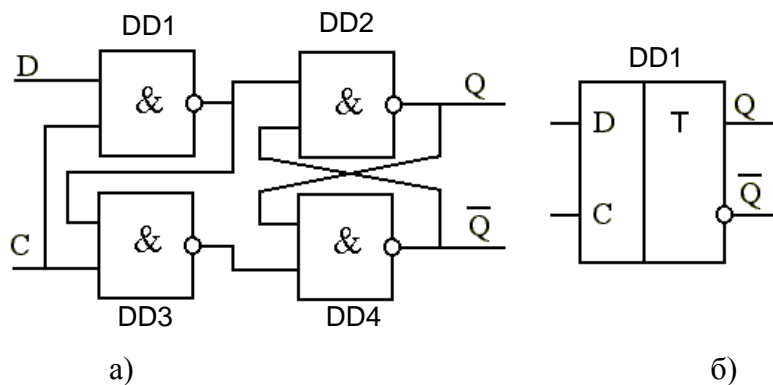


Рис. 3.37. D-триггер

а) структурная схема

б) УГО

JK – триггер

JK-триггеры подразделяются на универсальные и комбинированные.

Универсальность JK-триггера состоит в том, что он может выполнять функции Т- и D-триггеров.

Комбинированный JK-триггер (рис. 3.38, а) отличается от универсального наличием дополнительных асинхронных входов S и R для предварительной установки триггера в определенное состояние (логические 1 или 0). Принцип работы JK-триггера поясняется диаграммами в соответствии с рисунком 6.12, б.

Сигнал на входах \bar{R} и \bar{S} производят установку 0 или 1 на выходе Q независимо от прихода тактовых импульсов. Тактовый импульс C осуществляет установку 0 или 1 по входам J и K (тактовые импульсы 4 и 5). Если на оба входа J и K установить высокий потенциал (логическую 1), то триггер работает как Т-триггер в режиме деления на 2 (тактовые импульсы 7-13).

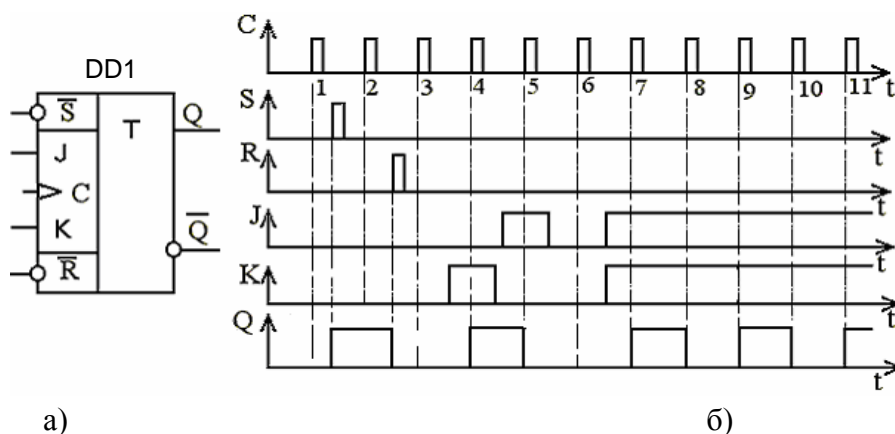


Рис. 3.38. JK-триггер

а) условное обозначение

б) к пояснению принципа работы JK – триггера

3.3.8 Счетчики

Цифровым счетчиком импульсов называют последовательное цифровое устройство, которое осуществляет счет поступающих на его вход импульсов. Результат счета формируется счетчиком в заданном коде и может храниться требуемое время [4].

Основным параметром счетчика является модуль счета K_C – максимальное число импульсов, которое может быть сосчитано счетчиком. После поступления K_C импульсов счетчик должен возвратиться в исходное состояние. Значение K_C равно числу устойчивых состояний счетчика. Счетчик, содержащий m разрядов (триггеров), может иметь 2^m

устойчивых состояний, поэтому его модуль счета $K_C \leq 2^m$. (Количество поступивших на счетный вход импульсов представляется на выходе счетчика в виде двоичного числа). Обычно счетчики имеют дополнительные входы установки S , позволяющие предварительно установить на выходе счетчика заданное число, или входы сброса R , сигнал на которых переводит счетчик в исходное состояние.

