

Б.Ф.Лаврентьев

АНАЛОГОВАЯ И ЦИФРОВАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Йошкар-Ола
2000

Министерство образования Российской Федерации
Марийский государственный технический университет

Б.Ф. Лаврентьев

АНАЛОГОВАЯ И ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Йошкар-Ола
2000

УДК 681.34
ББК 32.973.3
Л 13

Рецензенты:

Кафедра КиП ЭВА Казанского государственного технического университета
(заведующий кафедрой д-р техн. наук, проф. **О.Ш. Даутов**);

заведующий кафедрой электроснабжения Марийского государственного
университета, канд. техн. наук, проф. **Л.М. Рыбаков**.

Печатается по решению

редакционно-издательского совета МарГТУ

Лаврентьев Б.Ф.

Аналоговая и цифровая электроника: Учебное пособие. — Йошкар-
Ола: МарГТУ, 2000. — 155 с.

ISBN 5-8158-0097-X

Рассматривается элементная база электроники : электровакуумные приборы, полупроводниковые приборы. Излагаются принципы построения аналоговых и импульсных электронных устройств . Особое внимание уделено операционным усилителям и устройствам на базе операционных усилителей. Рассмотрены также основные устройства цифровой электроники, запоминающие устройства, преобразователи информации.

Для студентов специальностей 200800, 220500 и направления 654300.

УДК 681.34
ББК 32.973.3

ISBN 5-8158-0097-X

© Лаврентьев Б.Ф., 2000
© Марийский государственный
технический университет, 2000

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в развитии многих областей науки и техники обусловлен развитием электроники. В настоящее время невозможно найти какую-либо отрасль промышленности, в которой не использовались бы электронные приборы или электронные устройства измерительной техники, автоматики и вычислительной техники. Причем тенденция развития такова, что доля электронных информационных устройств и устройств автоматики непрерывно увеличивается. Это является результатом развития интегральной технологии, внедрение которой позволило наладить массовый выпуск дешевых, высококачественных микроэлектронных функциональных узлов различного назначения.

В настоящее время промышленность выпускает все электронные функциональные узлы, необходимые для создания устройств измерительной и вычислительной техники: интегральные усилители, коммутаторы, логические элементы, цифровые устройства и т.д. Типовые электронные узлы позволяют собрать нужный электронный блок без детального расчета отдельных каскадов. Необходимо только подобрать интегральные микросхемы, разработать схему их соединения и ввести обратные связи требуемого вида.

В целом электроника включает в себя два направления: энергетическое (силовое), связанное с преобразованием переменного и постоянного токов для нужд электроэнергетики, металлургии, электротяги и т.д., и информационное, к которому относятся электронные средства, обеспечивающие измерения, контроль и управление различными процессами во многих инженерных и неинженерных областях.

Настоящее пособие "Аналоговая и цифровая электроника" посвящено, в основном, информационной электронике и написано в соответствии с программой курса "Аналоговая и цифровая электроника" для студентов, обучающихся по специальностям 220500 "Конструирование и технология ЭВС" и 200800 "Проектирование и технология радиоэлектронных средств".

Учебное пособие состоит из четырех разделов. В первом разделе рассмотрена элементная база электронных устройств, второй посвящен вопросам построения аналоговых и импульсных электронных устройств, третий цифровой электронике и четвертый раздел содержит информацию по электронным устройствам хранения и преобразования информации.

В данном учебном пособии изложены в сжатой и доступной форме основные разделы программы курса, рассмотрены принципы функционирования, выбора и практической реализации электронных устройств различного назначения, методы их анализа и расчета. Особое внимание уделяется вопросам практического построения аналоговых и цифровых электронных устройств.

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Электроника охватывает обширный раздел науки и техники, связанный с изучением и использованием различных физических явлений, а также разработкой и применением устройств, основанных на протекании электрического тока в вакууме, газе и твердом теле при воздействии электрических или магнитных полей.

В зависимости от применяемой элементной базы можно выделить четыре основных поколения развития электроники:

Первое поколение (1904 -1950гг.) характеризуется тем, что основу элементной базы электронных устройств составляли электровакуумные и газоразрядные приборы. К ним относятся электронные лампы, электронно-вакуумные трубки, газоразрядные индикаторы и др.

Второе поколение (1950 - начало 60-х гг.) характеризуется применением дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров и т.д.)

Третье поколение (1960-1980гг.) связано с бурным развитием микроэлектроники и с созданием интегральных схем различной степени интеграции, а также микросборок. На этом этапе электронные устройства характеризуются резким увеличением надежности, уменьшением габаритов, массы, энергопотребления.

Четвертое поколение (с 1980 гг. по настоящее время) характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств с использованием больших и сверхбольших интегральных схем.

Электронные устройства (ЭУ) по способу формирования и передачи сигналов управления подразделяются на два класса: аналоговые и дискретные.

Аналоговые электронные устройства предназначены для приема, преобразования и передачи сигналов, которые изменяются по закону непрерывной (аналоговой) функции. Аналоговые ЭУ отличаются простотой, быстродействием, однако имеют низкую помехоустойчивость и нестабильность параметров при воздействии внешних дестабилизирующих факторов, например температуры, влажности, времени и т.д.

Дискретные электронные устройства предназначены для приема, преобразования и передачи электрических сигналов, представленных в дискретной форме. Такие устройства отличаются высокой помехоустойчивостью, небольшой потребляемой мощностью и стоимостью.

В свою очередь дискретные электронные устройства подразделяются на *импульсные и цифровые*.

Импульсные электронные устройства формируют импульсную последовательность сигналов. Процесс преобразования аналоговой информации в последовательность импульсов носит название импульсной модуляции. На практике широко используется амплитудная, широтно-импульсная и фазоимпульсная модуляция.

В цифровых электронных устройствах происходит кодирование сигнала, т.е. преобразование его в определенную последовательность однотипных импульсов.

Цифровые электронные устройства в настоящее время получили очень широкое распространение благодаря высокой надежности, высокой помехоустойчивости, возможности длительного хранения информации без ее потери; энергетической совместимости и интегральной технологичности элементной базы.

В ряде электронных устройств имеет место аналоговая и цифровая информация. Такие устройства относятся к комбинированным электронным устройствам.

К аналоговым электронным устройствам относятся:
электронные усилители, операционные усилители, коммутаторы, компараторы, стабилизаторы напряжения и т.д.

К импульсным электронным устройствам относятся:
мультивибраторы, одновибраторы, триггеры, блокинг-генераторы, функциональные преобразователи, генераторы пилообразного напряжения, таймеры и т.д.

К цифровым электронным устройствам относятся:
логические элементы, триггеры, регистры, счетчики, дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры и т.д.

К комбинированным электронным устройствам относятся:
аналого-цифровые преобразователи и цифро-аналоговые преобразователи.

Все выше перечисленные электронные устройства рассмотрены в последующих главах настоящего учебного пособия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные этапы развития электроники.
2. В чем принципиальное отличие третьего поколения элементной базы электроники от второго поколения?
3. Классификация электронных устройств.
4. Назначение аналоговых электронных устройств.

5. Какие ЭУ относятся к аналоговым?
6. Какие ЭУ относятся к импульсным?
7. Какие ЭУ относятся к цифровым?

2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

2.1. Электровакуумные приборы

К электровакуумным приборам относятся электронные лампы, электронно-лучевые трубки, электровакуумные фотоэлектронные приборы, вакуумные люминесцентные индикаторы и др.

Принцип действия электровакуумных приборов основан на создании электронного потока и управлении этим потоком свободных электронов с помощью электрических или электромагнитных полей. Для получения потока свободных электронов используется специальный металлический или полупроводниковый электрод, называемый катодом. Процесс выхода электронов из катода называется электронной эмиссией. Как известно, выходу электронов из катода препятствуют силы двойного электрического слоя у его поверхности. Для преодоления тормозящего действия двойного электрического слоя электронам необходимо сообщить дополнительную энергию. В зависимости от способа сообщения электронам дополнительной энергии различают следующие виды электронной эмиссии:

- термоэлектронную*, при которой дополнительная энергия сообщается электронам при нагреве катода;
- вторичную электронную*, которая возникает при бомбардировке катода потоком электронов или ионов, двигающихся с большой скоростью;
- фотоэлектронную*, при которой на поверхность катода воздействует электромагнитное излучение;
- электростатическую*, при которой выход электронов из катода обеспечивается сильным электрическим полем у его поверхности.

В современных электронных приборах широкое распространение получили катоды с термоэлектронной эмиссией прямого и косвенного накала.

В катодах прямого накала ток проходит непосредственно по катоду, нагревая его. Обычно они изготавливаются из вольфрамовой проволоки и нагреваются до температуры более 2000°С. Для увеличения количества электронов, выходящих из катода, последний покрывается активным слоем, например, торием. Катоды прямого накала отличаются большим уровнем шумов,

что приводит к нарушению нормального режима работы электровакуумных приборов. Поэтому чаще используются катоды косвенного накала, которые представляют собой полый цилиндр, внутри которого размещается спираль нагревателя, изолированная от катода. Наружная поверхность цилиндра покрыта активным слоем.

Электронные лампы. В зависимости от количества электродов различают лампы двухэлектродные — диоды, трехэлектродные — триоды, четырехэлектродные — тетроды, пятиэлектродные — пентоды и др. В ряде случаев в одном корпусе размещаются две лампы, например, триод и пентод.

Электровакуумный диод представляет собой стеклянный или металлический баллон, в котором создан высокий вакуум. Внутри баллона

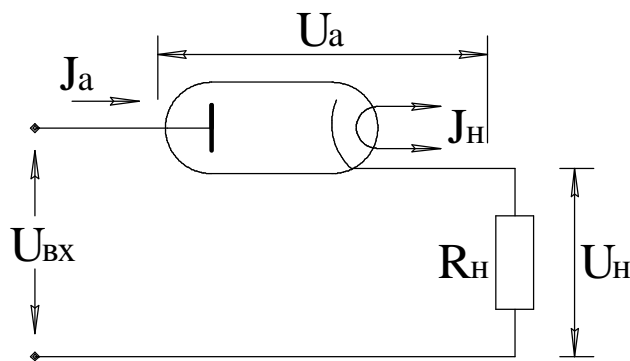


Рис 1. Включение диода в электрическую цепь

располагаются два электрода: анод и катод. При нагревании катода энергия электронов возрастает и часть из них вылетает с поверхности катода. Если к аноду приложить положительный потенциал, то между анодом и катодом возникает ускоряющее поле и протекает электрический ток. Если изменить полярность приложенного напряжения, то возникает тормозящее электрическое поле и протекание тока J_a через диод прекращается (рис.1).

Таким образом диоды обладают односторонней проводимостью.

Основными статическими параметрами любого диода являются :

- *крутизна анодной характеристики S_i ,*
$$S_i = \frac{dJ_a}{dU_a} \approx \frac{\Delta J_a}{\Delta U_a};$$
- *дифференциальное сопротивление R_i ,*
$$R_i = \frac{dU_a}{dJ_a} \approx \frac{\Delta U_a}{\Delta J_a};$$
- *сопротивление при постоянном токе R_o ,*
$$R_o = \frac{U_{a0}}{J_{a0}};$$

где $\Delta U_a, \Delta J_a$ – конечные приращения напряжения и тока вблизи рабочей точки.

Указанные параметры определяются по вольт-амперной характеристике диода (ВАХ) (рис. 3).

Если во внешнюю цепь диода включить резистор R_n (рис. 1), то электрические свойства схемы описывается вторым законом Киргофа

$U_{\text{ВХ}} = U_a + J_a R_H$. Это уравнение представляет собой уравнение прямой и называется *линией нагрузки*.

По графику (рис. 2) можно определить ток в цепи J_{a0} для любой нагрузки R_H , а также напряжение U_a и U_H .

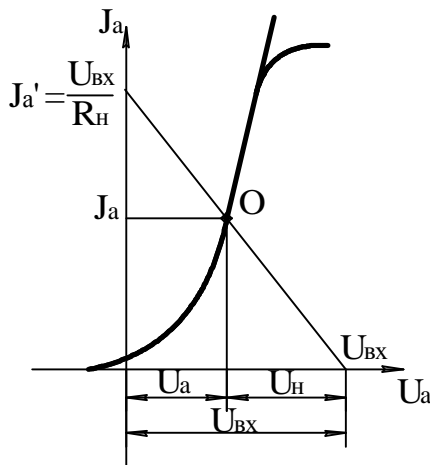


Рис. 2. Вольт- амперная характеристика диода

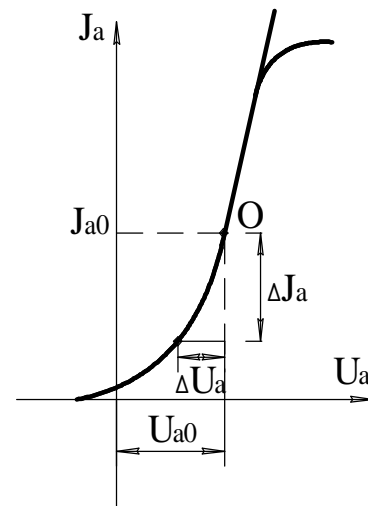


Рис. 3. Определение режима работы диода

Электрoвакуумные диоды используются в схемах выпрямителей переменного тока, детекторах, формирователях, генераторах импульсов специальной формы и т.д.

Электрoвакуумные триоды имеют в своем составе дополнительную управляющую сетку, которая располагается вблизи катода. Изменяя напряжение U_c на управляющей сетке, можно управлять анодным током. Поэтому триод можно использовать в качестве усилительного элемента.

Работа триода в статическом режиме характеризуется семейством анодных $J_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ и анодно-сеточных характеристик $J_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ (рис.4).

Основными параметрами триодов являются :

- крутизна S_i , $S_i = \frac{dJ_a}{dU_c} \approx \frac{\Delta J_a}{\Delta U_c}$, при $U_a = \text{const}$. ;

- внутреннее динамическое сопротивление R_i , $R_i = \frac{dU_a}{dJ_a} \approx \frac{\Delta U_a}{\Delta J_a}$, при $U_c = \text{const.}$;
- статический коэффициент усиления m , $m = \frac{dU_a}{dU_c} \approx \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$, при $J_a = \text{const.}$;

где ΔU_a , ΔJ_a , ΔU_c – конечные приращения тока J_a и напряжений U_a и U_c вблизи рабочей точки.

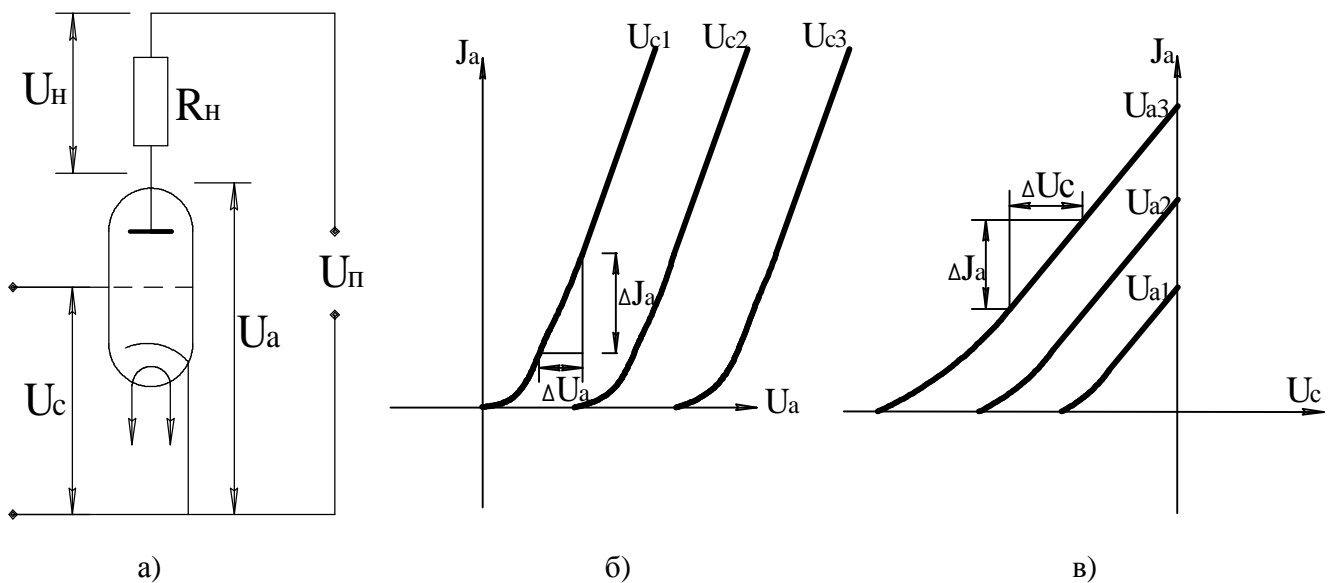


Рис 4. Схема включения триода(а), анодная(б) и анодно-сеточная(в) характеристики триода

Для повышения коэффициента усиления, уменьшения проходной емкости и расширения функциональных возможностей в состав лампы вводятся дополнительные сетки. Лампа, имеющая две сетки – управляющую и экранирующую, получила название тетрод. Экранирующая сетка располагается между анодом и управляющей сеткой и выполняется в виде густой спирали. На экранную сетку подается положительное напряжение, равное $U_{\text{Э}} \approx 0,4 \div 0,8 U_{\text{п}}$.

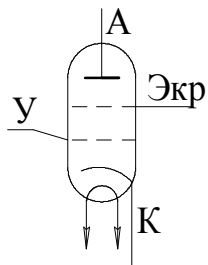


Рис. 5. Тетрод
Экранирующая сетка эффективно ослабляет воздействие анодного напряжения на электроны, вылетающие с катода, и при этом значительно повышается коэффициент усиления. Недостатком тетродов является возможность появления вторичной эмиссии с анода на экранную сетку. Для исключения вторичной

эмиссии между анодом и экранной сеткой устанавливают дополнительную сетку (антидинаatronную), на которую подают напряжение $U=0$. Такая лампа получила название пентод. Тетрод и пентод имеют пологие рабочие участки анодной характеристики (рис. 6), поэтому указанные приборы обладают высоким внутренним сопротивлением и большим коэффициентом усиления.

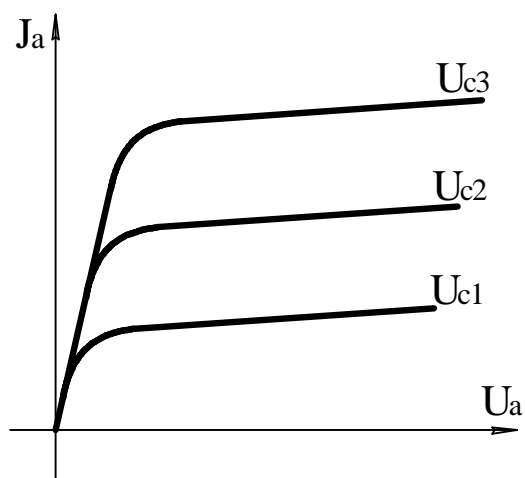


Рис. 6. Анодная характеристика пентода

Маркировка ламп включает несколько цифровых и буквенных элементов. Первый элемент — число, указывающее напряжения накала в вольтах (округленно). Второй элемент — буква, характеризующая тип лампы: “Д”-диод; “Ц”-кенотрон; “Н”-триод; “П”-пентод; “Ж”-пентод; “Ф”- триод-пентод и т.д. Третий элемент — порядковый номер данного типа лампы. Четвертый элемент — буква, характеризующая конструктивное оформление лампы : “С”- в стеклянном баллоне, диаметром более 22,5 мм; “П”- пальчиковые ; “Б”- сверхминиатюрные с диаметром от 6 до 10,5 мм .

Например, 6ПП- пентод пальчиковый с напряжением накала ~6,3в.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРИБОРЫ. К ним относятся электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), приемные телевизионные трубки (кинескопы) и др. В таких приборах формируется тонкий электронный луч, который направляется на экран, покрытый люминофором, с целью получения оптического изображения. В общем случае ЭЛТ состоит из электронной пушки, отклоняющей системы и экрана. Электроны, попадая на люминофор, возбуждают его атомы. Яркость свечения экрана пропорциональна числу электронов и их энергии. Свечение наблюдается со стороны, противоположной электронной бомбардировке, поэтому корпус трубки стеклянный. Электронная пушка обеспечивает фокусировку луча до диаметра менее 0,1 мм. Для управления перемещением электронного луча используются отклоняющие системы, которые также могут быть электростатическими и магнитными. Первые применяются, как правило, в ЭЛТ, а вторые — в кинескопах. Отклоняющие системы характеризуются чувствительностью. Для трубок с электростатическим отклонением чувствительность d_s определяется отклонением смещения h (мм) светящегося пятна на ее экране к отклоняющему напряжению

$$U_{\text{упр}}: d_{\text{э}} = \frac{h}{U_{\text{упр}}}$$

Цвет свечения экрана определяется химическим составом люминофора и может быть зеленым, оранжевым, синим и т.д.

На рис 7 изображена ЭЛТ, в которой используется электростатическая фокусировка и электростатическое отклонение луча.

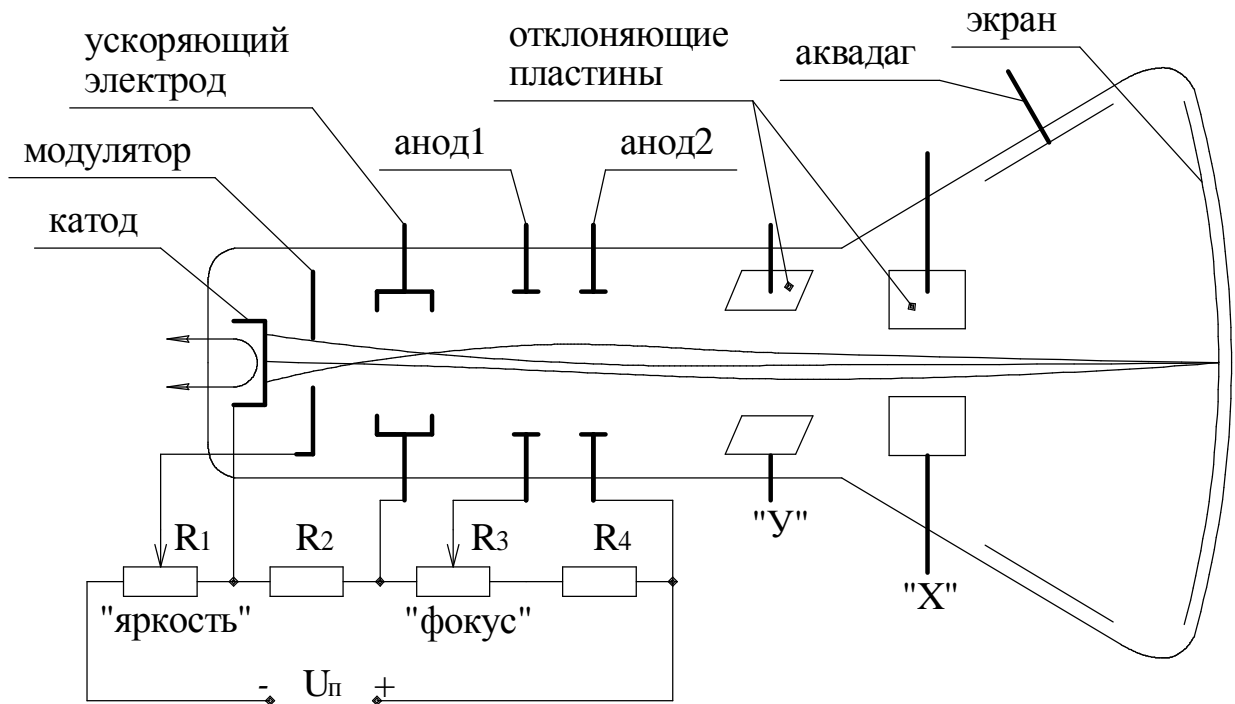


Рис. 7. Электронно-лучевая трубка с электростатическим отклонением

Система электродов ЭЛТ помещена в стеклянный баллон, из которого откачан воздух. В торце баллона расположен катод косвенного накала, предназначенный для формирования электронного потока. Далее идет модулятор, представляющий собой цилиндр с отверстием, из которого вылетают электроны. На модулятор подается напряжение, которое с помощью резистора R1 может изменяться относительно катода. При этом меняется интенсивность электронного потока и изменяется "яркость" свечения изображения на экране. Ускоряющий электрод, первый и второй аноды образуют электронную линзу, под действием которой электронный луч на экране фокусируется в точку. Резистор R3 обеспечивает "фокусировку" луча. Для отклонения луча используются две пары отклоняющих пластин "X" и "Y". Напряжение, подаваемое на эти пластины, создает электрическое поле, которое отклоняет электронный луч. Чувствительность ЭЛТ

составляет 0,1ч0,4 мм/в. Чтобы электроны не скапливались около экрана и не искажали изображение, стенки баллона вблизи экрана покрыты графитовым слоем – аквадагом. Электроны с аквадага стекают на второй анод. Основными достоинствами ЭЛТ с электростатическим управлением являются: простота конструкции, малая мощность, малая инерционность.

Кинескопы, в отличие от рассмотренных выше ЭЛТ, имеют магнитную систему отклонения луча. Она образована двумя парами отклоняющих катушек, расположенных на горловине трубки перпендикулярно друг другу и к оси трубки. Токи, проходящие через катушки, создают магнитные поля, которые и вызывают отклонения луча. В современных телевизионных приемниках используются кинескопы с прямоугольной формой экрана и короткой горловиной. С помощью электромагнитной отклоняющей системы обеспечивается широкий угол отклонения луча (до 114°), что позволяет создать короткие трубки с большим размером экрана. Благодаря магнитной отклоняющей системе в кинескопе обеспечивается хорошая фокусировка и достаточная яркость, однако они имеют значительную инерционность, что не позволяет использовать их для наблюдения быстропротекающих процессов.

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ. В газоразрядных приборах используются явления, происходящие в газе или парах ртути при прохождении через них электрического тока. Газоразрядные приборы отличаются от электровакуумных тем, что в их работе используются как электроны, так и ионы газа. В настоящее время газоразрядные приборы применяются в основном в качестве индикаторных элементов (подробно в разд. 2.7).

2.2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называется прибор с двумя выводами и одним р-п переходом. Принцип работы полупроводникового диода основан на использовании односторонней проводимости, электрического пробоя и других свойств р-п перехода. Диоды различают по назначению, материалу, конструктивному исполнению, мощности и другим признакам.

В зависимости от технологии изготовления различают точечные диоды, сплавные, микросплавные, эпитаксиальные и другие.

По функциональному назначению диоды делятся на выпрямительные, универсальные, импульсные, смесительные, СВЧ, стабилитроны, стабисторы, варикапы, динисторы, тиристоры, симисторы, фотодиоды, светодиоды и т.д.

По конструктивному исполнению диоды бывают плоскостные и точечные.

По используемому материалу - кремниевые, германиевые, арсенид-галлиевые.

Диоды обладают односторонней проводимостью и служат: для *выпрямления переменного тока, стабилизации тока и напряжения, формирования импульсов, для регулирования мощностей и т.д.*

Выпрямительные диоды применяются для преобразования переменного тока в постоянный. Они делятся на: маломощные (до 0,3А), средней мощности (до 10А), мощные (более 1000А), низкочастотные (до 1кГц) и высокочастотные (до 100кГц).

Свойства выпрямительных диодов характеризуются вольт - амперной характеристикой и параметрами, которые приводятся в справочной литературе.

Основные параметры диодов(рис. 8.):

- *средний выпрямленный ток J_{cp}* ,
- *прямое падение напряжения $U_{пр}$* ,
- *обратный ток диода при заданной температуре $J_{обр}$* ,
- *напряжение отсечки $U_{отс}$* ,
- *мощность рассеивания $P_{рас.}$* ,
- *рабочая частота f_p* и др.

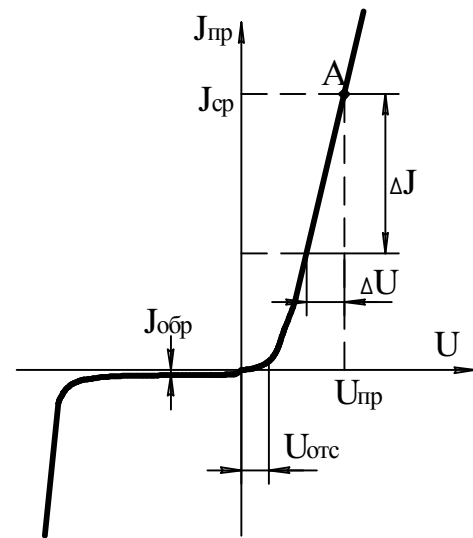


Рис.8 Вольт – амперная характеристика выпрямительного диода

В ряде случаев для увеличения тока используется параллельное включение диодов. Для выравнивания токов через диоды последовательно с диодами включаются резисторы.

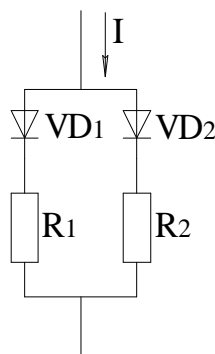


Рис.9 Параллельное включение диодов.

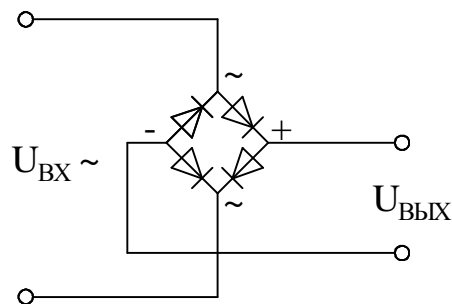


Рис.10 Диодный мост

Наряду с выпрямительными диодами для выпрямления переменного тока используются мосты (рис.10) и диодные столбики. Выпрямительные мосты состоят из четырех диодов, размещенных в корпусе и залитые эпоксидной смолой.

Диодные столбики представляют собой набор из последовательно соединенных диодов и предназначены для выпрямления высоковольтных напряжений.

Высокочастотные диоды предназначены для преобразования и обработки высокочастотных сигналов (до десятков гигагерц). Обычно это точечные диоды с минимальными паразитными параметрами.

Импульсные диоды нашли применение в пленочных схемах, например в формирователях импульсных сигналов, в схемах автоматического регулирования, в вычислительных устройствах. Импульсные диоды обладают высоким быстродействием и минимальным временем восстановления.

Стабилитроны — это разновидность диодов, предназначенных для стабилизации напряжения. Вольт – амперная характеристика стабилитрона имеет вид (рис.11). Рабочий участок характеристики АВ лежит в области электрического пробоя диода и характеризуется малым изменением напряжения $U_{ст}$ при значительных изменениях тока.

Стабилитроны могут быть одноанодные, двуханодные, универсальные, прецизионные. Двуханодные стабилитроны обеспечивают стабилизацию двух полярных напряжений. Обычно они представляют собой два одноанодных стабилитрона, включенных последовательно навстречу друг другу.

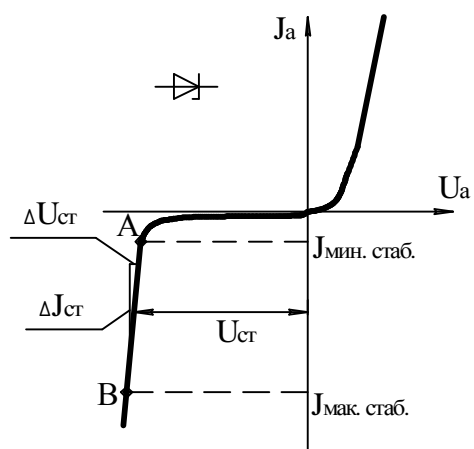


Рис.11 Вольт – амперная характеристика одноанодного стабилитрона.

Основными параметрами стабилитрона являются:

- *напряжение стабилизации $U_{ст}$,*
- *минимальный ток стабилизации $J_{мин. стаб.}$,*
- *максимальный ток стабилизации $J_{мак. стаб.}$,*
- *дифференциальное сопротивление $r_{диф} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$,*
- *допустимая мощность рассеивания,*
- *температурный коэффициент напряжения стабилизации.*

Все стабилитроны подразделяются на маломощные, средней мощности и мощные. Условные обозначения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Мощность	Напряжение стабилизации (в)	Обозначение	Напряжение стабилизации (в)
Малая	0,5÷9,9	КС 133А	3,5
	10÷99	КС 213А	13
	100÷199	КС 333А	133
Средняя	0,5÷9,9	КС 456А	5,6
	10÷99	КС 515А	15
	100÷199	КС 620А	120
Большая	0,5÷9,9	КС 756А	5,6
	10÷99	КС 815А	15
	100÷199	КС 620А	120

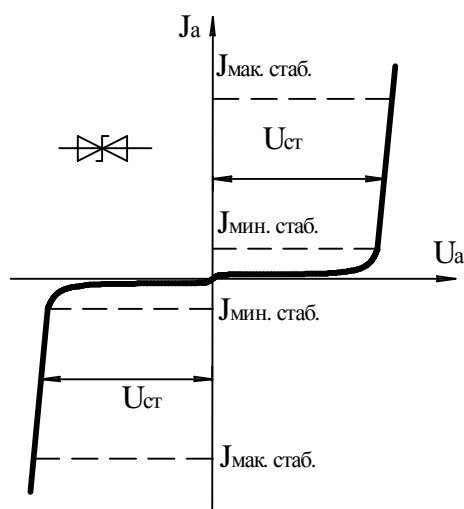


Рис.12 Вольт – амперная характеристика двуханодного стабилитрона.

Стабисторы, как и стабилитроны, предназначены для стабилизации напряжения. Однако, в отличие от последних, рабочим участком у них является прямая ветвь вольт–амперной характеристики. Стабисторы работают при прямом напряжении и позволяют стабилизировать малые напряжения (0,35÷1,9)в. Основные параметры и условные обозначения у стабисторов такие же, как и у стабилитронов.

Варикапы – это полупроводниковые диоды, емкость которых меняется при изменении обратного напряжения. На рис.13 приведена вольт – амперная и емкостная характеристика варикапа.

Емкость варикапа увеличивается с уменьшением обратного напряжения. Основными параметрами варикапа являются:

- емкость варикапа при заданном обратном напряжении C_B ,
- коэффициент перекрытия по емкости $K_B = \frac{C_{B.макс}}{C_{B.мин}}$,
- сопротивление потерь $r_{п}$,
- добротность Q_B ,
- температурный коэффициент емкости.

Варикапы применяются в резонансных схемах для изменения резонансной частоты генераторов, усилителей и т.д.

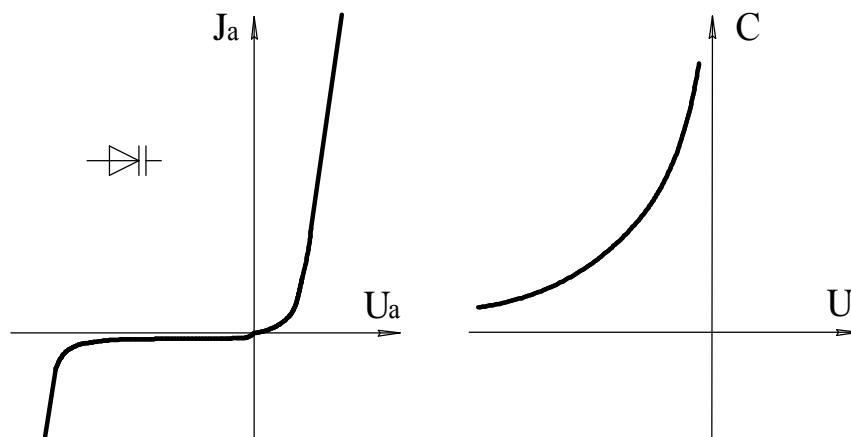


Рис.13 Вольт – амперная (а) и емкостная (б) характеристики варикапа

Динисторы (диодные тиристоры) – представляют собой четырехслойную структуру и имеют три р-п перехода. Вольт – амперная характеристика динистора приведена на рис.14.

При повышении напряжения на аноде U_a динистора ток J_a растет медленно (участок I). При $U_a = U_{вкл.}$ возникает электрический пробой р-п перехода, сопротивление динистора падает (участок II) и ток J_0 определяется, в основном, нагрузочным резистором в цепи анода. Отключение динистора происходит только при уменьшении тока $J_a < J_{удерж.}$. Динисторы применяются в формирователях импульсов, в преобразователях, в системах автоматического регулирования.

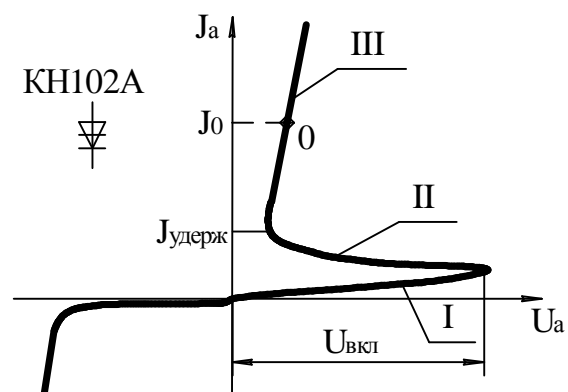


Рис.14 Вольт – амперная характеристика динистора

Тиристоры (тринисторы) представляют собой многослойную структуру, имеющие три вывода: анод, катод и управляющий электрод. ВАХ тиристора приведена на рис.15. На управляющий электрод поступает управляющий ток $J_{упр}$, снижающее напряжение включения $U_{вкл.}$.

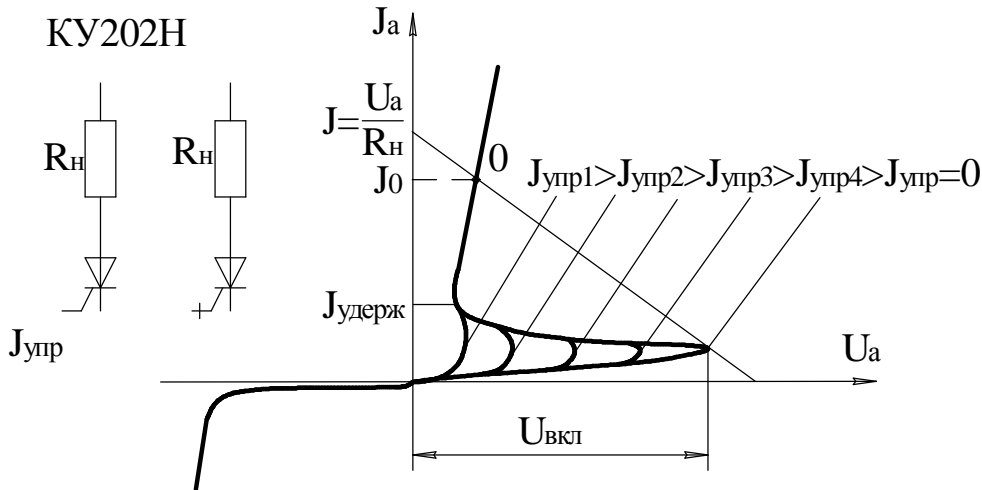


Рис.15 ВАХ тиристора (с), условное обозначение незапираемого (а) и запираемого (в) тиристора

Тиристоры делятся на запираемые и незапираемые. Запираемые тиристоры способны переключаться из открытого состояния в закрытое при подаче на управляющий электрод сигнала отрицательной полярности. Незапираемые тиристоры отключаются только при снижении анодного тока до уровня $J_a < J_{удерж}$.

Таким образом тиристор имеет два устойчивых состояния и используется в формирователях импульсов и в схемах автоматического управления.

Симисторы (симметричные тиристоры) имеют пятислойную структуру, три электрода и симметричную вольт —

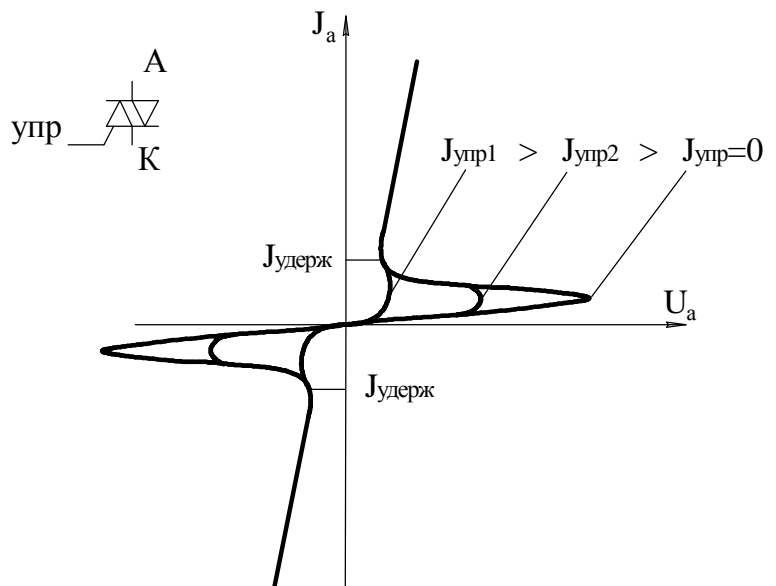


Рис.16 ВАХ симистора (б), условное обозначение симистора (а)

амперную характеристику (рис.16). Открытие симистора управляющими сигналами. Симисторы в отличие от тиристоров имеют возможность проводить

ток в двух направлениях, поэтому на них можно подавать переменное напряжение. Симисторы, как и тиристоры могут применяться в формирователях, коммутаторах, в регуляторах тока и напряжения.

Важнейшими параметрами тиристоров являются: ток удержания $J_{\text{удерж}}$, напряжение в открытом состоянии, ток отпирания $J_{\text{упр}}$, средний ток, импульсный ток, время включения и отключения и т.д.

Излучающие диоды представляют собой полупроводниковые диоды, излучающие из области р-п перехода кванты энергии. Излучение происходит через прозрачную стеклянную пластину, размещенную в корпусе диода. По характеристике излучения диоды делятся на две группы: диоды с излучением в видимой области спектра, получившие название светодиоды и диоды с излучением в инфракрасной области спектра, получившие название ИК -диоды.

Светодиоды применяются в качестве световых индикаторов, а ИК -диоды в качестве источников излучения в оптоэлектронных приборах и в качестве первичных преобразователей информации.

Маркировка полупроводниковых приборов предусматривает шесть символов. *Первый символ* – буква (для приборов общего применения) или цифра (для приборов специального назначения), указывающая исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен диод: Г(1) – германий, К(2) – кремний, А(3) – арсенид галлия.

Второй символ – буква, обозначающая подкласс диода: Д – выпрямительные, высокочастотные и импульсные; В – варикапы, С – стабилитроны и стабисторы; Н – динисторы; У – тиристоры; Л – излучающие диоды и т.д.

Третий символ – цифра, указывающая назначение диода, например: 1, 2, 3 – выпрямительные диоды, 5- импульсные, 6 – СВЧ и т.д.

Четвертый и пятый символы – двухзначное число, указывающее порядковый номер разработки (у стабилитронов – номинальное напряжение стабилизации).

Шестой символ – буква, обозначающая параметрическую группу прибора. Например: КД521А – кремниевый импульсный диод, номер разработки 21, группа А, общего применения.

2.3. Полупроводниковые транзисторы

Все полупроводниковые транзисторы делятся на две группы: биполярные и униполярные (полевые) транзисторы.

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p-n переходами. Биполярные транзисторы различаются по структуре. В зависимости от чередования областей различают биполярные транзисторы типа “p-n-p” и “n-p-n” (рис.17).

Транзисторы также подразделяются по мощности, частоте и другим признакам.

Принцип действия биполярного транзистора основан на использовании физических процессов, происходящих при переносе основных носителей электрических зарядов из эмиттерной области в коллекторную через базу.

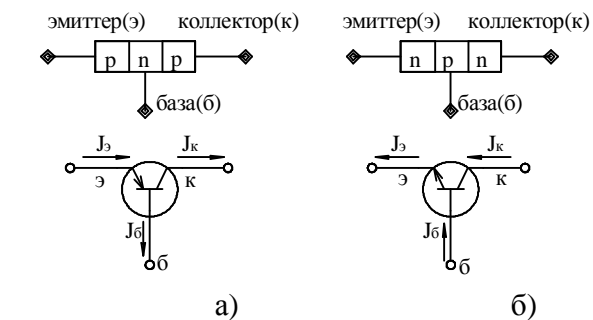


Рис.17 Биполярные транзисторы типа “p-n-p” (а) и “n-p-n” (б)

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}},$$

где $I_{\text{э}}$, $I_{\text{к}}$, $I_{\text{б}}$ – токи соответственно в цепи эмиттера, коллектора, базы.

Важнейшими параметрами, характеризующими качество транзистора, являются дифференциальный коэффициент передачи тока из эмиттера в коллектор - α и дифференциальный коэффициент передачи тока из базы в коллектор - β .

$$a = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}, \text{ при } U_{\text{кэ}} - \text{const. } b = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{a}{1-a} \gg 1$$

Современные транзисторы имеют $a=(0,9\div 0,99)<1$ и $\beta=(4\div 10000)$.

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (рис. 18.) являются:

— коэффициент усиления по току $K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$,

— коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$,

— коэффициент усиления по мощности $K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}}$,

— входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$,

— выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}$.

Обычно транзисторы включаются в электрическую схему таким образом, чтобы один из его электродов был входным, второй выходным, а третий общий

для входа и выхода. В зависимости от этого различают три способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Рассмотрим особенности каждой схемы.

В схеме с ОБ (рис.19) входной сигнал поступает на эмиттер, а выходной снимается с коллектора.

Входным сопротивлением схемы $R_{вх}$ является сопротивление открытого эмиттерного перехода, которое составляет десятки ом. Выходное сопротивление определяется обратным включенным коллекторным переходом. Поэтому $R_{вых} \gg R_{вх}$.

Коэффициент усиления транзистора с ОБ по току соответствует примерно коэффициенту передачи a :

$$K_I \approx \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} \approx a = (0,95 \div 0,99),$$

Коэффициент усиления транзистора по напряжению

$$K_V = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_k R_H}{\Delta I_э R_{вх.б}} = a \frac{R_H}{R_{вх.б}},$$

где $R_{вх.б}$ – входное сопротивление открытого эмиттерного перехода.

Так как $R_H \gg R_{вх.б}$, то $K_V > 1$.

Таким образом схема включения транзистора с ОБ не обеспечивает усиление по току, однако усиливает входной сигнал по напряжению и мощности.

В схеме с ОЭ (рис.20) входной сигнал поступает на входы база – эмиттер, а выходной снимается с коллектора.

Входное сопротивление $R_{вх.э}$ схемы значительно больше, чем в схеме с ОБ.

$$R_{вх.э} = \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э R_{вх.б}}{\Delta I_б} \approx b R_{вх}$$

Коэффициент усиления схемы по току K_I

$$K_I = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} \approx b \gg 1$$

Коэффициент усиления схемы по напряжению K_V

$$K_V = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_k R_H}{\Delta I_б R_{вх.э}} \approx b \frac{R_H}{R_{вх.э}} > 1$$

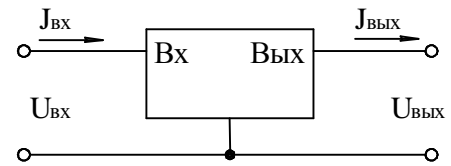


Рис.18 Четырехполюсник

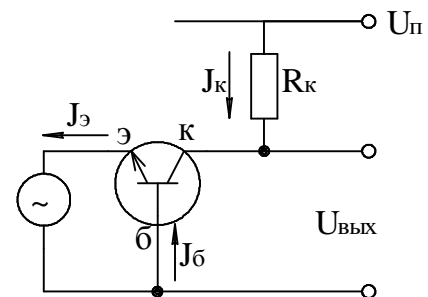


Рис.19 Включение транзистора с ОБ

Коэффициент усиления схемы по мощности равен произведению коэффициентов K_I и K_V

$$K_P = K_I \cdot K_V = b^2 \frac{R_H}{R_{вх.э}} \gg 1$$

Схема с ОЭ обеспечивает усиление входного сигнала по току, напряжению и мощности, используется в усилителях, генераторах, формирователях и является самой распространенной.

В схеме ОК (рис.21) входной сигнал подается на входы база – коллектор, а выходной сигнал снимается с эмиттера.

Входное сопротивление схемы $R_{вх}$ велико и равно $R_{вх} \approx R_H(b+1)$.

Коэффициент усиления схемы с ОК по току

$$K_I = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э - \Delta I_к} = \frac{1}{1-a} \gg 1$$

Коэффициент усиления схемы с ОК по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{U_{ВХ} - U_{б.э}}{U_{ВХ}} < 1$$

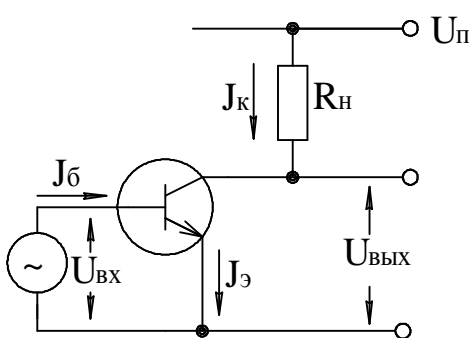


Рис. 20 Включение транзистора ОЭ

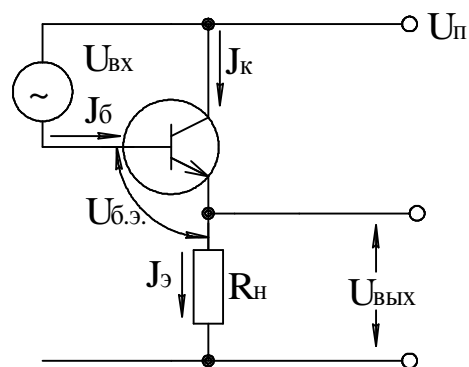


Рис. 21 Включение транзистора ОК

Схему с общим эмиттером часто называют эмиттерным повторителем, т.к. нагрузка включена в цепь эмиттера. Схема обеспечивает усиление по току, мощности, имеет коэффициент усиления по напряжению меньше единицы ($K_V \approx 0,9$ ч $0,99$), отличается большим входным сопротивлением и малым выходным $R_{вх} \gg R_{вых}$ и широко используется в качестве согласующего каскада.

Статические характеристики транзисторов.

Статические характеристики транзисторов представляют собой графические зависимости между токами, протекающими в цепях транзистора, и напряжениями

на его входах и выходах. Эти характеристики приводятся в справочной литературе и используются при анализе и расчете электронных схем. Различают входные и выходные статические характеристики транзисторов.

Входные характеристики показывают зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном напряжении на коллекторе. Выходные характеристики показывают зависимость выходного тока от напряжения на коллекторе при постоянном входном токе или напряжении. На рис. 22 приведены статические характеристики для схемы с ОЭ.

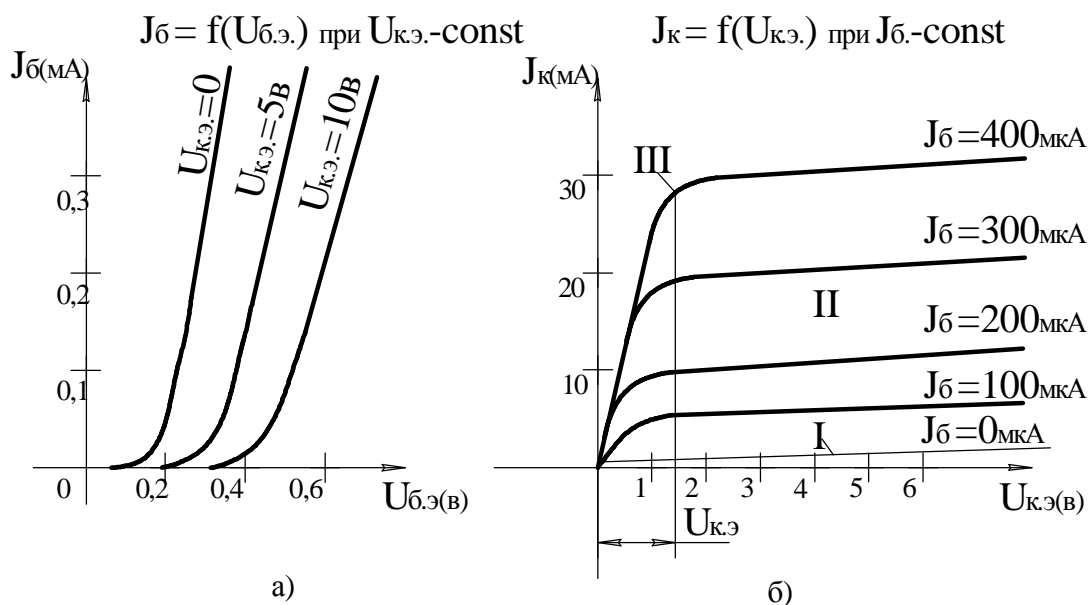


Рис.22. Статические входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора с ОЭ.

На выходной характеристике можно выделить три зоны, свойственные трем режимам работы транзисторов.

Область I - режим отсечки; область II - режим усиления и область III - режим насыщения.

Динамические характеристики транзистора определяют режим работы транзистора, в выходной цепи которого имеется нагрузка, а на вход подается усиливаемый сигнал.

В этой схеме увеличение тока базы вызывает возрастание тока в цепи коллектора и уменьшение напряжения на коллекторе. Ток и напряжение на коллекторе связаны между собой уравнением $U_{\text{к.э.}} = U_{\text{п}} - J_{\text{к}} R_{\text{к}}$

Такой режим работы транзистора называется динамическим. Динамические характеристики строятся на семействе статических при заданных напряжениях источника питания $U_{\text{п}}$ и сопротивления нагрузки $R_{\text{к}}$. Для построения динамической характеристики используется уравнение, которое представляет собой уравнение прямой (АВВ).

Изменение температуры окружающей среды изменяет параметры транзистора и его статические и динамические характеристики. Это может привести к нарушению выбранного режима работы. Поэтому применяются различные методы температурной стабилизации.

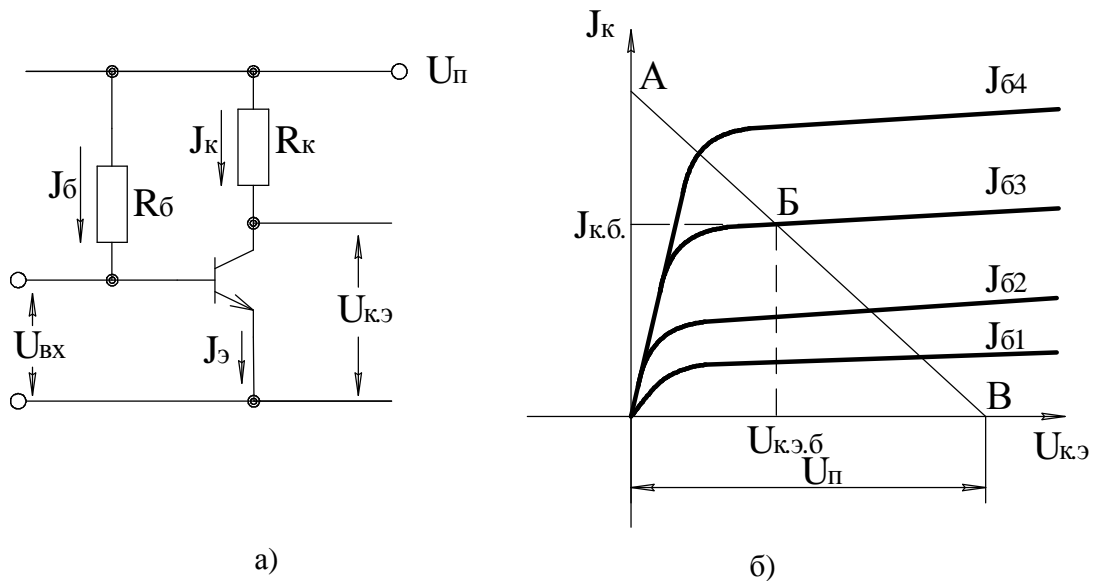


Рис.23. Схема усилителя с ОЭ (а) и выходная характеристика (б).

Эквивалентные схемы транзисторов.

Эквивалентные схемы транзисторов применяются для анализа цепей, содержащих транзисторы. Как известно, транзистор представляет собой совокупность двух встречно включенных взаимодействующих р-п переходов. Обычно транзистор заменяется четырехполосником. Параметры эквивалентной схемы могут быть определены либо расчетным, либо экспериментальным путем.

В настоящее время чаще всего применяются малосигнальные эквивалентные схемы в h -параметрах. Такая эквивалентная схема отражает зависимость

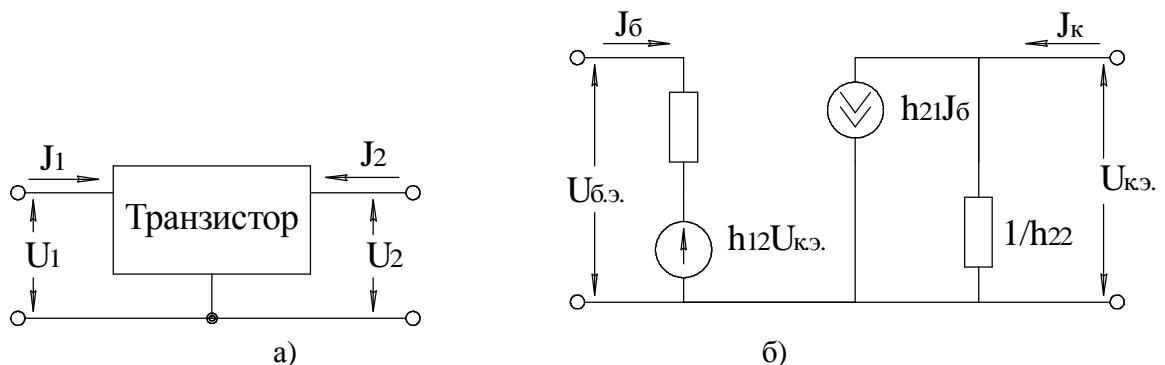


Рис.24. Схема четырехполосника (а), эквивалентная схема транзистора для включения с ОЭ (б).

выходного тока J_2 и входного напряжения U_1 от входного тока J_1 и выходного напряжения U_2 транзистора.

Эта зависимость определяется системой уравнений

$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta J_1 + h_{12} \Delta U_2; \quad \Delta J_2 = h_{21} \Delta J_1 + h_{22} \Delta U_2$$

где ΔU_1 и ΔU_2 - изменение входного и выходного напряжений.

ΔJ_1 и ΔJ_2 - изменения соответствующих токов.

Для малых сигналов можно записать

$$U_1 = h_{11} J_1 + h_{12} U_2; \quad J_2 = h_{21} J_1 + h_{22} U_2;$$

Все h параметры имеют физический смысл.

$h_{11} = U_1/J_1$ - входное сопротивление транзистора при короткозамкнутом выходе ($U_2=0$).

$h_{12} = U_1/U_2$ - коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом по переменному току входе ($J_1=0$)

$h_{21} = J_2/J_1$ - коэффициент передачи тока при короткозамкнутом выходе ($U_2=0$)

$h_{22} = J_2/U_2$ - выходная проводимость при разомкнутом по переменному току входе ($J_1=0$).

Коэффициенты h зависят от схемы включения транзисторов (ОБ, ОЭ, ОК).

Для транзисторов, включенных с ОЭ

$$h_{11Э} = \left(\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta J_{КЭ}} \right)_{\text{при } U_{КЭ}=0} = R_{\text{ВХЭ}} = R_{\text{ВХБ}} (b+1) \quad h_{21Э} = \left(\frac{\Delta J_{К}}{\Delta J_{Б}} \right)_{U_{КЭ}=0} = b$$

$$h_{12Э} = \left(\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right)_{\text{при } J_{Б}=0} = 0 \quad h_{22Э} = \left(\frac{\Delta J_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right)_{\text{при } J_{Б}=0} = 1/r_{К}$$

Для высокочастотных схем используется эквивалентная схема в u -параметрах.

Биполярные транзисторы классифицируются по двум параметрам: по мощности и по частотным свойствам. По мощности они подразделяются на маломощные ($P_{\text{вых}} \leq 0,3$ Вт), средней мощности ($0,3 \text{ Вт} < P_{\text{вых}} \leq 1,5$ Вт) и мощные ($P_{\text{вых}} > 1,5$ Вт); по частотным свойствам - на низкочастотные ($f_0 \leq 0,3$ МГц), средней частоты ($0,3 \text{ МГц} < f_0 \leq 3 \text{ МГц}$), высокой частоты ($3 \text{ МГц} < f_0 < 30 \text{ МГц}$) и сверхвысокой частоты ($f_0 > 30 \text{ МГц}$).

Маркировка биполярных транзисторов предусматривает шесть символов.

Первый символ - буква (для приборов общего применения) или цифра для приборов специального назначения, указывающая исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен транзистор: Г(1)- германий, К(2)-кремний, А(3)- арсенид галлия.

Второй символ – буква Т, означающая биполярный транзистор,

Третий символ- цифра, указывающая мощность и частотные свойства транзистора (таблица 2).

Таблица 2.

Мощность	Частота		
	НЧ	СЧ	ВЧ
Маломощные	КТ1...	КТ2...	КТ3...
Средней мощности	КТ4...	КТ5...	КТ6...
Мощные	КТ7...	КТ8...	КТ9...

Четвертый и пятый символы - двухзначное число, указывающее порядковый номер разработки.

Шестой символ- буква, обозначающая параметрическую группу прибора.

Полевые транзисторы. Полевым транзистором называется транзистор, в котором между двумя электродами образуется проводящий канал, по которому протекает ток. Управление этим током осуществляется электрическим полем, создаваемым третьим электродом. Электрод, с которого начинается движение носителей заряда, называется *истоком*, а электрод, к которому они движутся- *стоком*. Электрод, создающий управляющее электрическое поле называется *затвором*.

Различают два типа полевых транзисторов: с управляющим р-п-переходом и

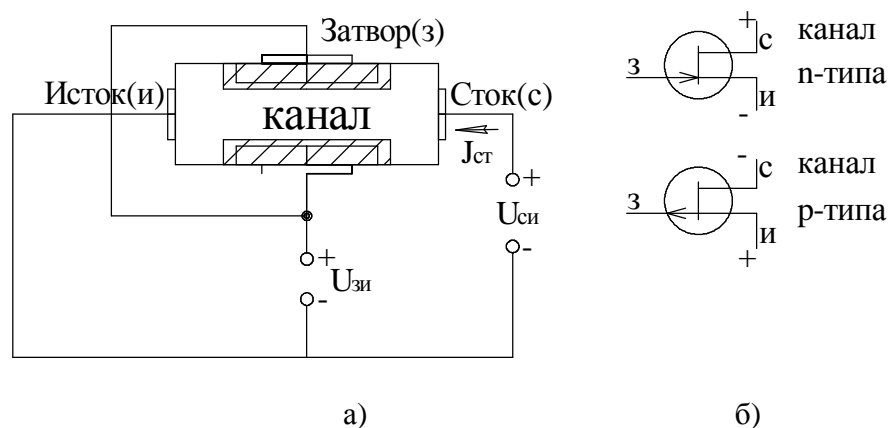


Рис.25. Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом (а) и его условно обозначение (б).

с изолированным затвором (МДП -транзисторы). По типу электропроводности полевые транзисторы подразделяются на транзисторы с каналами "р" и "n" типов.

Транзистор с управляющим р-п переходом представляет собой пластину из полупроводникового материала, имеющего электропроводность определенного типа, от концов которого сделаны два вывода- исток и сток. Вдоль пластины сделан р-п-переход, от которого сделан третий вывод- затвор.

Если к электродам подключить напряжение питания, то между стоком и истоком будет протекать ток. Сопротивление канала, а, следовательно, и ток, проходящий через канал зависят от напряжения на затворе. Напряжение на затворе, при котором ток истока минимален, называется напряжением отсечки $U_{зи.отс}$. Если на затвор подать переменный сигнал, то ток стока I_c также будет изменяться по тому же закону.

Статические характеристики транзистора с управляющим р-п-переходом приведены на рис. 26.

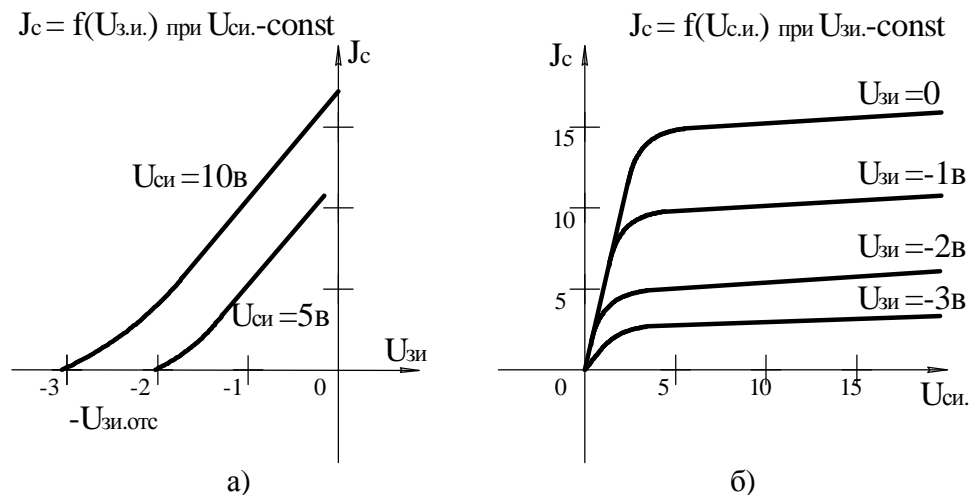


Рис.26. Входная (а) и выходная б характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.

Максимальный ток стока J_c будет при нулевом напряжении на затворе. При уменьшении напряжения на затворе ток стока уменьшается и при $U_{зи}=U_{зи.отс}$ $J_c \approx 0$.

Полевые транзисторы характеризуются следующими параметрами:

— *крутизной характеристики* $S = \frac{dJ_c}{dU_{зи}} = \frac{\Delta J_c}{\Delta U_{зи}}$ при $U_{си}-const$

— *коэффициентом усиления по напряжению* $K_v = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}}$ при $J_c-const$

— выходным сопротивлением $R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta J_{\text{с}}}$ при $U_{\text{зи}} = \text{const}$

— входным сопротивлением $R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{зи}}}{\Delta J_{\text{з}}}$

— напряжением отсечки $U_{\text{зи.отс.}}$

— максимальным током стока $J_{\text{с.мах.}}$

Транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы) в отличие от рассмотренных выше, имеют затвор изолированный от канала слоем диэлектрика. Поэтому они имеют очень большое входное сопротивление до $10^{12} \text{--} 10^{14}$ Ом.

Принцип действия МДП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием электрического поля.

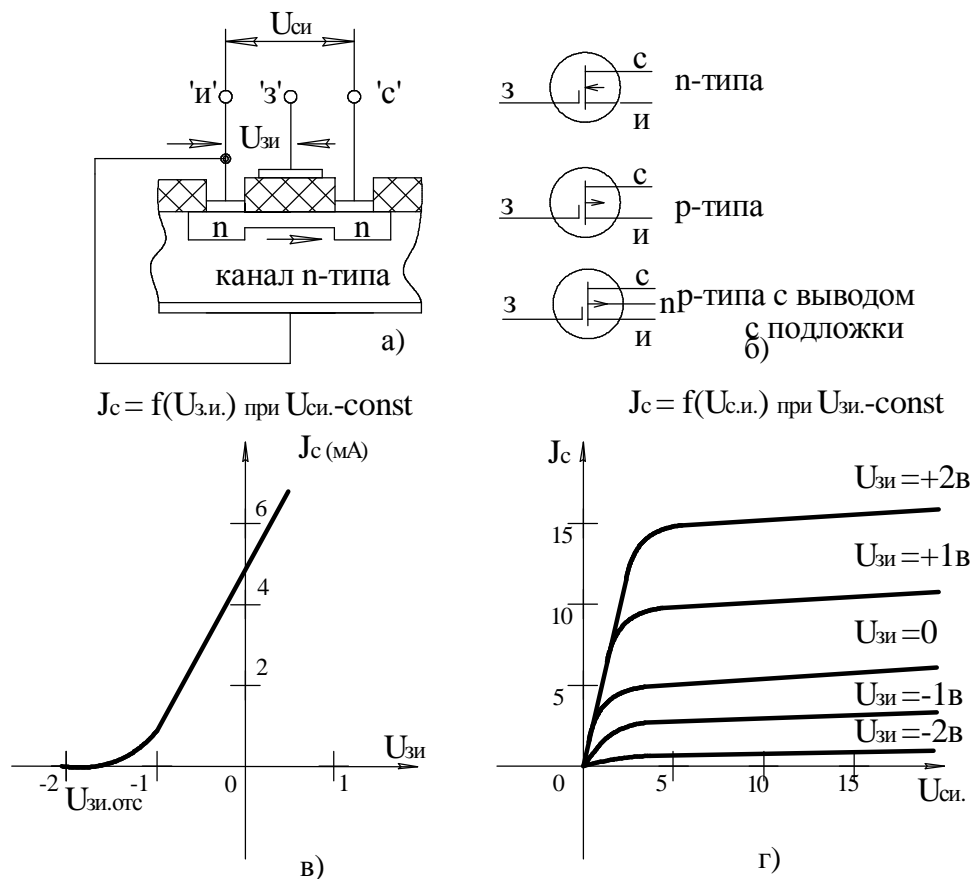


Рис.27. Конструкция(а), условные обозначения(б), входная(в) и выходная(г) характеристики МДП – транзистора со встроенным каналом.

МДП -транзисторы делятся на транзисторы с встроенным каналом и на транзисторы с индуцированным каналом. Транзисторы имеют четвертый электрод, называемый подложкой, который выполняет вспомогательную роль. МДП -транзисторы могут быть с каналами n или p-типа.

На рис. 27 приведена конструкция МДП –транзистора со встроенным каналом.

В МДП –транзисторах токопроводящий канал создается технологическим путем в виде тонкого слаболегированного полупроводникового слоя. Поэтому при $U_{зи}=0$ канал существует.

МДП –транзисторы с индуцированным каналом отличаются тем, что проводящий канал здесь не создается, а образуется (индуцируется) благодаря притоку электронов из полупроводниковой пластины при приложении к затвору напряжения положительной (отрицательной) полярности относительно истока. За счет притока электронов в приповерхностном слое возникает токопроводящий канал, соединяющий области стока и истока. При изменении напряжения на

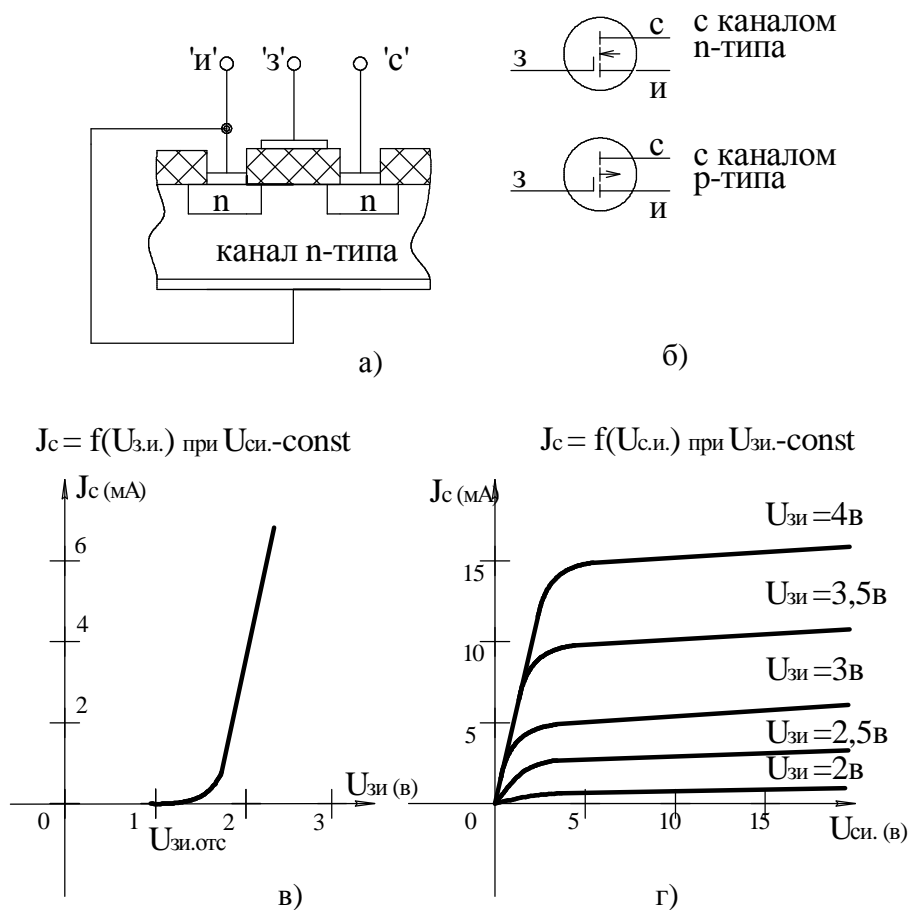


Рис.28. Конструкция(а), условные обозначения(б), входная(в) и выходная(г) характеристики МДП – транзистора с индуцированным каналом.

затворе изменяется сопротивление канала. На рис. 28 приведена конструкция и статические характеристики МДП –транзистора с индуцированным каналом.

Особенностью данного транзистора является то, что управляющий сигнал $U_{зи}$ совпадает по полярности с напряжением $U_{си}$.

Полевые транзисторы, так же как и биполярные, могут быть включены в цепь по схеме с общим затвором (ОЗ), с общим истоком (ОИ) и с общим стоком (ОС).

Отличительным свойством полевых транзисторов является то, что управляющим сигналом является не ток, а напряжение. Это делает их похожими на лампы.

Полевые транзисторы успешно применяются в различных усилительных и переключающих устройствах, они часто используются в сочетании с биполярными транзисторами. На базе полевых транзисторов построены многие интегральные микросхемы.

Полевые транзисторы обозначаются аналогично биполярным, только вторым элементом является буква П, например КП306А – кремневый полевой транзистор, малой мощности, высокочастотный, номер разработки 06 группа А. Необходимая информация по транзисторам приводится в справочной литературе.

2.4 Полупроводниковые резисторы.

Полупроводниковые резисторы нашли широкое применение в электронных приборах. К ним относятся терморезисторы, магниторезисторы, варисторы, фоторезисторы. Принцип действия таких приборов основан на изменении свойств полупроводниковых материалов при воздействии на них температуры, магнитного и электрического полей, электромагнитного излучения.

Полупроводниковый терморезистор представляет собой прибор, сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Зависимость сопротивления от температуры имеет вид:

$$R_T = A \exp (B/T),$$

где A , B – постоянные, определяемые свойствами полупроводникового материала и конструкцией терморезистора, T – температура.

С увеличением температуры сопротивление терморезистора уменьшается. Температурный коэффициент сопротивления терморезистора лежит в пределах от 2 до 8,5% на градус.

Недостатком полупроводниковых терморезисторов является нелинейная зависимость сопротивления от температуры и значительный разброс параметров. Терморезисторы могут быть выполнены в виде цилиндрических стержней, дисков, бусинок, плоских прямоугольников. Для защиты от внешней среды их покрывают лаками и эмалями.

Часто используют терморезисторы типа ММТ (медно-марганцевые) и КМТ (кобальто-марганцевые).

Терморезисторы применяются в качестве первичных преобразователей температуры для контроля и регулирования температуры, а также в схемах температурной компенсации.

Магниторезисторы представляют собой полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от воздействия на него магнитного поля. Магниторезисторы позволяют обеспечить хорошую гальваническую развязку. Для формирования магнитного поля можно использовать постоянный магнит или электромагнит.

Зависимость сопротивления магниторезистора от величины магнитного поля нелинейна. С увеличением величины магнитного поля сопротивление возрастает.

Основными параметрами магниторезистора являются:

- номинальное сопротивление при отсутствии магнитного поля,
- мощность рассеивания,
- ТКР,
- зависимость $R_B = f(H)$.

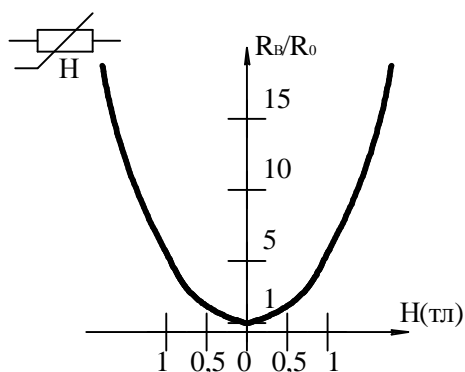


Рис. 29. Зависимость $R_B = f(H)$ для магниторезистора

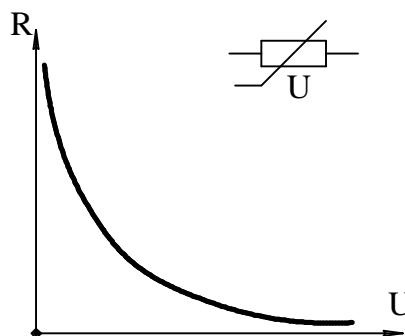


Рис 30. Зависимость $R_B = f(U)$.

При увеличении магнитной индукции от 0 до 1Тл сопротивление магниторезистора увеличивается в 10÷15 раз.

Магниторезисторы нашли применение в коммутационной технике: бесконтактных выключателях, реле, контактах управления.

Варисторы представляют собой полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от приложенного напряжения. Зависимость сопротивления от напряжения нелинейная и имеет вид (рис.30). Сопротивление R_B уменьшается при увеличении приложенного напряжения. Варисторы применяются для защиты от перенапряжений, защиты от помех, для искрогашения в электрических машинах. Они ограничивают возникающее напряжение, особенно при коммутации индуктивной или емкостной нагрузки и тем самым позволяют значительно повысить срок службы контактов реле и т.д.

Фоторезисторы – представляют собой полупроводниковые приборы, сопротивление которых зависит от электромагнитного излучения. (см. 2.5.).

2.5 Фотоэлектрические приборы

Фотоэлектрические приборы строятся на принципах фотопроводимости. Фотопроводимость – это свойство веществ изменять свою электропроводность под воздействием электромагнитного излучения.

Фотоэлектрические приборы делятся на две группы:

- с *внешним фотоэффектом*,
- с *внутренним фотоэффектом*.

К приборам с внешним фотоэффектом относятся вакуумные и газонаполненные фотоэлементы (ФЭ) и фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

К приборам с внутренним фотоэффектом относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры.

В качестве излучателей используется солнечный свет, лампочки накаливания и другие источники света.

Фотоэлемент (ФЭ) – это электровакуумный или газоразрядный диод, в стеклянном баллоне которого установлены фотокатод и фотоанод (рис. 31).

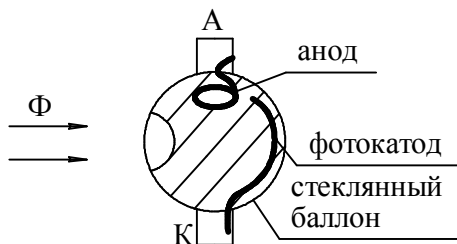


Рис 31. Фотоэлемент.

Фотокатод представляет собой слой, покрывающий внутреннюю поверхность колбы, выполненный из полупроводникового материала, чувствительного к внешнему излучению. Анод выполнен в виде кольца или рамки и размещен внутри колбы. ФЭ разделяются на вакуумные и газоразрядные.

При отсутствии излучения анодный ток равен нулю. При освещении фотокатода возникает фотоэмиссия и в цепи анода протекает ток.

Фотоэлементы используются в первичных преобразователях информации.

Фотоэлектронный умножитель – представляет собой электровакуумный прибор, преобразующий энергию электромагнитного излучения в электрические сигналы с использованием вторичной электронной эмиссии. Состоит из стеклянного баллона, внутри которого расположены ускоряющие электроды, умножительные электроды и анод. При освещении фотокатода возникает электронный поток, который фокусируется и направляется на умножительные электроды, где за счет вторичной эмиссии он усиливается и попадает на анод.

Фоторезистор представляет собой полупроводниковый прибор, сопротивление которого зависит от освещенности. На рис.32 показана конструкция фоторезистора и зависимость его сопротивления от светового

потока. Эта зависимость нелинейна. Фоторезисторы имеют высокую инерционность и многие из них не способны работать на частотах более 100Гц.

Фотодиод представляет собой полупроводниковый прибор с n-p – переходом.

Принцип работы фотодиода заключается в том, что при его освещении возрастает обратный ток, и он не зависит от обратного напряжения. На границе перехода “n-p” возникает ЭДС, величина которой зависит от освещенности и может достигать 0,5÷1В. При этом обратное сопротивление фотодиода уменьшается.

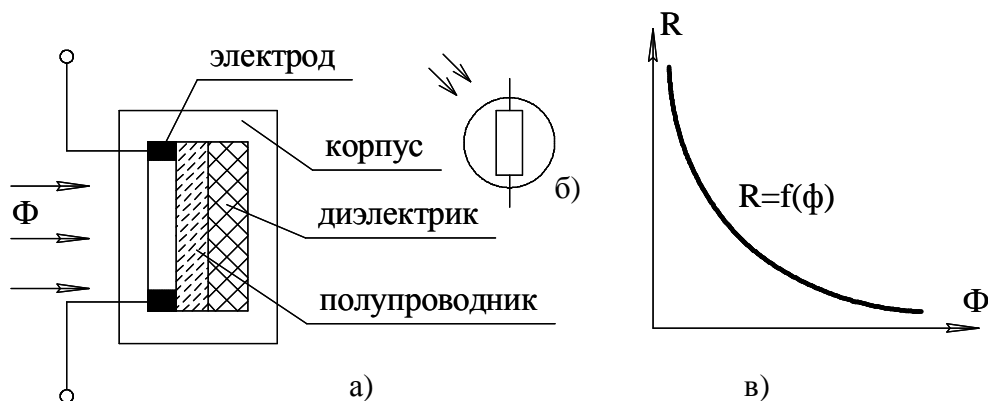


Рис 32. Конструкция (а), условное обозначение (б) и зависимость $R=f(\Phi)$ для фоторезистора.

Фотодиоды используются в электрических цепях измерительной аппаратуры и аппаратуры передачи данных. Они относятся к быстродействующим приборам и реагируют на сигналы до 1МГц. Фотодиоды могут также использоваться в качестве источников питания, например, в солнечных батареях.

Основными характеристиками фотодиодов являются световая, вольт-амперная и спектральная.

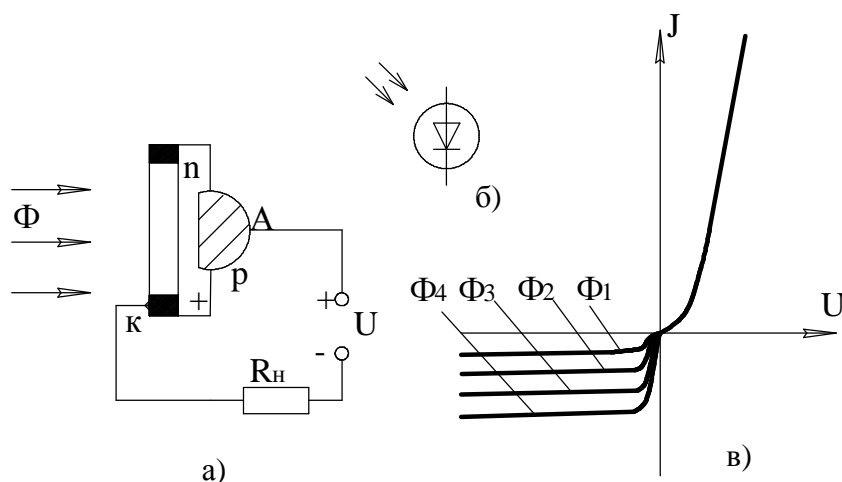
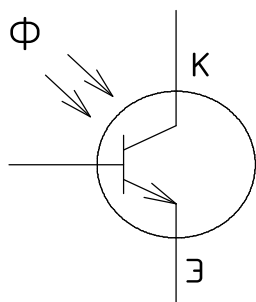


Рис 33. Конструкция (а), условное обозначение (б) и вольт-амперная характеристика (в) фотодиода.

Фототранзистор в отличие от фотодиода является активным преобразователем, в нем происходит не только преобразование энергии излучения, но и усиление.



Фототранзистор имеет три электрода: эмиттер, коллектор и базу, причем база подвергается облучению потоком лучистой энергии. Конструктивно фототранзисторы выполняются в металлическом корпусе со стеклянным окном.

Внутренний эффект в полупроводнике может быть использован для построения других приборов, например, фототиристоры, однопереходных фототранзисторов и др.

Оптоэлектронные приборы содержат одновременно источник и приемник световой энергии. Для оптопары как входным так и выходным параметром является электрический сигнал. Особенностью оптопар (оптронов) является отсутствие гальванической связи между входными и выходными цепями. В качестве излучателя оптопары могут быть использованы

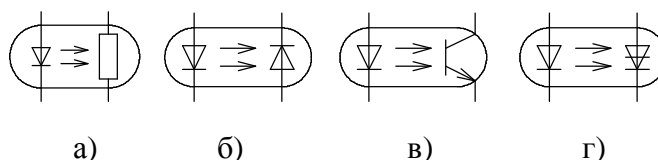


Рис 34. Условное обозначение оптопар: а-резистивная, б-диодная, в-транзисторная, г-тиристорная.

светоизлучающий или инфракрасный диод, электрическая лампочка или полупроводниковый лазер. В качестве приемника оптопары находят применение рассмотренные выше фотоэлектрические приборы: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. На рис.34 приведены условные обозначения основных типов оптопар.

Оптопары широко применяются в аппаратуре передачи данных, преобразователях информации, системах автоматического управления.

Маркировка оптронов включает в себя семь символов:

- первый обозначает материал: А(3) – арсенид галлия;
- второй символ – буква О означает оптопара;
- третий указывает тип приемника: Д – диод, Т – транзистор, У – тиристор;
- четвертый, пятый и шестой символы указывают номер разработки;
- седьмой символ – буква, означает группу.

Например: АОД130А – диодная оптопара на основе соединений галлия, номер разработки 130, группа параметров А, общего применения.

ЗОТ110А – транзисторная оптопара, на основе соединения галлия, номер разработки 110, группа параметров А, специального применения.

2.6. Интегральные схемы (ИС)

Интегральные схемы в настоящее время являются наиболее распространенной элементной базой при проектировании электронной аппаратуры. Согласно ГОСТ 17021-88 интегральная микросхема - это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала или накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов, которые рассматриваются как единое целое.

В зависимости от технологии изготовления интегральные микросхемы могут быть: полупроводниковыми, пленочными и гибридными.

Полупроводниковая микросхема – это микросхема, в которой все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

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

Гибридная микросхема – это микросхема, в которой пассивные элементы выполнены в виде пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку, а активные элементы являются навесными. В качестве активных элементов обычно используют бескорпусные диоды, транзисторы или ИС.

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

В зависимости от количества элементов и компонентов, входящих в ИС, различают:

- *ИС малой степени интеграции (МИС)* – до 50 элементов,
- *ИС средней степени интеграции (СИС)* – до 500 элементов,
- *ИС большой степени интеграции (БИС)* – до 10000 элементов,
- *ИС сверхбольшой степени интеграции (СБИС)* – более 10000 элементов.

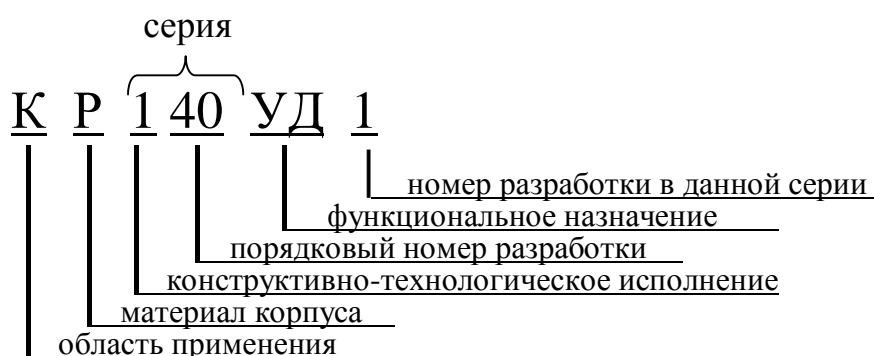
Современные СБИС содержат до 4 млн элементов.

Интегральные микросхемы могут быть построены на базе биполярных транзисторов и на базе МДП-транзисторов (полевых). Последние отличаются минимальными потребляемыми мощностями.

Корпуса микросхем изготавливаются из стекла, металлокерамических и металлокерамических композиций, а также из пластмасс и керамики. Наибольшее распространение получили металлокерамический, металлокерамический, стеклокерамический и пластмассовый корпуса.

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

Условное обозначение интегральных схем включает буквы и цифры.



Первая буква К означает, что ИС общего применения. Отсутствие буквы К означает, что ИС специального применения.

Вторая буква означает материал и тип корпуса: Р - пластмассовый, М – керамический типа 2, А – пластмассовый типа 4.

Следующие три или четыре цифры – серия. Первая цифра в серии означает конструктивно-технологическое исполнение:

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

Следующие две буквы - функциональное назначение схемы:

УД – операционный усилитель,
 ЛА – логический элемент И-НЕ,
 ИР – регистр,
 ИЕ – счетчик,
 ИД – дешифратор,
 ЕН – стабилизатор напряжения и т.д.

Последние цифры – номер разработки в данной серии.

2.7. Индикаторные приборы

Индикаторные приборы предназначены для визуального отображения информации.

По способу светоотдачи все индикаторы делятся на две группы: пассивные и активные. По виду отображаемой информации индикаторы делятся на единичные (точка, запятая, круг и др.); цифровые для отображения цифр; буквенно-цифровые; шкальные; мнемонические, графические. В зависимости от значений питающих напряжений различают низковольтные ($U < 5В$), средневольтные ($U < 30В$) и высоковольтные ($U > 70В$) индикаторы.

Пассивные индикаторы характеризуются отсутствием собственного излучения. Принцип их работы основан на отражении или преломлении внешнего светового потока. К пассивным индикаторам относятся электромагнитные индикаторы и жидкокристаллические индикаторы.

Принцип работы электромагнитных индикаторов основан на отражении внешнего рассеянного освещения, падающего на информационное табло. Основным элементом такого индикатора является подвижный элемент-шторка, на одну сторону которой нанесено светоотражающее покрытие, а на другую- светопоглощающее.

При изменении вектора магнитного поля шторка поворачивается на 180° , обращаясь к внешнему освещению этой или другой стороной. Совокупность элементов образует соответствующий символ. Такие индикаторные табло широко используются на железнодорожных вокзалах и в аэропортах.

Достоинством электромагнитных индикаторов является простота и малая потребляемая мощность.

Принцип работы жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ) основан на свойстве некоторых веществ изменять свои оптические показатели (отражение, преломление и др.) под влиянием внешнего электрического поля. Вследствие модуляции падающего света изменяется цвет участка, к которому приложено электрическое поле, и на поверхности вещества появляется рисунок требуемой конфигурации. В качестве веществ, имеющих подобные свойства, используют жидкие кристаллы.

По способу использования внешнего освещения ЖКИ подразделяются на индикаторы, работающие на просвет и на отражение.

ЖКИ состоит из двух параллельно расположенных стеклянных пластин, на внутренних сторонах которых нанесены пленочные электроды (рис.35). Межэлектродное пространство заполнено жидкокристаллическим веществом.

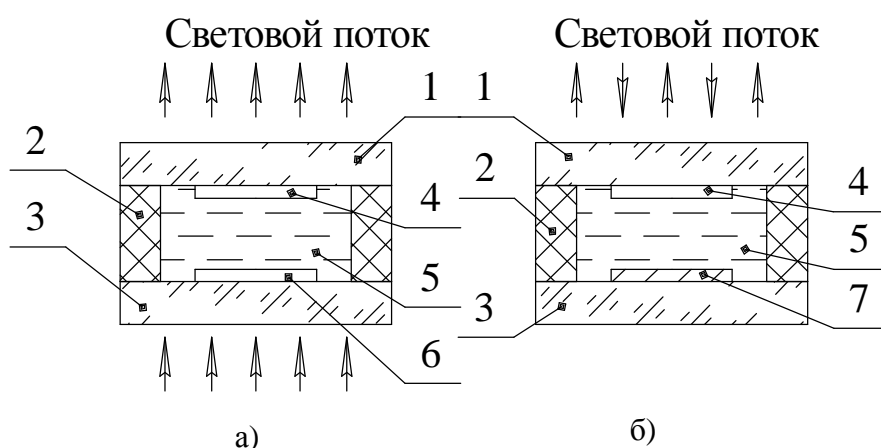


Рис.35. Конструкции ЖКИ, работающих на просвет (А) и на отражение (Б).

1,3- стеклянные пластины, 2-клеевое соединение, 4- передний прозрачный электрод, 5- жидкокристаллическое вещество, 6- задний прозрачный электрод, 7- задний отражающий электрод.

Один из электродов выполняется в виде рисунка отображаемого знака, а второй является общим. У ЖКИ, работающего на просвет, оба электрода прозрачны, а у ЖКИ, работающего на отражение, внутренний общий электрод имеет зеркальную поверхность. При подаче напряжения на общий электрод и выбранные прозрачные сегментные электроды под соответствующим сегментом появляется полоса, цвет которой резко отличается от окружающего фона.

В настоящее время промышленностью выпускаются одноразрядные и многоразрядные индикаторы, а также шкальные индикаторы и информационные табло. ЖКИ питаются переменным напряжением величиной (3ч24)В.

Основными преимуществами ЖКИ являются сверхмалое потребление энергии, хорошие яркость и контрастность изображения при сильном внешнем освещении, простота конструкции и высокая долговечность. К недостаткам относятся малый интервал рабочих температур и большая инерционность.

Активные индикаторы характеризуются собственным электромагнитным излучением. К ним относятся электронно-лучевые трубки, накаливаемые индикаторы, вакуумные люминесцентные индикаторы, газоразрядные индикаторы, светодиодные индикаторы и др.

В накаливаемых индикаторах в качестве излучающего элемента используется вольфрамовая нить, нагретая до температуры $\sim 2500^{\circ}\text{C}$, помещенная в стеклянную колбу с вакуумом. Используются точечные и цифровые индикаторы. Точечные индикаторы могут использоваться для построения информационных табло.

Принцип работы вакуумных люминесцентных индикаторов (ВЛИ) основан на способности некоторых веществ-люминофоров преобразовывать кинетическую энергию электронов в световую. Яркость свечения зависит от плотности электронного потока и скорости электронов.

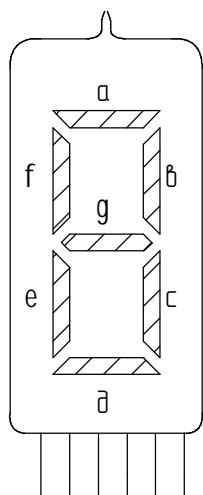


Рис.36. ВЛИ ИВ-4.

ВЛИ представляет собой триод с анодом, управляющей сеткой и катодом, выполненным в виде нити накала.

При нагревании катода с него вылетают электроны, которые под воздействием электрического поля приобретают скорость и попадают на анод, который начинает светиться. Форма анода соответствует индицируемому элементу.

Индикаторы подразделяются на символьные, цифровые и буквенно-цифровые; одноразрядные и многоразрядные, шкальные, матричные и мозаичные.