Частота импульсов на выходе последнего разряда счетчика в K_C раз меньше частоты импульсов, поступивших на вход. Поэтому счетчики используются в качестве делителей частоты, обеспечивающих на выходе в K_C раз меньшую частоту сигнала, чем на входе.

Счетчики можно классифицировать по нескольким признакам. В зависимости от направления счета различаются суммирующие (с прямым счетом), вычитающие (с обратным счетом) и реверсивные (с прямым и обратным счетом). По способу организации схемы переноса различаются счетчики с последовательным, параллельным и параллельно-последовательным переносом. В зависимости от наличия синхронизации различаются синхронные и асинхронные счетчики.

Счетчики строят на Т-триггерах с применением при необходимости логических элементов в цепях межразрядных и обратных логических связей. Так же можно применять D-триггеры и JK-триггеры двухступенчатой структуры или с динамическим управлением.

Суммирующие счетчики

Рассмотрим пример реализации трехразрядного суммирующего счетчика на динамических D-триггерах с последовательным переносом в соответствии с рисунком 3.39.

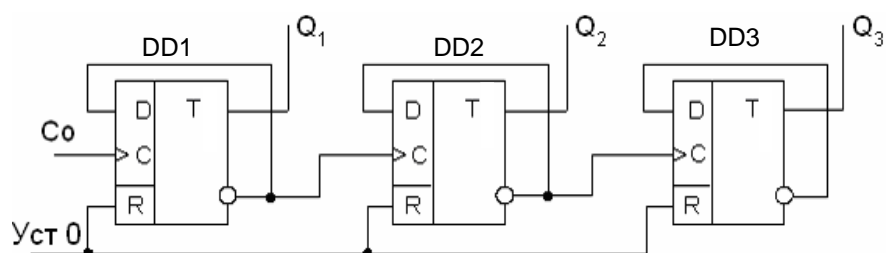


Рис. 3.39. Суммирующий счетчик

Порядок смены состояний счетчика задан таблицей 3.9, а осциллограммы, поясняющие принцип работы, имеют вид в соответствии с рисунком 3.39.

В качестве исходного принято состояние, которое определяется нулевым уровнем на выходах всех триггеров, т.е. $Q_1=Q_2=Q_3=0$. С приходом очередного счетного импульса к содержимому счетчика прибавляется единица. При этом увеличивается на единицу номер состояния.

Таблица 3.9 - Таблица состояний суммирующего счетчика

Номер состояния	Q_3	Q_2	Q_1
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
0	0	0	0

Изменение состояния каждого последующего разряда происходит при изменении состояния предыдущего разряда от 1 к 0. Это означает, что всякий раз, когда данный триггер в счетчике переходит из состояния 1 в состояние 0, на его выходе должен

формироваться сигнал переноса, изменяющий состояние следующего триггера. Если же данный триггер переходит из 0 в 1, то сигнала переноса на его выходе не должно быть.

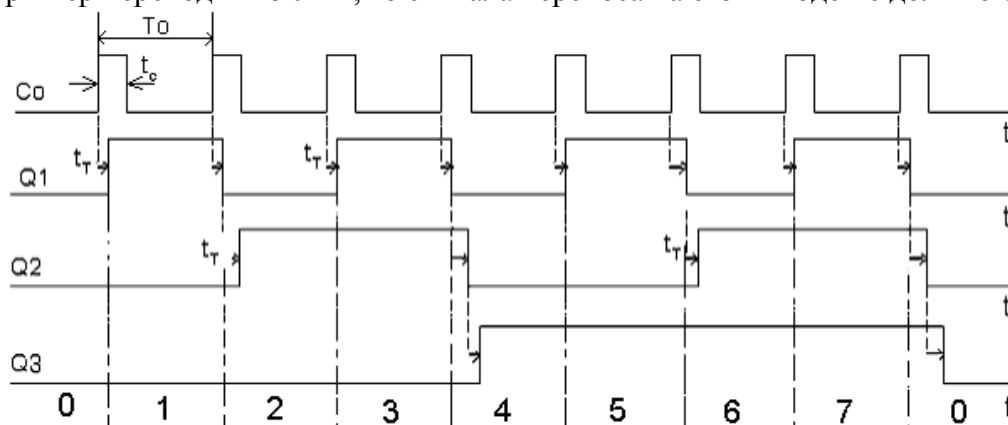


Рис. 3.40. К пояснению принципа работы суммирующего счетчика

Из таблицы 3.40 и осциллограмм следует, что триггер первого, самого младшего разряда должен менять свое состояние каждый раз с приходом очередного счетного импульса, а триггер каждого последующего разряда вдвое реже триггера предыдущего разряда.