Одноразрядные цифровые индикаторы имеют катод в виде нити накала, управляющую сетку и семь анодов. Цвет сечения индикаторов зависит от химического состава люминофора и может быть красным, желтым, зеленым, синим и т.д. Напряжение питания 25В. Достоинством ВЛИ является высокая яркость и большая долговечность.

Принцип работы газоразрядных индикаторов основан на излучении газового разряда при прохождении электрического тока в замкнутом объеме. Во

всех газоразрядных индикаторах используется режим тлеющего разряда с холодным катодом при напряжении (60÷200)В.

Яркость и цвет свечения индикатора зависят от газа-наполнителя.

Газоразрядные индикаторы можно подразделить на четыре группы: неоновые лампочки, газоразрядные цветные сигнальные индикаторы, знаковые газоразрядные индикаторы и газоразрядные индикаторные панели.

Неоновая лампа содержит два электрода: анод и катод, выполненные в виде дисков или цилиндров, помещенные в герметичный стеклянный сосуд, заполненный газом неонам.

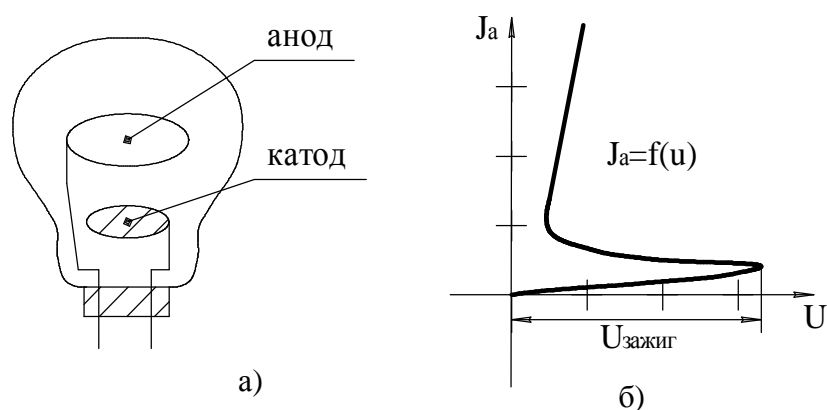


Рис.37. Конструкция неоновой лампы ТН-30(а) и ее вольт-амперная характеристика(б).

При увеличении напряжения на аноде до величины, равной $U_{\text{зажиг}}$, возникает тлеющий разряд в газе, и поверхность катода начинает светиться. Для нормальной работы индикаторы должны включаться в цепь последовательно с балластным резистором. Неоновые лампочки используются для индикации наличия высокого напряжения, например "Сеть вкл."

Газоразрядные цветные сигнальные индикаторы представляют собой стеклянную колбу, на внутреннюю поверхность которой наносится слой люминофора.

Колба наполнена инертным газом и содержит два электрода: анод и катод. При подаче напряжения на анод возникает тлеющий разряд и ультрафиолетовое излучение, под воздействием которого люминофор светится. Цвет свечения зависит от газа и люминофора. Например, индикатор ТЛГ-1-2 - тлеющий, люминофор, голубой, ток 1 мА.

Знаковые газоразрядные индикаторы предназначены для отображения символов или цифр. Они представляют собой стеклянную колбу, внутри которой расположены полупрозрачный анод и десять катодов, изготовленных из молибденовой проволоки в виде цифр. При подаче напряжения между анодом и одним из катодов возникает тлеющий разряд, охватывающий всю поверхность данного катода, в результате отображается соответствующая цифра.

Газоразрядные индикаторы отличаются хорошей яркостью и контрастностью, но требуют высокого напряжения питания. Маркировка

знаковых индикаторов включает две буквы ИН и цифру, означающую номер модификации. Например, ИН-8, ИН12, ИН18 и т.д.

Полупроводниковые светодиодные индикаторы выполняются на основе светоизлучающих диодов. Различают точечные, цифровые, буквенно-цифровые, шкальные, мозаичные и другие светоизлучающие индикаторы. Используя различный материал, можно получить индикаторы с различным цветом свечения. Для визуального увеличения размеров индикаторов используются фокусирующие и увеличительные линзы.

В микрокалькуляторах широко используются многоразрядные светодиодные индикаторы на 4÷16 разрядов. Рабочее напряжение светодиода лежит в пределах (1,2ч2,5) В, а ток от 3 до 20 мА.

Для управления работой индикаторов разработаны специальные микросхемы. Обычно это преобразователи кода с формировавателями выходных сигналов.

Для управления ВЛИ используются микросхемы серии К161 и микросхемы из серии К176. Для цифровых газоразрядных индикаторов применяется микросхема К155ИД1.

Существуют два принципа управления работой индикаторов: статический и динамический. В первом случае каждый индикатор управляется своей схемой. Во втором случае каждая цифра подключается поочередно с частотой более 30 Гц. При этом из-за инерционности глаза изображение выглядит неподвижно.

При динамическом управлении и большом количестве разрядов значительно уменьшается количество выводов с индикаторного табло. Обычно

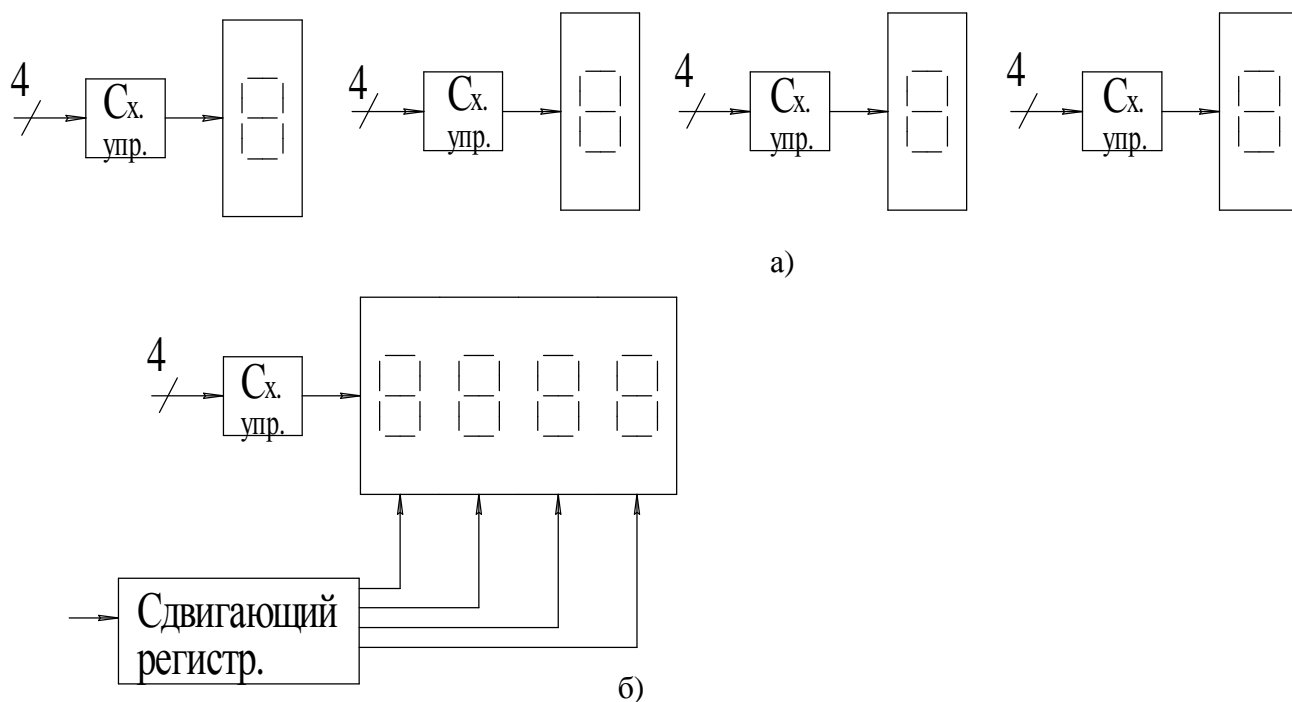


Рис.38. Управление индикаторами статическое (а) и динамическое (б).

при количестве разрядов, меньше 4—используется статический принцип управления, а если больше 4 – динамический.

Условное обозначение индикаторов.

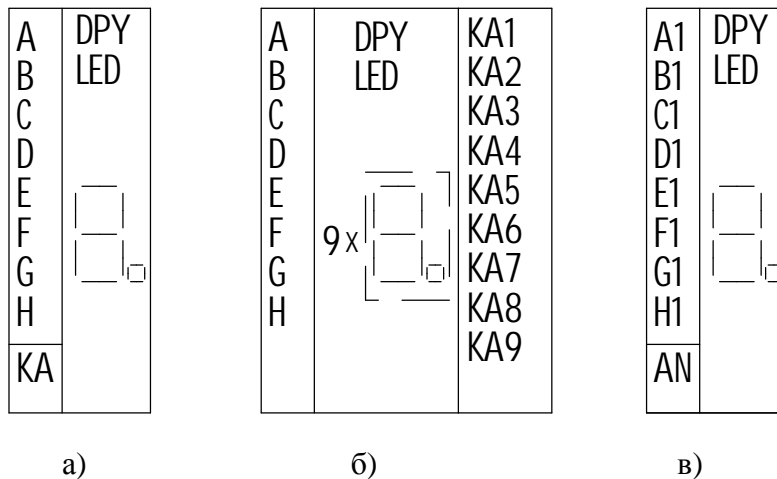


Рис.39. Условное обозначение светодиодных элементов индикации: 7-сегментный с общим катодом (а), для индикации девяти цифр с отдельными катодами (б), для индикации цифр с общим анодным выходом(в).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1.Какие приборы относятся к электровакуумным?
- 2.Что представляет собой триод и где он применяется?
- 3.Маркировка электронных ламп.
- 4.Назначение и классификация ЭЛТ.
- 5.Что представляет собой ЭЛТ?
- 6.Классификация полупроводниковых диодов.
- 7.Как определить дифференциальное и статическое сопротивление полупроводниковых диодов?
- 8.Поясните принцип работы стабилитронов.
- 9.Чем отличаются стабисторы от стабилитронов?
- 10.Условное обозначение и маркировка полупроводниковых диодов.
- 11.Что представляет собой тиристор?
- 12.Что представляет собой биполярный транзистор?
- 13.Основные схемы включения транзисторов.
- 14.Особенности и область применения эмиттерных повторителей.
- 15.Статические характеристики транзисторов.
- 16.Маркировка транзисторов.
- 17.Поясните принцип работы полевых транзисторов.
- 18.Классификация полевых транзисторов.
- 19.В чем заключаются особенности статических характеристик полевых транзисторов?

20. В чем отличие принципа работы полевого транзистора от биполярного?
21. Классификация полупроводниковых резисторов.
22. Где применяются варисторы?
23. Принцип работы фотоэлектрических приборов.
24. Какие приборы относятся к приборам с внешним фотоэффектом.
25. Поясните принцип работы фотодиода?
26. Что такое оптопары и область их применения?
27. Что представляет собой интегральная схема?
28. Классификация ИС.
29. Условное обозначение ИС.
30. На какие группы подразделяются индикаторные приборы?
31. Принцип работы ЖКИ?
32. Поясните принцип работы ВЛИ.
33. Назовите два принципа управления работой индикаторов.

3. АНАЛОГОВЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

3.1. Расчет нелинейных электрических цепей.

Нелинейным элементом называется элемент, у которого зависимость между входными и выходными параметрами носит нелинейный характер. Нелинейный элемент характеризуется нелинейностью характеристик. (рис. 40).

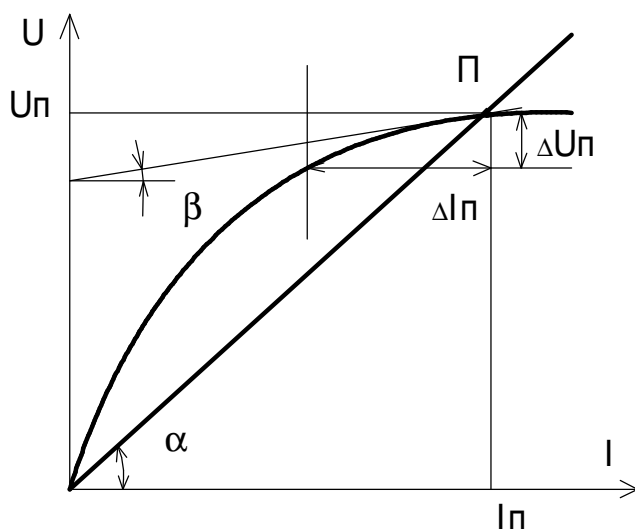


Рис 40 Вольт-амперная характеристика нелинейного резистора

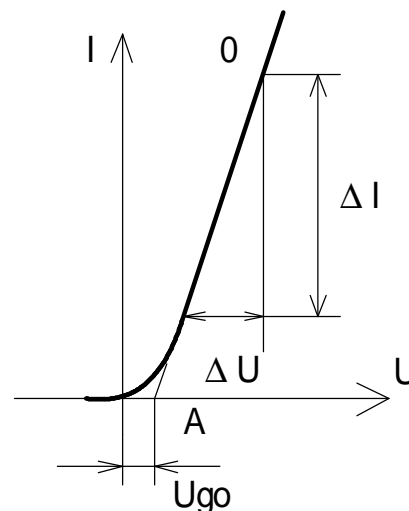


Рис 41 В А Х диода

С помощью ВАХ резистора можно определить его статистическое $R_{ст}$ и динамическое $R_{дин}$ сопротивление в точке П:

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_n} = \operatorname{tg} b ; \quad R_{ст} = \frac{U_n}{I_n} = \operatorname{tg} a ,$$

где U_n и I_n – напряжение и ток в точке П;

ΔU и ΔI – конечные приращения напряжения и тока.

Обычно все электрические цепи, включающие ЭУ, являются нелинейными. Цепи, в которых нет электронных устройств, могут быть линейными и нелинейными. Расчет нелинейных электрических цепей достаточно сложен, так как нужно решать систему нелинейных уравнений. Поэтому на практике для расчета нелинейных электрических цепей используются графоаналитические методы, а именно линеаризации, кусочно-линейной аппроксимации, эквивалентных преобразований и метод пересечения характеристик.

Метод линеаризации заключается в замещении нелинейного элемента линейной схемой, справедливой для ограниченного диапазона тока и напряжения. Такое замещение нелинейного элемента позволяет описывать электрическую цепь с помощью системы линейных уравнений.

$$U = U_{g0} + I \cdot R_{\text{дин}}$$

где U_{g0} – пороговое напряжение диода;
 $R_{\text{дин}}$ – динамическое сопротивление.

Метод кусочно-линейной аппроксимации заключается в том, что заданная нелинейная характеристика заменяется ломаной прямой с несколькими точками излома. Например, ВАХ полупроводникового диода (рис. 42) легко поддается кусочно-линейной аппроксимации. ВАХ диода может быть разбита на три области: прямой участок (DC), обратное смещение (AE) и область пробоя (AB). Каждая из этих областей близка к линейной. Поэтому ВАХ диода может быть представлена тремя отрезками: C'D; AE' и A'B.

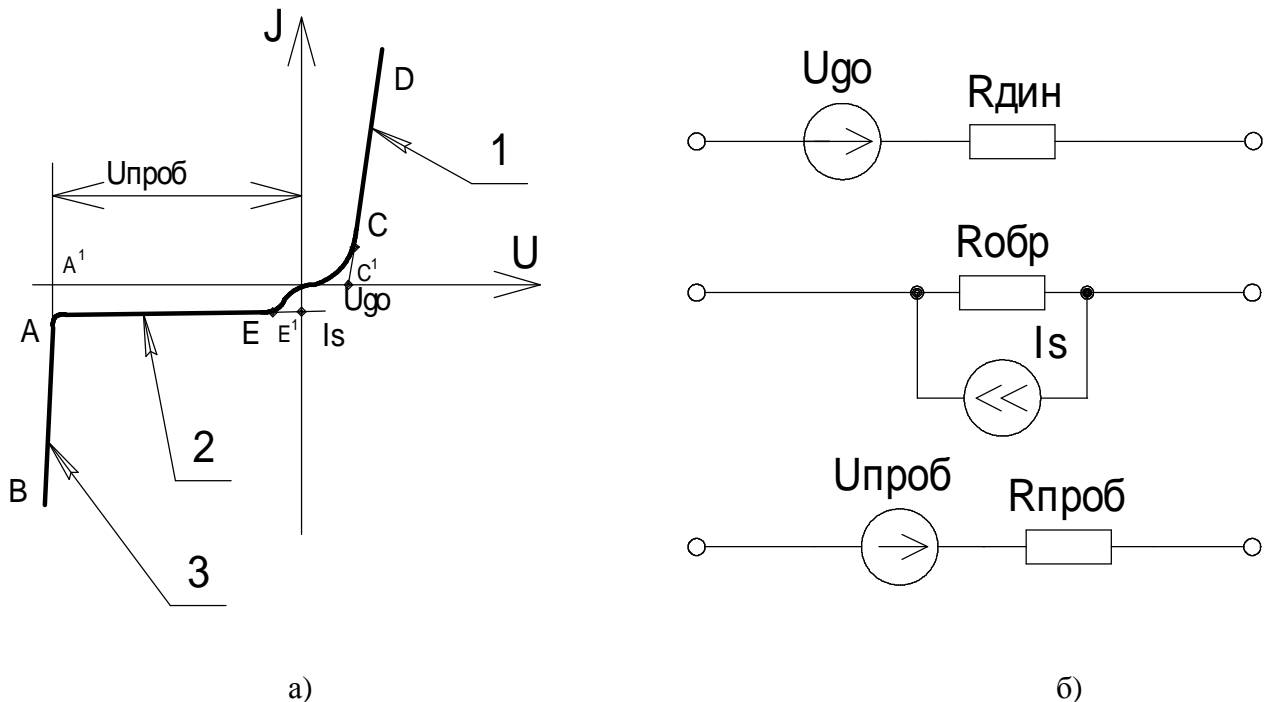


Рис. 42 ВАХ полупроводникового диода (а), эквивалентные схемы участков 1-3 (б)

Прямая ветвь может быть аппроксимирована линейной функцией

$$U_{\text{пр}} = U_{g0} + I \cdot R_{\text{дин}},$$

Аналогично может быть аппроксимирован линейный участок в области обратного смещения (участок EA) и в области пробоя (участок AB), когда к диоду приложено обратное напряжение.

Метод эквивалентных преобразований заключается в замене группы нелинейных элементов одним нелинейным элементом. Параметры такого элемента и режим работы могут быть определены графическим путем. Например, необходимо рассчитать электрическую цепь из последовательно соединенных линейных и нелинейных резисторов R_1 , R_2 и R_3 (рис 43). Необходимо определить ток в цепи $I_{\text{вх}}$ и падение напряжения на резисторах U_1 , U_2 и U_3 . Для схемы согласно закону Кирхгофа можно записать:

$$I_{\text{ВХ}} = I_1 = I_2 = I_3;$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_1 + U_2 + U_3$$

Зная ВАХ всех резисторов, входящих в схему, строим ВАХ эквивалентного сопротивления $U_{\text{ЭКВ}}(I)$. Проводим горизонтальную прямую на уровне $U_{\text{ВХ}}$ до пересечения с ВАХ эквивалентного сопротивления. Точка А определяет параметры цепи, т.е. ток в цепи $I_{\text{ВХ}}$ и падение напряжения на резисторах U_1 , U_2 и U_3 .

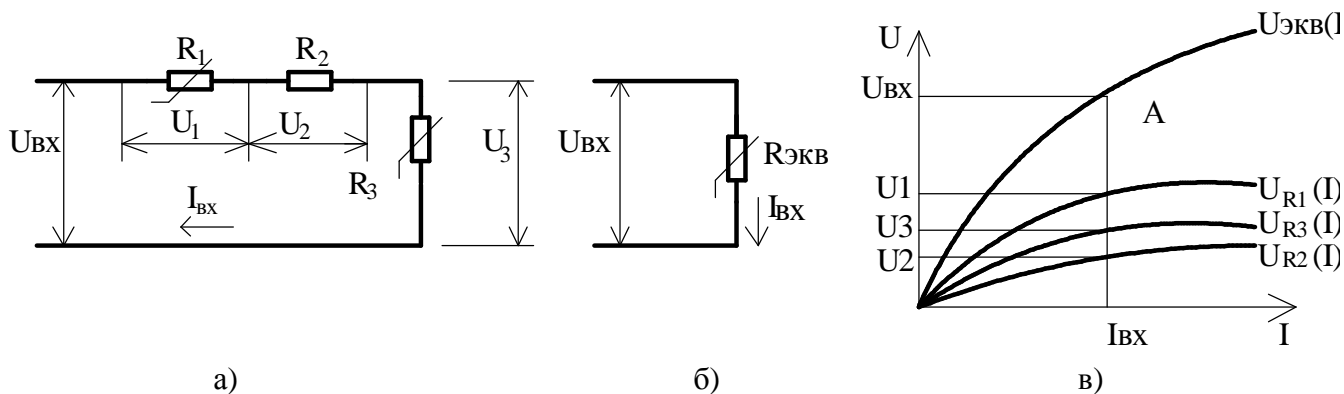


Рис. 43 Схема с последовательным соединением резисторов (а), эквивалентная схема (б), ВАХ (в).

Метод пересечения характеристик применяется для анализа цепей с двумя последовательно включенными элементами, которые могут быть линейными и нелинейными. В основу метода положено то, что суммарное напряжение на последовательно включенных элементах определяется внешним источником напряжения $U_{\text{ВХ}}$ и не зависит от тока, протекающего в цепи. Для цепи из двух элементов (рис. 44) справедливо выражение: $I_{\text{ВХ}} = I_{R_1} = I_{R_2}$

$$U_{\text{ВХ}} = U_1 + U_2$$

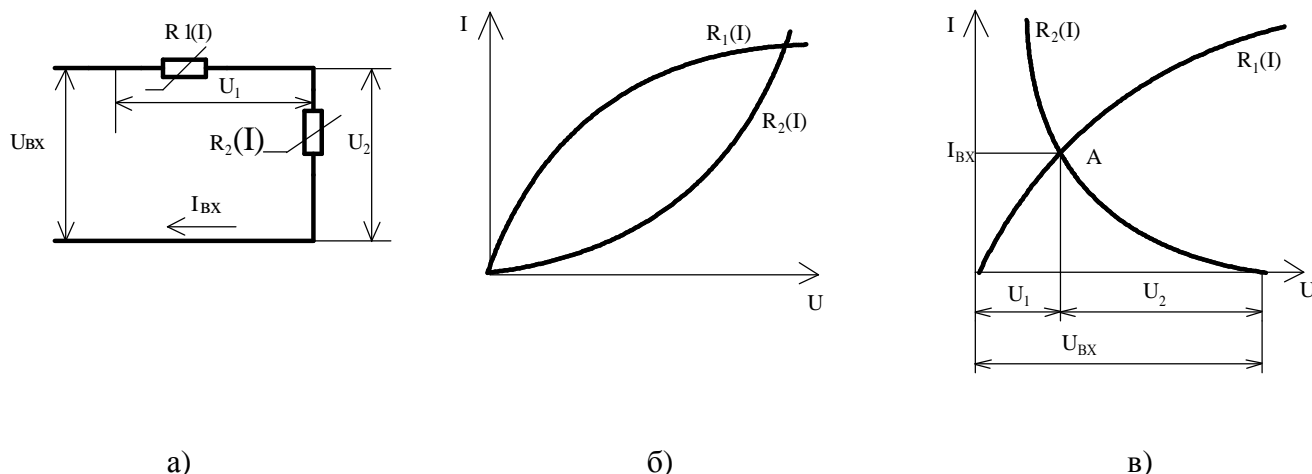


Рис. 44. Схема цепи (а), ВАХ нелинейных элементов (б), решение методом пересечения характеристик (в).

Решение задачи заключается в том, что одна из характеристик (например $R_2(I)$) зеркально разворачивается и перемещается относительно начала

координат на величину $U=U_{\text{вх}}$. Точка пересечения ВАХ элементов А дает искомый ток в цепи $I_{\text{вх}}$ и падение напряжения на элементах U_1 и U_2 .

В качестве примера рассчитаем цепь, содержащую последовательное соединение полупроводникового диода и резистора при $U_{\text{вх}}=5\text{В}$ и $R_2=1\text{кОм}$ (рис 45)

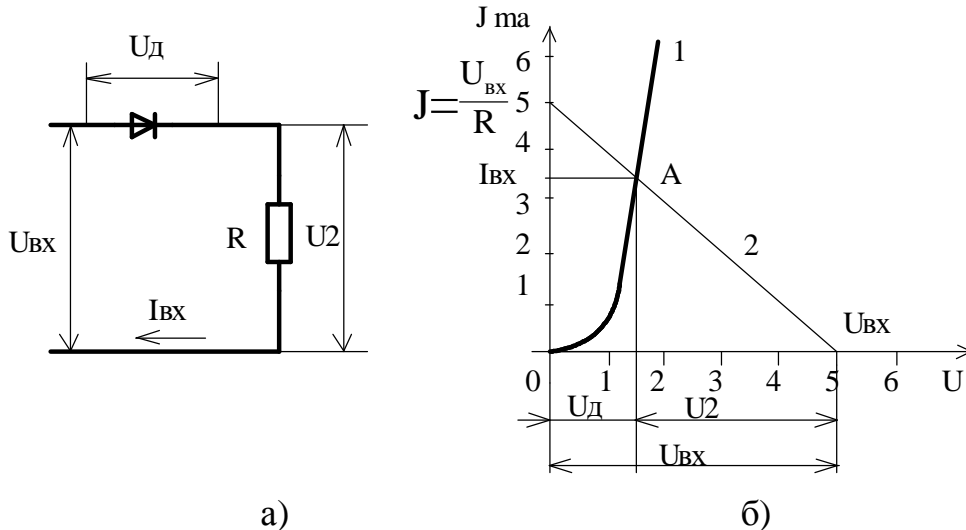


Рис. 45. Схема нелинейной цепи (а), решение (б) методом пересечения характеристик

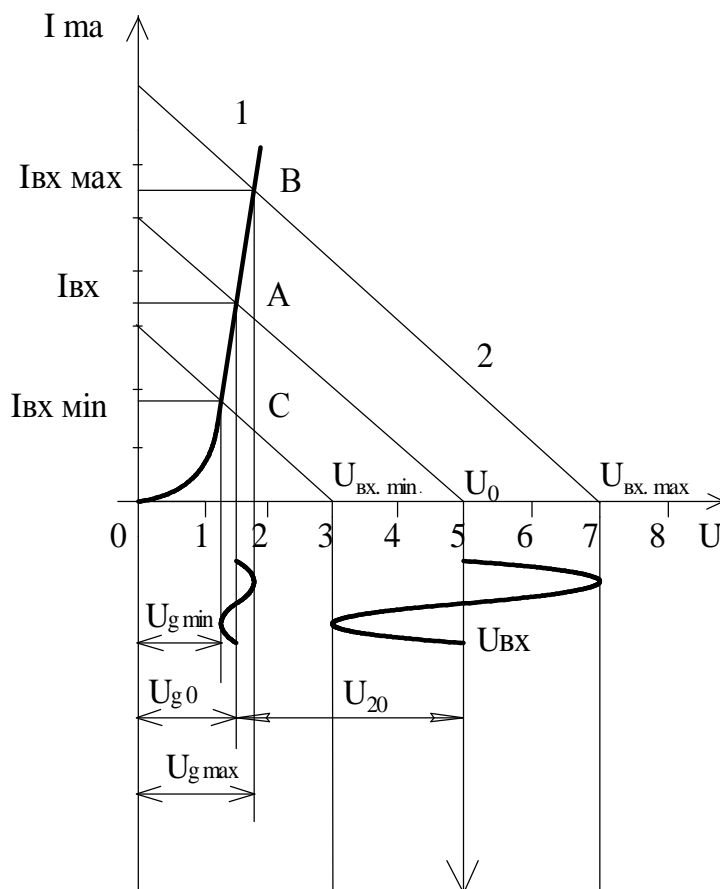


Рис. 46. Графоаналитический расчет нелинейной цепи

Строим ВАХ диода (1) и нагрузочную прямую $U_{\text{вх}}=U_{\text{д}}+IR$ (2) по двум точкам: $I_{\text{вх}}=0$ и $U_{\text{г}}=0$.

Точка пересечения характеристик – А определяет ток в цепи: $I_{\text{вх}}=4\text{ мА}$, $U_{\text{г}}=1,2\text{ В}$ и $U_2=3,8\text{ В}$.

Если на входе нелинейных цепей действуют одновременно постоянная и переменная составляющие тока, то используется метод наложения. В этом случае вначале определяется режим по постоянному току, а затем производится расчет по ее переменной составляющей. Например,

$$U_{\text{вх}} = U_0 + U_{\text{max}} \sin \omega t ; U_0 = 5$$

В, $U_{\text{max}} = 2\text{ В}$, $R_2 = 1\text{ кОм}$.
Вначале определяется

режим по постоянному току, т.е. определяется U_{g0} , I_{Bx0} , U_{20} . Затем на оси U берутся две точки $U_{Bx \min}=3В$ и $U_{Bx \max}=7В$ и проводятся две параллельные линии. Места пересечения характеристик B и C дают $U_{g \max}$, $U_{g \min}$, $I_{Bx \max}$, $I_{Bx \min}$.

3.2. Аналоговые усилители. Классификация. Основные характеристики и параметры усилителей

Усилителем называется устройство, предназначенное для усиления входных электрических сигналов по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Усилитель включает в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом U_{Bx} , источник питания $U_{п}$ и нагрузочное устройство с сопротивлением $Z_{н}$.

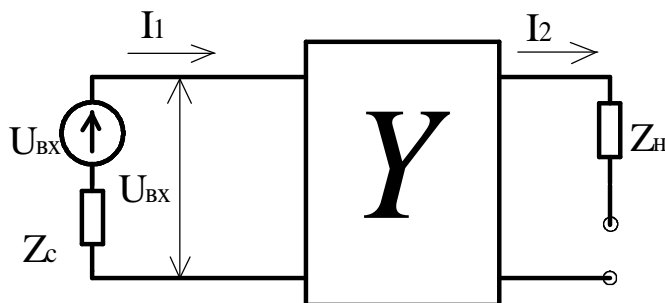


Рис. 47. Структурная схема усилительного устройства.

Входной сигнал U_{Bx} управляет параметрами нелинейного элемента. В качестве нелинейного элемента используются электровакуумные приборы, транзисторы и другие элементы.

Усилитель может иметь один или два входа и один или два выхода.

Один из входов обычно является прямым, а второй – инверсным.

Классификация усилителей производится по многим признакам:
по виду усиливаемого сигнала они делятся на усилители гармонических и импульсных сигналов;
по типу усиливаемого сигнала усилители подразделяют на усилители напряжения, тока и мощности;
по диапазону усиливаемых частот различают усилители постоянного тока и усилители переменного тока. В свою очередь усилители переменного тока в зависимости от диапазона усиливаемых частот делятся на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные и избирательные усилители. Последние обеспечивают усиление в узком диапазоне частот;
по виду нагрузки различают усилители с активной, с активно-индуктивной и емкостной нагрузкой.

Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными с гальванической, емкостной и индуктивной связью.

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

Основными характеристиками любого усилителя являются:

амплитудная характеристика, которая представляет собой зависимость: $U_{\text{ВЫХ}} = j(U_{\text{ВХ}})$. Для линейных усилителей это прямая, проходящая через начало координат;

амплитудно-частотная характеристика (АЧХ): $U_{\text{ВЫХ}} = j(f)$ отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Реально в усилителях из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей различные частоты усиливаются неодинаково;

фазово-частотная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = I(f)$ отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала;

переходная характеристика – отражает реакцию усилителя на единичный скачок входного напряжения. Переходная характеристика определяется по ее изображению на экране осциллографа при подаче на вход усилителя входного сигнала прямоугольной формы. Процесс изменения выходного сигнала может быть колебательным (кривая 1) либо апериодичным (кривая 2).

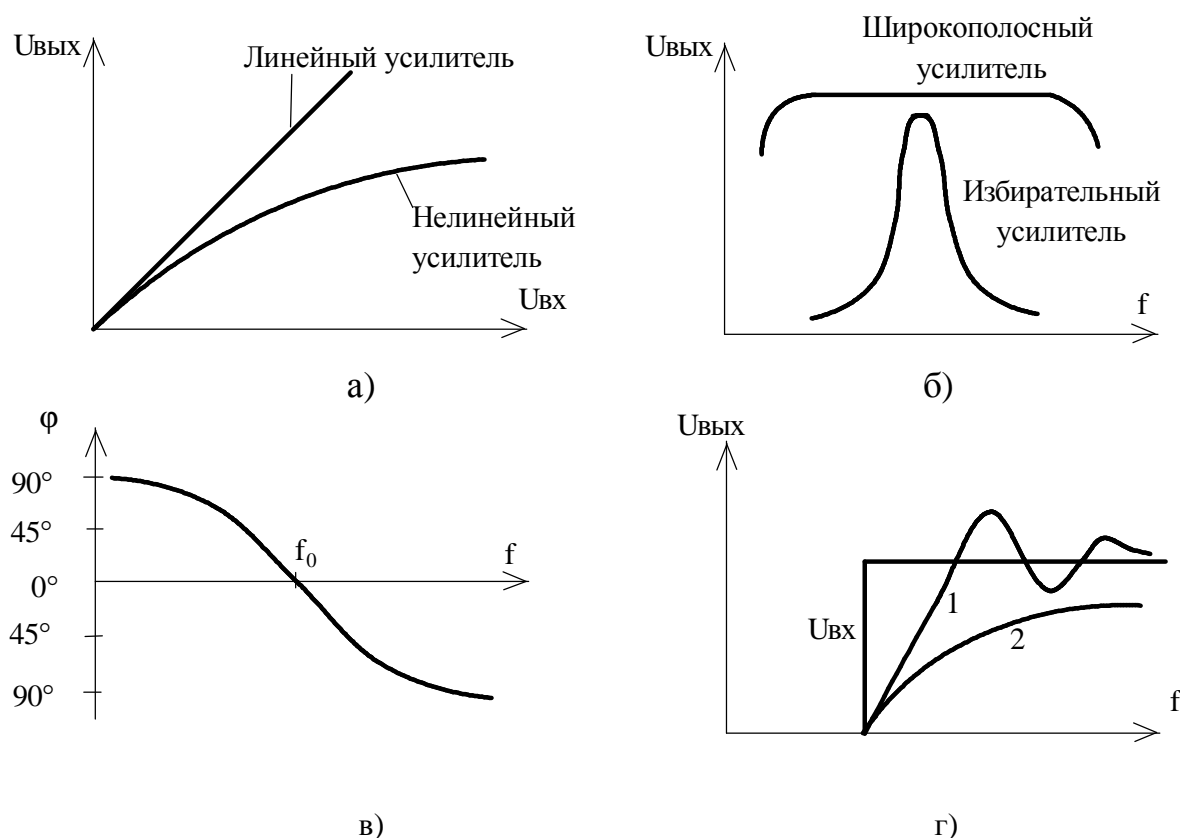


Рис. 48. Характеристики усилителя: амплитудная(а), амплитудно-частотная(б), фазово-частотная (в) и переходная (г).

Важнейшими параметрами усилителя являются:

коэффициенты усиления по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P :

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}; \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}};$$

где $I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}, P_{\text{ВХ}}, P_{\text{ВЫХ}}$ – действующие значения токов напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя.

полоса пропускания усилителя $2\Delta f$ - характеризует частотные свойства усилителя. (Измеряется на уровне $0,707$ от K_{\max} $2\Delta f = f_B - f_H$.)

Для наглядности в ряде случаев АЧХ строится в относительных единицах усиления.

$$N(f) = \frac{K(f)}{K_{\max}},$$

где $K(f)$ - коэффициент усиления на частоте f , K_{\max} - максимальный коэффициент усиления.)

Входное и выходное сопротивление необходимо учитывать при согласовании с источником входного сигнала и с нагрузкой. В общем случае значение входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией от частоты:

$$Z_{\text{вх}}(f) = \frac{U_{\text{вх}}(f)}{I_{\text{вх}}(f)}; \quad Z_{\text{вых}}(f) = \frac{U_{\text{вых}}(f)}{I_{\text{вых}}(f)}.$$

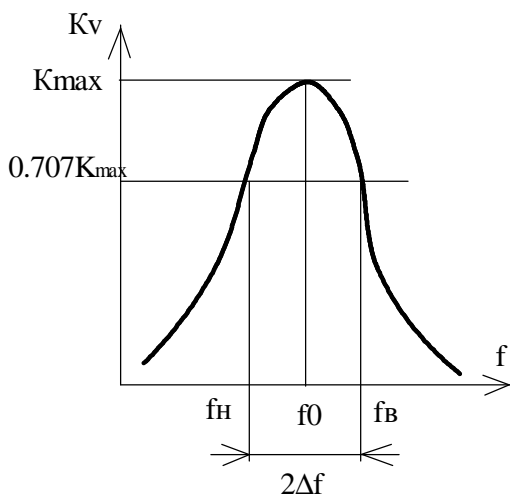


Рис. 49. АЧХ усилителя

Выходная мощность усилителя - это мощность, которая выделяется на нагрузке.

Искажения сигналов в усилителе - это отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала. Различают два вида искажений: статические (нелинейные) и динамические (линейные).

Нелинейные искажения возникают в усилителе за счет работы его на нелинейном участке ВАХ. Количественно нелинейные искажения оцениваются коэффициентом нелинейных

искажений $K_n = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1},$

где A_n - амплитуда n-й гармоники;

A_1 - амплитуда основной гармоники выходного сигнала.

Линейные искажения определяются амплитудно-частотной характеристикой усилителя и количественно оцениваются коэффициентами частотных искажений на низких и высоких частотах.

Для получения высоких коэффициентов усиления в состав усилителя входит обычно несколько каскадов. Первым каскадом как правило является предварительный усилитель, затем идут промежуточный усилитель и усилитель мощности. Предварительный усилитель обеспечивает связь источника сигнала с усилителем. Он должен иметь большое входное сопротивление для того, чтобы не ослаблять входной сигнал. Промежуточный

усилитель обеспечивает основное усиление, а усилитель мощности обеспечивает заданную выходную мощность.

При построении усилительных устройств наибольшее распространение получили каскады на биполярных и полевых транзисторах, включенных с ОЭ (ОУ) или с ОК (ОС).

3.3. Обратная связь в усилителях

Обратной связью называется такая связь, при которой сигнал с выхода усилителя через электрическую цепь поступает на его входы. Обратная связь изменяет свойства усилителя, поэтому она широко используется для получения требуемых параметров усилителя.

Структурная схема усилителя, охваченного обратной связью, приведена ниже.

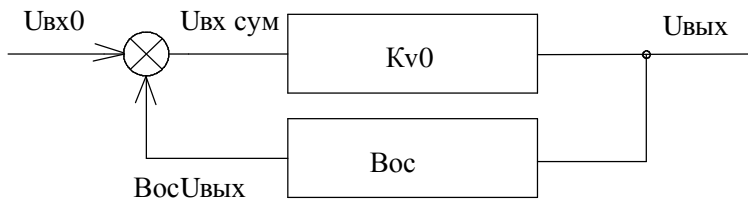


Рис. 50. Структурная схема усилителя с обратной связью

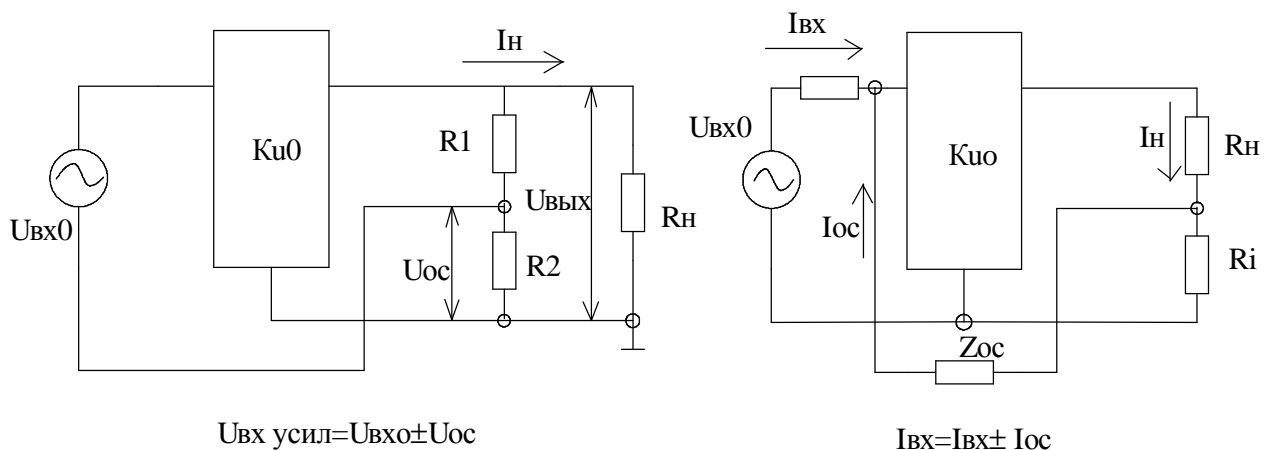
В общем случае обратная связь в усилителе может быть положительной и отрицательной. Если сигнал обратной связи по фазе совпадает с входным, то связь называется положительной. В этом

случае: $U_{\text{ВЫХ}} = K_{U0} U_{\text{ВХ.СУММ.}}$; $U_{\text{ВХ.СУММ.}} = U_{\text{ВХ0}} - V_{\text{ОС}} U_{\text{ВЫХ}}$;

$$K_{U.\text{полож}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ0}}} = \frac{K_{U.0}}{(1 - V_{\text{ОС}} K_{U.0})};$$

где K_{U0} – коэффициент усиления усилителя без обратной связи;

$K_{U.\text{полож}}$ – коэффициент усиления усилителя с положительной



а) б)
Рис. 51. Обратная связь по напряжению (а) и по току (б).

обратной связью;

v_{oc} – коэффициент передачи в цепи обратной связи.

Полученное выражение показывает, что введение в усилитель положительной обратной связи увеличивает коэффициент усиления. При $v_{oc} = 1/K_{U0}$, усиление равно ∞ .

Отрицательная обратная связь возникает, если фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного составляет 180° . $U_{вых} = K_{U0} U_{вх.сум.}$;

$$U_{вх.сумм.} = U_{вх0} - v_{oc} U_{вых}; \quad K_{U.отр} = \frac{K_{U.0}}{(1 + v_{oc} K_{U.0})}.$$

Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя. По способу получения сигнала обратной связи принято различать обратную связь по напряжению и по току. (рис. 51)

Обратная связь может быть частотозависимой и частотонезависимой. В обратной связи могут использоваться как линейные элементы, так и нелинейные.

В электронных усилителях, как правило, применяется отрицательная обратная связь. Несмотря на уменьшение коэффициента усиления, отрицательная обратная связь позволяет улучшить стабильность работы схемы при изменении параметров усилителя и напряжения питания; снижает уровень нелинейных искажений и собственных помех, увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление; расширяет полосу пропускания усилителя.

Положительная обратная связь применяется в автогенераторах.

В некоторых усилителях для получения требуемой АЧХ используется одновременно и положительная и отрицательная обратные связи.

3.4. Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером

Основными элементами схемы являются транзистор VT и резистор в цепи коллектора R_k . Остальные элементы играют вспомогательную роль. Резисторы R_1 и R_2 создают напряжение смещения $U_{см}$ на базе транзистора и тем самым обеспечивают заданный режим работы усилителя. Конденсаторы C_g разделяют переменную и постоянную составляющие входного и выходного сигналов.

При отсутствии входного сигнала выходной ток и выходное напряжение постоянны: $I_k = I_{k0}$ и $U_{вых} = U_{вых.0}$.

При поступлении на вход сигнала $U_{вх}$ он усиливается в K_U раз и снимается с выхода в противофазе по отношению к входному сигналу.

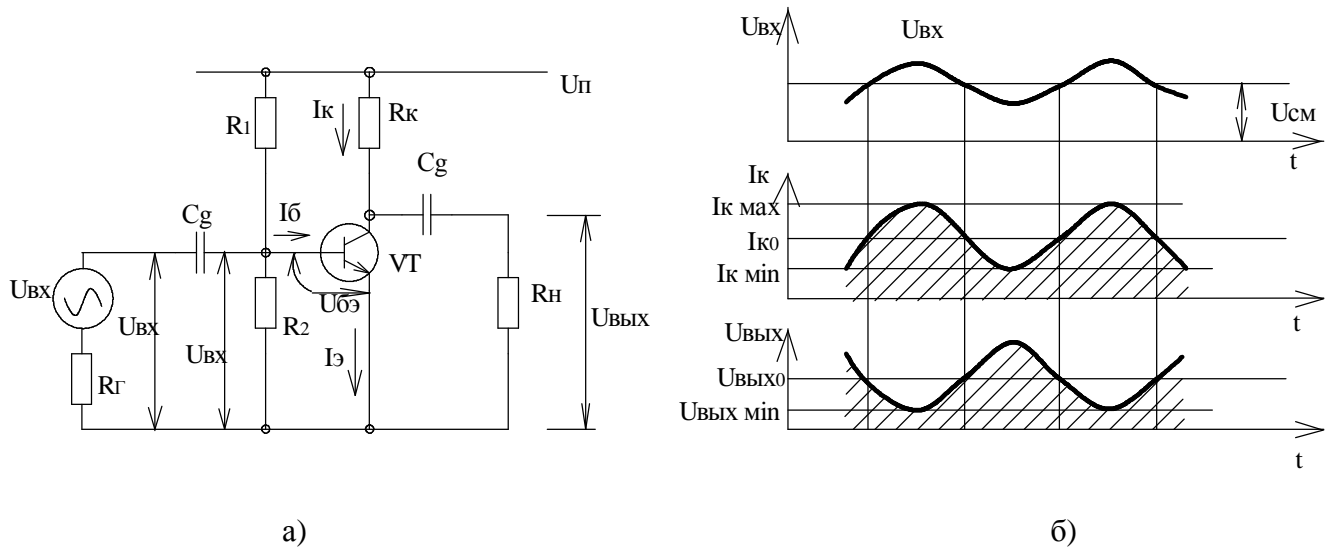


Рис. 52. Усилительный каскад с ОЭ (а), временная диаграмма его работы (б).

Для усилителя с ОЭ $R_{вх} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{вх.э}$, где $R_{вх.э} \cong bR_{вх.б}$. Обычно $R_1 \parallel R_2 \geq (2 \div 5)R_{вх.б}$. $R_{вх.б}$ не превышает $1 \div 3$ кОм.

Коэффициент усиления по току $K_I = b \frac{R_k \parallel R_H}{R_H}$.

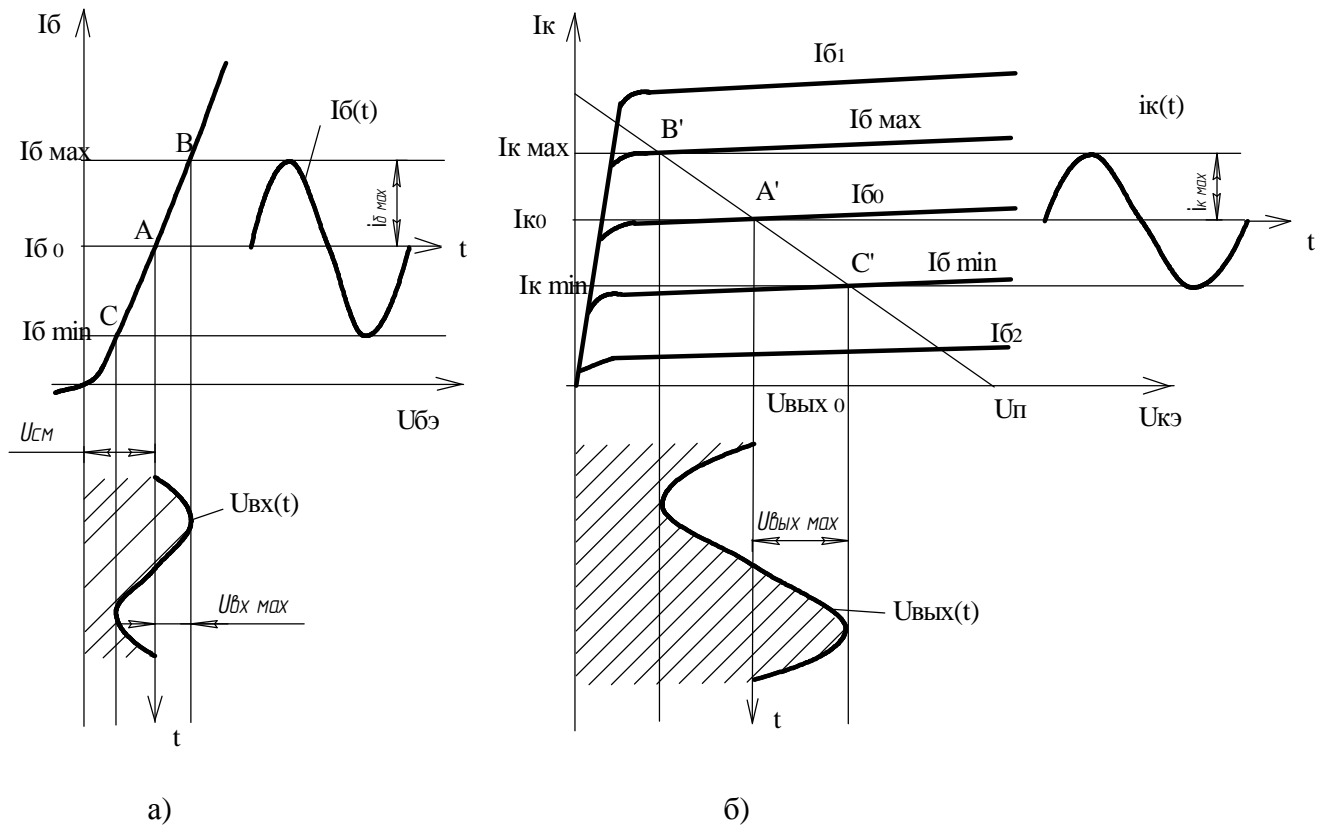


Рис. 53. Входная(а) и выходная(б) характеристики усилителя в режиме работы А.

Таким образом, каскад с ОЭ имеет большой коэффициент усиления по току и при $R_k \gg R_H$ стремится к b .

Коэффициент усиления по напряжению $K_U = b \frac{R_k \parallel R_H}{R_\Gamma + R_{вхб}}$

Коэффициент усиления K_U возрастает с увеличением b и R_H . Обычно $K_U \approx 10 \div 100$ и выше.

Коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U \cdot K_I$ составляет $(0,2 - 5) \cdot 10^3$.

Выходное сопротивление каскада с ОЭ $R_{ввых} = R_k \parallel r_{кэ}$. Обычно $r_{кэ} \gg R_k$ и $R_{ввых} \approx R_k$.

Усилительный каскад с ОЭ осуществляет поворот по фазе на 180° выходного напряжения относительно входного.

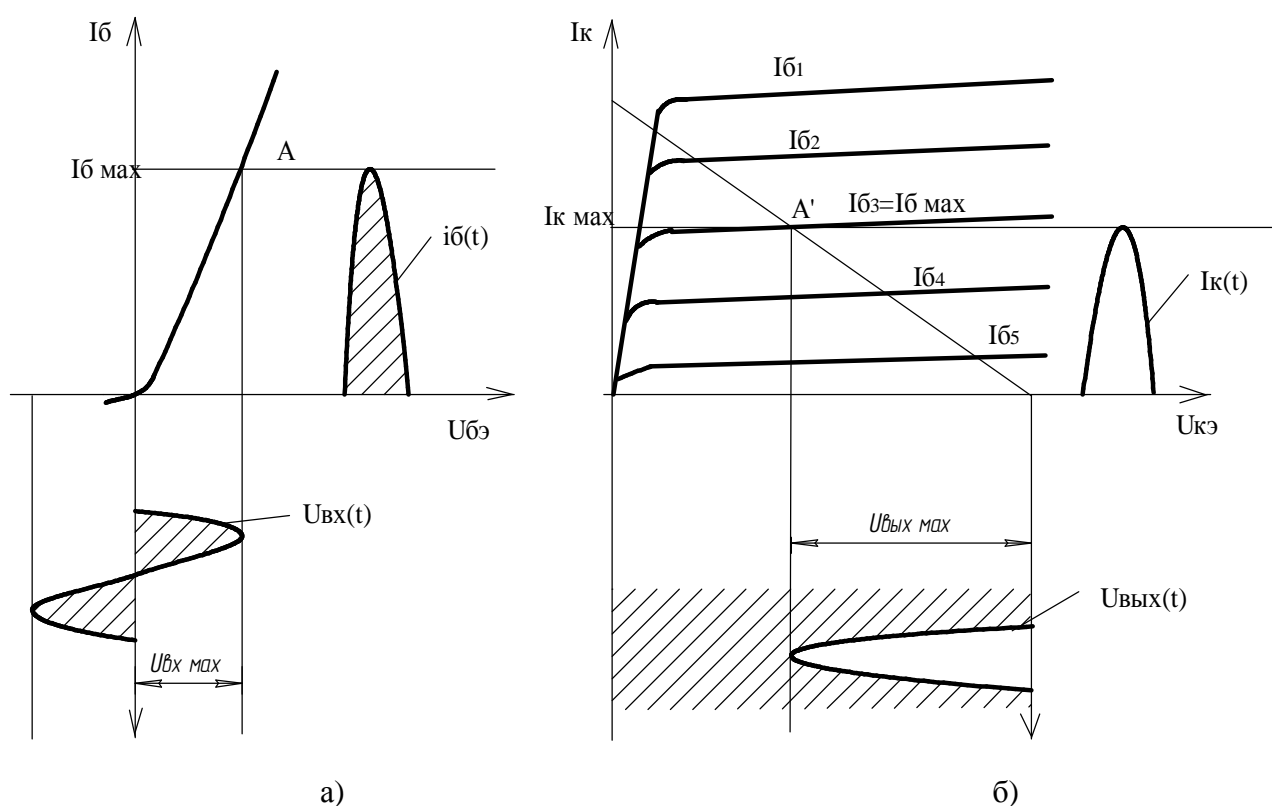


Рис. 54. Входная (а) и выходная (б) характеристики усилителя в режиме работы В

Основные режимы работы усилителя. В зависимости от величины смещения на базе транзистора $U_{см}$ различают следующие режимы работы усилителя: А, В, АВ, С, D.

Режим А характеризуется выбором рабочей точки на линейном участке входной характеристики (рис. 53). В исходном состоянии транзистор открыт напряжением смещения $U_{см}$ и в цепи коллектора протекает ток $I_{к0}$. При поступлении входного сигнала на выходе усилителя появляется выходной сигнал в противофазе по отношению ко входному.

Режим А характерен тем, что форма выходного сигнала $U_{\text{вых}}(t)$ повторяет форму входного сигнала $U_{\text{вх}}(t)$ за счет работы транзистора в активной зоне без захода в область насыщения и отсечки.

Режим характеризуется минимальными нелинейными искажениями.

В это же время работа усилителя в режиме А характеризуется низким КПД, который теоретически не может превышать 0,5, что объясняется постоянным током $I_{\text{к0}}$ вне зависимости от наличия или отсутствия входного сигнала. Поэтому такой режим используется только в маломощных каскадах, в которых необходимо иметь минимальные нелинейные искажения.

На основе характеристик рис.53, можно пояснить графоаналитический метод расчета усилителя. По графикам можно определить:

$$\text{коэффициент усиления по току } K_I = \frac{I_{\text{к. max}} - I_{\text{к0}}}{I_{\text{б. max}} - I_{\text{б0}}} = \frac{i_{\text{к. max}}}{i_{\text{б. max}}};$$

$$\text{коэффициент усиления по напряжению } K_U = \frac{U_{\text{вых. max}}}{U_{\text{вх. max}}};$$

$$\text{коэффициент усиления по мощности } K_P = \frac{U_{\text{вых. max}} \cdot i_{\text{к. max}}}{U_{\text{вх. max}} \cdot i_{\text{б. max}}}.$$

Режим В характеризуется тем, что напряжение смещения $U_{\text{см}}=0$, а следовательно, рабочая точка выбирается в самом начале входной характеристики. Особенностью режима В является то, что при отсутствии входного сигнала отсутствуют базовые и коллекторные токи.

При поступлении входного сигнала ток в коллекторе имеет пульсирующий характер и протекает в течении половины периода. Режим В характеризуется высоким КПД, который может достигать 70%, однако выходной сигнал сильно искажается. Поэтому такой режим применяется только в двухтактных усилителях.

Режим АВ занимает промежуточное положение между режимом А и В. Он характеризуется небольшим напряжением смещения $U_{\text{см}}$ меньшими нелинейными искажениями по сравнению с режимом А. Режим АВ используется в высококачественных двухтактных усилителях мощности.

Режим С характеризуется тем, что рабочая точка на входной характеристике сдвинута влево от начала координат. Следовательно, более половины периода транзистор находится в закрытом состоянии. Режим С характеризуется высоким КПД, большими нелинейными искажениями и применяется в генераторах частоты.

Режим D характеризуется тем, что усилительный элемент может находиться в открытом (режим насыщения) либо в закрытом (режим отсечки) состояниях.

Таким образом, ток в выходной цепи может принимать только два значения: $I_{K.max}=I_{нас.}$ и $I_{K.min}\approx 0$. Скорость перехода из одного состояния в другое характеризует быстродействие усилительного элемента. Обычно $U_{нас.}<1В$,

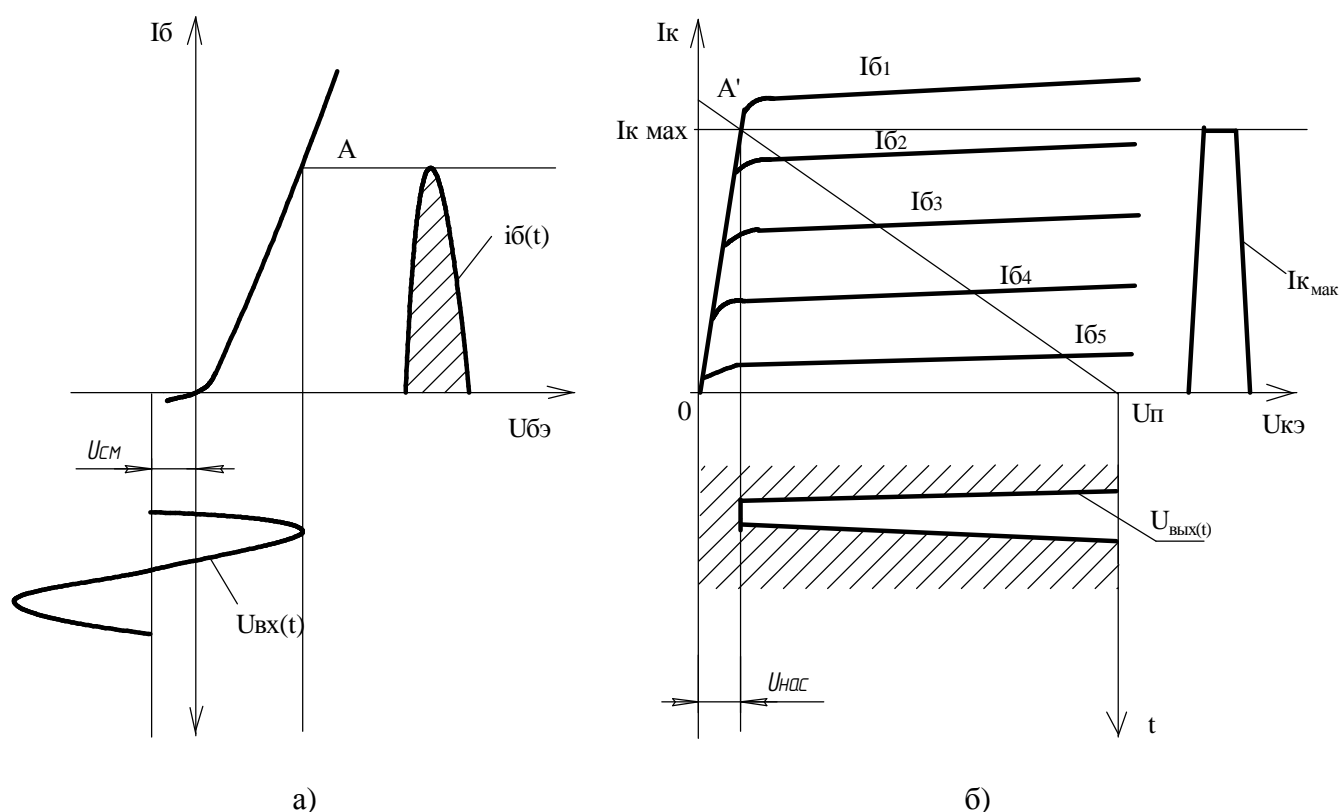


Рис. 55. Входная (а) и выходная (б) характеристики усилителя в режиме работы D

поэтому КПД такого усилительного каскада близок к 1.

Режим работы D, который называют еще ключевым режимом, применяется в импульсных схемах.

Методы стабилизации работы усилителя по схеме с ОЭ.

Основные параметры каскада усилителя с ОЭ зависят от внешних возмущений и в первую очередь от температуры. При изменении температуры изменяется обратный ток $I_{K.обр.}$, напряжение $U_{б.э.}$, коэффициенты α и b . Все эти изменения принято характеризовать понятием *дрейф нуля* усилителя. Внешние воздействия, изменяя ток покоя транзистора, выводят транзистор из заданного режима. Это особенно опасно для усилителей, работающих в режиме А, т.к. транзистор может перейти в нелинейную область характеристики.

Существуют три основных метода стабилизации работы транзисторного каскада: термокомпенсация, параметрическая стабилизация и введение отрицательной обратной связи.

Метод термокомпенсации заключается в том, что отдельные термозависимые элементы или целиком каскады помещаются в термокамеру с постоянной температурой.

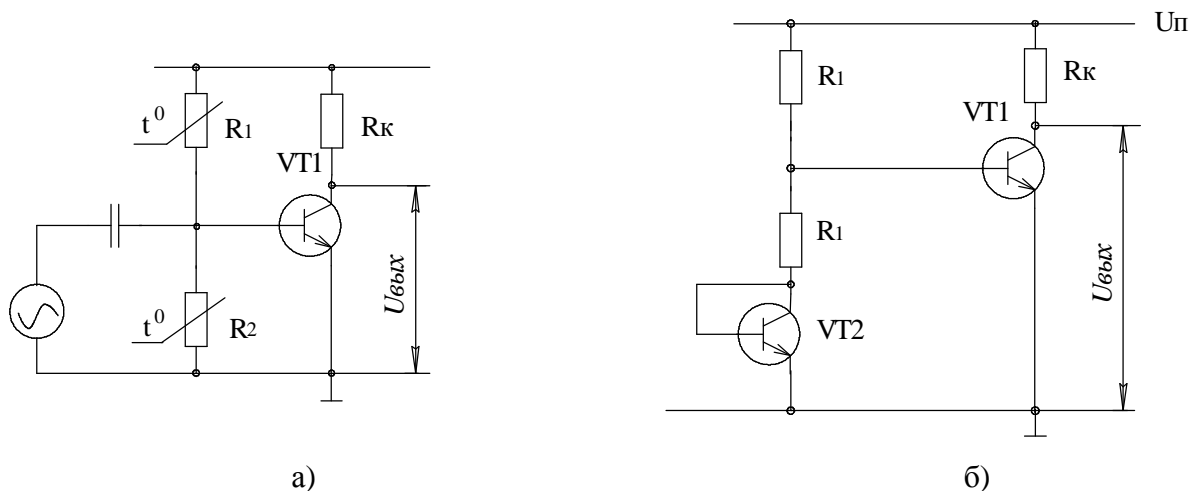


Рис. 56. Параметрическая стабилизация с использованием терморезистора (а) и полупроводникового транзистора (б).

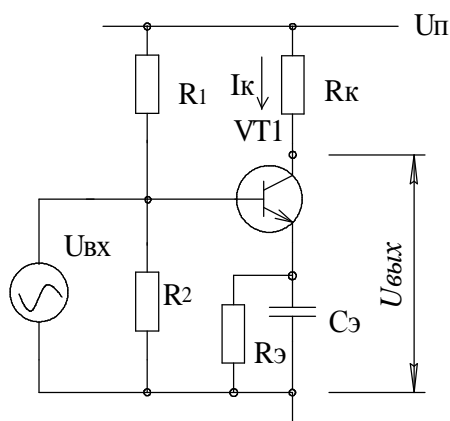


Рис. 57. Транзисторный усилитель с отрицательной ОС по току.

Метод параметрической стабилизации основан на введении в схему элементов, которые компенсируют изменение параметров схемы при внешних воздействиях среды. Например, воздействие температуры может быть уменьшено введением в схему полупроводниковых элементов или терморезисторов.

Метод введения отрицательной обратной связи является более распространенным. Отрицательная обратная связь (ООС) осуществляется за счет введения в цепь эмиттера

резистора R_3 . Ток эмиттера, протекая по резистору R_3 , создает на нем падение напряжения $U_{\text{оос}}=I_3R_3$. Это напряжение автоматически складывается с напряжением на базе, однако, направлено встречно и компенсирует температурные изменения напряжения на базе транзистора.

Введение ООС увеличивает входное сопротивление усилительного каскада, расширяет полосу пропускания, уменьшает линейные и нелинейные искажения, делает работу схемы более устойчивой.

3.5. Усилительный каскад по схеме с общим коллектором

Усилитель на транзисторе с ОК более часто называют эмиттерным повторителем. Он представляет собой каскад со 100%-й последовательной отрицательной обратной связью по току. В отличие от усилителя по схеме с ОЭ, схема с ОК (рис.58) не инвертирует входной сигнал.

Рассмотрим основные характеристики эмиттерного повторителя:

коэффициент усиления по току $K_I \approx (1 + b) \frac{R_3 \parallel R_H}{R_H}$;

коэффициент усиления по напряжению с учетом 100%-й ООС ($V_{oc}=1$) определяется $K_U = \frac{K_{U0}}{(1 + K_{U0} b_{oc})} < 1$;

входное сопротивление определяется $R_{вх.ок} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{вх}$.

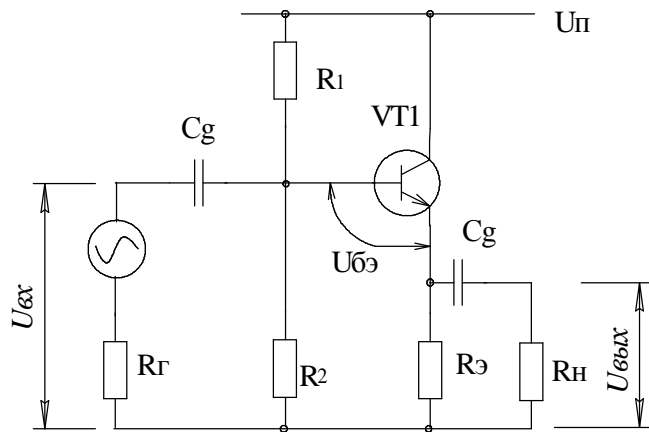


Рис. 58. Усилительный каскад с ОК

При больших сопротивлениях R_1 и R_2 входное сопротивление $R_{вх.ок} = (b + 1)R_3 \parallel R_H$.

Обычно в практических схемах $R_{вх}$ достигает 200-300 кОм при $R_3=10$ кОм. Выходное сопротивление повторителя $R_{вых} \approx r_э$ и составляет десятки Ом. Эмиттерные повторители используются, в основном, в качестве согласующего элемента.

На базе транзисторного усилителя с ОЭ можно построить

источник постоянного тока. Для этого необходимо обеспечить постоянный базовый ток транзистора или ввести постоянную обратную связь по току.

Для повышения коэффициента усиления транзисторного каскада с ОЭ в качестве резистора R_k часто используется нелинейный элемент, статическое сопротивление которого значительно меньше его дифференциального сопротивления. В этом случае падение напряжения на этом элементе от протекания тока будет определяться его статическим сопротивлением, а отклонение выходного напряжения - динамическим сопротивлением. Роль нелинейного элемента выполняет транзистор.

Для увеличения коэффициента $h_{21э}$ транзистора можно использовать каскадное включение нескольких транзисторов. Такие транзисторы называются составными транзисторами или схемами Дарлингтона.

В составном транзисторе суммарный коэффициент передачи тока равен произведению токов передачи отдельных транзисторов $h_{21\Sigma} = h_{21э1} \cdot h_{21э2}$.

3.6. Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель представляет собой мостовые усилительные каскады параллельного типа. Они обладают высокой стабильностью параметров при воздействии различных дестабилизирующих

факторов, большим коэффициентом усиления дифференциальных сигналов и высокой степенью подавления синфазных помех. Усилитель состоит из двух каскадов, у которых имеется общий эмиттерный резистор (рис.59).

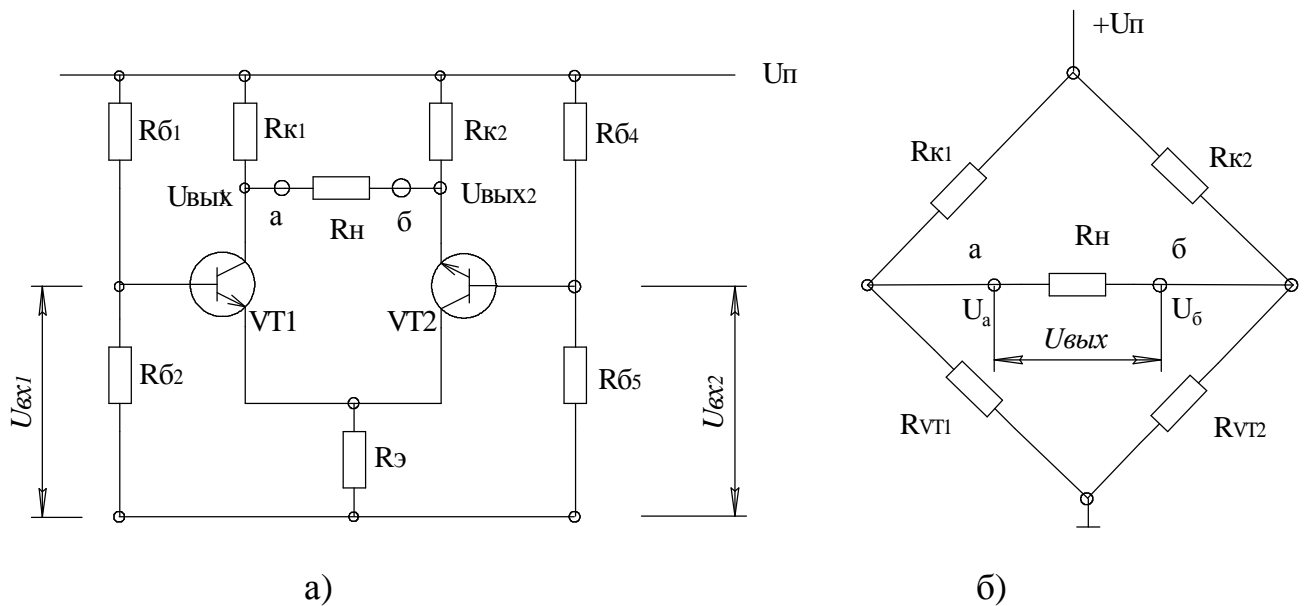


Рис. 59. Дифференциальный усилительный каскад (а) и его эквивалентная схема (б)

Элементы схемы образуют мост, в одну диагональ которого включен источник питания U_n , а в другую сопротивление нагрузки R_n . Для балансировки моста ($U_{\text{ВЫХ}}=0$) необходимо, чтобы

$$U_a = \left(U_n R_{VT1} \right) / (R_{K1} + R_{VT1}) = U_b = U_n R_{VT2} / (R_{K2} + R_{VT2}) \text{ или } R_{VT1} R_{K2} = R_{VT2} R_{K1}.$$

где R_{VT1} и R_{VT2} выходные сопротивления транзисторов VT1 и VT2.

Таким образом, можно утверждать, что если элементы схемы будут полностью идентичны, то выходное напряжение будет оставаться постоянным.

$$U_{\text{ВЫХ}} = \Delta I_{K1} R_{K1} - \Delta I_{K2} R_{K2}.$$

Дифференциальный усилитель имеет два входа и два выхода поэтому для выходного напряжения можно записать $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}} = -K_1 U_{\text{ВХ1}} - (-K_2 U_{\text{ВХ2}})$,

где K_1 и K_2 соответственно коэффициенты усиления каскадов на транзисторах VT1 и VT2.

В общем случае, если $U_{\text{ВХ1}} = -U_{\text{ВХ2}}$ и $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}} = 2U_{\text{ВХ1}}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} (K_1 + K_2) / 2 = -U_{\text{ВХ}} K_{\text{гy}},$$

где $K_{\text{гy}} = (K_1 + K_2) / 2$ - коэффициент усиления дифференциального усилителя.

В отличие от полезного сигнала, который поступает на входы дифференциального усилителя в противофазе, на входы усилителя действуют сигналы, совпадающие по фазе. Такие сигналы называются синфазными. Появление данных сигналов обусловлено действием различных дестабилизирующих факторов, например, изменением температуры

окружающей среды, изменением питающих напряжений наводками внешних электромагнитных полей. Для идеального дифференциального усилителя синфазные сигналы полностью подавляются. В реальных усилителях из-за не идентичности каскадов подавление будет не полным и характеризуется коэффициентом подавления синфазных помех $K_{\text{псф}}$.

Величина $K_{\text{псф}}$ в современных дифференциальных усилителях достигает $10^4 \div 10^6$. Коэффициент $K_{\text{псф}}$ в значительной степени характеризует дрейф нуля усилителя, т.е. изменение выходного напряжения при постоянном входном сигнале. Для снижения дрейфа нуля производят подбор пар транзисторов с одинаковыми параметрами и увеличение R_3 . Для увеличения R_3 в эмиттерную цепь ставится не пассивный резистор, а нелинейный двухполюсник, например транзисторный источник тока на биполярном или полевом транзисторе. Эти схемы при небольшом статическом сопротивлении обладают большим дифференциальным сопротивлением.

Для увеличения коэффициента усиления в современных дифференциальных усилителях вместо резисторов R_k используют активную нагрузку, выполненную на транзисторах. Входное сопротивление дифференциального усилителя может быть существенно увеличено при использовании в каскадах полевых транзисторов.

3.7. Многокаскадные усилители

Коэффициент усиления одиночных транзисторных каскадов не превышает нескольких десятков. Поэтому для усиления слабых сигналов применяются многокаскадные усилители. Многокаскадные усилители строятся путем последовательного соединения отдельных усилительных каскадов (рис. 60).

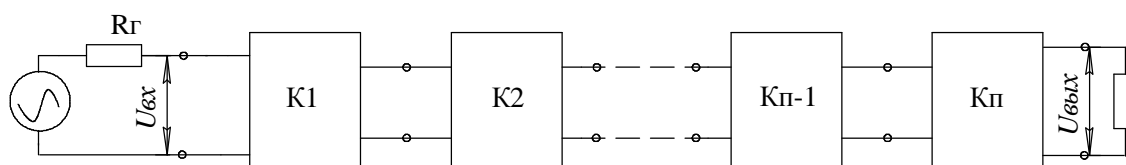


Рис. 60. Структурная схема многокаскадного усилителя

В многокаскадных усилителях выходной сигнал предыдущего усилителя является входным сигналом для последующего каскада. Входное сопротивление многокаскадного усилителя определяется входным сопротивлением первого каскада, а выходное – выходным сопротивлением последнего каскада. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления всех каскадов, входящих в него:

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \dots \cdot K_{Un},$$

где $K_{U1}, K_{U2}, \dots, K_{Un}$ – коэффициенты усиления отдельных каскадов.

Важными характеристиками многокаскадного усилителя являются его амплитудно-частотная и амплитудная характеристики. Отдельные каскады могут иметь различные АЧХ. Общая АЧХ многокаскадного усилителя определяется всеми входящими в его состав каскадами.

Связь отдельных каскадов друг с другом осуществляется с помощью конденсаторов, трансформаторов или непосредственно. В соответствии с этим различают многокаскадные усилители с емкостной, индуктивной или гальванической связями. Ниже приведен пример многоканального усилителя с емкостными связями.

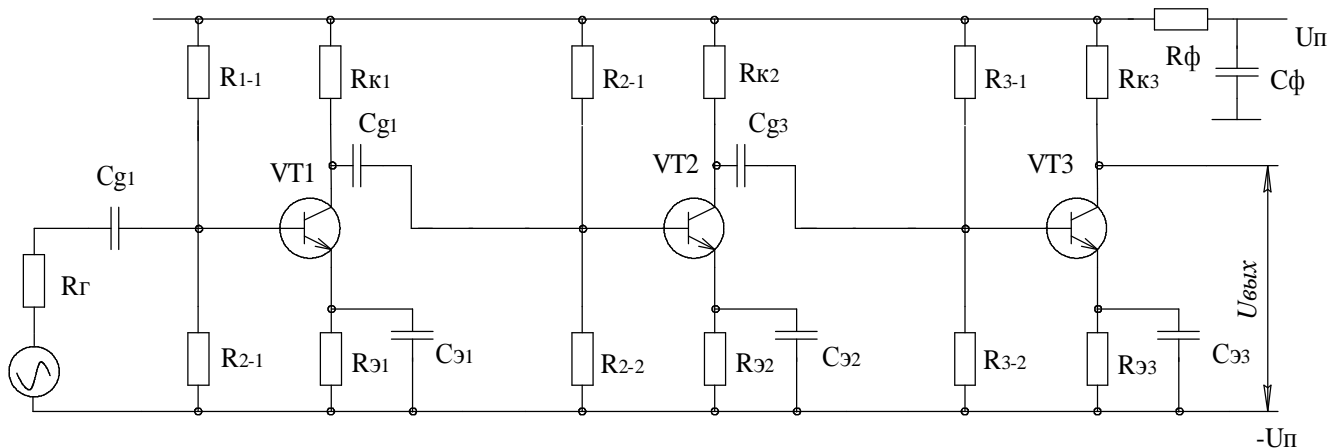


Рис. 61. Схема многокаскадного усилителя с емкостными связями.

Усилитель состоит из трех каскадов. Разделительные емкости C_g не пропускают постоянную составляющую коллекторного напряжения в базовую цепь последующего каскада. Элементы $R_э$, $C_э$ стабилизируют работу каскада в широком интервале температур.

Расчет многокаскадного усилителя производят, начиная с окончного каскада к первому. Оконечный каскад рассчитывается по обеспечению требуемой мощности или тока (напряжения). Количество каскадов определяется общим коэффициентом усиления. В многокаскадных усилителях широко используются обратные связи, с помощью которых достигаются требуемые технические параметры.

3.8 Усилители постоянного тока (УПТ)

Усилители постоянного тока усиливают не только переменную составляющую сигнала, но и его постоянную составляющую. Поэтому их АЧХ имеет вид (рис. 62). Усилители постоянного тока должны иметь большой коэффициент усиления, небольшое напряжение смещения и малый дрейф. Обычно УПТ состоит из нескольких каскадов с непосредственными связями.

По принципу действия УПТ подразделяются на два основных типа: УПТ прямого усиления и УПТ с преобразованием сигнала.

УПТ прямого усиления представляют собой многокаскадный усилитель с непосредственными связями. Для уменьшения дрейфа в качестве первого каскада применяется дифференциальный усилитель. Для питания УПТ используются два разнополярных источника напряжения.

В УПТ с преобразованием сигнала входной сигнал вначале преобразуется в сигналы переменного тока. Далее переменный сигнал усиливается УНЧ и демодулируется. Ввиду того, что усиление сигналов происходит в УНЧ по переменному току, дрейф практически отсутствует.

К недостаткам таких УПТ являются наличие в выходном сигнале переменной составляющей, которую можно снизить установкой дополнительного фильтра, и недостаточно широкая полоса пропускания.

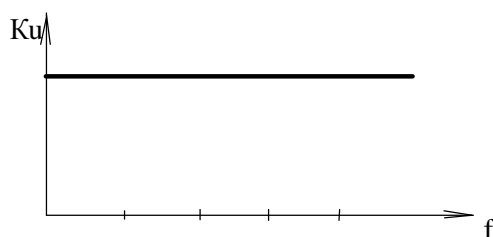
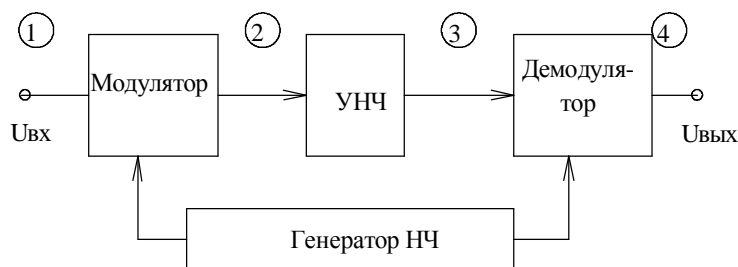


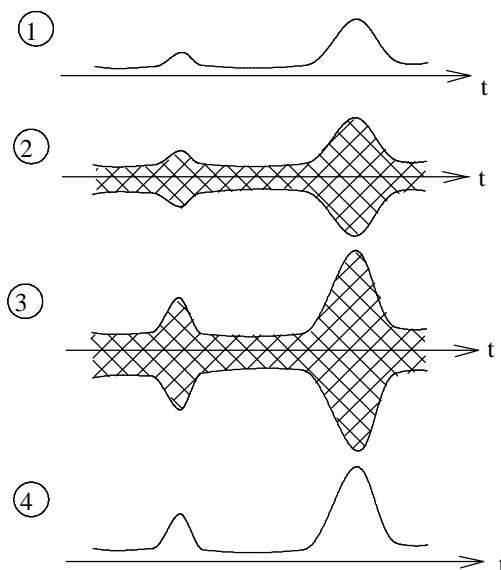
Рис. 62. АЧХ усилителя постоянного тока.

пропускания.

В настоящее время УПТ выполняются в виде интегральных схем. УПТ широко используются в электронных вычислительных устройствах, стабилизаторах, системах автоматического управления.



а)



б)

Рис. 63. Блок-схема УПТ с преобразованием сигнала (а) и временная диаграмма (б).

3.9. Избирательные усилители

Избирательные усилители предназначены для усиления сигналов в узкой полосе частот. По принципу действия различают избирательные усилители: резонансные и усилители с обратной связью.

В резонансных усилителях в качестве нагрузки применяется колебательный контур, умеющий большое сопротивление на резонансной частоте f_0 и малое для других частот.

Избирательные свойства усилителя оцениваются добротностью Q :

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f},$$

где f_0 – резонансная частота контура;

$2\Delta f$ – полоса пропускания контура.

Резонансные усилители обладают высокой помехозащищенностью и используются часто в измерительных и в приемопередающих устройствах на высоких и средних частотах. На более низких частотах избирательные

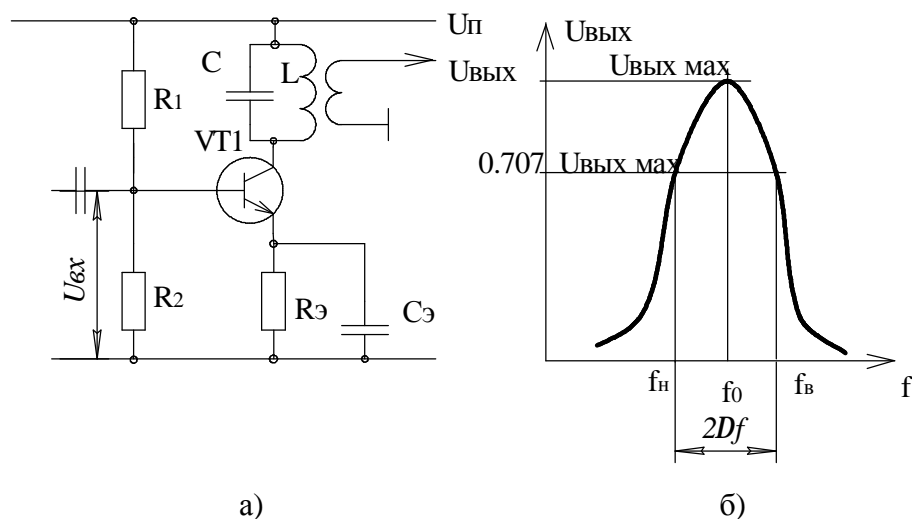


Рис. 64. Схема резонансного усилителя (а) и его АЧХ (б).

усилители с резонансными контурами становятся слишком громоздкими. Поэтому на низких частотах обычно используются избирательные усилители с обратными связями с использованием частотно-избирательных фильтров RC-типа в цепях обратной связи. На рис. 65 приведена структурная схема такого усилителя с двойным T-образным мостом, включенным в цепь обратной связи усилителя.

Резонансная частота такого усилителя определена по формуле: $f_0 = \frac{1}{2pRC}$.

На частоте f_0 сопротивление T-образного моста максимально, а отрицательная обратная связь минимальна. Следовательно, усиление будет максимальным. На частотах отличающихся от f_0 сопротивление моста уменьшается и за счет отрицательной обратной связи усиление усилителя уменьшается.

3.10 Усилители мощности

Усилители мощности обычно являются выходными каскадами многокаскадных усилителей и предназначены для получения в нагрузке большой мощности. В связи с этим такие усилители должны иметь высокий

КПД и минимальные нелинейные искажения. Усилители мощности выполняются на мощных биполярных и полевых транзисторах, включенных по схеме с ОЭ или с ОК.

По способу включения нагрузки усилители мощности могут быть трансформаторными и бестрансформаторными, а также одноконтными и двухконтными. Одноконтные усилители работают обычно в режиме А, а

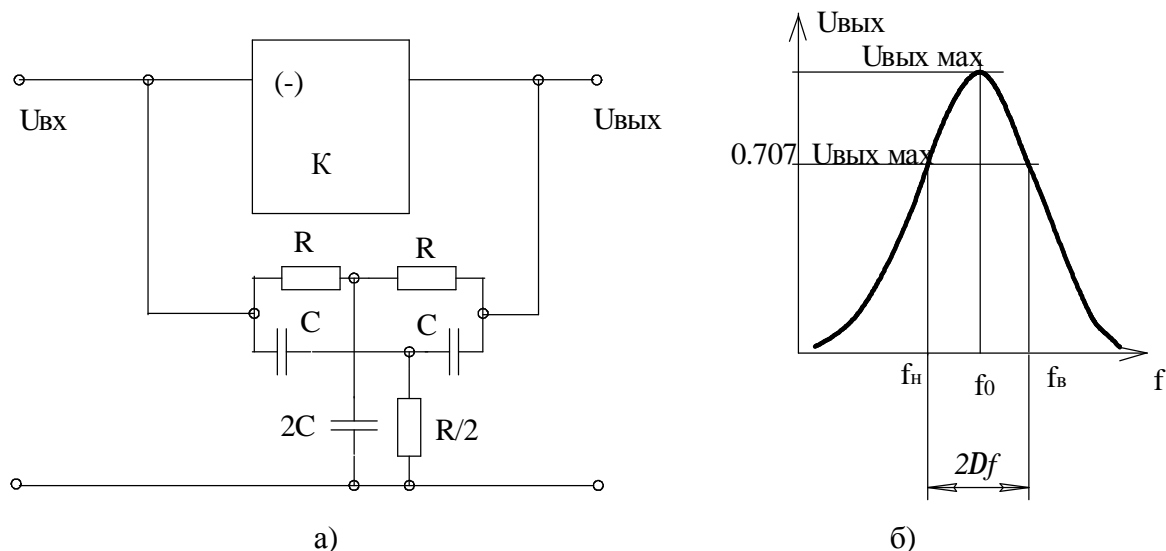


Рис. 65. Структурная схема избирательного усилителя с частотно-избирательными фильтрами (а) и его АЧХ (б).

двухконтные – в режиме В или АВ. Схема одноконтного усилителя мощности с трансформаторным выходом, работающего в режиме А, приведена на рис.66.

Одноконтный усилитель имеет низкий КПД и используется редко. Расчет такого каскада производят графоаналитическим методом с использованием динамических характеристик.

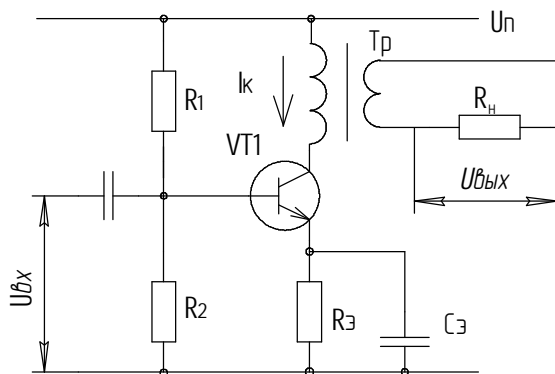


Рис. 66. Усилитель мощности одноконтный с трансформаторным выходом

Схема двухконтного трансформаторного усилителя мощности приведена на рис.67.

Усилитель выполнен на двух транзисторах: VT1 и VT2. В коллекторные цепи транзисторов подключен выходной трансформатор Tr2. Трансформатор Tr1 обеспечивает подачу входного сигнала $U_{вх}$ на

базы транзисторов. Каскад работает в режиме В. Следовательно, при отсутствии сигнала токи в транзисторах отсутствуют, и к коллекторам транзисторов прикладывается напряжение U_n .

При поступлении на вход усилителя сигнала $U_{вх}$ каждая полуволна открывает поочередно один из транзисторов, и через первичную обмотку трансформатора $Tr2$ протекает ток полуволны. Таким образом, процесс усиления входного сигнала происходит в два такта. КПД двухтактного трансформаторного усилителя по сравнению с одноктактным увеличивается примерно в 1,5 раза и достигает максимального значения 0,785.

Из-за нелинейности начального участка входной характеристики возникают нелинейные искажения (рис. 67, б). Если подать на базу транзисторов небольшое напряжение смещения $U_{см}$, то нелинейные искажения можно свести к минимуму (рис. 67, в).

Бестрансформаторные усилители мощности позволяют упростить схемы усилителей мощности за счет исключения крупногабаритных трансформаторов.

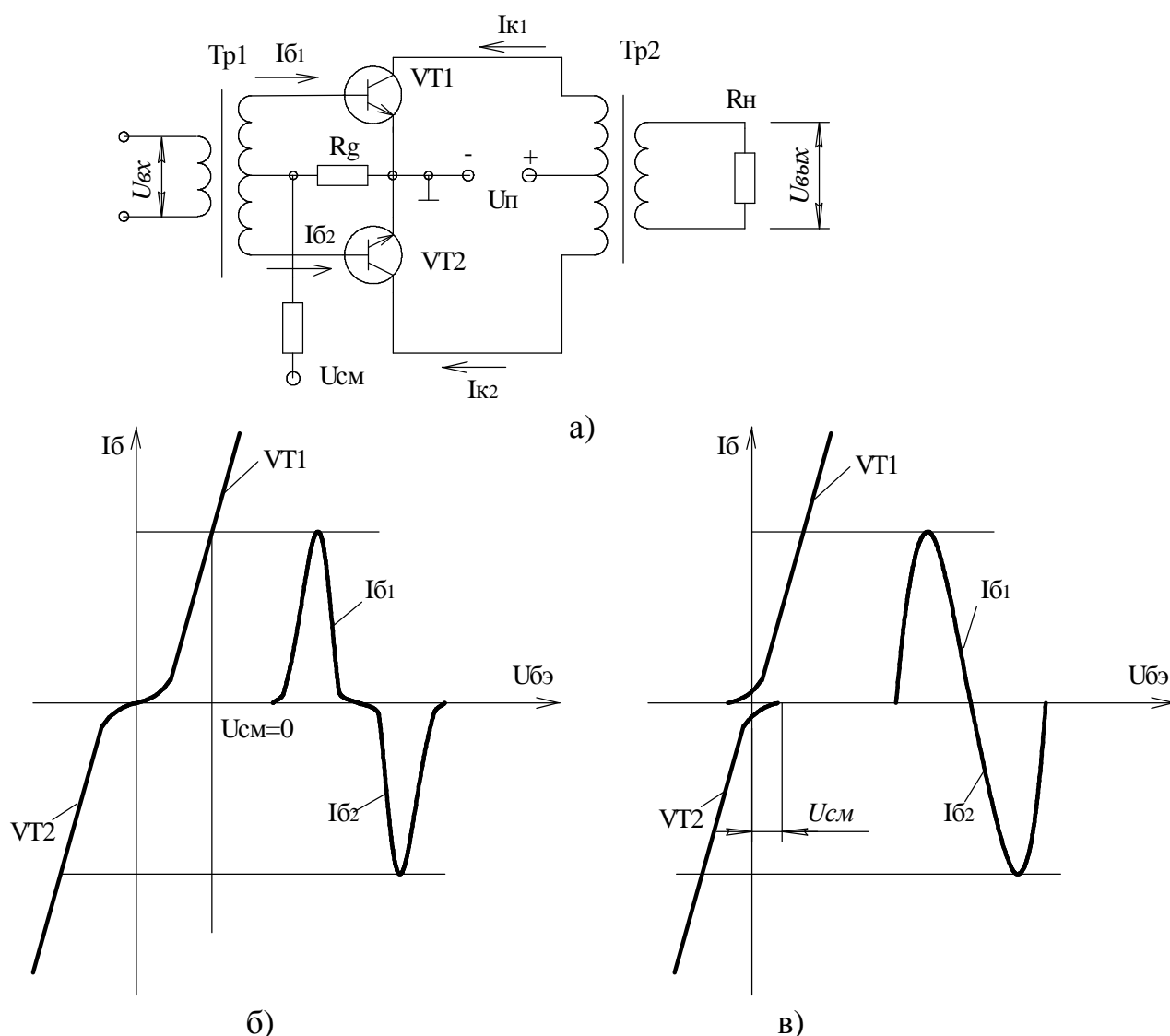


Рис. 67. Усилитель мощности двухтактный с трансформаторным выходом (а), входная характеристика для режима В (б), для режима АВ (в)

Наибольшее распространение получили две схемы бес трансформаторных

усилителей мощности: на транзисторах разного типа проводимости и на транзисторах одного типа проводимости (рис. 68).

В каждый полупериод входного напряжения ток формируется одним из транзисторов. Усилитель (б) используется, как правило, в импульсных схемах.

3.11. Операционные усилители (ОУ)

Операционный усилитель – это многокаскадный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления. Для идеального операционного

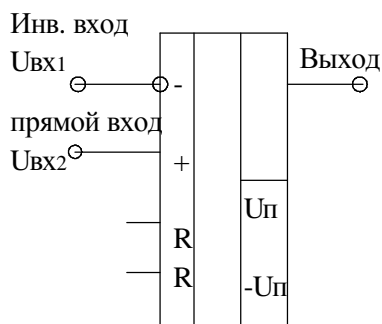


Рис. 69. Графическое изображение ОУ

усилителя $K_U \rightarrow \infty$, $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$, $\Delta f \rightarrow \infty$. ОУ имеет два или три каскада. Первым каскадом является дифференциальный усилитель, вторым – усилитель напряжения и последним – усилитель мощности. Питание ОУ производится от двух разнополярных источников питания. ОУ имеет два входа (прямой и инверсный) и один выход, а также ряд дополнительных выводов для балансировки и для коррекции АЧХ. Условное графическое изображение ОУ приведено на рис. 69. Выходное

напряжение связано с входным напряжением $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ соотношением: $U_{вых} = K_{U0}(U_{вх1} - U_{вх2})$, где K_{U0} – коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Операционные усилители в настоящее время выполняются в виде интегральных схем.