Счетные импульсы должны быть поданы на вход триггера самого младшего разряда. Счетчики, построенные таким образом, получили название счетчиков с последовательным переносом.

Для установки исходного состояния счетчика служит шина «Уст 0», которой объединены R-входы всех триггеров. Нулевое состояние триггеров устанавливается подаваемым по этой шине положительного импульса соответствующего логической 1.

Вычитающие счетчики

Вычитающий счетчик с последовательным переносом имеет обратный порядок смены состояний: с приходом очередного счетного импульса, содержащееся в счетчике число уменьшается на единицу. Порядок смены состояний такого счетчика задан таблицей 3.10.

Таблица 3.10 - Таблица состояний вычитающего счетчика

Номер состояния	Q_3	Q_2	Q_1
7	1	1	1
6	1	1	0
5	1	0	1
4	1	0	0
3	0	1	1
2	0	1	0
1	0	0	1
0	0	0	0
7	1	1	1

Особенностью вычитающего счетчика, отличающая его от суммирующего, является то, что триггер каждого последующего разряда изменяет свое состояние при изменении уровня на выходе триггера предыдущего разряда от 0 к 1, т.е. при сигнале займа. Строится вычитающий счетчик так же, как суммирующий, но с тем отличием, что со входом каждого последующего триггера соединяется выход Q предыдущего триггера.

3.3.9 Регистры

Регистром называется устройство, состоящее из нескольких триггеров и предназначенное для выполнения операций приема, хранения и передачи информации. Наиболее распространены статические регистры. Каждому разряду слова, записанного в такой регистр, соответствует свой разряд регистра, выполненный на основе статического триггера. Разряды регистра нумеруются в порядке нумерации разрядов в слове. Из регистров слова обычно поступают на комбинационные логические схемы, где над ними производят логические операции. Результат операции, представляемый одним или несколькими словами, заносится в регистры результата [4].

Регистры делятся на параллельные, последовательные и параллельно-последовательные. Параллельный статический регистр представляет собой совокупность D-триггеров в соответствии с рисунком 3.41, имеющих общие сигналы управления и синхронизации и индивидуальные информационные входы для приема разрядов записываемого в регистр слова.

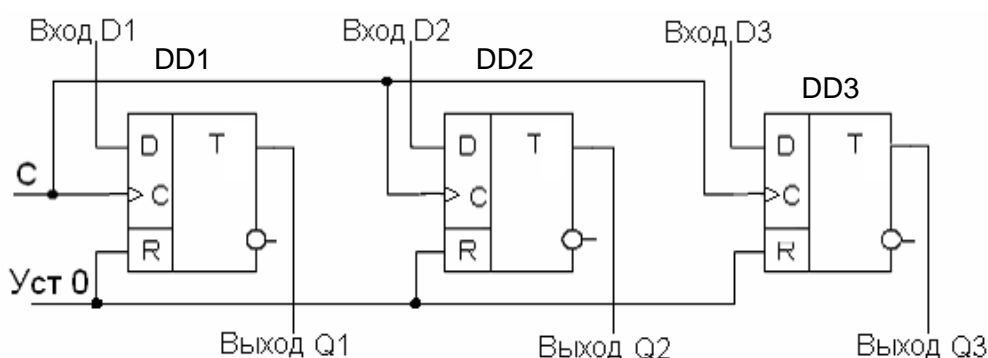


Рис. 3.41. Структурная схема параллельного регистра

Каждый разряд регистра в общем случае может иметь несколько информационных входов соответственно числу источников информации, подключаемых к входу регистра. Процессы записи и считывания информации в параллельных регистрах обычно разделены во времени, что позволяет использовать в разрядах регистра примитивные триггерные схемы.

Параллельные регистры могут строиться как по асинхронному, так и по синхронному принципу. В последнем случае тактирующие импульсы стробируют управляющие сигналы. Это позволяет повысить помехоустойчивость устройства, устраняя влияние ложных импульсов, возникающих в процессе формирования управляющих сигналов. Параллельные регистры предназначены для записи и хранения чисел в двоичном параллельном коде.