Операционный усилитель характеризуется следующими параметрами:

- коэффициент усиления по напряжению $K_{U0} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$. Обычно

$$K_{U0} = 10^5 \div 10^7 .;$$

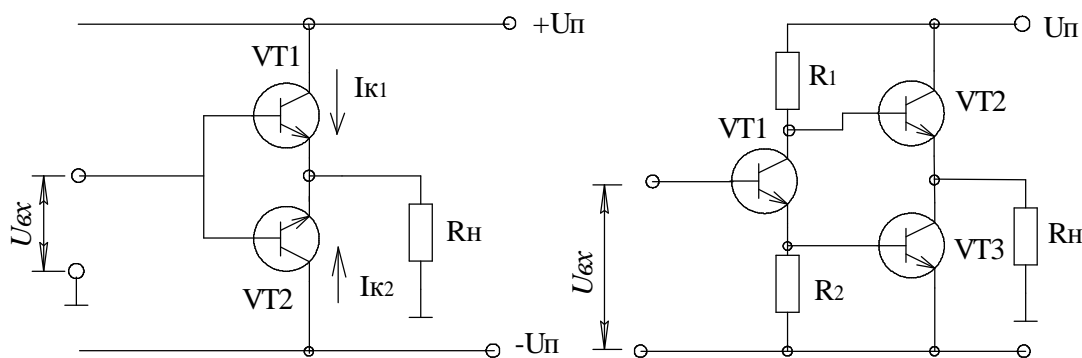
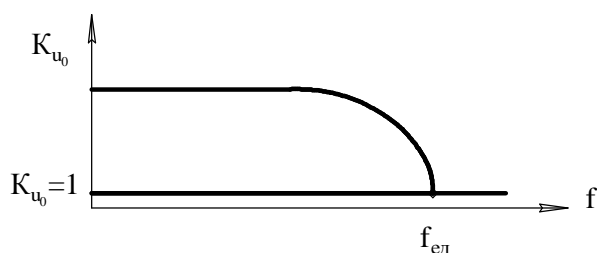


Рис. 68. Бестрансформаторный усилитель мощности на транзисторах разной проводимости (а) и одного типа проводимости (б).

- амплитудно-частотная характеристика:



- частота единичного усиления $f_{ед}$ – это частота, на которой коэффициент усиления $K_{U0}=1$;
- входное сопротивление $R_{вх}$. Для повышения входного сопротивления в первом каскаде могут использоваться полевые транзисторы;
- выходное сопротивление $R_{вых}$ обычно составляет сотни Ом;
- входные токи $I_{вх(-)}$ и $I_{вх(+)}$ - это токи, протекающие по входным шинам;
- разность входных токов $\Delta I_{вх} = |I_{вх(-)} - I_{вх(+)}|$. Входные токи могут отличаться друг от друга на (10-20)%;
- выходной ток $I_{вых}$ - максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется его работоспособность.
- скорость нарастания выходного сигнала V – характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах. Измеряется в вольтах/микросекунду;
- напряжение смещения $U_{см}$. Численно напряжение смещения определяется как напряжение, которое необходимо приложить ко входу усилителя для того, чтобы его выходное напряжение было равно “0”. Обычно $U_{см}$ от единиц микровольт до десятков милливольт;
- мощность (или ток) потребления;
- дрейф напряжения смещения $\Delta U_{см}/градус$;
- дрейф разности входных токов $\Delta I_{вх}/градус$;
- коэффициент подавления синфазных помех. Кроме перечисленных выше параметров ОУ характеризуются целым рядом предельно-допустимых основных эксплуатационных параметров.

Классификация ОУ. Все операционные усилители имеют либо внутреннюю коррекцию АЧХ, либо внешнюю. В последнем случае к выводам ОУ подключаются внешние пассивные элементы. Некоторые ОУ имеют защиту от короткого замыкания.

В зависимости от назначения ОУ можно подразделить на пять групп:

Универсальные ОУ (общего применения) – имеют средние характеристики, небольшую стоимость и применяются в большинстве приборов (см. приложение)

Прецизионные ОУ используются для усиления малых сигналов в информационно-измерительной аппаратуре. Такие ОУ должны иметь большой

коэффициент усиления, малый уровень шумов, малые значения напряжения смещения, дрейфа напряжения смещения и дрейфа разности токов. Прецизионные ОУ строятся обычно на принципе модуляции-демодуляции. Например ОУ К140УД21, К140УД24 и др.

Быстродействующие ОУ используются для преобразования высокочастотных сигналов. Они характеризуются высокой скоростью нарастания выходного сигнала, малым временем установления, высокой частотой единичного усиления $f_{ед}$. Для таких ОУ обычно: $V \geq 50$ в/мкс, $t_{уст} \leq 1$ мкс, $f_{ед} \geq 10$ МГц.

Микрометрические ОУ – отличаются минимальными потребляемыми мощностями. Потребляемый ток иногда можно регулировать с помощью внешнего резистора. Поэтому такие ОУ иногда называются программируемыми.

Многоканальные ОУ – представляют собой несколько ОУ (обычно 2 или 4), размещенных в одном корпусе. Применяются для снижения массогабаритных показателей. Например, К140УД20, К1401УД1, К1401УД2.

Преобразователи аналоговых сигналов на ОУ

Обычно функции, выполняемые ОУ, определяются элементами обратной связи, в качестве которых используются резисторы, емкости, индуктивности, полупроводниковые приборы и т.д. На основе ОУ могут быть построены масштабные усилители, повторители, сумматоры, интеграторы, стабилизаторы тока и напряжения, активные фильтры, усилители переменного тока, генераторы импульсных сигналов, функциональные преобразователи, схемы сравнения и т.д.

Повторитель напряжения (рис. 70) представляет собой усилитель, охваченный 100% ООС по выходному напряжению $v_{oc}=1$. Для повторителя $U_{\text{ВЫХ}}=U_{\text{ВХ}}$.

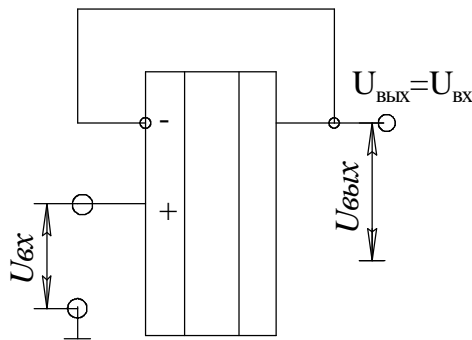


Рис. 70 Повторитель напряжения

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх}0} (1 + K_{U0}); R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}0}}{(1 + K_{U0})};$$

где K_{U0} – коэффициент усиления без ООС,

$R_{\text{вх}0}$ – входное сопротивление ОУ без ООС.

Благодаря большому входному сопротивлению и малому выходному сопротивлению повторитель используется в качестве согласующего элемента.

элемента.

Неинвертирующий масштабный усилитель (рис. 71). Здесь коэффициент передачи делителя в цепи ООС определяется выражением:

$\beta_{oc} = \frac{Z_1}{(Z_{oc} + Z_1)}$. Тогда коэффициент усиления усилителя:

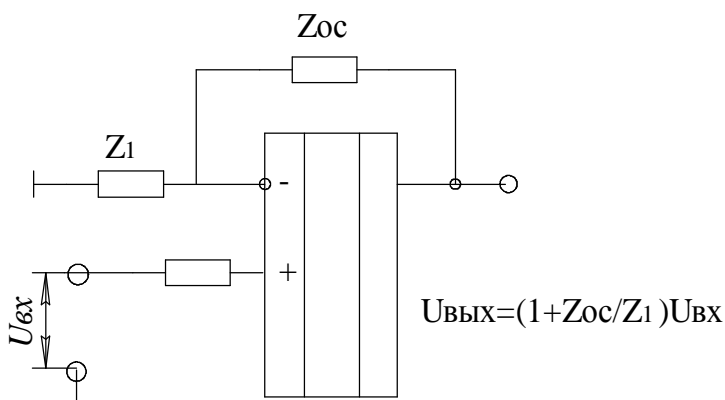


Рис. 71. Неинвертирующий усилитель

$$K_{U,oc} = \frac{K_{U0}}{(1 + K_{U0} \beta_{oc})} = \frac{K_{U0}}{\left[\frac{1 + Z_1 K_{U0}}{(Z_{oc} + Z_1)} \right]}$$

Полагая, что $K_{U0} \rightarrow \infty$, получим

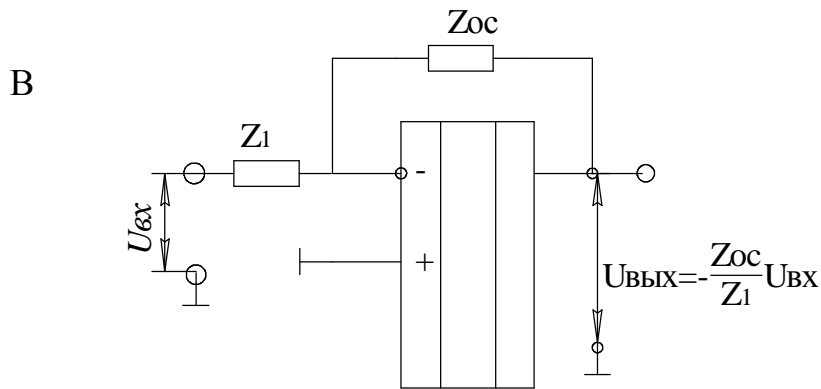
$$K_{U,oc} = \frac{(Z_1 + Z_{oc})}{Z_1} = \left(1 + \frac{Z_{oc}}{Z_1} \right),$$

$$\text{т.е. } U_{\text{ВЫХ}} = \left(1 + \frac{Z_{oc}}{Z_1} \right) U_{\text{ВХ}}$$

Из полученного выражения можно сделать вывод, коэффициент усиления усилителя не зависит от параметров ОУ и не может быть меньше единицы.

Следует отметить, что в рассматриваемом усилителе фазы входного и выходного напряжений совпадают.

Инвертирующий усилитель. Здесь входной сигнал и сигнал обратной



связи подается на инвертирующий вход ОУ. отличие от неинвертирующего усилителя входной сигнал попадает на вход ОУ не посредственно, а через делитель Z1 и Zoc.

Рис. 72 Инвертирующий усилитель

Полагая, что $R_{вых}=0$ можно

записать
$$K_{U.оoc} = \frac{K_{дел} K_{U.оoc}}{(1 + K_{U0} B_{oc})} = \frac{Z_{oc}}{Z_1 + Z_{oc}} \cdot \frac{K_{U0}}{1 + Z_1 K_{U0} (Z_{oc} + Z_1)}$$
, где

Полагая, что $K_{U0} \rightarrow \infty$, получим $K_{U.оoc} = -\frac{Z_{oc}}{Z_1}$, т.е.

Для инвертирующего усилителя фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на 180° .

Входное сопротивление усилителя практически равно сопротивлению резистора Z1, т.к. напряжение на входе ОУ “-” за счет действия ООС стремится к 0.

Следовательно, при любых входных сигналах разность напряжения между инвертирующими и неинвертирующими входами стремится к нулю.

Дифференциальный усилитель. В дифференциальном усилителе входной сигнал Uвх подается на прямой и инверсный входы.

Особенностью такого усилителя является значительное ослабление синфазных помех.

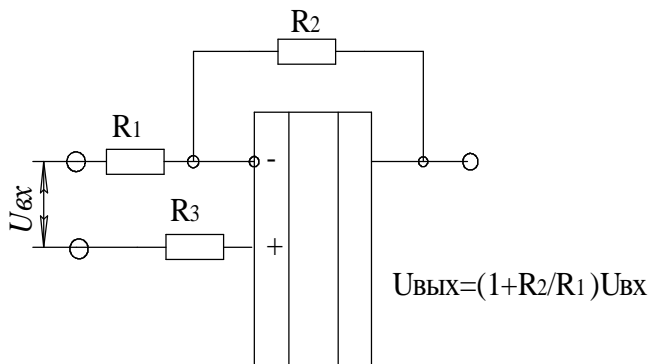


Рис. 73. Дифференциальный усилитель

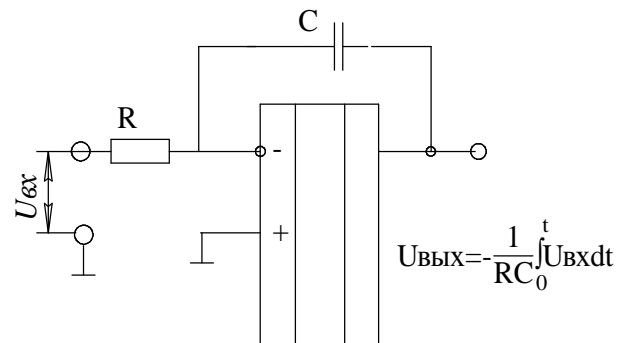


Рис. 74. Интегратор на базе ОУ

Интегратор представляет собой ОУ, в цепь обратной связи которого включен конденсатор С. Для интегратора $U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt$.

Для повышения точности работы интегратора необходимо использовать ОУ с малыми значениями $U_{\text{см}}$, $I_{\text{вх}}$ и $\Delta I_{\text{вх}}$ и ограничить максимальное время интегрирования.

Известны схемы, в которых выходное напряжение равно интегралу от разности входных напряжений. Эти схемы строятся на основе дифференциальных усилителей.

Функциональные преобразователи на ОУ обеспечивают нелинейную зависимость входного и выходного напряжений. Такие преобразователи представляют собой масштабные усилители, цепи обратной связи которых выполнены в виде сложных делителей, содержащих линейные и нелинейные элементы. В качестве примера рассмотрим схему усилителя с убывающим коэффициентом усиления.

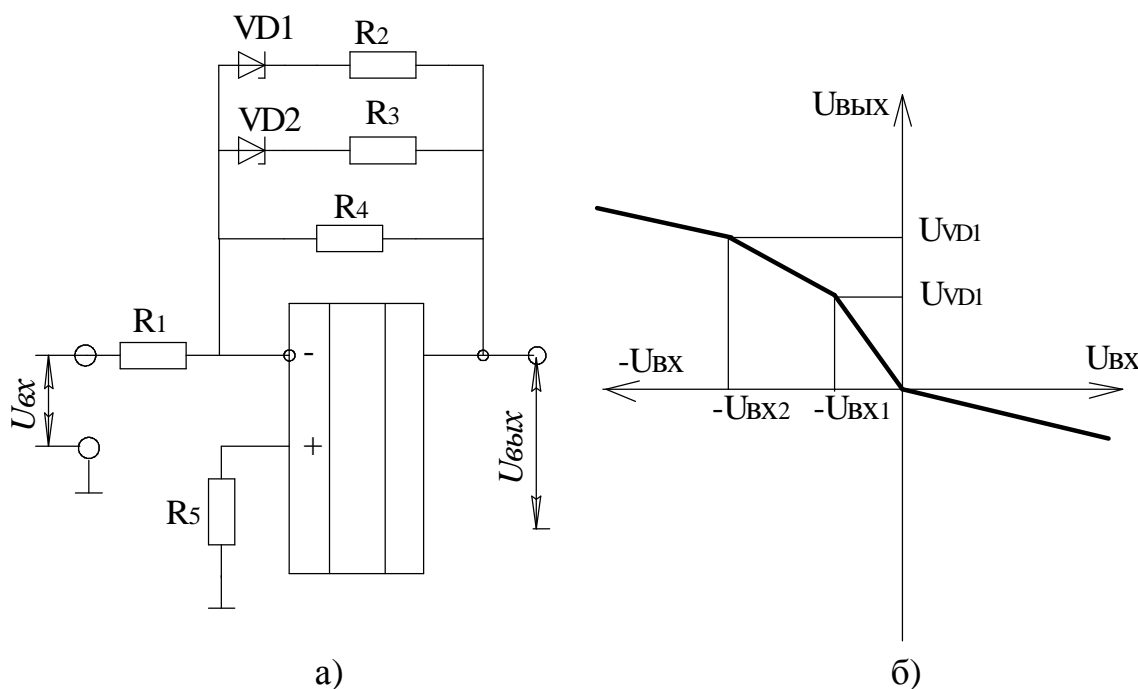


Рис. 75. Функциональный преобразователь на ОУ (а) и передаточная характеристика (б).

Здесь стабилитроны VD1 и VD2 включены в цепь ООС. При напряжениях (U_{VD1} и U_{VD2}) возникает пробой соответствующих стабилитронов и скачком изменяется сопротивление обратной связи $R_{оос}$.

Стабилизатор тока. Один из возможных вариантов стабилизатора тока приведен на рис.76. Величину тока нагрузки I_n устанавливают входным напряжением $U_{вх}$. Транзистор позволяет увеличить выходной ток. Данное устройство можно рассматривать как усилитель с последовательной ООС по току.

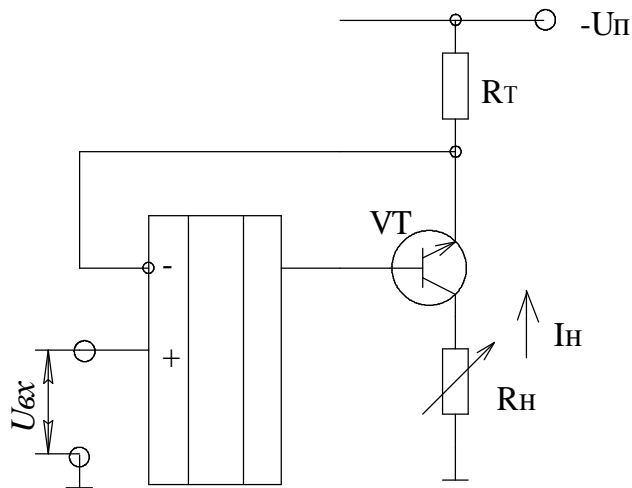


Рис. 76. Стабилизатор тока.

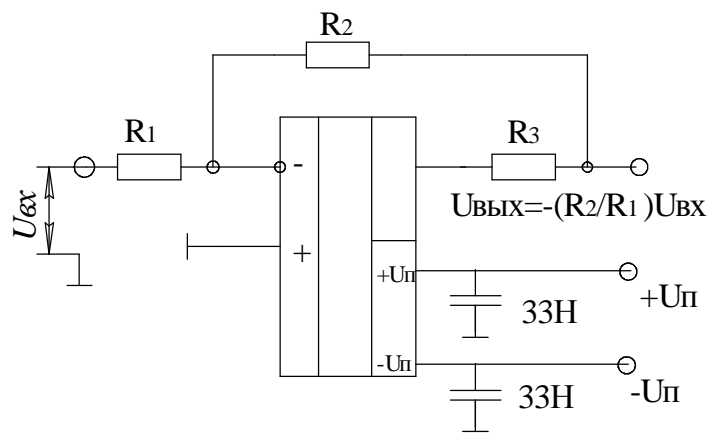


Рис. 77. ОУ с защитой от КЗ.

Активные фильтры – используются для формирования частотной характеристики заданного типа. Активные фильтры представляют собой ОУ, в обратную связь которого включены частотозависимые элементы. Они подразделяются на фильтры низкой частоты, фильтры ВЧ, полосовые фильтры, режекторные (заградительные) фильтры. Для решения конкретных задач в настоящее время разработано множество разнообразных активных фильтров. Наиболее распространенными являются фильтры Чебышева, Баттерворда и Бесселя. В зависимости от количества частотозависимых цепочек RC активные фильтры бывают фильтрами первого, второго, третьего и т.д. порядка.

Особенности использования ОУ.

- Для питания ОУ применяются два разнополярных источника питания. Эти напряжения по абсолютному значению не должны отличаться друг от друга более чем на 10%. Обычно ОУ могут работать в широком диапазоне изменения питающих напряжений $U_{п}=(2\div 18)\text{В}$. Для предотвращения паразитной генерации в цепях питания ОУ устанавливаются фильтры в виде конденсаторов емкостью $(10\div 68)\text{нф}$.

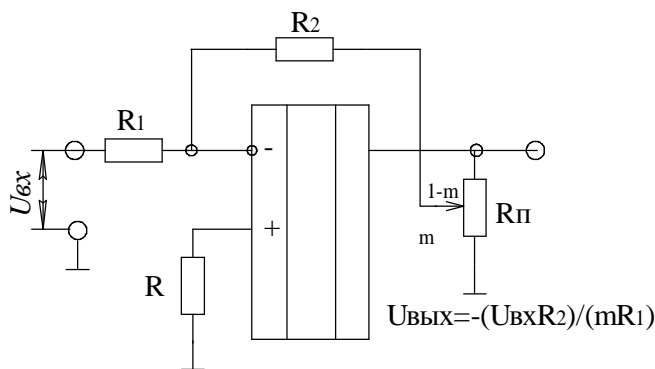


Рис. 78. ОУ с изменяющимся коэффициентом усиления

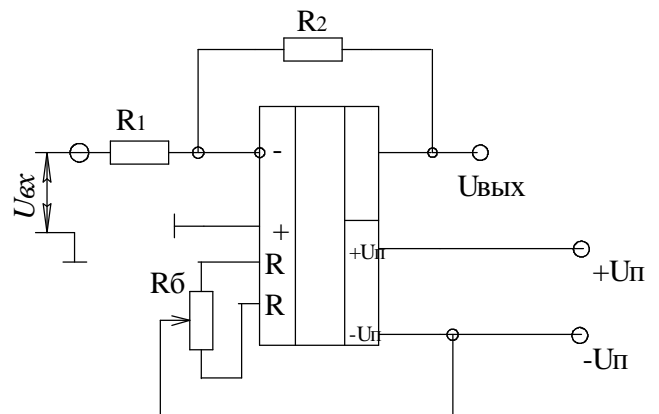


Рис. 79. Балансировка ОУ

- Если ОУ не имеют защиты от короткого замыкания, то последовательно с выходом устанавливается резистор $R_3=200 \text{ Ом}$, включенный последовательно в цепь обратной связи. Такое включение не повышает величины выходного сопротивления.

- Изменение коэффициента усиления ОУ возможно путем изменения величины резисторов R_1 и R_2 . Однако такая регулировка может привести к неустойчивости в работе усилителя. Более предпочтительна регулировка, представленная на рис.78. С помощью потенциометра R_{Π} можно изменять коэффициент усиления от 0 до $K = \frac{R_2}{R_1}$. ; $U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{вх}}}{m} \cdot \frac{R_2}{R_1}$.

- Балансировка ОУ представляет собой операцию по компенсации напряжения смещения в ОУ. Балансировка производится с помощью многооборотного потенциометра R_6 , начало и конец которого подключены на входы ОУ, а средний вывод на источник питания U_n ($-U_n$). Для балансировки входы ОУ заземляются и с помощью потенциометра R_6 устанавливается напряжение $U_{\text{вых}}=0$.

Балансировка позволяет компенсировать напряжение смещения ОУ в данный момент при действующих дестабилизирующих факторах. При изменении параметров питающих напряжений и внешних факторов, таких как температура и влажность окружающей среды, балансировка нарушается. Поэтому в ряде случаев применяется автоматическая установка нулей ОУ (рис.80).

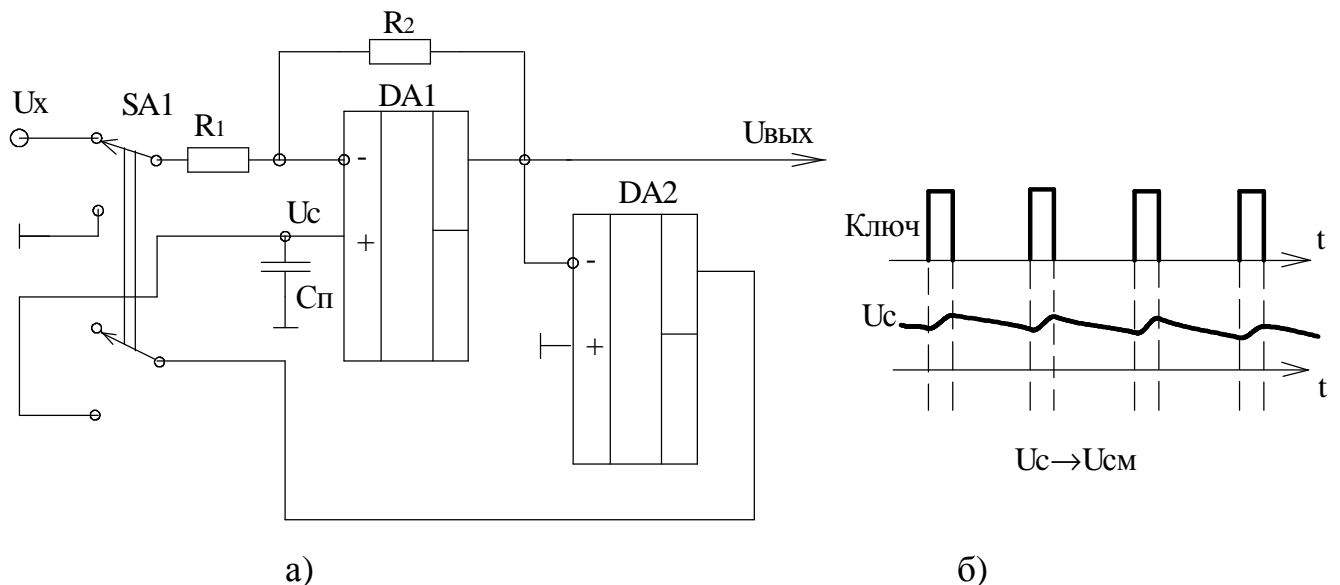


Рис. 80. Схема автоматической установки нулей ОУ (а), временная диаграмма работы (б).

В состав схемы автоматической установки нулей входит основной ОУ ДА1, вспомогательный ОУ ДА2, ключ SA1, который периодически замыкает

вход ДА1 на землю. Во время замыкания напряжение смещения $U_{см}$ усиливается вспомогательным ОУ ДА2 и заряжает емкость памяти C_n , подключенную к прямому входу ОУ ДД1. Напряжение на емкости C_n стремится к $U_c \rightarrow U_{см}$. При этом при размыкании ключа происходит компенсация напряжения смещения. Частота переключения ключа составляет $(20 \div 50)$ Гц. При изменении внешних условий, напряжения питания и т.д. автоматически производится компенсация напряжения смещения.

3.12. Аналоговые компараторы

Аналоговые компараторы предназначены для сравнения двух аналоговых сигналов между собой или одного входного аналогового сигнала с заданным эталонным уровнем.

Компараторы представляют собой специализированные ОУ с дифференциальным входом и высоким коэффициентом усиления и быстродействием без обратной связи. Обычно они изготавливаются в виде интегральных схем. На входы компаратора поступают аналоговые сигналы, а с выхода снимаются напряжение $+U_n$ или $-U_n$, т.е. снимается “0” или “1”.

Основными параметрами компаратора являются: чувствительность, быстродействие и нагрузочная способность.

Компараторы бывают однопороговые и двухпороговые. На рис.81 представлена схема однопорогового компаратора и его передаточная характеристика.

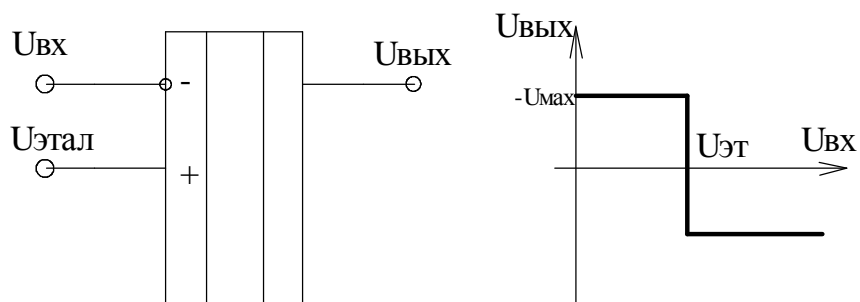


Рис. 81. Однопороговый компаратор (а) и его передаточная характеристика (б)

На рис.82 приведена схема двухпорогового компаратора, представляющая собой триггер Шмитта.

Компаратор (Рис. 82) охватывается положительной обратной связью через делитель напряжения R_1, R_2 . Меняя соотношение делителя $R_1 R_2$, можно изменять напряжение срабатывания $U_{пор}$

$$U_{пор} = U_{вых} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Обычно } U_{вых} \approx +U_n \text{ или } -U_n$$

При $R_2=0$, компаратор становится однопороговым.

Передаточную характеристику можно перемещать влево и вправо, подачей дополнительного напряжения $U_{см}$ на инверсный вход компаратора (рис. 83).

$$U_{пор2} = U_{см} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{вых} \quad U_{пор1} = U_{см} - \frac{U_{вых} R_2}{R_1 + R_2}$$

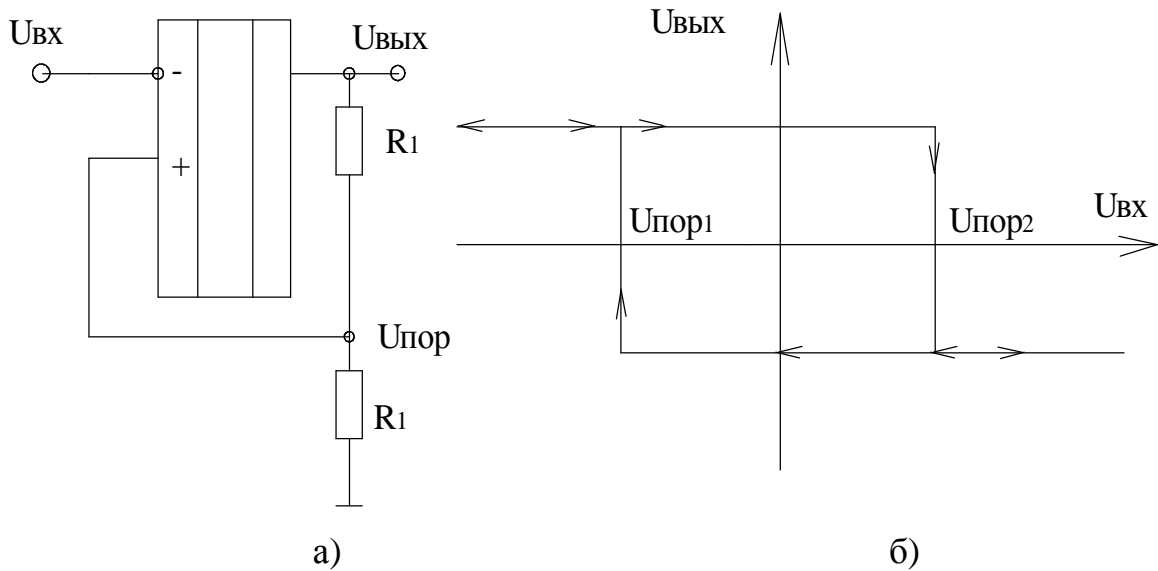


Рис. 82. Двухпороговый компаратор (а) и его передаточная характеристика (б).

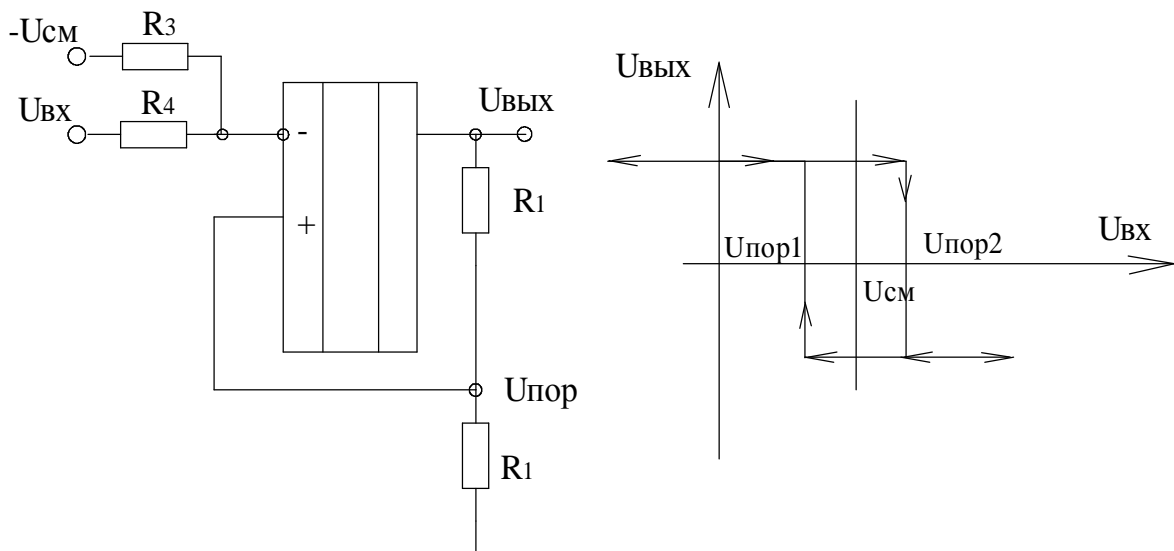


Рис. 83. Двухпороговый компаратор (а) и его передаточная характеристика при $U_{см}$ (б).

В качестве компараторов используются микросхемы серий К521, К554, К597, К1401. Микросхема К521СА3 – является прецизионным балансировкой. Микросхема К521СА1 представляет собой два автономных компаратора с одним общим выходом. Микросхема может использоваться для сравнения двух аналоговых сигналов. Микросхема К1401СА1 относится к многоканальным. Здесь в одном корпусе располагаются четыре компаратора.

3.13. Генераторы гармонических колебаний на базе транзисторов и ОУ

Генераторы гармонических колебаний строятся на основе усилителей с положительной обратной связью, обеспечивающих режим самовозбуждения на требуемой частоте. Структурная схема генератора имеет вид (рис.84). Для работы генератора необходимо выполнить два условия: баланс амплитуд, баланс фаз.

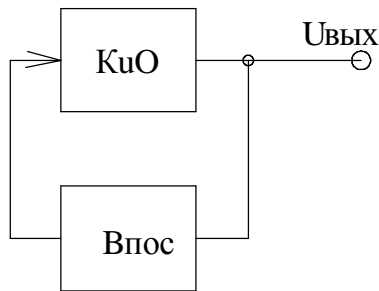


Рис. 84. Структурная схема генератора.

Генераторы могут выполняться на основе колебательного контура LC или с частотозависимыми цепями RC.

Первые называются генераторами LC-типа и предназначены для работы в диапазоне десятков кГц и выше, вторые называются генераторами RC-типа и предназначены для работы в области низких частот.

Схема генератора LC-типа с трансформаторной связью приведена на рисунке

85. Условия генерации здесь создаются на частоте резонанса f_0 : $f_0 = \frac{1}{2p\sqrt{L_k C_k}}$;

где L_k и C_k параметры колебательного контура.

Фазовый сдвиг (баланс фаз) обеспечивается соответствующим подключением вторичной обмотки ω_2 трансформатора.

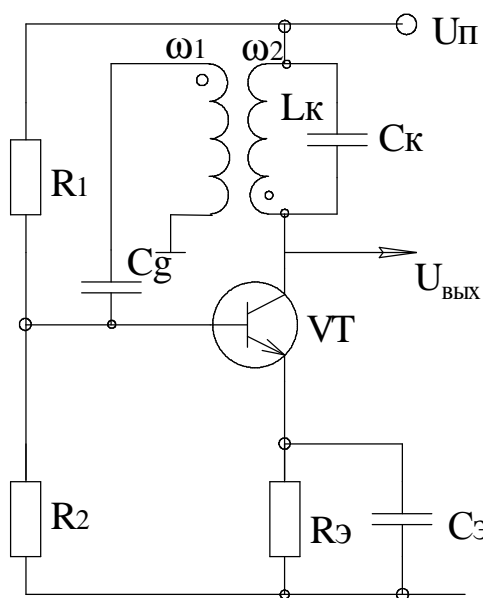


Рис. 85. Схема генератора LC-типа с трансформаторной связью.

Баланс амплитуд достигается подачей соответствующей амплитуды сигнала с коллекторной нагрузки в цепь базы. Выходной сигнал снимается либо третьей обмотке ω_3 либо с коллектора транзистора VT.

Помимо рассмотренной выше схемы с трансформаторной связью широкое распространение получили трехточечные схемы с индуктивной автотрансформаторной и емкостной обратными связями (рис.86).

В генераторе с индуктивной автотрансформаторной связью напряжение на базу подается через емкость C_g с части контурной катушки ω_2 . Количество витков ω_2 определяет баланс амплитуд.

В схеме с емкостной обратной связью резонансный колебательный контур образован конденсаторами C_{k1} , C_{k2} и катушкой L_k . Напряжение обратной связи снимается с конденсаторами C_{k2} .

Для получения неискаженной формы выходных сигналов с генератора добротность контура должна быть высокой.

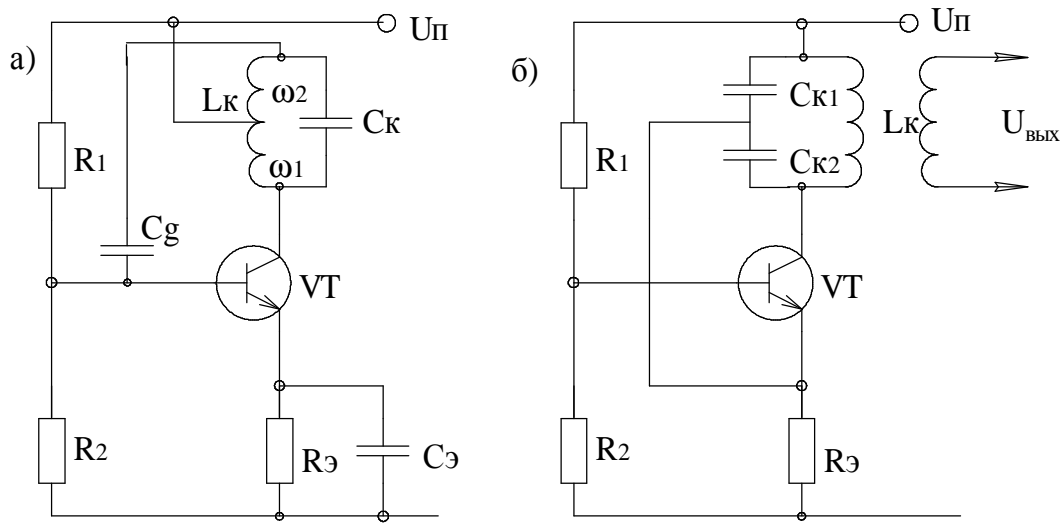


Рис. 86. Генератор LC – типа по схеме трехточки с индуктивной автотрансформаторной (а) и емкостной (б) обратными связями.

Генератор RC-типа представляет собой обычный резистивный усилитель, охваченный положительной обратной связью. Для получения необходимого фазового сдвига применяются фазовращающие цепочки, которые имеют несколько RC-звеньев и служит для поворота фазы выходного напряжения

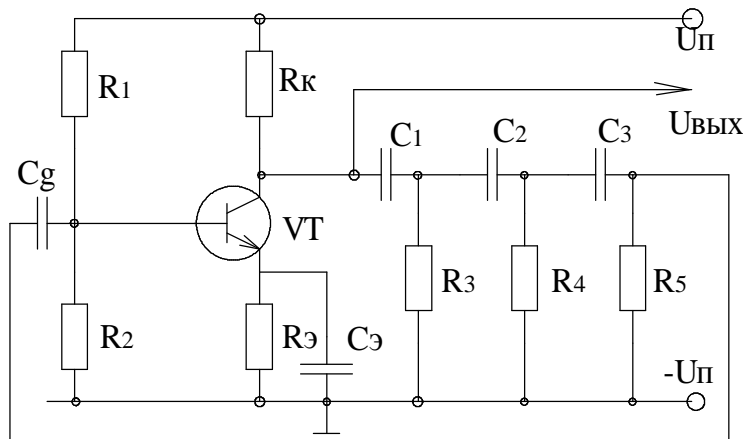


Рис. 87. Генератор RC- типа.

усилителя на 180° . Минимальное количество звеньев равно трем. Для устойчивой работы схемы необходимо, чтобы усилитель обладал большим коэффициентом усиления, имел большое входное сопротивление и малое выходное сопротивление.

Обеспечение условий генерации выполняется подбором элементов в цепи обратной связи R и C.

3.14. Импульсные электронные устройства

В электронике часто используются импульсные сигналы отрицательной или положительной полярности, близкие по форме к прямоугольным, пилообразным или экспоненциальным.

Импульсные сигналы характеризуются целым рядом параметров (рис.88).

Параметрами импульсных сигналов являются также период следования импульсов, частота повторения, скважность.

В генераторах импульсов используются, как правило, транзисторы, работающие в ключевом режиме. Обычно транзисторы включаются по схеме с ОЭ.

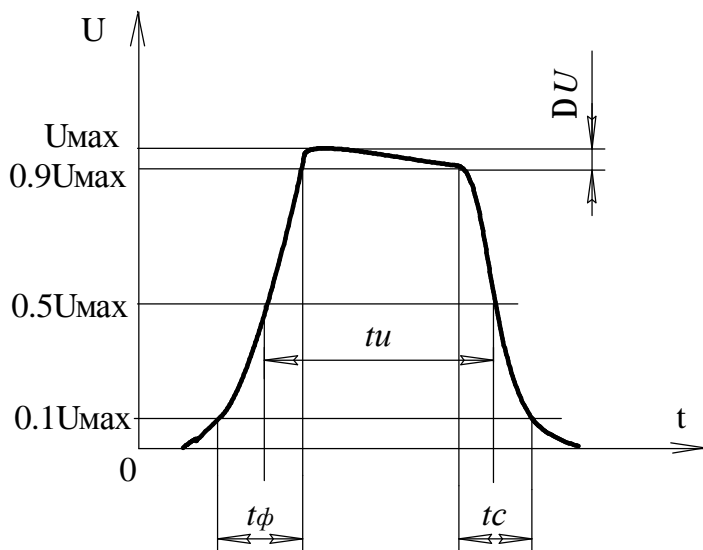


Рис. 88. Импульсный сигнал.

К импульсным устройствам относятся мультивибраторы, триггеры, одновибраторы, блокинг-генераторы, одновибраторы генераторы линейно-изменяющегося напряжения.

Мультивибратор – это электронный узел для формирования импульсов прямоугольной формы с требуемыми параметрами. Он представляет собой двухкаскадный резистивный усилитель со 100%

положительной обратной связью.

На рис.89 представлена схема мультивибратора, выполненная на транзисторах. Элементами положительной обратной связи являются конденсаторы $C_{б1}$ и $C_{б2}$, которые соединяют коллектора транзисторов VT1, VT2 с базами транзисторов VT2, VT1.

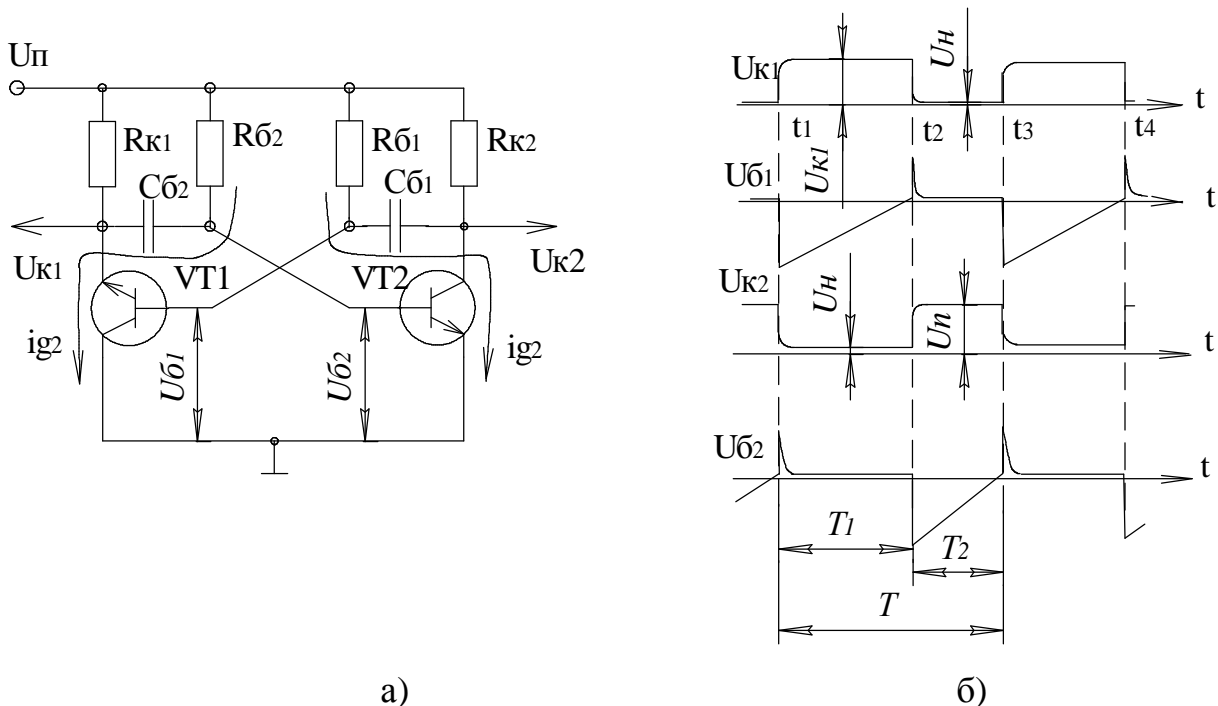


Рис. 89. Схема мультивибратора (а) и временная диаграмма его работы (б).

В мультивибраторе генерирование импульсов происходит сразу же после включения питания (рис.89 б).

Пусть в момент времени t_1 транзистор VT1 закрывается, а транзистор VT2 открывается. На базе VT2 напряжение $U_{б2} > 0$, а на базе VT1 $U_{б1} < 0$ ($U_{б1} = -U_n$). Емкость $C_{б1}$ начинает разряжаться через открытый транзистор VT2. Ток i_{g2} , а следовательно, и напряжение на $R_{б1}$ уменьшается по экспоненциальному закону. В момент времени t_2 напряжение $U_{б1}$ будет положительным и транзистор VT1 будет открываться. При этом появляется ток в коллекторной цепи транзистора VT1 и $U_{к1} \downarrow$, $U_{б2} \downarrow$, $U_{к2} \uparrow$. Происходит лавинообразный процесс, при котором транзистор VT1 открывается, а транзистор VT2 закрывается. Далее начинается процесс разряда емкости $C_{б2}$ через открытый транзистор VT1. В момент времени t_3 произойдет следующий переход и т.д. Длительность формируемых импульсов определяется постоянной времени $R_б C_б$.

$$T_1 = 0,7R_{g1}C_{g1}, \quad T_2 = 0,7R_{g2}C_{g2}, \quad T = T_1 + T_2.$$

Для симметричного мультивибратора: $R_{g1} = R_{g2}$; $C_{g1} = C_{g2}$; $T = 1,4R_g C_g$.

Длительность переднего фронта формируемых импульсов равна $t_\phi = 2,2C_б R_k$.

Обычно $R_g > 3R_k$.

Мультивибратор может быть построен на базе ОУ с положительной и отрицательной обратными связями.

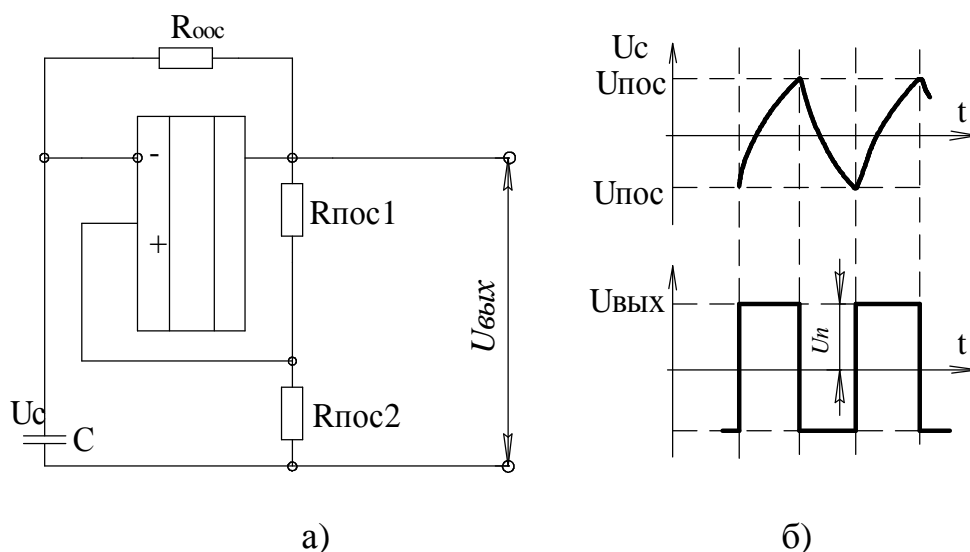


Рис. 90. Схема мультивибратора на ОУ (а), временная диаграмма его работы (б)

Положительный коэффициент передачи $v_{пос} = \frac{R_{пос2}}{(R_{пос1} + R_{пос2})}$

Здесь ОУ выполняет роль инвертирующего компаратора напряжения. При переключении схемы напряжения на инверсном входе ОУ изменяется и

конденсатор C перезаряжается до напряжения $U_{пос} = U_{max} \cdot \frac{R_{пос2}}{(R_{пос1} + R_{пос2})}$;

где $U_{max} \approx U_n$ – максимальное напряжение на выходе ОУ.

Затем вновь происходит переключение ОУ. Период следования импульсов зависит от величины положительной обратной связи и от элементов C и $R_{оос}$. С емкости C можно снимать пилообразное напряжение.

Одновибратор (ждущий мультивибратор) имеет одно устойчивое состояние и предназначен для формирования прямоугольных импульсов определенной длительности.

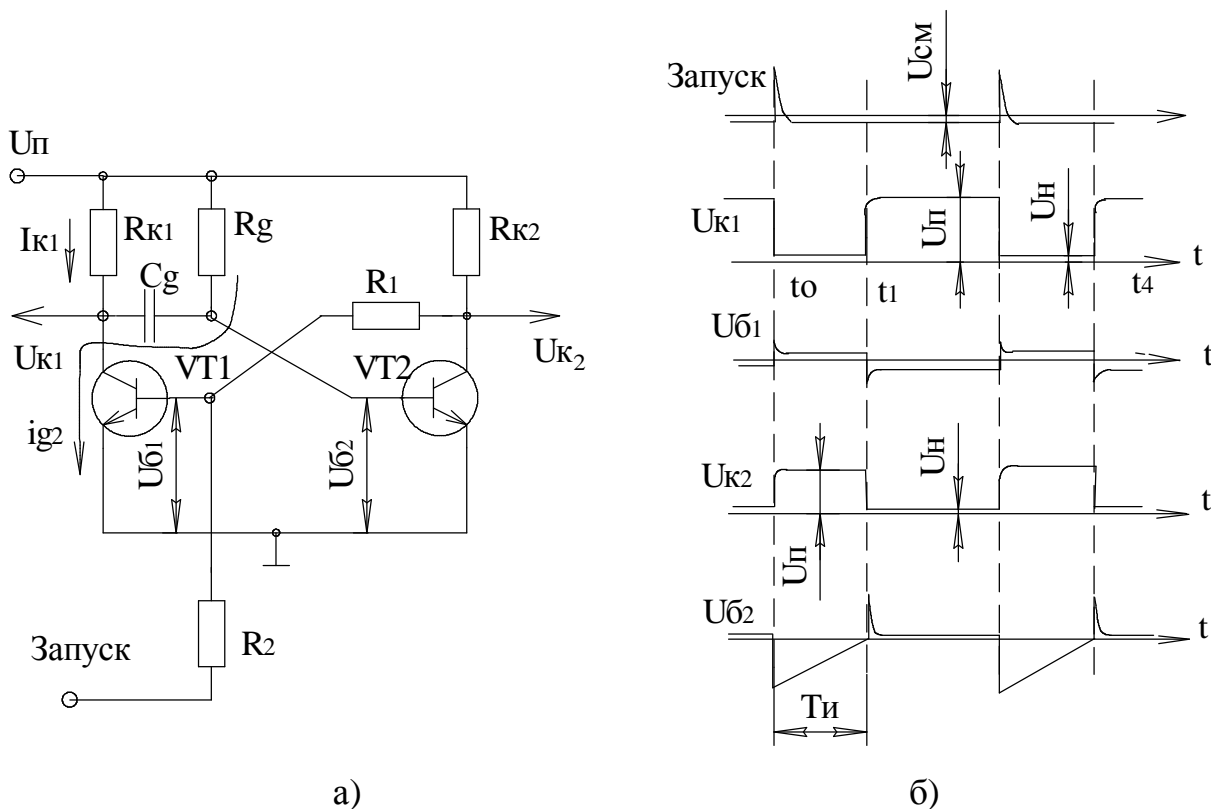


Рис. 91. Схема одновибратора (а) и его временная диаграмма работы (б).

В исходном состоянии транзистор VT1 закрыт, а VT2 открыт за счет положительного напряжения, поступающего на базу VT2 через резистор R_g. Запуск схемы, производится импульсом положительной полярности, поступающим на базу транзистора VT1. При этом транзистор VT1 открывается, по нему протекает ток I_{k1}, напряжение U_{k1}↓, напряжение U_{б2}↓, напряжение U_{k2}↑, напряжение U_{б1}↑. Следовательно, из-за положительной обратной связи через конденсатор C_g транзистор VT1 открывается и переходит в режим насыщения, а транзистор VT2 закрывается. После этого начинается разряд емкости C_g через R_g и открытый транзистор VT1. Напряжение на базе VT2 U_{б2} уменьшается по экспоненциальному закону и в момент времени t₁ (U_{б2}>0) произойдет обратный перепад напряжения.

Длительность формируемого импульса T_U: $T_U = 0,7R_g C_g$, $t_{\phi} \approx 2,2C_g R_{k1}$.

Триггер на транзисторах

Триггер представляет собой элемент памяти, имеющий два устойчивых состояния. Переход из одного состояния в другое происходит под воздействием внешних сигналов S и R.

В исходном состоянии один из транзисторов находится в закрытом состоянии, а второй – в насыщенном. При поступлении положительного сигнала в базу закрытого транзистора триггер переходит во второе устойчивое состояние.

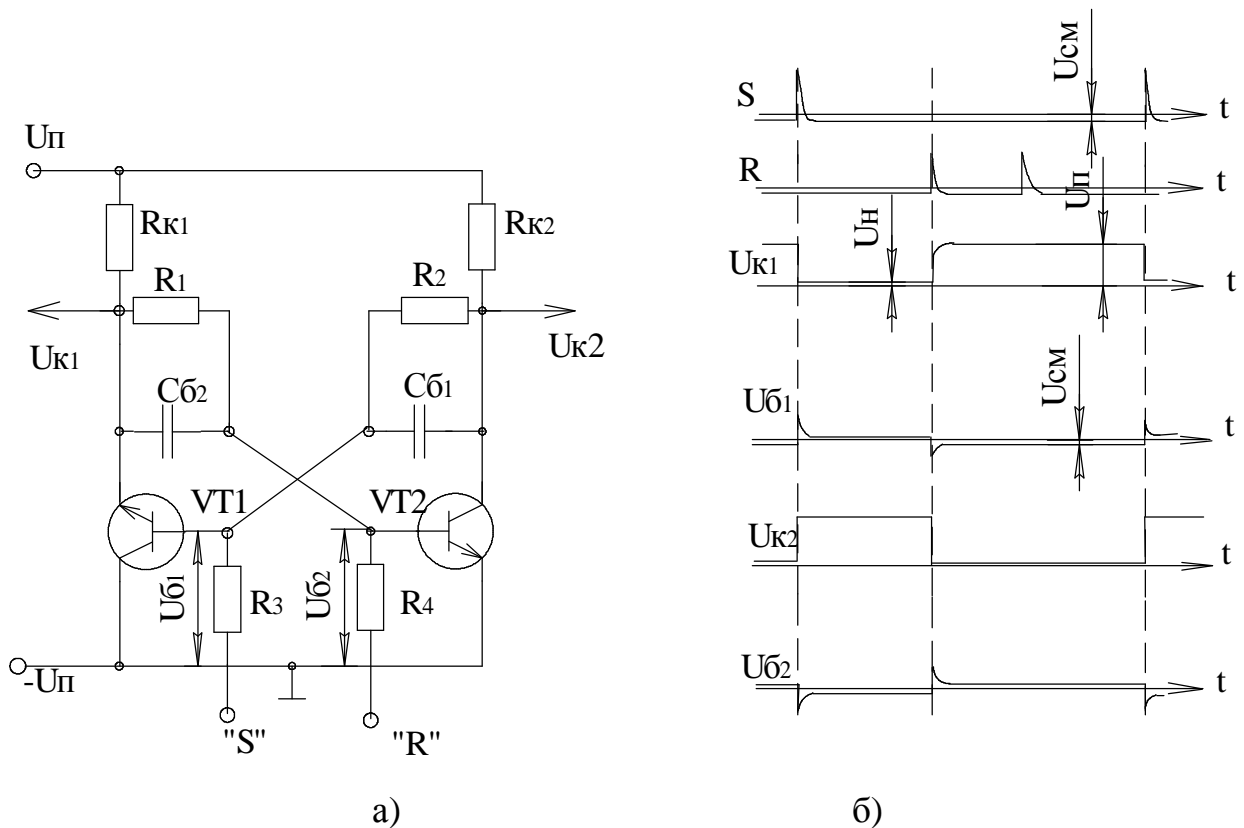


Рис. 92. Схема триггера (а) и его временная диаграмма (б).

Емкости $C_{б1}$ и $C_{б2}$ являются ускоряющими и предназначены для повышения быстродействия схемы.

Генераторы пилообразного напряжения (ГПН) предназначены для формирования линейно-изменяющегося (пилообразного) напряжения. Пилообразное напряжение характеризуется длительностью прямого и обратного хода, периодом повторения, максимальным значением напряжения, коэффициентом нелинейности ϵ . На практике работа ГПН основана на заряде и разряде емкости через токостабилизирующий элемент (рис.93).

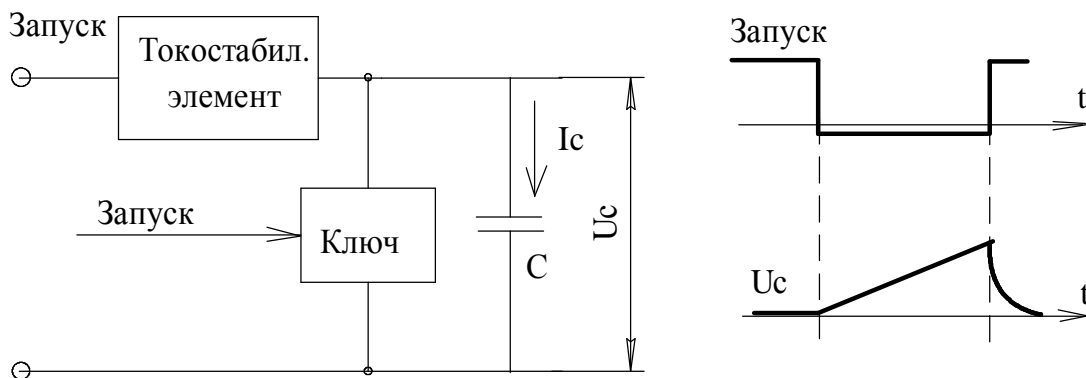


Рис. 93. Структурная схема ГПН.

Известно, что напряжение на конденсаторе $U_c = -\frac{1}{C} \int i_c dt$. Для получения

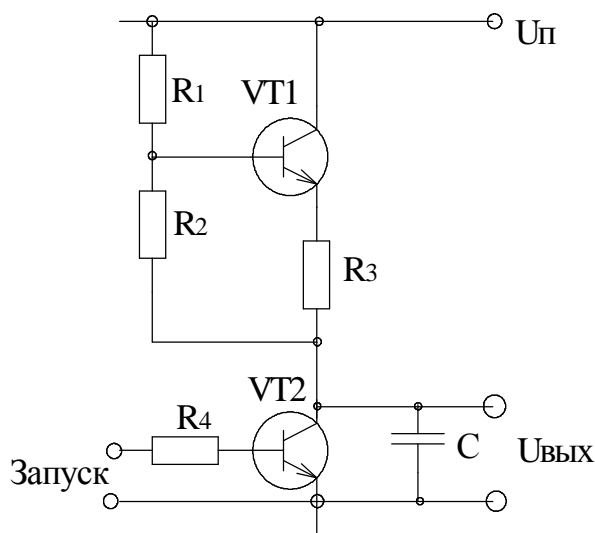


Рис. 94. ГПН с транзисторным стабилизатором тока.

хорошей линейности необходимо, чтобы ток зарядки i_c был постоянным.

В качестве токостабилизирующего элемента используются схемы на транзисторах, на ОУ и на резисторах. На рис.94 представлена схема ГПН с транзисторным стабилизатором тока. Очень хорошие параметры ГПН, построенного на базе ОУ.

ГПН широко применяется в измерительной технике, в преобразователях информации, в телевизионной и радиолокационной технике, в системах автоматического регулирования.

3.15. Источники вторичного электропитания (ИВП)

Источники вторичного электропитания – это электронные устройства, предназначенные для преобразования энергии первичного источника электропитания, в электрическую энергию с заданными техническими характеристиками.

Первичными источниками электропитания могут быть: промышленная сеть переменного тока, автономные источники переменного или постоянного тока, аккумуляторы, химические батареи и т.д.

К источникам вторичного напряжения относятся, как правило, источники постоянного тока для питания электронной аппаратуры.

В общем случае ИВП состоит из нескольких функционально законченных блоков, а именно: трансформатора для согласования напряжений, выпрямителя, сглаживающего фильтра, стабилизатора напряжения.

Стабилизатор напряжения в ряде случаев может отсутствовать.

На рисунке 95 приведены структурные схемы ИВП.

Наиболее распространена схема (а), которая включает в себя трансформатор, выпрямитель, фильтр и стабилизатор напряжения.

Схема отличается простотой и надежностью, однако имеет большие массогабариты из-за размеров силового трансформатора.

Этот недостаток отсутствует у схемы, изображенной на рисунке (б), в которой первичное напряжение (сеть) сначала выпрямляется и поступает на генератор

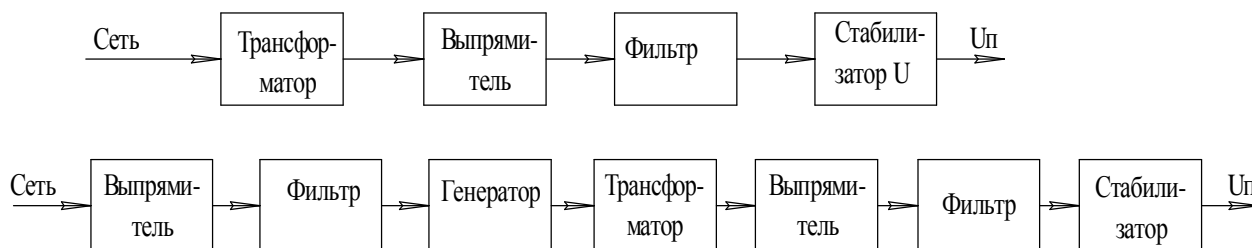


Рис. 95. Структурные схемы ИВП.

высокой частоты (30÷100) кГц. Генератор нагружен на трансформатор и далее, как и в схеме (а), идут выпрямитель, фильтр и стабилизатор напряжения. Благодаря высокой частоте размеры и вес трансформатора и фильтров будут значительно меньше.

Существуют другие структурные схемы ИВП.

К основным параметрам ИВП относятся:

номинальные уровни входного $U_{вх.ном.}$ и выходного $U_{вых.ном.}$ напряжений;

предельные отклонения входного и выходного напряжений от номинальных значений;

коэффициенты неустойчивости выходного напряжения и тока:

$$K_{HU} = \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} \cdot \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вх}} \cdot 100\%; \quad K_{HI} = \frac{\Delta U_{вых} I_{вых}}{U_{вых} \Delta U_{вх}} \cdot 100\%;$$

где $DU_{вх}$ – изменение входного напряжения, $DU_{вых}$ – изменение выходного напряжения, $DI_{вых}$ – изменение выходного тока;

выходная мощность (или выходной ток);

$$\text{коэффициент пульсации } \varepsilon = \frac{U_{mi}}{U_{ном}},$$

где U_{mi} – амплитуда основной гармоники выпрямительного тока.

Выпрямители предназначены для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

В зависимости от источника первичного электропитания выпрямители бывают однофазные и трехфазные. Кроме того выпрямители могут быть однополупериодные и двухполупериодные.

Схема однофазного однополупериодного выпрямителя приведена на рисунке 96.

На вход выпрямителя поступает синусоидальное напряжение ... В интервале времени от 0 до $T/2$ диод открыт и ток в нагрузке повторяет форму входного сигнала. В интервале времени от $T/2$ до T диод VD закрыт.

Средний выпрямительный ток в нагрузке $U_{н.ср.}$ равен:

$$U_{н.ср.} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\max} dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\max} \sin \omega t dt = \frac{U_{\max}}{T \omega} \left[-\cos \omega t \right]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{U_{\max}}{p} = 0,318 U_{\max}$$

Учитывая, что $U_{дейст} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$, имеем $U_{н.ср.} = 0,45 U_{дейст.}$

Аналогично получим $I_{н.ср.} = 0,318 I_{\max} = 0,45 I_{дейст.}$

Спектральный состав выпрямительного напряжения имеет вид:

$$U_n = \frac{1}{p} U_{\max} + \frac{1}{2} U_{\max} \sin \omega t - \frac{2U_{\max}}{3p} \cos(2\omega t) - K$$

При этом коэффициент пульсации выходного напряжения e равен:

$$e = \frac{U_{\max i}}{U_{ном}} = \frac{p}{2} = 1,57.$$

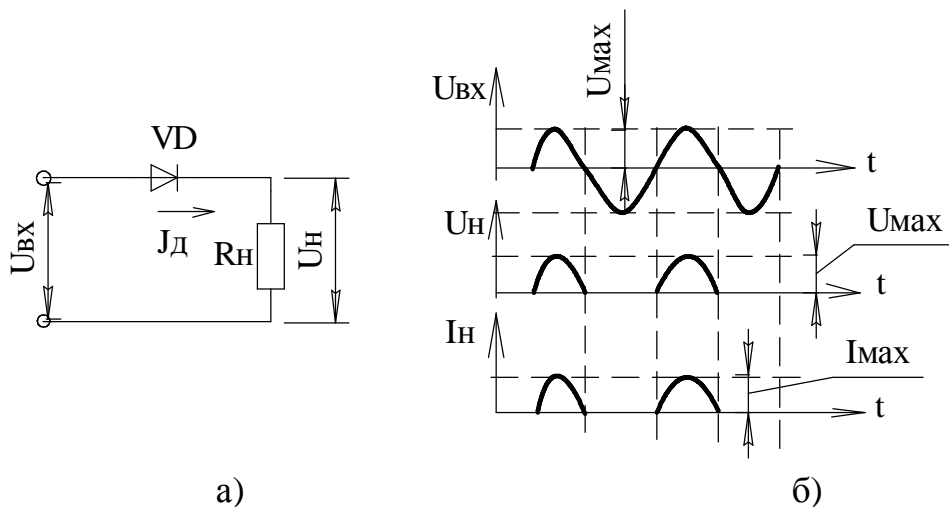


Рис. 96. Схема однополупериодного выпрямителя (а) и временная диаграмма его работы (б).

Однополупериодные выпрямители отличаются простотой, но имеют низкую эффективность и высокий коэффициент пульсации. Частота пульсаций равна частоте выпрямляемого напряжения.

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя приведена на рисунке 97.

Здесь диоды работают попеременно в каждый полупериод. Средний выпрямительный ток в нагрузке равен:

$$U_{н.ср.} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{max} dt = \frac{1}{T} \int_0^{2p} U_{max} dt = 0,636 U_{max} \text{ или } U_{н.ср.} = 0,9 U_{действ.} .$$

Частота пульсации здесь в два раза выше, а коэффициент пульсации в два раза меньше $\epsilon=0,67$.

Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (рис.97 а) имеет два диода, однако требует двух обмоток трансформатора. Кроме того, обратное напряжение на диодах равно удвоенному максимальному входному напряжению $U_{обр.диода}=2U_{max}$.

Эти недостатки отсутствуют у мостовой схемы (рис.97 б), но здесь четыре диода и КПД такого выпрямителя ниже.

Схема трехфазного однополупериодного выпрямителя приведена на рисунке 98.

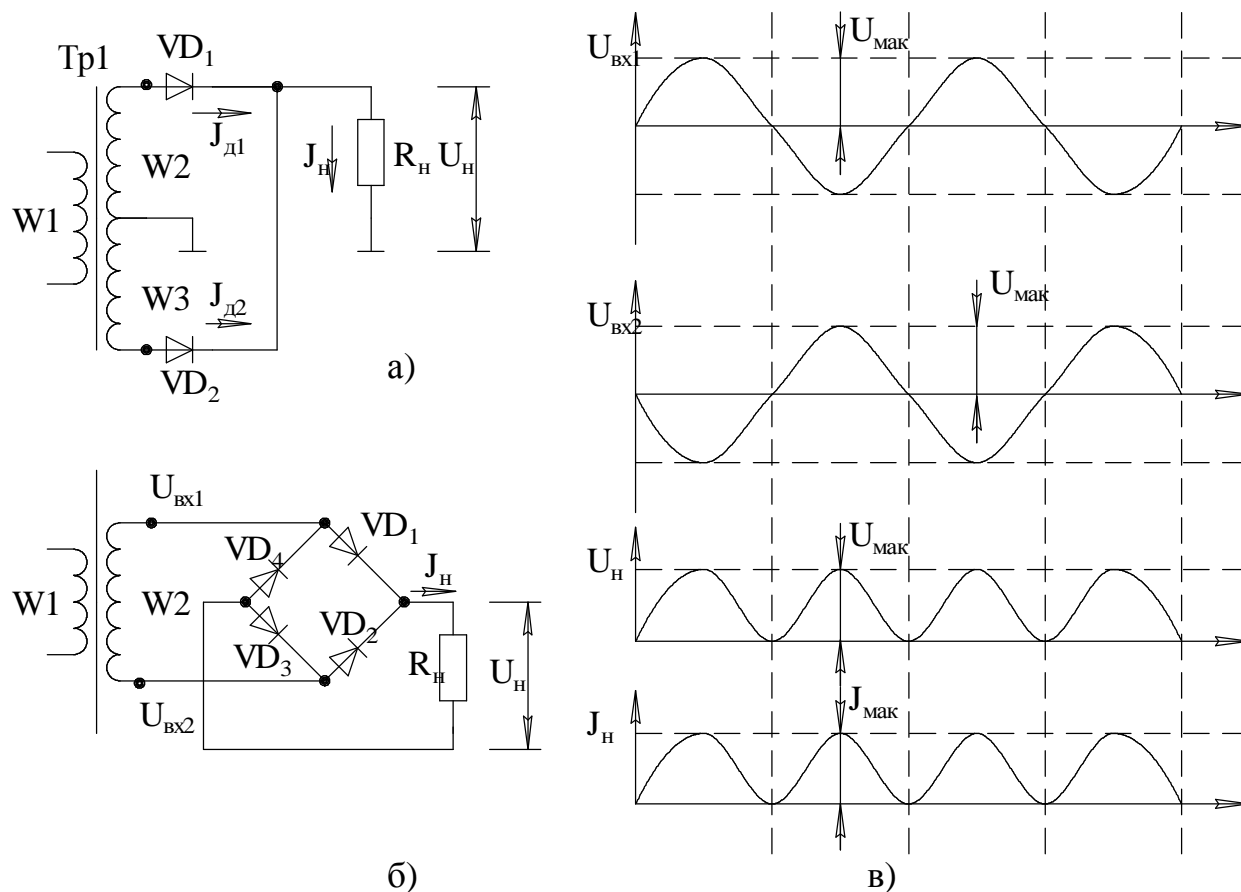


Рис. 97. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (а) и мостового (б) и его диаграмма работы (в).

Здесь обмотки трансформатора включены по схеме звезды с выводом от общей точки 0. В течении одного периода входного напряжения последовательно открываются три диода VD1-VD3:

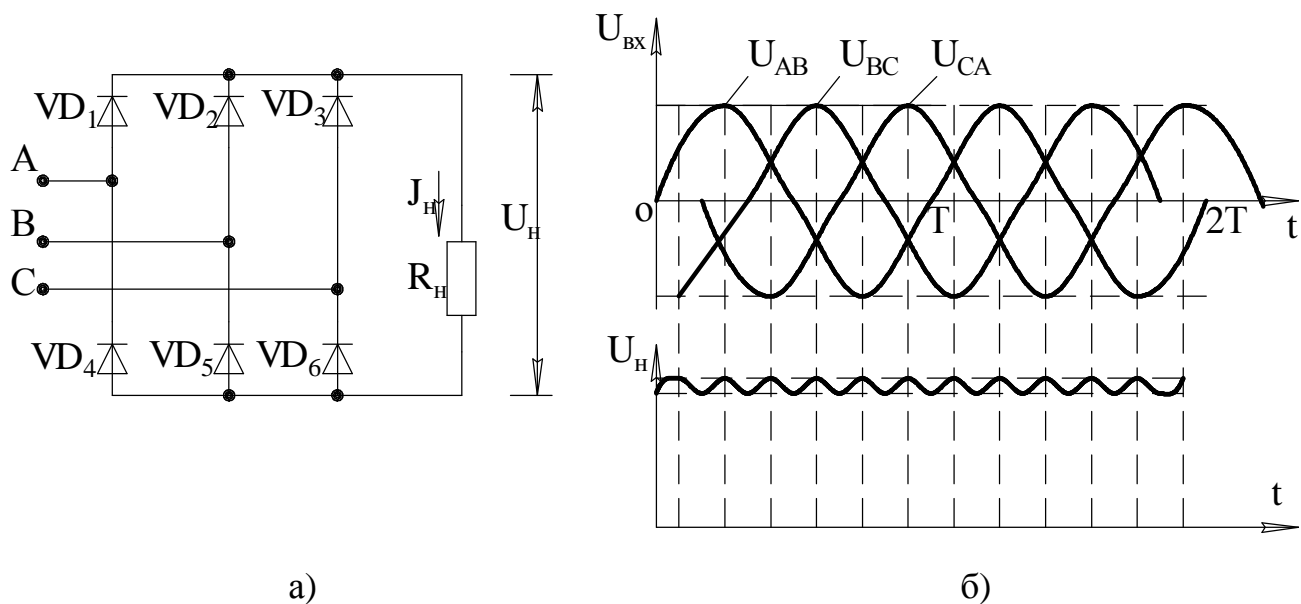


Рис. 99. Схема Ларионова (а) и временная диаграмма работы (б).

$$U_{н.ср.} = \frac{3}{\rho} U_{\max \phi} \sin \frac{\rho}{3} = \frac{3\sqrt{3}U_{\max \phi}}{2\rho} \approx 0,827U_{\max \phi} = 1,17U_{\text{действ. ф.}} ;$$

$$I_{н.ср.} = 0,827I_{\max \phi} = 1,17I_{\text{действ. ф.}}$$

Частота переменной составляющей выходного напряжения в три раза превосходит частоту входного напряжения. Для сети 50 Гц $f_{\text{пульс}}=150\text{Гц}$. Коэффициент пульсации $\epsilon=0,25$.

Схема трехфазного двухполупериодного выпрямителя (схема Ларионова) рис.99 содержит 6 диодов. Для обеспечения тока в нагрузке в схеме

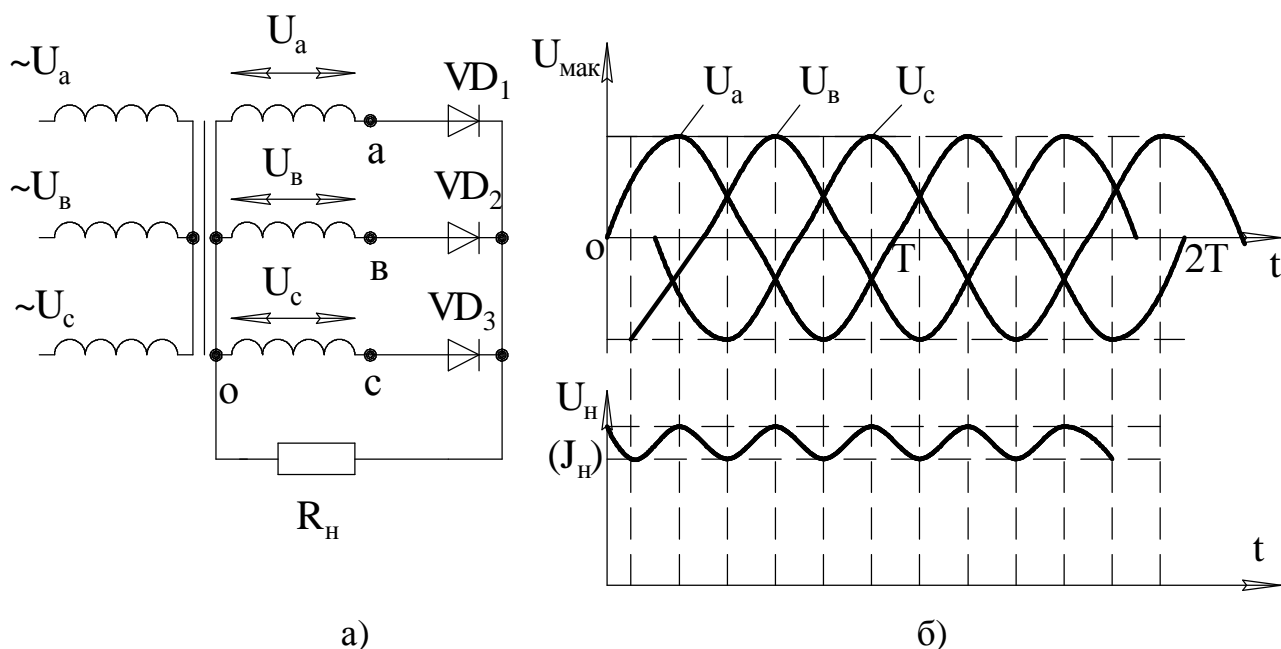


Рис. 98. Схема трехфазного однополупериодного выпрямителя (а) и временная диаграмма его работы (б).

Ларионова используются обе полуволны питающего трехфазного напряжения. Поэтому выпрямленное напряжение U_H отличается более высоким качеством.

Для рассматриваемого выпрямителя: $U_{н.ср.} = \frac{6}{\rho} U_{\max л} \sin \frac{\rho}{6} \cong 0,955 U_{\max ф}$.

Частота переменной составляющей выходного напряжения в шесть раз превосходит частоту входного сигнала.

Коэффициент пульсации выходного напряжения $\epsilon=0,057$.

Фильтры применяются для уменьшения напряжения пульсации на выходе выпрямителя. В настоящее время наиболее распространенными являются: емкостной фильтр, индуктивный фильтр и П-образный фильтр.

Емкостной фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке. Для фильтра необходимо выполнить условие:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \ll R_H ;$$

где ωC – сопротивление емкости.

Индуктивный фильтр представляет собой дроссель низкой частоты, включенный между выпрямителем и нагрузкой. Для обеспечения большого коэффициента сглаживания необходимо, чтобы $x_L = \omega L \gg R_H$. Индуктивность дросселя можно определить по формуле:

$$L = q \frac{R_H}{2\rho \cdot f_1},$$

где q – коэффициент сглаживания, f_1 – частота первой гармоники.

Недостатком индуктивного фильтра являются большие габариты и вес дросселя.

Г-образный фильтр сочетает в себе свойства индуктивного и емкостного фильтров. Его можно рассматривать как делитель напряжения с частотно-зависимым коэффициентом передачи. Для фильтра необходимо,

$$\text{чтобы } \omega \cdot L \gg R_H \gg \frac{1}{\omega_1 C}.$$

Г-образные фильтры применяются в выпрямителях большой и средней мощности.

П-образные фильтры применяются в выпрямителях с большим внутренним сопротивлением. Они сложные, дорогие, но обеспечивают высокий коэффициент сглаживания.

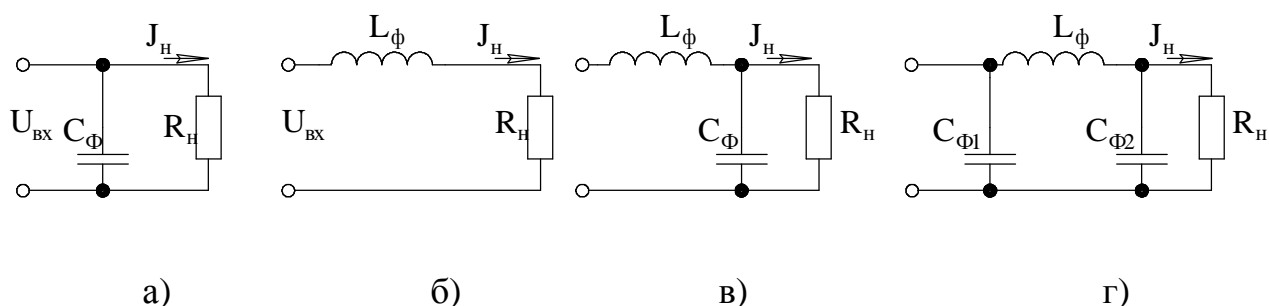


Рис. 100. Варианты сглаживающих фильтров: емкостной (а), индуктивный (б), Г-образный (в), П-образный(г).

Стабилизаторы напряжения

Стабилизатор напряжения – это электронное устройство, которое обеспечивает постоянство входного напряжения или тока нагрузки.

Стабилизаторы напряжения подразделяются на параметрические, компенсационные и импульсные. Основными параметрами стабилизаторов являются:

выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$;

выходной ток $I_{\text{ВЫХ}}$;

пределы изменения входного напряжения $\Delta U_{\text{ВХ}}$;

рассеиваемая мощность $P_{\text{рас}}$;

коэффициент неустойчивости по напряжению K_{HV} и току K_{HI} :

$$K_{\text{HV}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot 100\% ; \quad K_{\text{HI}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}} \Delta I_{\text{ВЫХ}}} \cdot 100\% ;$$

температурный коэффициент напряжения и др.

Параметрические стабилизаторы напряжения строятся на основе стабилитронов или стабилиторов (рис.101).

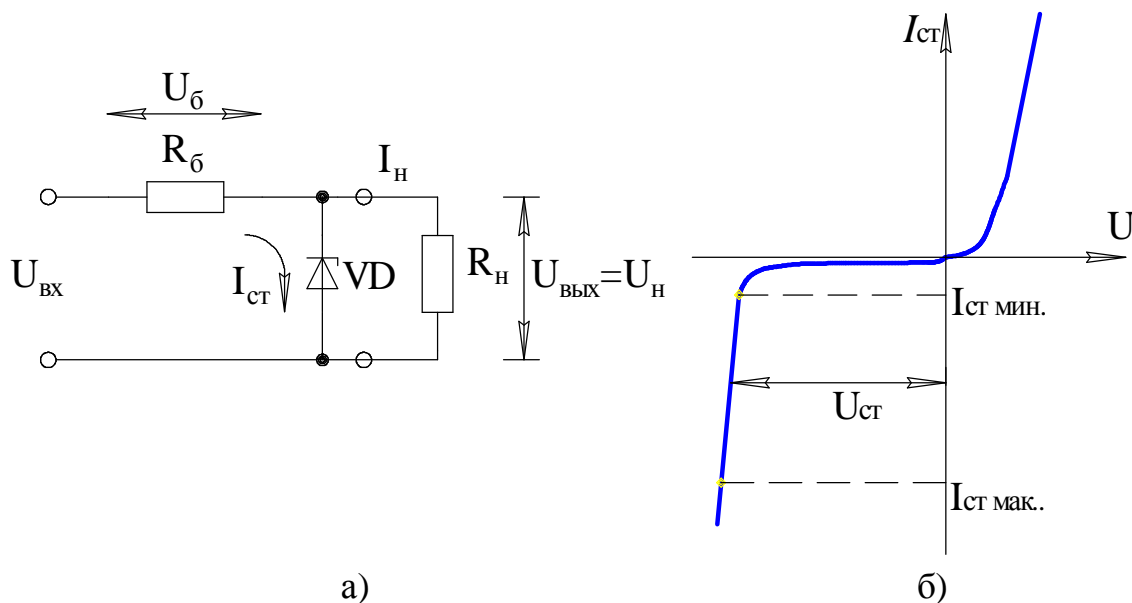


Рис. 101. Схема параметрического стабилизатора напряжения (а), вольт-амперная характеристика (б).

Схема состоит из балластного резистора $R_{\text{б}}$ и стабилитрона VD . При изменении входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ напряжение на выходе стабилизатора будет изменяться незначительно, т.к. оно определяется малоизменяющимся обратным напряжением стабилитрона $U_{\text{стаб.}}$. При этом будет только изменяться ток через стабилитрон $I_{\text{стаб.}}$. Расчет стабилизатора сводится к тому, чтобы выбрать величину сопротивления $R_{\text{б}}$, при котором ток через стабилитрон лежал в пределах: $I_{\text{ст.мин}} < I_{\text{ст}} < I_{\text{ст.макс}}$ при изменении напряжения $U_{\text{ВХ}}$ в заданных пределах.

Рассмотренная выше схема параметрического стабилизатора напряжения отличается низким КПД и небольшими нагрузочными токами. Нагрузочный ток можно повысить, если на выходе поставить эмиттерный повторитель (рис.102). Транзистор VT выбирается исходя из заданного тока нагрузки.

Компенсационный стабилизатор напряжения представляет собой устройство автоматического регулирования. Он включает в себя усилитель и регулирующий элемент, в качестве которого применяются транзисторы (рис.103).

Принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения заключается в том, что при изменении входного напряжения $U_{вх}$ или тока нагрузки $I_{н}$ изменяется выходное напряжение $U_{вых}$. Это изменение $\Delta U_{вых}$ поступает на вход усилителя, усиливается и изменяется напряжение на регулирующем элементе U_p таким образом, чтобы стабилизировать выходное напряжение $U_{вых}$.

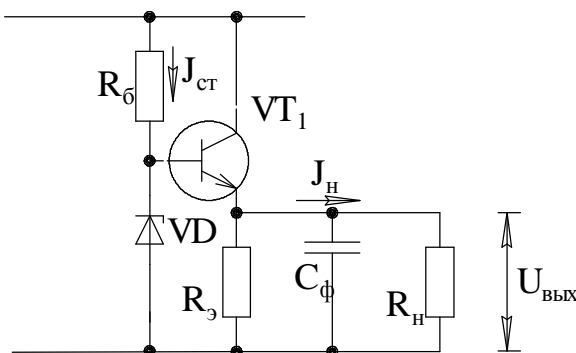


Рис. 102. Параметрический стабилизатор напряжения с эмиттерным повторителем.

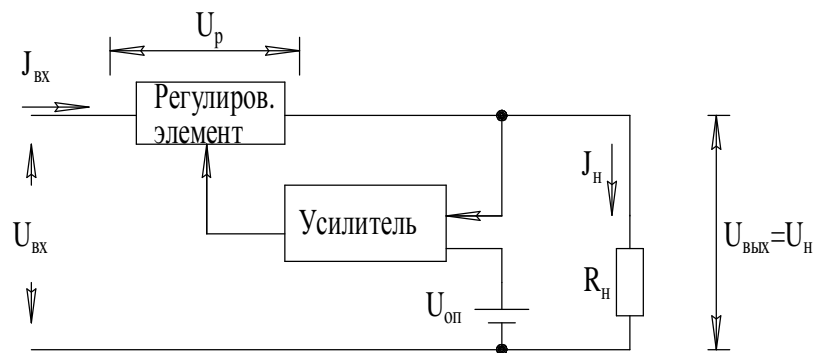


Рис. 103. Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения.

Для схемы стабилизатора $U_{вх} = U_p + U_{вых}$. При изменении входного напряжения на величину $\Delta U_{вх}$ имеем: $(U_{вх} + \Delta U_{вх}) = (U_p + \Delta U_p) + (U_{вых} + \Delta U_{вых})$.

Необходимо, чтобы $\Delta U_p \rightarrow \Delta U_{вх}$, а $\Delta U_{вых} \rightarrow 0$.

В качестве усилителя могут использоваться транзисторные каскады, ОУ и т.д.

В настоящее время в качестве стабилизаторов напряжения широко используются интегральные схемы серии К142. Они построены на принципе компенсационных стабилизаторов напряжения и подразделяются на универсальные стабилизаторы и стабилизаторы с фиксированным напряжением.

Универсальные стабилизаторы напряжения имеют внешний делитель напряжения, с помощью которого выходное напряжение можно регулировать в

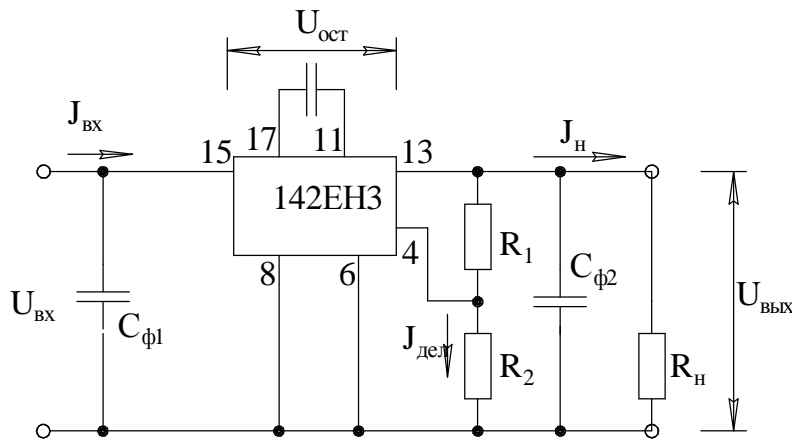


Рис. 104. Стабилизатор напряжения на ИС К142ЕН3.

широких пределах. К ним относятся микросхемы К142ЕН1, К142ЕН2, К142ЕН3, К142ЕН10.

Микросхема К142ЕН3 имеет защиту по короткому замыканию и от нагрева (рис.104).

Расчет универсального стабилизатора производится исходя из двух условий:

$$I_{\text{дел}} \geq 1,5 \text{ мА}$$

$$U_{\text{вых}} = 2,6 \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} U_{\text{ост}}$$

Мощность рассеивания на ИС определяется по формуле: $P_{\text{рас}} = I_{\text{вх}} U_{\text{ост}}$.

Для увеличения тока нагрузки параллельно с микросхемой ставят мощный транзистор, например, КТ805А, КТ829 и т.д.

Микросхемы с фиксированным напряжением имеют внутренний

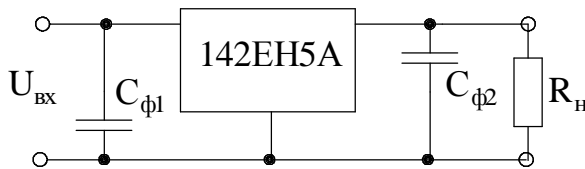


Рис. 105. Стабилизатор на ИС К142ЕН5А

делитель напряжения и настроены на определенное выходное напряжение. К таким ИС относятся 142 ЕН5, ЕН6, ЕН8 и др. Схемы имеют защиту от короткого замыкания. Выходное напряжение определяется буквой

в конце маркировки (табл.3).

Таблица 3.

Маркировка	Выходное напряжение (В)	Маркировка	Выходное напряжение (В)
К142ЕН5А	5±0,1	К142ЕН8А	9±0,27
К142ЕН5Б	6±0,12	К142ЕН8Б	12±0,3
К142ЕН5В	5±0,18	К142ЕН8В	15±0,45
К142ЕН5Д	6±0,21	К142ЕН8Д	9±0,36

Микросхема К142ЕН6А, В, Д формирует два разнополярных напряжения по 15В для питания ОУ.

В стабилизаторах с фиксированным напряжением можно повысить выходное напряжение с помощью делителя R_1, R_2 . Иногда резистор R_2 заменяют диодом или стабилитроном.

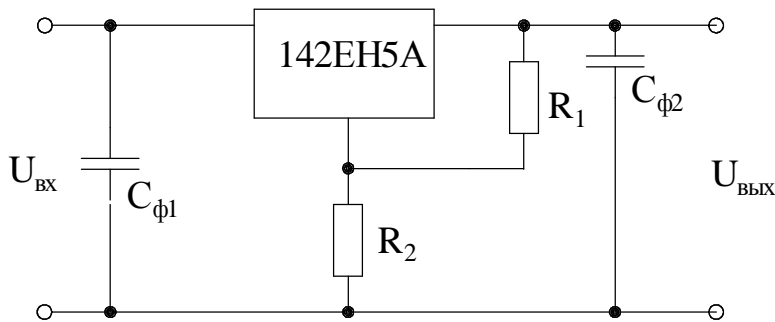


Рис. 106. Стабилизатор с повышенным фиксированным напряжением.

Сопротивление резистора определяется из формулы:

$$R_2 = \frac{(U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \cdot R_1}{(U_{ВЫХ} + I_{потр} R_1)}$$

где $I_{потр}$ – ток, потребляемый микросхемой. Значение резистора R_1 задается. Вместо резистора R_2 можно использовать диоды или стабилитроны.

Методика проектирования компенсационных стабилизаторов напряжения заключается в выборе необходимых микросхем, расчетов делителей, и подборе радиаторов для ИС. Величина емкостных фильтров $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ берется из справочной литературы. Обычно $C_{\phi 2} \approx 10$ мкФ. Напряжение на микросхеме должно быть не менее 2 вольт, однако увеличение этого напряжения приводит к существенному снижению КПД стабилизатора и увеличению массогабаритных показателей за счет радиаторов. Компенсационные стабилизаторы напряжения применяются при небольших нагрузочных токах. Ключевые стабилизаторы напряжения обеспечивают значительно больший КПД за счет того, что транзисторный ключ работает в ключевом режиме. При этом снижаются массогабаритные характеристики стабилизатора. Однако в ряде случаев такие стабилизаторы являются источником импульсных помех, что снижает информационную надежность электронной аппаратуры.

Ключевые стабилизаторы (рис.107) содержат накопительную индуктивность (дроссель) L , включенную последовательно с нагрузкой R_n . Для сглаживания пульсаций в нагрузке параллельно ей включен конденсатор C_{ϕ} . Ключевой транзистор VT включен между источником питания $U_{ВХ}$ и накопительной индуктивностью L . Устройство управления включает и выключает транзистор VT в зависимости от значения напряжения на нагрузке U_n .

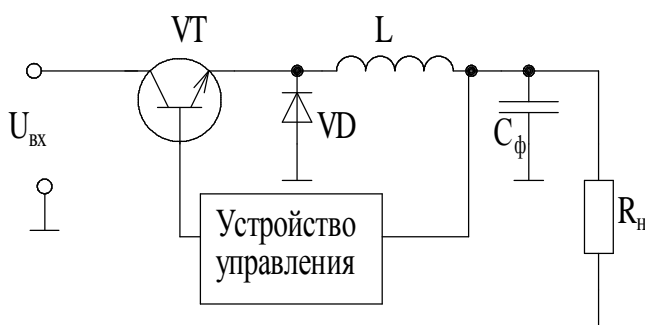


Рис. 107. Ключевой стабилизатор напряжения.

При открытом состоянии транзистора напряжения поступает на выход и одновременно энергия запасается в дросселе. При отключении транзистора в нагрузке течет ток за счет емкости C_{ϕ} и самоиндукции дросселя L .

По виду управления ключевые стабилизаторы подразделяются на импульсные и релейные.

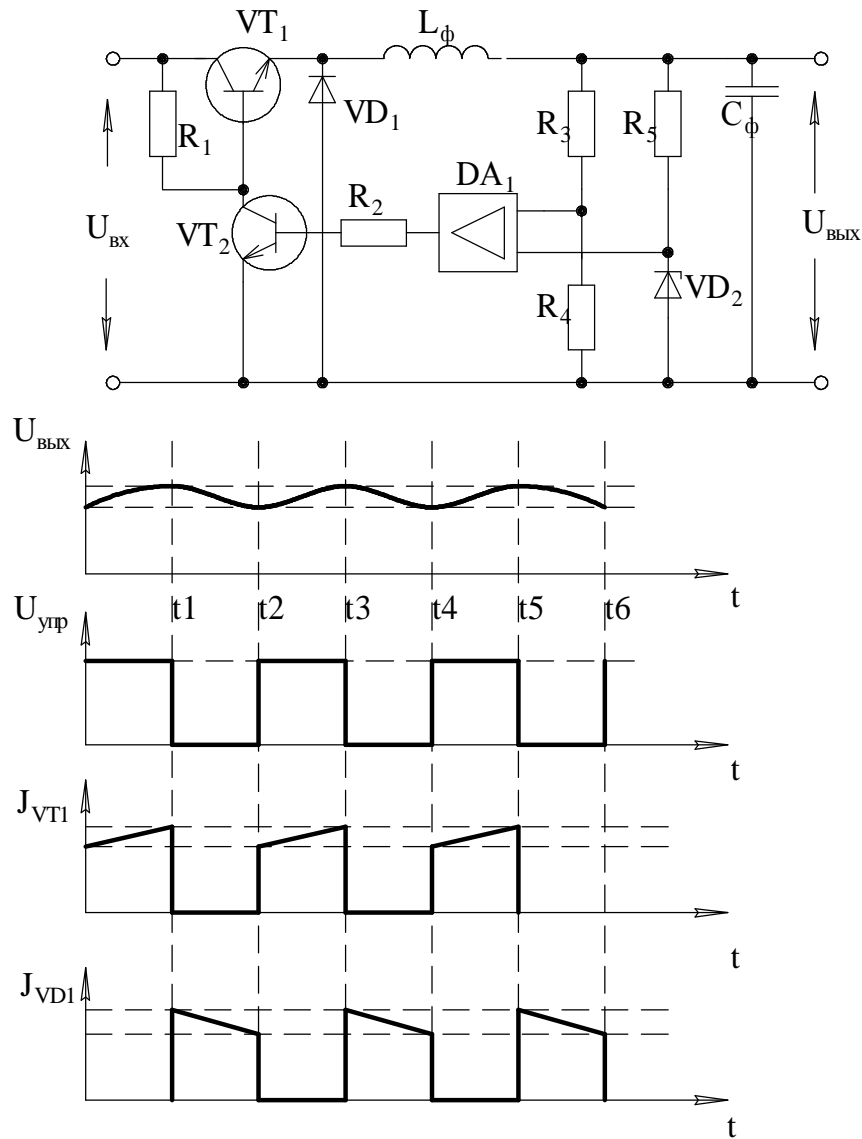


Рис 108. Схема релейного стабилизатора напряжения (а) и временная диаграмма его работы (б).

В первых – частота управляющих сигналов постоянна, задается внешним генератором, однако в процессе работы изменяется скважность.

В релейных стабилизаторах напряжения управляющие сигналы формируются с помощью компаратора и зависят от выходного напряжения. На рис.108 приведена схема релейного стабилизатора напряжения.

Предположим в момент времени t_1 напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ выше требуемого ($U_1 > U_2$), тогда напряжение на выходе ДА1 положительное, транзистор VT2 открывается, а транзистор VT1 запирается. Ток дросселя, протекая через диод VD1, отдает накопленную энергию в нагрузку. По мере уменьшения энергии дросселя выходное напряжение стабилизатора уменьшается и в момент времени t_2 компаратор запирает транзистор VT2. При этом открывается транзистор VT1 и на вход $L_{\phi}C_{\phi}$ фильтра прикладывается напряжение близкое к $U_{\text{ВХ}}$.

Ключевые стабилизаторы напряжения имеют небольшие габаритные размеры.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие нелинейного элемента от линейного?
2. Назовите основные графоаналитические методы расчета нелинейных цепей.
3. В чем заключается метод пересечения характеристик?
4. По каким признакам классифицируются усилительные устройства?
5. Назовите основные характеристики усилителя.
6. Назовите основные параметры усилителя.
7. Какие искажения усиленного сигнала Вы знаете и в чем причина их появления?
8. Что такая обратная связь в усилителе?
9. Какие виды обратной связи Вы знаете?
10. Основные режимы работы усилителя.
11. Основные особенности работы усилителя в режиме А.
12. Перечислите основные методы стабилизации работы усилителя по схеме с ОЭ.
13. Чему равны K_I , K_U , K_P в усилителях с ОЭ?
14. Чему равны K_I , K_U , K_P в усилителях с ОК?
15. Что представляет собой дифференциальный усилитель?
16. Чему равен коэффициент K_U для дифференциального усилителя?
17. Какие сигналы называются синфазными?
18. Чему равен K_U многокаскадного усилителя?
19. Что такое дрейф нуля УПТ?
20. С какой целью в качестве первого каскада УПТ выбирают дифференциальный усилитель?
21. Принцип работы УПТ с преобразованиями сигнала.
22. Что такое избирательный усилитель?
23. Классификация усилителей мощности.
24. Почему в двухтактных усилителях мощности с трансформаторным выходом, работающих в режиме АВ, нелинейные искажения меньше, чем при работе в режиме В?
25. Что такое ОУ?
26. Перечислите основные параметры ОУ.
27. Классификация ОУ.
28. Какие требования предъявляются к прецизионным ОУ?
29. Какой вид обратной связи используется в повторителе на ОУ?
30. Докажите, почему K_U инвертируемого усилителя может быть меньше 1?
31. Объясните, почему входные резисторы на входах ОУ желательно иметь одинаковыми?
32. Нарисуйте схему стабилизатора тока на ОУ.
33. Что представляют собой активные фильтры?
34. Как обеспечить защиту от короткого замыкания в ОУ?
35. Что такое "балансировка" ОУ?
36. В каких случаях применяется автоматическая установка нулей ОУ?

37. Назначение аналоговых компараторов?
38. Нарисуйте схему двухпорогового компаратора на ОУ?
39. Какие условия необходимо выполнить для работы генератора гармонических колебаний?
40. Что представляет собой компаратор?
41. Чем отличается генератор RC-типа от генератора LC-типа?
42. Перечислите основные параметры импульсного сигнала.
43. Что такое мультивибратор?
44. Как вычислить частоту импульсов мультивибратора на транзисторах?
45. Нарисуйте схему мультивибратора на ОУ.
46. Нарисуйте схему одновибратора на транзисторах.
47. Чем определяется длительность выходных импульсов в триггерах RS-типа?
48. Принцип работы ГПН.
49. От каких параметров зависит линейность ГПН?
50. Что представляет собой ИВН?
51. Перечислите основные параметры ИВН.
52. Приведите схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя.
53. Поясните отличие между одно- и двухполупериодными схемами трехфазной цепи.
54. Перечислите основные виды сглаживающих фильтров.
55. Классификация стабилизаторов напряжения.
56. Нарисуйте схему параметрического усилителя. Поясните методику его расчета.
57. Поясните принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.
58. Поясните принцип работы ключевого стабилизатора напряжения.
59. На какие группы подразделяются интегральные стабилизаторы напряжения?
60. Рассчитайте стабилизатор напряжения на ИС К142ЕН3 для $U_{\text{вых}}=10\pm 0,5\text{В}$, $I_{\text{вых}}=0,5\text{А}$.

4. Цифровые электронные устройства

4.1. Системы счисления.

Способ записи чисел цифровыми знаками называется *системой счисления*. Они делятся на непозиционные, например, римская система счисления, и позиционные.

Система называется позиционной, если значение каждой цифры, входящей в запись числа, определяется ее местоположением в числе. В цифровой технике нашли применение только позиционной системе счисления.

Любое число в позиционной системе счисления можно представить в виде суммы

$$N_q = K_n q^n + K_{n-1} q^{n-1} + \dots + K_1 q^1 + K_0 q^0 + \dots,$$

где N_q – число, записанное в системе счисления q ;

K_n – разрядные коэффициенты;

n – разрядность;

q – основание системы счисления.

Основанием системы счисления q называется общее количество цифр, используемых в данной позиционной системе для записи чисел. Если принять $q = 10, 2, 8, 16$ и т.д., то будем иметь соответственно десятичную, двоичную, восьмеричную, шестнадцатеричную системы счисления. В таблице 4 приведен натуральный ряд чисел в различных системах счисления.

Таблица 4

$q=10$	$q=8$	$q=2$	$q=16$	$q=10$	$q=8$	$q=2$	$q=16$
0	0	0	0	8	10	1000	8
1	1	1	1	9	11	1001	9
2	2	10	2	10	12	1010	A
3	3	11	3	11	13	1011	B
4	4	100	4	12	14	1100	C
5	5	101	5	13	15	1101	D
6	6	110	6	14	16	1110	E
7	7	111	7	15	17	1111	F
				16	20	10000	10

Для перевода чисел из одной системы счисления в другую существуют свои правила. Например, для перевода числа N_q из десятичной системы счисления в систему счисления с основанием q необходимо осуществить последовательное деление этого числа и получающихся остатков на это основание. Остатки от деления представляют собой число в системе счисления с основанием q . Например, перевести число 54 в двоичную, восьмеричную, шестнадцатеричную системы счисления:

рого не зависит от значения истинности других высказываний, называется простым. При анализе и синтезе логических схем простое высказывание рассматривается как независимая переменная X , принимающая два значения: "0" или "1". Сложное высказывание зависит от простых высказываний и также может принимать два значения "0" или "1". Зависимость сложного высказывания от простых носит название логической или переключательной функции Y .

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

В теории логических функций особое значение имеют функции одной и двух переменных. Для одной переменной X существуют четыре логические функции: 0, 1, переменная X и ее инверсия \bar{X} (операция "НЕ"). Первая и вторая функции – это константы "0" и "1" (рис. 109).

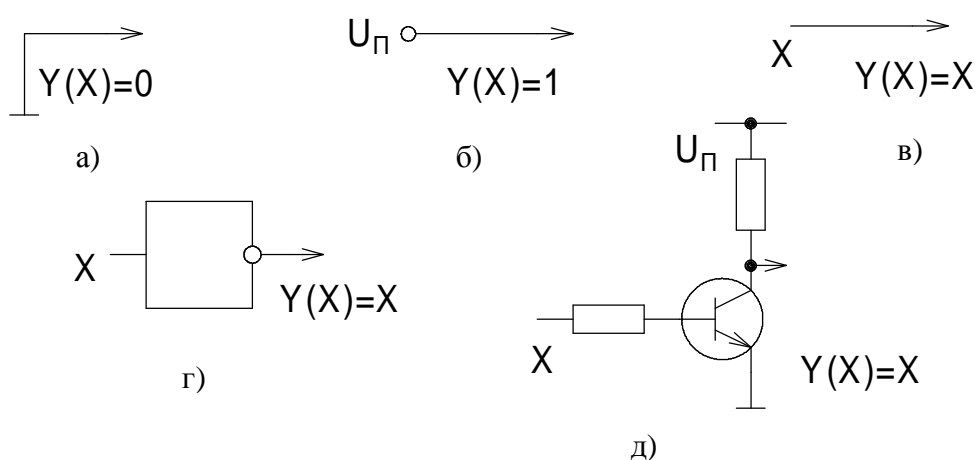


Рис.109. Функции одной переменной: "0"(а), "1"(б), X (v), \bar{X} (г), схемная реализация операции "НЕ"(д).

Для реализации операции "НЕ" обычно используют усилительный каскад с ОЭ.

Для двух переменных X_1, X_2 существуют 16 логических функций, причем шесть операций зависят только от одной переменной: 0, 1, $X_1, X_2, \bar{X}_1, \bar{X}_2$ и де-

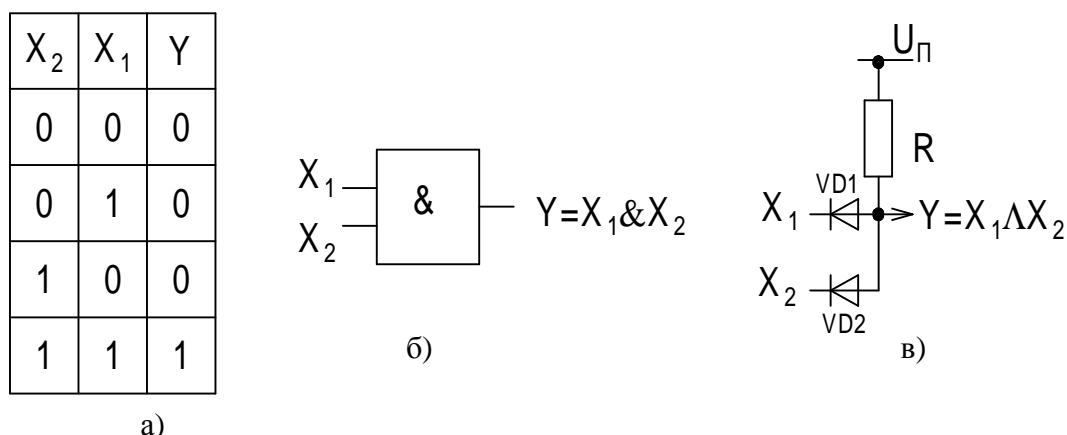


Рис.110. Таблица а истинности элемента(а), логический элемент "И"(б), схемная реализация элемента(в).

связь зависят от двух переменных.

Наиболее важными логическими операциями двух переменных являются:

- *логическое умножение*. Эту операцию в математике называют конъюнкцией, а в схемотехнике – операцией "И". Обозначаются значком “&” или “Λ”. (рис.110)
- *логическое сложение*. Операция носит название дизъюнкция, а в схемотехнике – операция "ИЛИ".

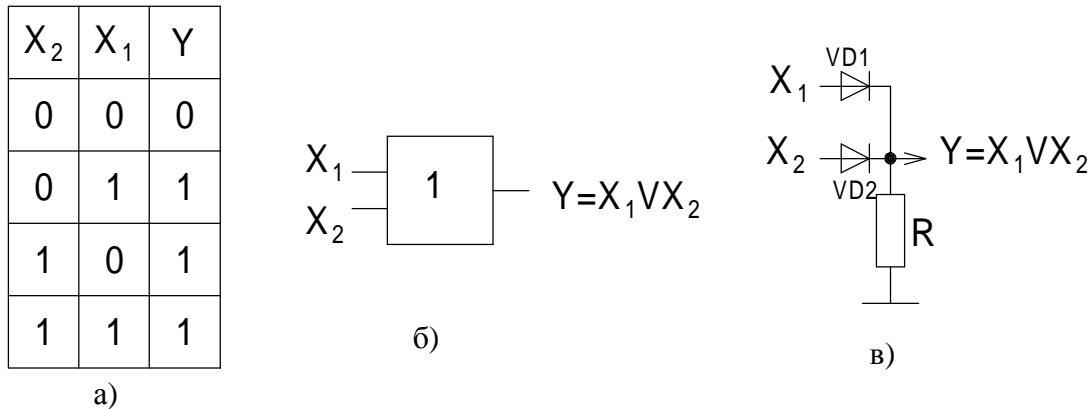


Рис.111. Таблица истинности элемента(а), условное обозначение элемента "ИЛИ"(б), схема реализации(в).

Количество входных сигналов, поступающих на элемент может быть любым. На рис.111(в) изображена схема реализации операции "ИЛИ" на диодах. В математических выражениях операция обозначается знаками "V" или "+".

- *равнозначность* (операция сравнения)(рис.112а).

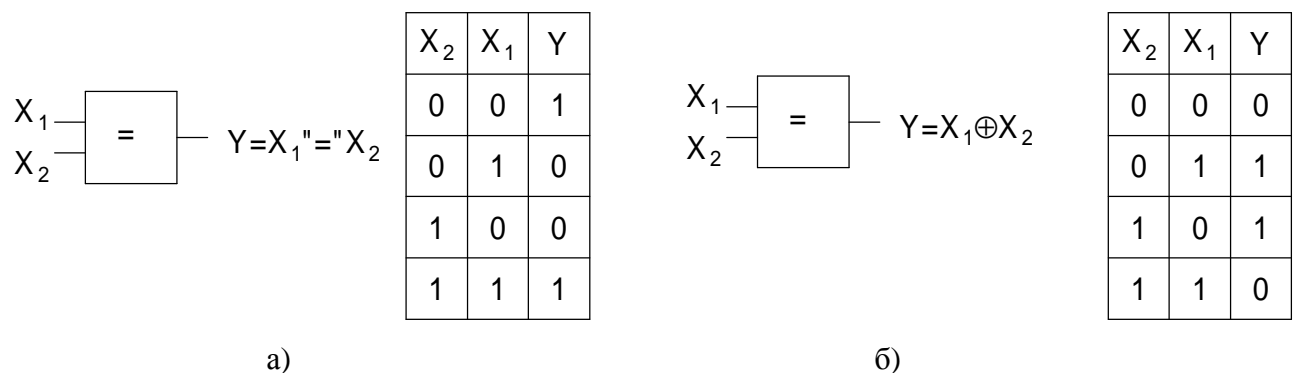


Рис.112. Условное обозначение и таблица истинности элемента "равнозначность"(а) и "неравнозначность"(б)

- *неравнозначность* (рис.112б).

- операция Шеффера или операция "И-НЕ"

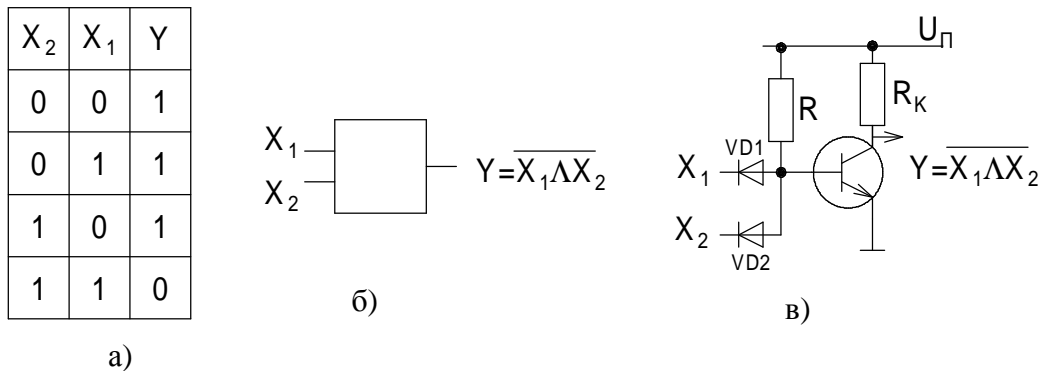


Рис.113. Условное обозначение(а), таблица истинности(б) и схемная реализация элемента "И-НЕ"(в).

- операция Пирса или операция "ИЛИ-НЕ"

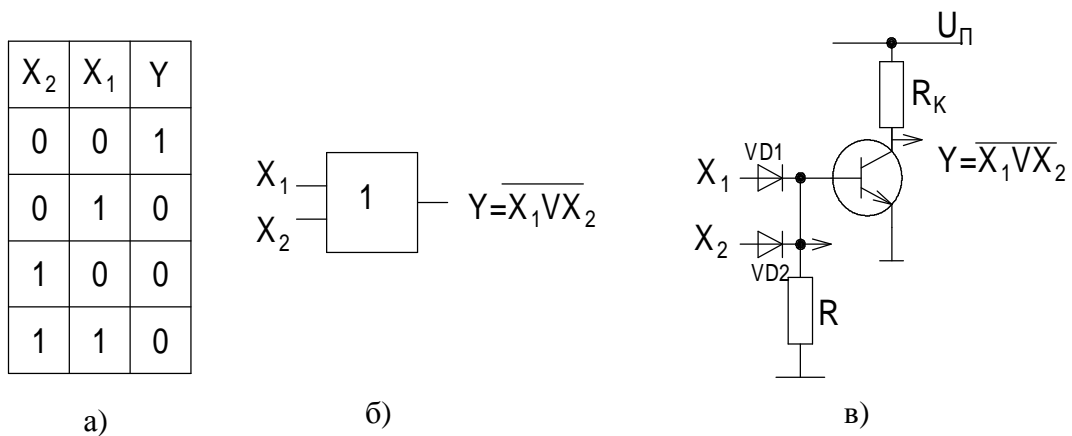


Рис.114. Условное обозначение(а), таблица истинности(б) и схемная реализация элемента "ИЛИ-НЕ"(в).

Способы записи функций алгебры логики. Рассмотрим некоторое логическое устройство, на вход которого присутствует некоторый Π – разрядный двоичный код $x_{n-1} \dots x_1 x_0$, а входе соответственно Π_2 – разрядный двоичный код $Z_{m-1} \dots Z_1 Z_0$ (рис.115).

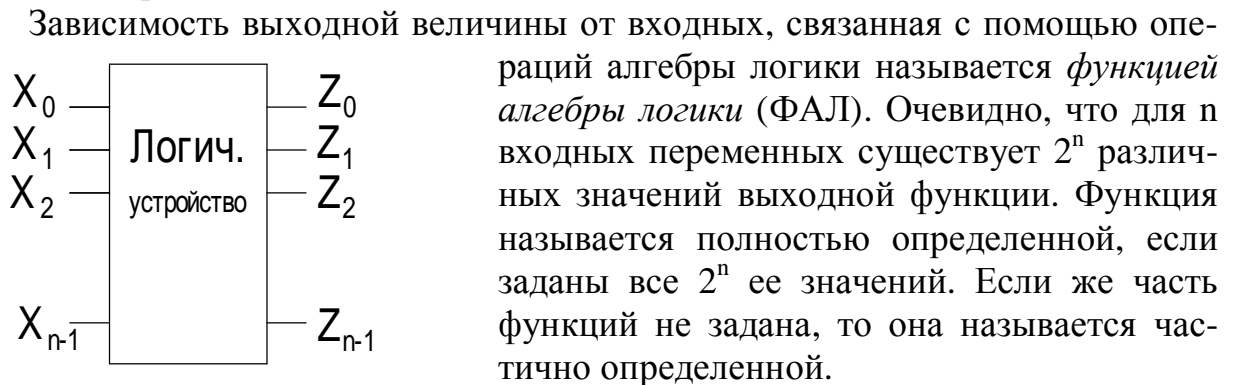


Рис.115. Логическое устройство.

Устройства, поведение которых описывается при помощи ФАЛ, называются *логическими*. Для описания ФАЛ могут быть использованы следующие способы:

- словесное описание;
- описание в виде таблиц истинности;
- описание в виде алгебраических выражений;
- описание в виде последовательности десятичных чисел.

Словесное описание ФАЛ может звучать так: "Логическая функция трех переменных равна единице, если все три входные переменные равны "единицам". Данный вид описания наиболее часто применяется для первоначального описания поведения логического устройства.

Описание в виде таблицы истинности представляет собой таблицу, которая содержит все возможные комбинации входных переменных и соответствующие им значения функций. Таблица содержит 2^n строк и $n + m$ столбцов. Например, таблица 5.

Таблица 5.

x_2	x_1	x_0	y	x_2	x_1	x_0	y
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1
0	1	0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1

При описании ФАЛ с помощью алгебраических выражений возможны две формы ее записи:

1. Дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ), которая представляет собой логическую сумму элементарных логических произведений, в каждое из которых входят входные переменные или их инверсии один раз. ДНФ может быть получена из таблицы истинности. Для этого для значений функции $Y=1$ записываются элементарные логические произведения. Для таблицы 5 имеем:

$$Y(x_2, x_1, x_0) = \overline{x_2} \overline{x_1} \overline{x_0} + \overline{x_2} \overline{x_1} x_0 + \overline{x_2} x_1 \overline{x_0} + \overline{x_2} x_1 x_0$$

2. Конъюнктивная нормальная форма (КНФ), которая представляет собой логическое произведение элементарных логических сумм, в каждую из которых входит входные переменные или их инверсии только один раз. КНФ может быть получена из таблицы истинности. Для этого для значений функции $Y=0$ записываются элементарные логические суммы входных величин. Для таблицы 5 записываем:

$$Y(x_2, x_1, x_0) = (x_2 + x_1 + x_0) \cdot (x_2 + x_1 + \overline{x_0}) + (\overline{x_2} + x_1 + x_0) + (\overline{x_2} + \overline{x_1} + x_0)$$

Описание ФАЛ в виде последовательности десятичных чисел можно получить из алгебраических выражений ДНФ и КНФ. Например для нашего случая:

$$Y(x_2, x_1, x_0) = \Sigma(2, 3, 5, 7); \quad Y(x_2, x_1, x_0) = \Pi(0, 1, 4, 6)$$

Основные теоремы и аксиомы алгебры логики и минимизация ФАЛ. Одним из важнейших положений алгебры логики является принцип двойственно-

сти. Он заключается в том, что операции логического сложения можно заменить операциями логического умножения и наоборот.

Если $X_1 \cdot X_0 = Y$, то $\overline{X_1} + \overline{X_0} = \overline{Y}$; если $X_1 + X_0 = Y$, то $\overline{X_1} \cdot \overline{X_0} = \overline{Y}$

свою очередь все логические функции могут быть записаны в ДНФ и КНФ. Следовательно, любую логическую функцию можно представить с помощью трех элементарных функций: инверсии, дизъюнкции и конъюнкции.

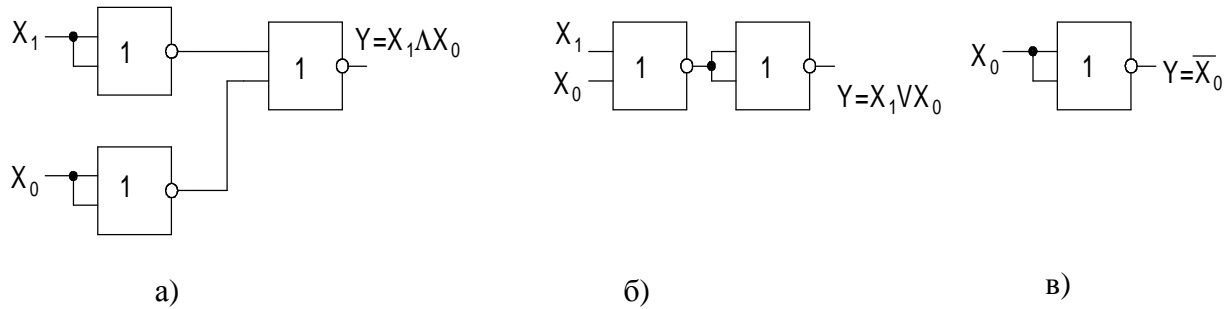


Рис.116. Реализация операций И(а), ИЛИ(б), НЕ(в) на базе элементов 2ИЛИ-

Функционально полной системой логических элементов называется совокупность логических элементов, позволяющая реализовать все 16 логических операций. К таким функционально полным системам относятся системы: И, ИЛИ, НЕ; И, НЕ; ИЛИ, НЕ; И-НЕ. В качестве примера рассмотрим выполнение операций И, ИЛИ, НЕ на элементах ИЛИ-НЕ.

Теоремы булевой алгебры отражают связи, существующие между операциями, выполняемыми над логическими переменными.

$$X + 0 = X$$

$$X + 1 = 1$$

$$X + X = X$$

$$\overline{\overline{X}} + X = 1$$

$$\overline{\overline{X}} = X$$

$$X_1 + X_0 = X_0 + X_1$$

$$(X_2 + X_1) + X_0 = X_2 + (X_1 + X_0)$$

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

$$X_1 \cdot X_0 + X_0 = X_0$$

$$X_2 \cdot X_1 + X_0 = (X_1 + X_0) \cdot (X_2 + X_0)$$

$$X_1 \cdot \overline{X_0} + X_0 = X_1 + X_0$$

$$X_1 \cdot X_0 + \overline{X_1} \cdot X_0 = X_0$$

$$X \cdot 1 = X$$

$$X \cdot 0 = 0$$

$$X \cdot X = X$$

$$X \cdot \overline{X} = 0$$

$$X_1 \cdot X_0 = X_0 \cdot X_1$$

$$(X_2 \cdot X_1)X_0 = X_2(X_1 \cdot X_0)$$

$$\overline{X_1 \cdot X_0} = \overline{X_1} + \overline{X_0}$$

$$(X_1 + X_0)X_0 = X_0$$

$$(X_2 + X_1)X_0 = X_2X_0 + X_1X_0$$

$$(X_1 + \overline{X_0})X_0 = X_1X_0$$

$$(X_1 + X_0)(\overline{X_1} + \overline{X_0}) = X_0$$

Любую логическую схему можно описать и представить в совершенной дизъюнктивной или конъюнктивной нормальной форме. Однако полученная

таким образом схема не является оптимальной с точки зрения ее практической реализации. Поэтому исходные ФАЛ обычно *минимизируют*. Целью минимизации является уменьшение стоимости ее технической реализации. Критерий минимизации неоднозначен. Наиболее просто задача минимизации решается с использованием карт Вейча. Данный метод минимизации базируется на табличном методе представления ФАЛ при числе переменных меньше пяти.

Карта Вейча – это прямоугольная таблица, число клеток в которой равно 2^n и в каждой клетке имеется набор всех входных переменных и их инверсий. На рис.117 приведены карты Вейча для двух, трех и четырех переменных. Алгоритм минимизации ФАЛ сводится к следующему:

- 1) исходные данные записываются в виде таблицы истинности;

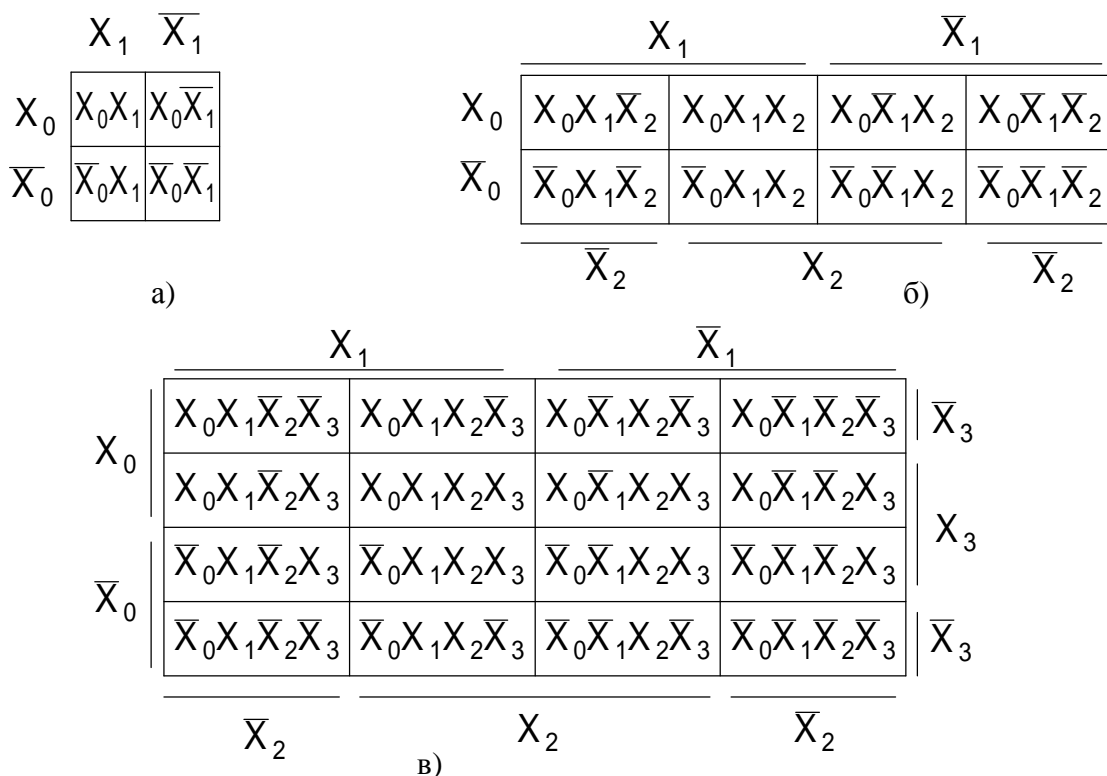
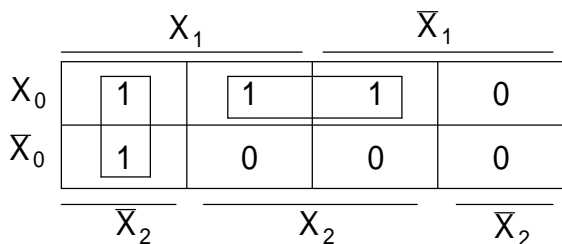


Рис.117. Карта Вейча для двух переменных(а), трех переменных(б), четырех переменных(в).

- 2) составляется карта Вейча, в квадраты которой записываются значения функций из таблицы истинности;
- 3) все клетки, содержащие 1, объединяются в замкнутые области, причем каждая область должна представлять собой прямоугольник с числом клеток 2^k , где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Области могут пересекаться и одни и те же клетки могут входить в разные области. Затем производится запись минимизированного выражения в дизъюнктивной нормальной форме.



Допустим необходимо минимизировать ФАЛ, заданную таблицей 5. Составляем карту Вейча, объединяем “1” в две области и записываем ФАЛ в ДНФ $Y(X_2, X_1, X_0) = X_1\bar{X}_2 + X_0X_2$

Полученное выражение может быть реализовано на логических элементах И, ИЛИ, НЕ(рис.118а). Дизъюнктивная форма функции может быть преобразована в конъюнктивную нормальную форму. Для этого производим двойную инверсию и используем принцип двойственности.

$$Y(X_2, X_1, X_0) = X_1\bar{X}_2 + X_0X_2 = \overline{\overline{X_1\bar{X}_2 + X_0X_2}} = \overline{\overline{X_1\bar{X}_2} \cdot \overline{X_0X_2}} = \overline{\overline{X_1\bar{X}_2} \cdot \overline{X_0X_2}}$$

Полученное выражение реализуется на логических элементах И-НЕ (рис.118,б).

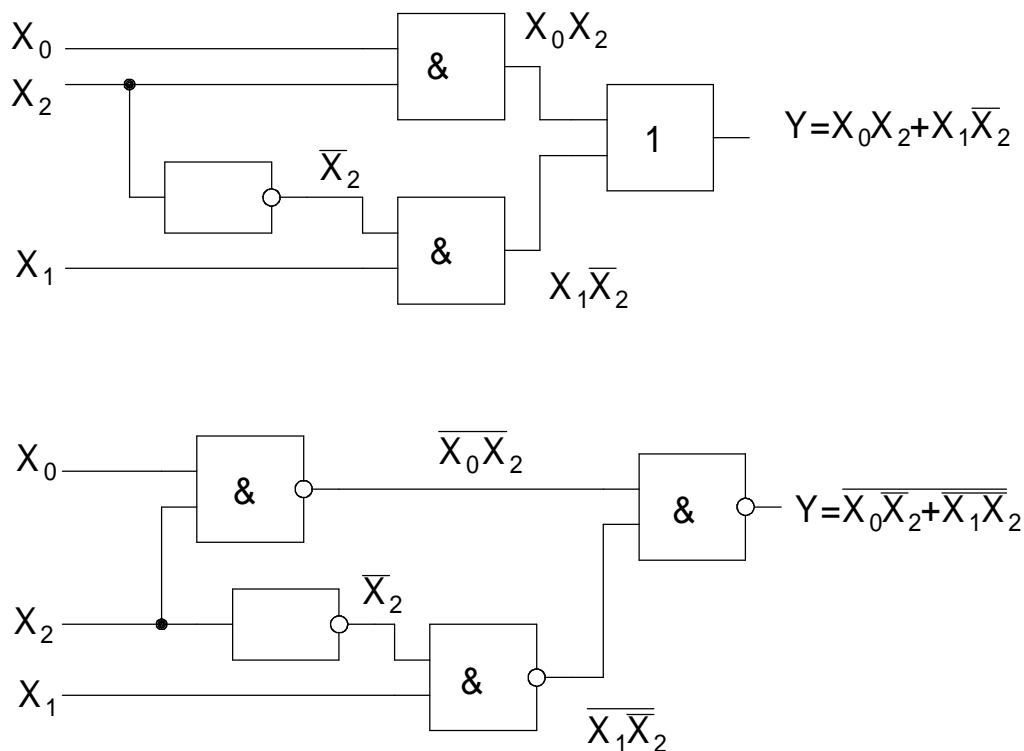


Рис.118. Схема реализации ДНФ(а) и КНФ(б).

4.2. Классификация логических устройств

Логические устройства могут быть классифицированы по различным признакам.

В зависимости от способа ввода и вывода информации цифровые устройства подразделяются на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Последовательным называется устройство, в котором входные сигналы поступают на вход, а выходные сигналы снимаются с выхода последовательно разряд за разрядом.

Устройство называется *параллельным*, если входные сигналы подаются на вход, а выходные сигналы снимаются с выхода одновременно.

В *последовательно-параллельных* устройствах входные и выходные сигналы представлены в разных формах. Либо на вход сигналы поступают последовательно сигнал за сигналом, а с выхода они снимаются одновременно, либо наоборот.

По принципу действия все цифровые устройства делятся на два класса: комбинационные и последовательные(накопительные).

Комбинационными цифровыми устройствами (ЦКУ) называются устройства, выходные сигналы которых определяются только действующими в данный момент входными сигналами и не зависят от внутреннего состояния устройства.

Последовательными устройствами называются цифровые устройства, выходные сигналы которых зависят не только от входных сигналов, но и от внутреннего состояния устройства. Этот тип устройств часто называют цифровыми автоматами.

4.3. Комбинационные цифровые устройства

К комбинационным ЦУ относятся: дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, комбинационные сумматоры и АЛУ.

Дешифратором называется комбинационная цифровая схема с несколькими входами и выходами, преобразующая код, подаваемый на входы, в сигнал на одном из выходов. Если дешифратор, имеющий n входов, имеет 2^n выходов, то

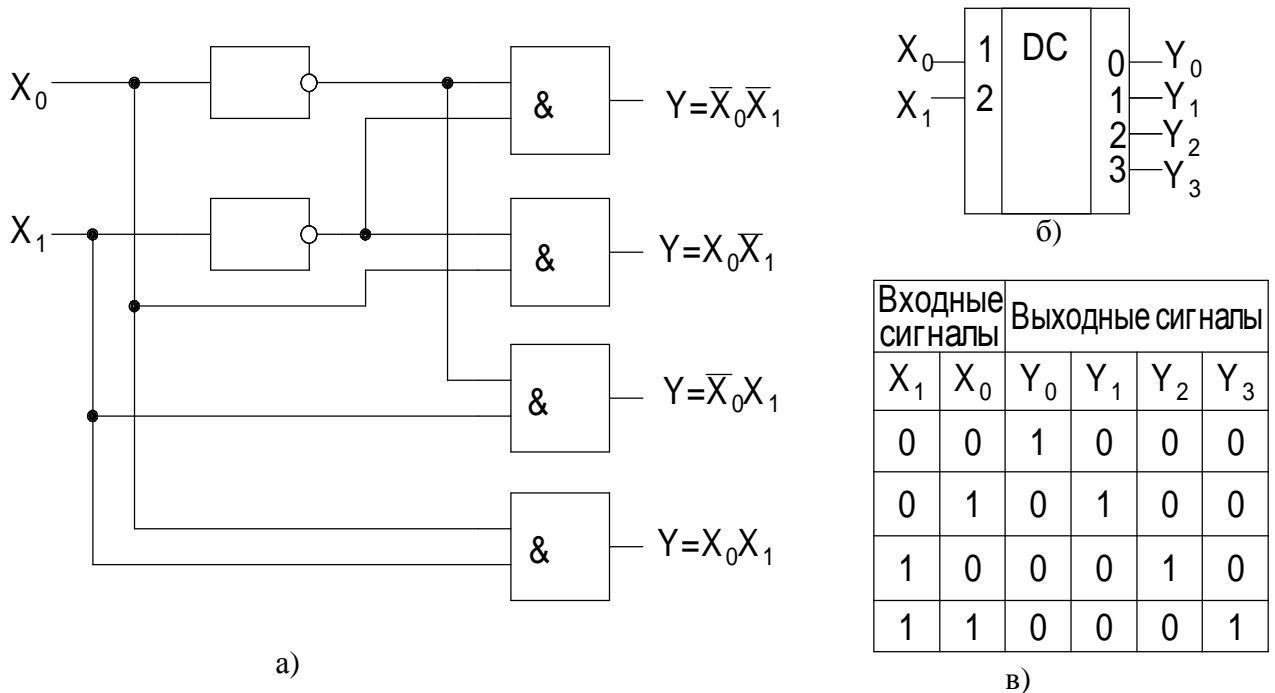


Рис.119. Схема дешифратора(а), условное обозначение(б), таблица истинности(в)

такой дешифратор называется полным. Если количество выходов меньше, то дешифратор называется неполным.

Логическая схема дешифратора на четыре выхода приведена на рис.119.

Поведение дешифратора описывается таблицей истинности(рис.119в). Используя карту Вейча, получаем $Y_0 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_0}$, $Y_1 = \overline{X_1} \cdot X_0$, $Y_2 = X_1 \cdot \overline{X_0}$, $Y_3 = X_1 \cdot X_0$.

Дешифраторы выпускаются, как правило, в виде микросхем с количеством выходов 4, 8, 10, 16, 32. Ряд микросхем имеют инверсные выходы, например, К555ИД3.

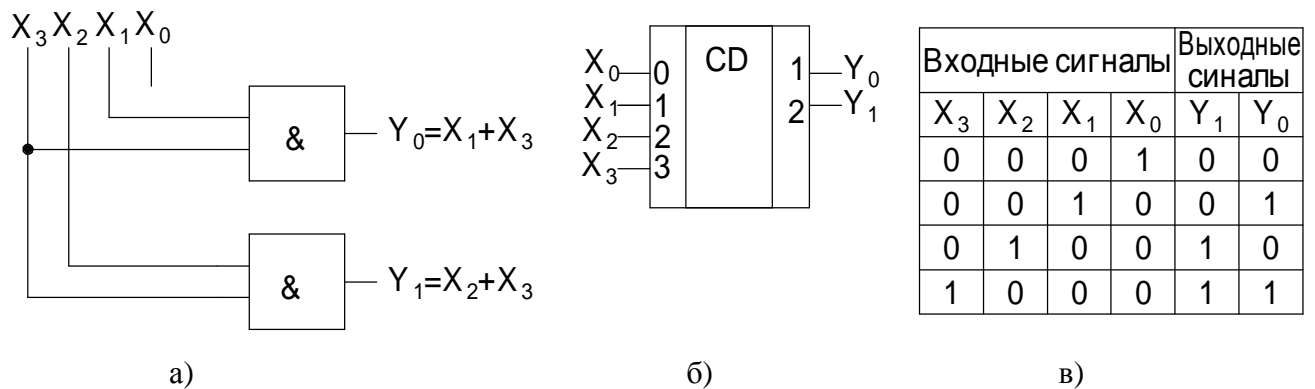


Рис.120. Схема шифратора(а), условное обозначение(б), таблица истинности(в)

Шифратором называется устройство, предназначенное для преобразования чисел из десятичной системы в двоичную. Логическая схема шифратора на два выхода приведена на рис.120.В соответствии с таблицей истинности (рис. 120в), используя карты Вейча, получаем: $Y_0 = X_1 + X_3$; $Y_1 = X_2 + X_3$.

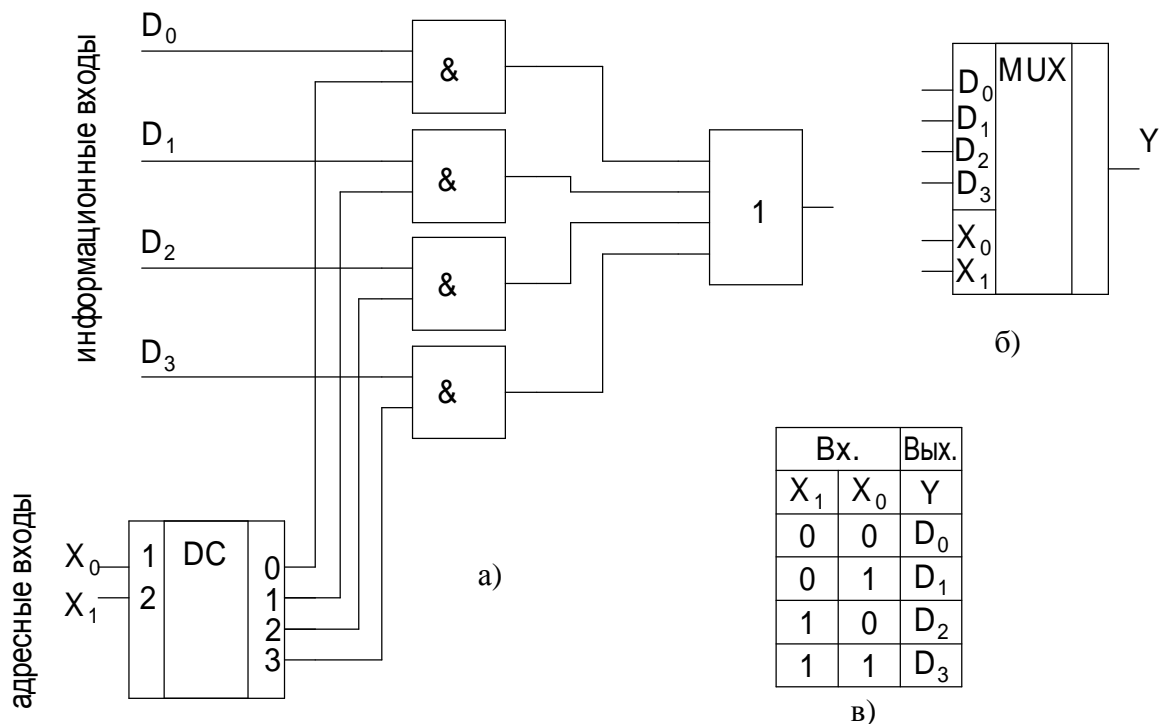


Рис.121. Схема мультиплексора(а), условное обозначение(б), таблица истинности(в).

Нетрудно видеть, что в шифраторе сигнал, подаваемый на вход X_0 , не используется. Основное применение шифраторов – это введение первичной информации с клавиатуры (преобразование десятичного кода в двоичный), например, ИС К555ИВ3.

Мультиплексором называется комбинационное цифровое устройство, предназначенное для управляемой передачи информации с нескольких источников в один выходной канал. Мультиплексор можно реализовать, используя логические элементы "И" и дешифратор. Мультиплексор имеет один выход, информационные входы и адресные или управляющие входы (рис.121). В зависимости от кода, подаваемого в адресные шины X_0, X_1 один из информационных входов подключается к выходному каналу.

Функция алгебры логики, описывающая работу мультиплексора, имеет вид:

$$Y = D_0 \overline{x_1} \overline{x_0} + D_1 \overline{x_1} x_0 + D_2 x_1 \overline{x_0} + D_3 x_1 x_0$$

Демультимлексором называется комбинационное логическое устройство, предназначенное для управляемой передачи данных от одного источника информации в несколько выходных каналов. Демультимлексор имеет один информационный вход, n адресных шин и 2^n – выходов. Для данной схемы:

$$Y_0 = D \cdot \overline{X_1} \cdot \overline{X_0}; Y_1 = D \cdot \overline{X_1} \cdot X_0; Y_2 = D \cdot X_1 \cdot \overline{X_0}; Y_3 = D \cdot X_1 \cdot X_0.$$

Для микросхем, выполненных на МДП - транзисторах, одни и те же схемы мо-

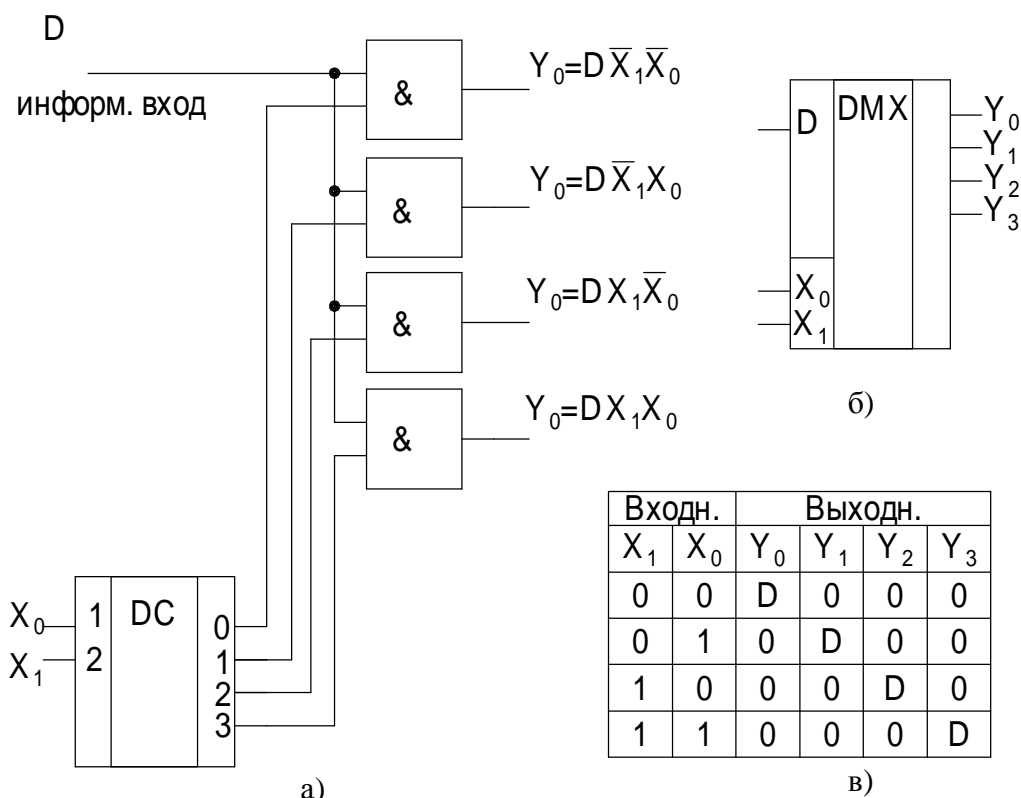


Рис.122. Схема демультимлексора(а), условное обозначение(б), таблица истинности(в)

гут выполнять функции мультиплексора и демультиплексора.

Комбинационный сумматор – это цифровое устройство, предназначенное для арифметического сложения чисел, представленных в виде двоичных кодов.

Обычно сумматор представляет собой комбинацию одноразрядных сумматоров. При сложении двух чисел в каждом разряде производится сложение трех цифр: цифры первого слагаемого a_i , цифры второго слагаемого b_i и цифры переноса из младшего разряда P_i . В результате суммирования на выходных шинах получается сумма S_i и перенос в старший разряд P_{i+1} .

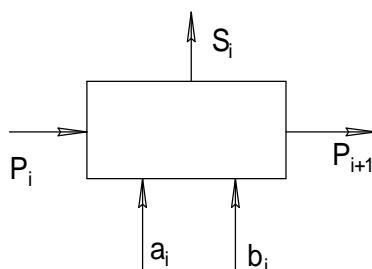


Рис. 123. Структурная схема одноразрядного сумматора

На рис. 124,б приведена таблица истинности одноразрядного сумматора.

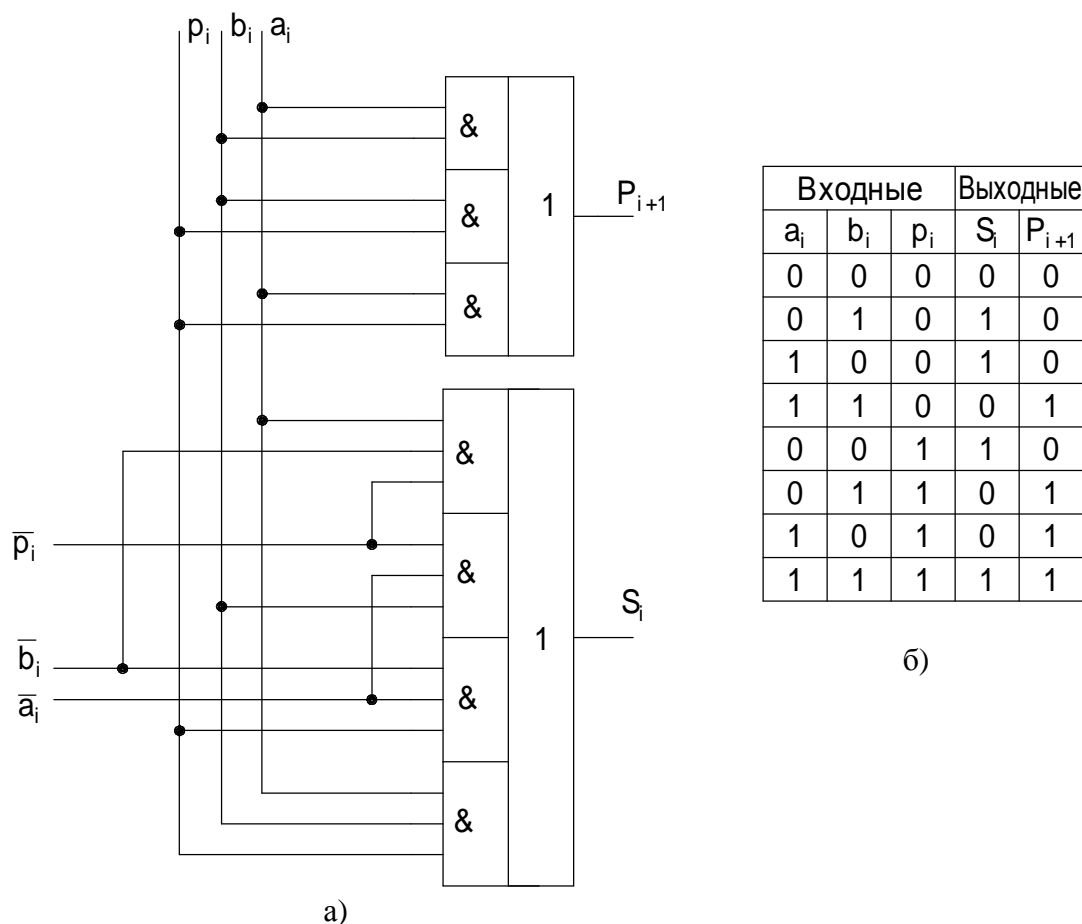


Рис. 124. Схема одноразрядного сумматора(а), таблица истинности(б)

Используя карты Вейча можно записать ФАЛ, описывающие работу сумматора, и построить схему сумматора.

$$S_i = \overline{a_i} b_i P_i + a_i \overline{b_i} P_i + a_i b_i \overline{P_i} + a_i b_i P_i \quad P_i = a_i b_i + a_i P_i + b_i P_i$$

Параллельный (многоразрядный) сумматор может быть составлен из одnorазрядных сумматоров путем их соединения по сигналам переноса P_i .

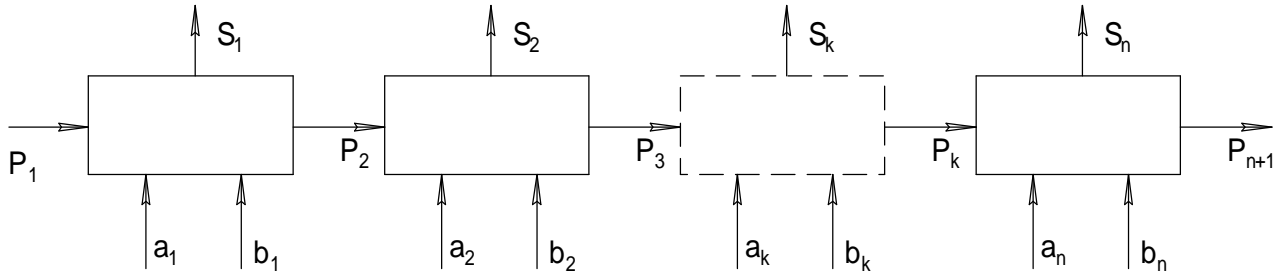


Рис.125. Многоразрядный сумматор с поразрядным (последовательным) переносом.

Сумматоры с поразрядным переносом выпускаются в виде микросхем на 2 и 4 разряда. Например, К561ИМ1 – сумматор на 4 разряда.

Для увеличения разрядности до 8 необходимо взять две микросхемы и соединить их последовательно по цепи переноса.

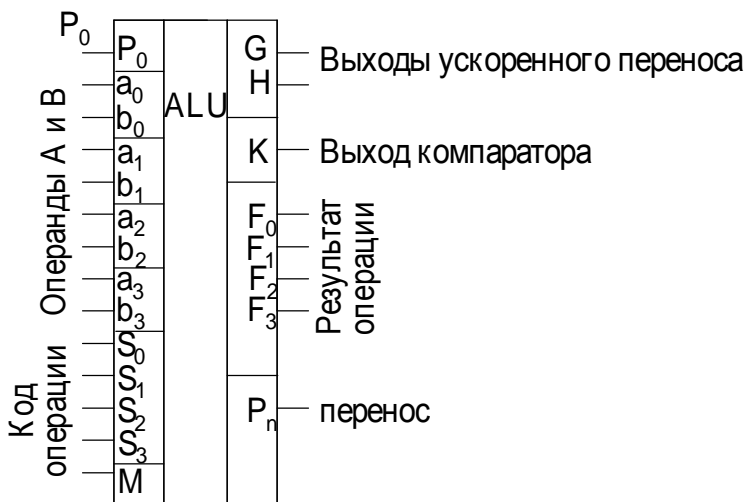


Рис.126. Условное обозначение АЛУ ИС К561ИПЗ.

n – количество разрядов.

Для повышения быстродействия используются сумматоры с параллельным переносом.

При построении арифметико-логических устройств (АЛУ) необходимо, наряду с операцией суммирования, выполнять ряд логических операций. Для этого можно использовать ИС К561ИПЗ, которая представляет собой четырехразрядное АЛУ, (рис. 126.) выполняющее 16 логических и арифметико-логических операций. Вид выполняемой операции определяется управляющим кодом, поступающим на входы S_3, S_2, S_1, S_0, M . Результаты выполненной операции снимаются с выходных шин F_3, F_2, F_1, F_0 . Схема имеет вход переноса P_0 и выход переноса P_{i+1} . Выход K является встроенным компаратором. $K=1$ при

нельзя их последовательно по цепи переноса. Сумматор с поразрядным последовательным переносом наиболее прост с точки зрения схемной реализации, однако имеет низкое быстродействие. Время выполнения операции $T_{оп}$ зависит от разрядности.

$$T_{оп} \approx \tau_1 n,$$

где τ_1 – время распространения переноса в одnorазрядном сумматоре.

$A=B$. Выходы G и H используются для организации ускоренного переноса. Для организации АЛУ с разрядностью больше 4 используют две или более схем К561ИП3.

Цифровые компараторы предназначены для сравнения цифровых кодов. Количество входов определяется разрядностью чисел. На выходе обычно формируются сигналы $A=B$, $A>B$ и $A<B$. На рис.127(а) изображена ИС К561ИП2 на четыре разряда. Для восьмиразрядного кода берутся две схемы, для двенадцати – три и т.д.

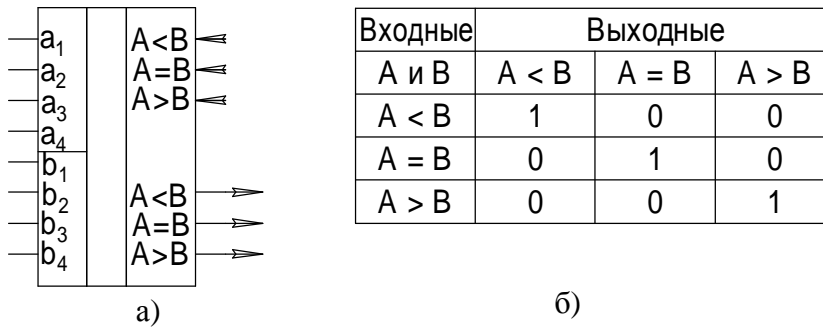


Рис. 127. Цифровой компаратор(а), таблица истинности(б)

4.4. Типовые функциональные узлы последовательных цифровых устройств.

В последовательных логических устройствах значение выходного сигнала зависит не только от действия входных сигналов, но и от внутреннего состояния устройства, т.е. от тех значений входных переменных, которые действовали в предыдущие моменты времени. Очевидно, что для функционирования таких устройств они должны содержать в своем составе элементы памяти. В качестве таких элементов памяти используются триггеры.

Триггером называется цифровое устройство, которое может находиться в одном из двух устойчивых состояний и переходит из одного состояния в другое под действием входных сигналов. Триггеры можно классифицировать по способу приема информации, принципу построения, функциональным возможностям. По способу приема информации триггеры подразделяются на асинхронные и синхронные. *Асинхронный триггер* изменяет свое состояние в момент прихода сигнала на его информационные входы. *Синхронные триггера* изменяют свое состояние под воздействием входных сигналов только в момент прихода активного сигнала на его синхронизирующий вход С.

По виду активного сигнала, действующего на информационных входах триггеры подразделяются на статические и динамические. Первые переключаются потенциалом (уровнем напряжения), а вторые – перепадом (передним или задним фронтом импульса). Входные информационные сигналы могут быть прямыми и инверсными.

По принципу построения триггеры со статическим управлением можно подразделить на одноступенчатые и двухступенчатые. В одноступенчатых триггерах имеется одна ступень запоминания. В двухступенчатых триггерах имеются две ступени запоминания. Вначале информация записывается в первую ступень, а затем переписывается во вторую и появляется на выходе.

По функциональным возможностям триггеры делятся на: RS-триггер, D-триггер, T-триггер, JK-триггер, VD и VT-триггеры.

Триггеры характеризуются быстродействием, чувствительностью, потребляемой мощностью, помехоустойчивостью, функциональными возможностями.

Асинхронный RS-триггер имеет две входные информационные шины R и S и две выходные шины Q и \bar{Q} . Под действием входного сигнала S триггер устанавливается в состояние 1 ($Q=1, \bar{Q}=0$), а под действием сигнала R – переходит в состояние "0" ($Q=0, \bar{Q}=1$).

Таблица истинности для R-S триггера имеет вид:

Входные		Вых.	
S_n	R_n	Q_{n+1}	Операц.
0	0	Q_n	Хранение
0	1	0	Запись 0
1	0	1	Запись 1
1	1	X	Запрет

а)

	R_n		\bar{R}_n	
Q_n	0	X	1	1
\bar{Q}_n	0	X	1	0
	\bar{S}_n	S_n	\bar{S}_n	S_n

б)

Рис.128. Таблица истинности(а) и карта Вейча(б) для асинхронного RS-триггера

Здесь одновременная подача выходных сигналов R и S запрещена. Из диаграммы Вейча следует:

$$Q_{n+1} = S_n + Q_n \bar{R}_n$$

RS-триггеры строятся на базе логических элементов ИЛИ-НЕ или И-НЕ.

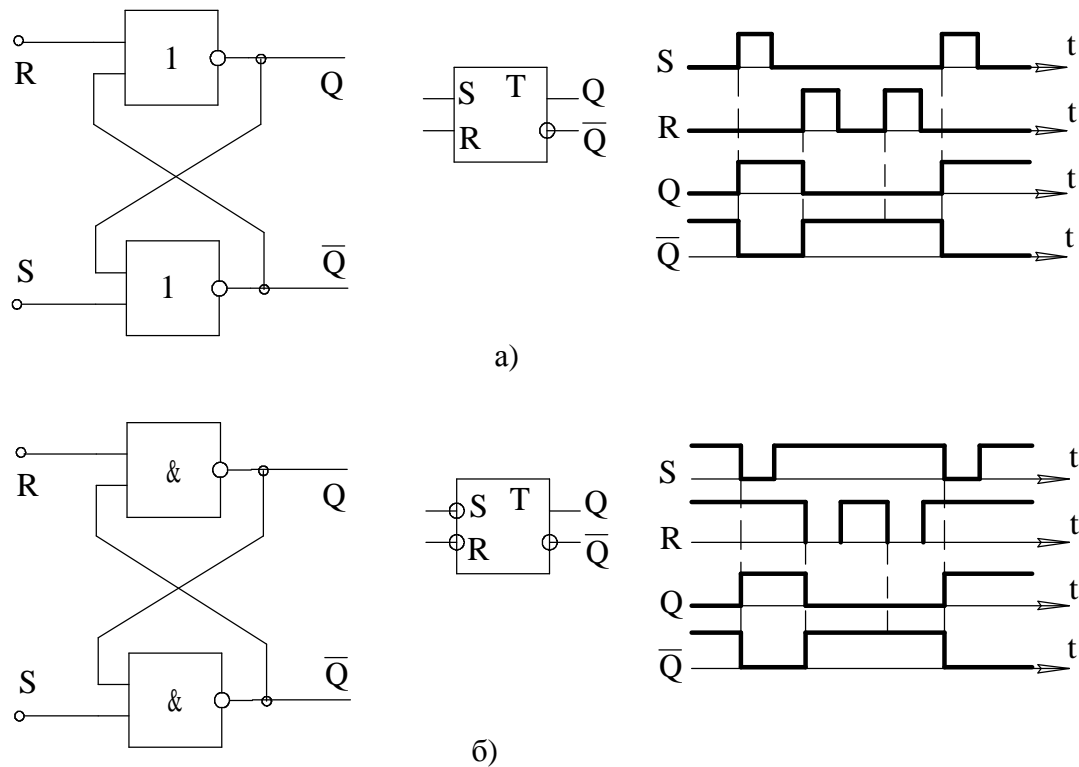


Рис. 129. Схема, условное обозначение и временная диаграмма работы асинхронного RS – триггера, построенного на логических элементах ИЛИ-НЕ(а) и И-НЕ(б)

Синхронный RS-триггер имеет дополнительный синхронизирующий вход С. Таблица истинности и карта Вейча имеют вид (рис.130)

Входные			Выходные	
S_n	R_n	C_n	Q_{n+1}	Опер.
0	0	0	Q_n	хран.
0	1	0	Q_n	хран.
1	0	0	Q_n	хран.
1	1	0	Q_n	хран.
0	0	1	Q_n	хран.
0	1	1	0	Зап.
1	0	1	1	Зап.
1	1	1	X	Запрет

		R_n	\bar{R}_n	
Q_n	1	1	1	C
	0	X	1	
\bar{Q}_n	0	X	1	C
	0	0	0	\bar{C}
		\bar{S}_n	S_n	\bar{S}_n

Рис. 130. Таблица истинности синхронного RS-триггера.

$$Q_{n+1} = Q_n \cdot \bar{C} + C \cdot \bar{R}_n \cdot Q_n + S_n \cdot C = Q_n \cdot \bar{C} + C(S_n + Q_n \cdot \bar{R}_n)$$

Триггер может быть построен на логических элементах И-НЕ, ИЛИ-НЕ. На рис.131 приведена схема синхронного RS-триггера на логическом элементе И-НЕ. Работа триггера описывается уравнением

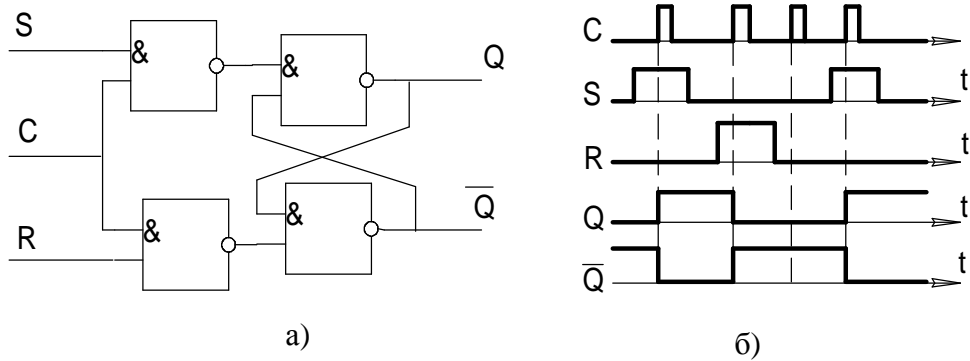


Рис.131. Схема(а), временная диаграмма работы(б) синхронного RS-триггера.

D-триггер имеет только один информационный вход D, с которого информация записывается и выдается на выходные шины по сигналу синхронизации. Это означает, что D-триггера могут быть только синхронными. Таблица истинности и карта Вейча приведены на рис.132. Работа триггера из карты Вейча описывается выражением. $Q_{n+1} = \bar{C} \cdot Q_n + C \cdot D$

D-триггера могут быть одноктактными и двухтактными.

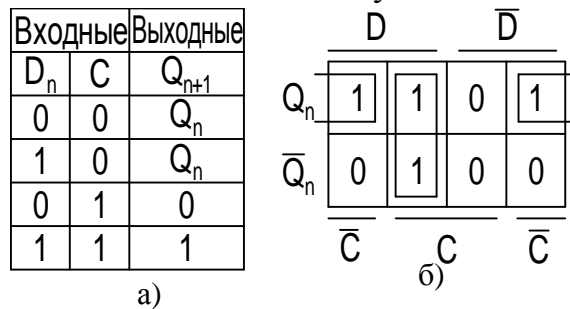


Рис.132. Таблица истинности(а) и диаграмма Вейча(б) D-триггера.

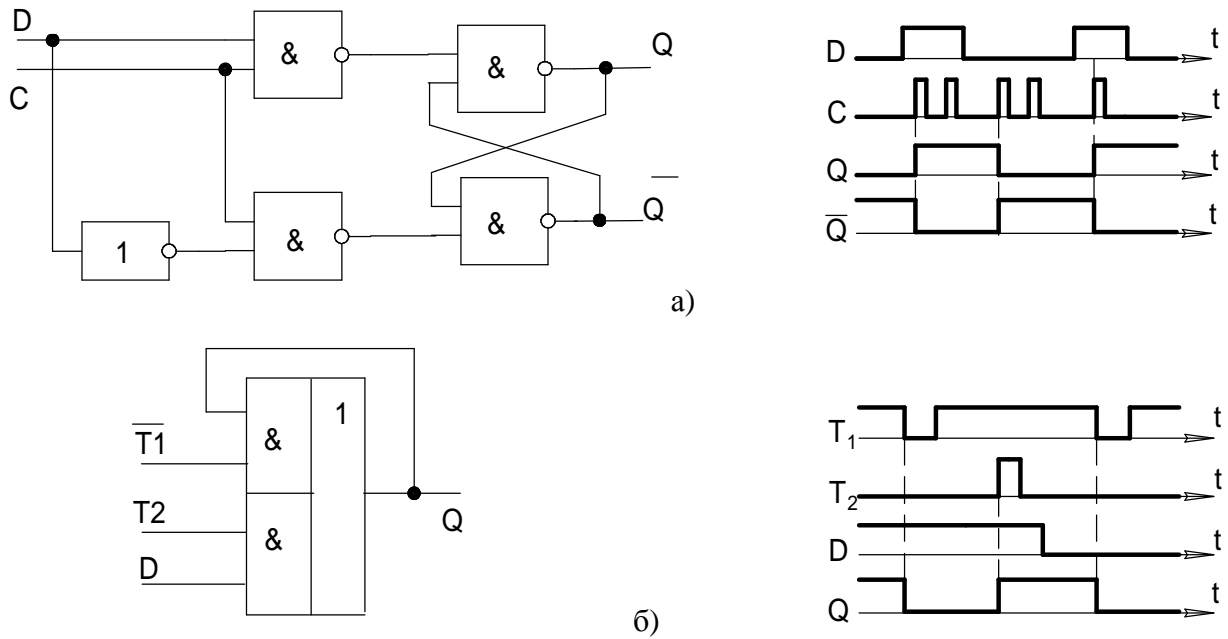


Рис.133. Схема и временная диаграмма работы одноклакового D-триггера(а) и двухклакового D-триггера(б).

Работа триггеров поясняется временной диаграммой работы.

Разновидностью D-триггера является VD-триггер. Этот триггер дополнительно снабжен входом разрешения работы V. При V=1 триггер функционирует как обычный D-триггер. При V=0 триггер работает в режиме хранения информации.

Триггеры выпускаются в виде ИС. В одном корпусе может быть 2, 4, 8, 16 триггеров.

T-триггеры имеют один информационный вход T и изменяют свое состояние на противоположное при поступлении на этот вход сигнала T.

Функционирование T-триггера описывается уравнением

$$Q_{n+1} = Q_n \bar{T} + \bar{Q}_n T$$

T триггер можно построить на базе D - триггера

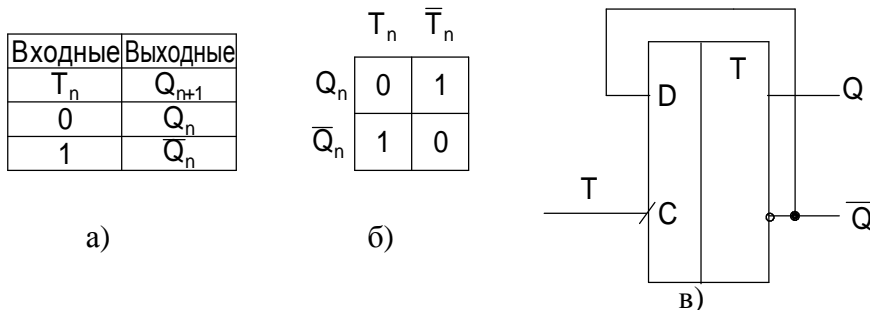


Рис.134. Таблица истинности(а) и карта Вейча(б) для T-триггера и T-триггер на базе D-триггера(в)

Более надежны двухступенчатые T-триггеры, выполненные в виде двух последовательно соединенных триггеров – ведущего и ведомого. При этом но-

вая информация вначале записывается в первый триггер, а затем переписывается во второй. На принципиальных схемах двухступенчатые триггеры обозначаются сдвоенной буквой ТТ.

JK-триггер в отличие от RS-триггера не имеет запрещенных комбинаций входных сигналов. При поступлении сигналов на оба входа J и K триггер изменяет свое состояние на противоположное. Уравнение работы асинхронного и синхронного JK-триггера имеет вид:

$$Q_{n+1} = j\bar{Q}_n + \bar{K}Q_n \text{ - для асинхронного}$$

$$Q_{n+1} = C(j\bar{Q}_n + \bar{K}Q_n) + \bar{C}Q_n \text{ - для синхронного.}$$

ВХОДНЫЕ		ВЫХОД
j _n	k _n	Q _{n+1}
0	0	Q _n
0	1	0
1	0	1
1	1	\bar{Q}_n

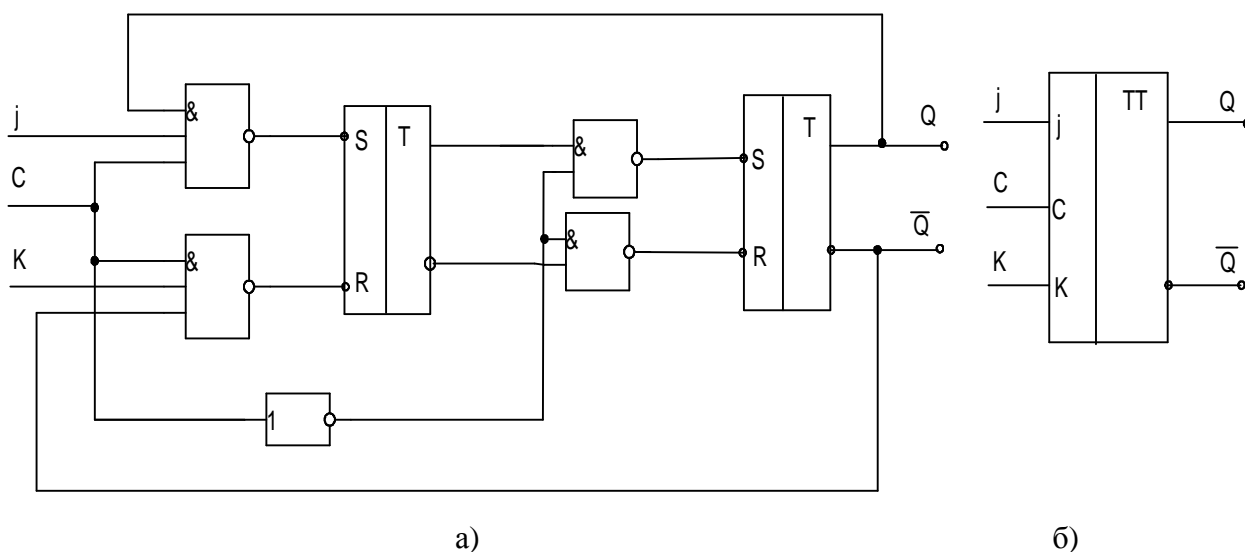
а)

	k _n		\bar{k}_n	
Q _n	0	0	1	1
\bar{Q}_n	0	1	1	0
	\bar{j}_n		j _n	
	\bar{j}_n		\bar{j}_n	

б)

Рис.135. Таблица истинности(а) и диаграмма Вейча(б) для JK-триггера.

На рис.136 приведена схема JK-триггера, построенная на базе двухступенчатого RS-триггера с запрещенными связями.



а)

б)

Рис.136. Схема JK-триггера(а) и его условное обозначение(б).

JK-триггер является универсальным триггером. На его основе можно построить RS, D, T-триггера.

Триггера с динамическим управлением. Недостатком триггеров со статическим управлением является то, что информационные сигналы на их входах не должны изменяться во всем интервале действия сигнала C. От этого недостатка свободны триггера с динамическим управлением. В таких триггерах переключе-

чение триггера происходит в течение короткого времени вблизи фронта или среза импульса синхронизации. Если триггер переключается передним фронтом синхроимпульса, то говорят, что он имеет прямой динамический вход, если триггер переключается задним фронтом, то – снабжен инверсным динамическим входом.

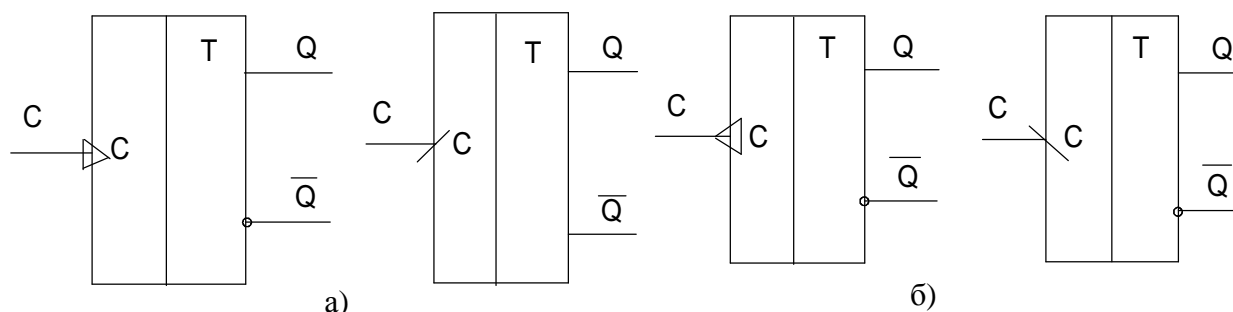


Рис.137. Условные обозначения триггер с прямым динамическим входом(а) и с обратным динамическим входом(б) синхронизации.

Таким образом триггер с динамическим управлением не чувствителен к изменению информационных сигналов при действии сигналов $C=1$ и $C=0$. Переключение триггера происходит по переднему или заднему фронту синхроимпульса.

Триггеры входят в состав многих функциональных последовательных цифровых устройств таких как регистры, счетчики, накапливающие сумматоры и т. д.

Регистром называется последовательное цифровое устройство, предназначенное для записи, хранения, выдачи или сдвига информации. В ряде случаев в регистре могут выполняться логические операции или операции преобразования кодов, например, из параллельного кода в последовательный и обратно. Регистр представляет собой совокупность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове, и вспомогательных схем для выполнения операций.

По способу приема информации регистры подразделяются на параллельные, последовательные и последовательно-параллельные.

В *параллельных регистрах* запись информации производится параллельным кодом одновременно по всем разрядам. Параллельные регистры применяются для хранения информации и поэтому называются еще регистрами памяти. Параллельный регистр может быть выполнен на RS или D-триггерах.

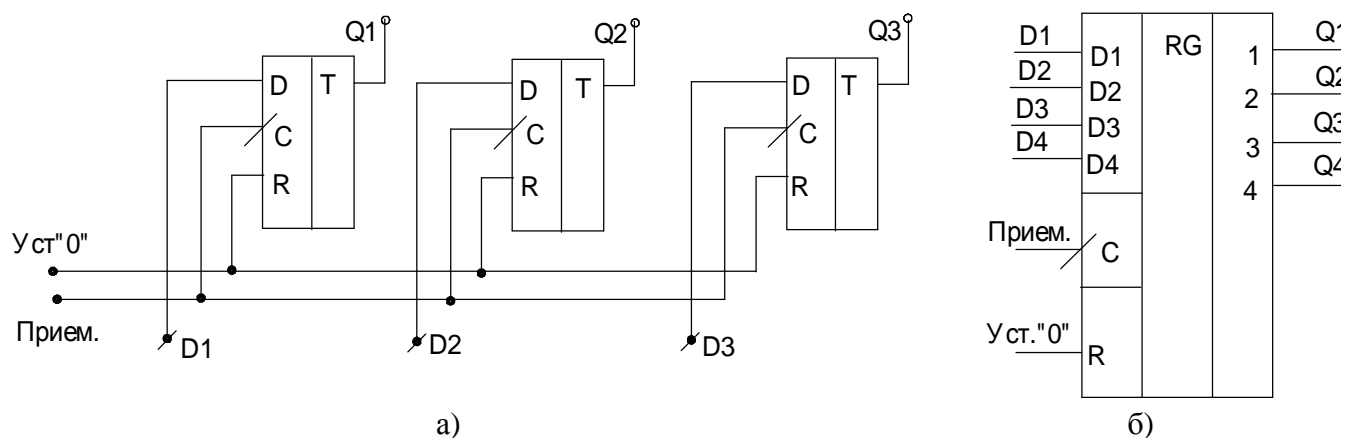


Рис.138. Функциональная схема параллельного регистра(а), условное обозначение(б).

Прием информации производится по переднему фронту тактового импульса. На входах и выходах триггеров регистра могут стоять логические схемы для преобразования кодов в прямые или инверсные коды.

В *сдвигающих регистрах* выполняется сдвиг информации влево или вправо. Информация на регистр может поступать в последовательном или параллельном коде и выдаваться с выходных шин в последовательном или параллельном коде. Следовательно, в сдвигающих регистрах можно преобразовывать коды из последовательного в параллельный и обратно. Сдвигающие регистры могут строиться на D-триггерах (рис.139а).

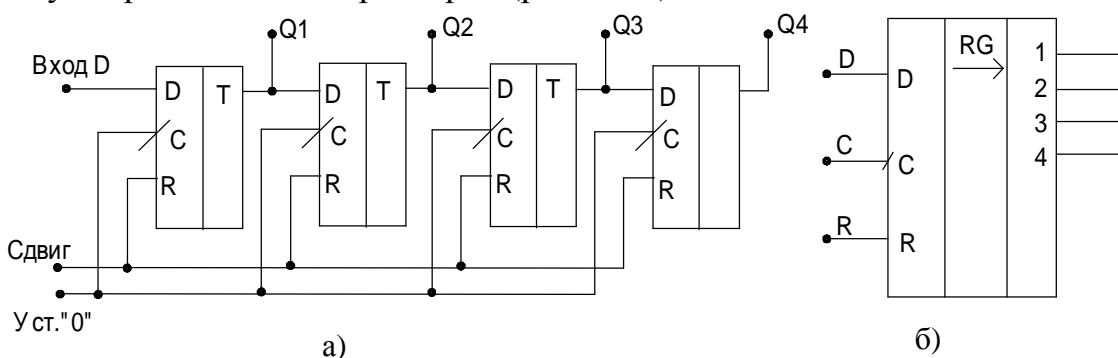


Рис.139. Функциональная схема сдвигающего регистра(а) и его условное обозначение(б).

Если сдвиг в регистре в зависимости от управляющего сигнала может быть и влево и вправо, то такие регистры называются *реверсивными*. В сдвигающих регистрах используются только двухступенчатые триггеры или триггеры с динамическим управлением. Это гарантирует сдвиг информации на один разряд по каждому импульсу синхронизации. В настоящее время выпускаются ИС параллельных регистров, сдвигающих регистров и универсальных регистров.

На рис.141(а) изображена микросхема К555ИР23, представляющая собой 8^и разрядный параллельный регистр с динамическим управлением.

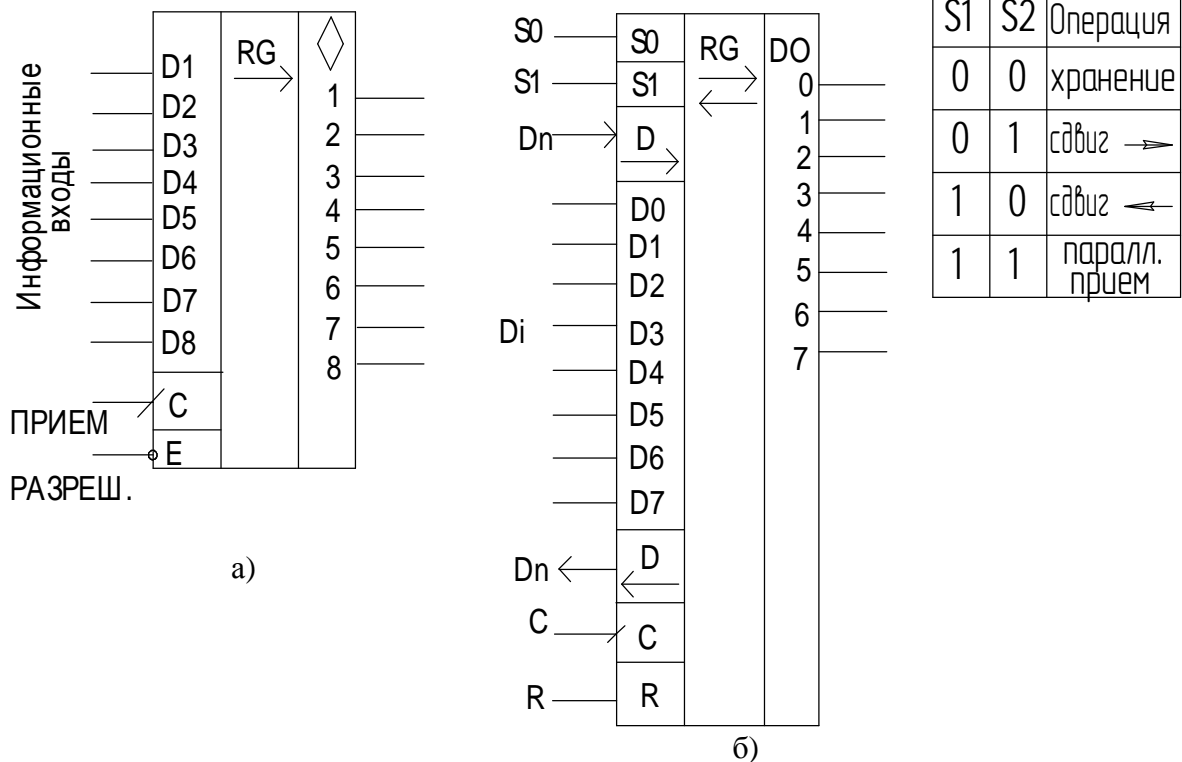


Рис.141. Параллельный регистр ИС К555ИР23(а), универсальный регистр ИС К155ИР13(б).

На рис.141(б) приведена микросхема К155ИР13. В зависимости от сигналов, подаваемых на управляющие шины S_0 и S_1 , микросхема может работать как параллельный регистр и как сдвигающий со сдвигом влево или вправо.

Счетчиком называется последовательное цифровое устройство, предназна-

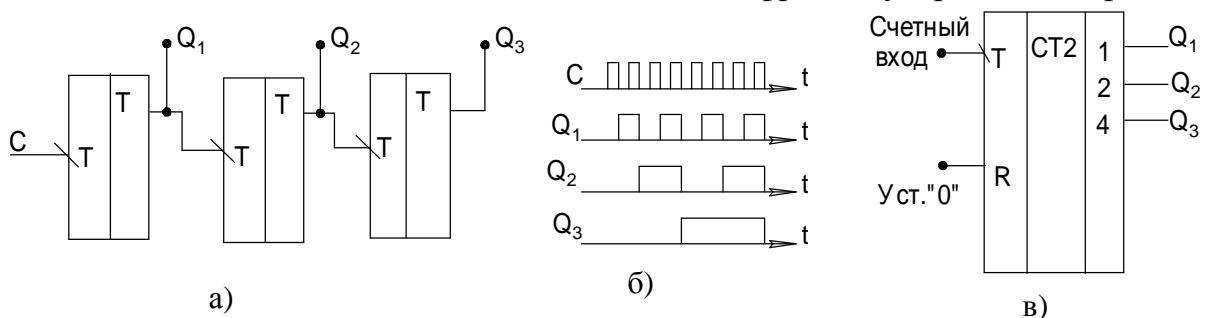


Рис.142. Схема трехразрядного двоичного счетчика(а), временная диаграмма работы(б), условное обозначение(в).

значенное для подсчета входных импульсов. Счетчики строятся на триггерах Т-типа и некоторых логических схемах для формирования управляющих сигналов.

Основными параметрами счетчика являются коэффициент пересчета и быстродействие. В зависимости от коэффициента пересчета (M) счетчики подразделяются на двоичные (коэффициент пересчета $M=2^n$) и счетчики с произвольным коэффициентом пересчета ($M \neq 2^n$). Разновидностью последних являются двоично-десятичные счетчики ($M=10$).

В зависимости от направления счета счетчики бывают: суммирующие, вычитающие и реверсивные. Последние в зависимости от управляющего сигнала работают как суммирующие или как вычитающие.

По способу организации межразрядных связей счетчики делятся на счетчики с последовательным переносом, счетчики с параллельным переносом и счетчики с параллельно-последовательным переносом.

Самые простые и вместе с тем самые медленные – это счетчики с последовательным переносом. Наибольшим быстродействием обладают счетчики с

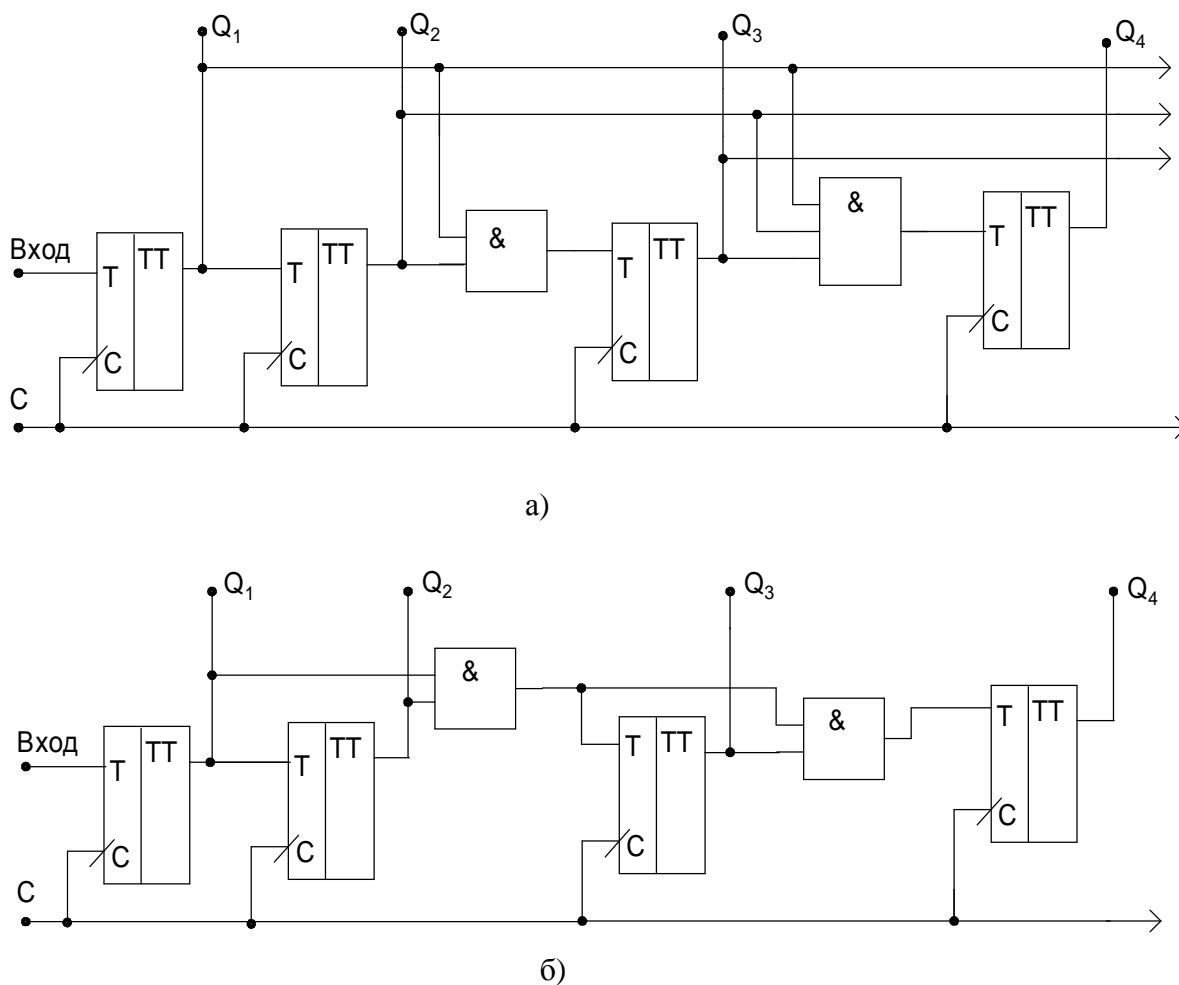


Рис.143. Схемы четырехразрядного счетчика с параллельным(а) и со сквозным(б) переносом.

параллельным переносом. Двоичные счетчики обеспечивают коэффициент пересчета $M=2^n$.

Для получения суммирующего двоичного счетчика Т-триггеры должны иметь инверсные динамические входы (должны переключаться по срезу тактового импульса С). Для получения вычитающего счетчика Т-триггеры должны иметь прямые динамические входы. Таким образом, направление счета можно изменять путем изменения межразрядных связей. На этом принципе строятся реверсивные счетчики.

Рассмотренный выше счетчик является счетчиком с последовательным переносом. Его быстродействие $t_{К\max}$ зависит от количества разрядов

$$t_{К\max} = n \cdot t_{К.тр.},$$

где $t_{К.тр.}$ – время переключения одного счетчика.

Для увеличения быстродействия используются счетчики с параллельным переносом или со сквозным переносом.

Для этого необходимо использовать синхронные Т-триггеры. Здесь триггеры устанавливаются в соответствующие состояния одновременно по переднему фронту синхроимпульса. Легко видеть, что быстродействие схемы(а) равно времени переключения одного триггера. В схеме(б) быстродействие схемы равно

$$t_{К\max} = t_{К.тр.} + n t_{з.л.},$$

где $t_{з.л.}$ – время задержки логического элемента.

Счетчики с произвольным коэффициентом пересчета строятся на основе двоичных счетчиков с организацией обратной связи с выходных шин через схему И на вход R счетчика.

На рис.144 приведена схема и временная диаграмма работы двоично-десятичного счетчика. Здесь при поступлении десятого импульса (код 1010) на выходах схемы И формируется сигнал, который переводит счетчик в ноль (код

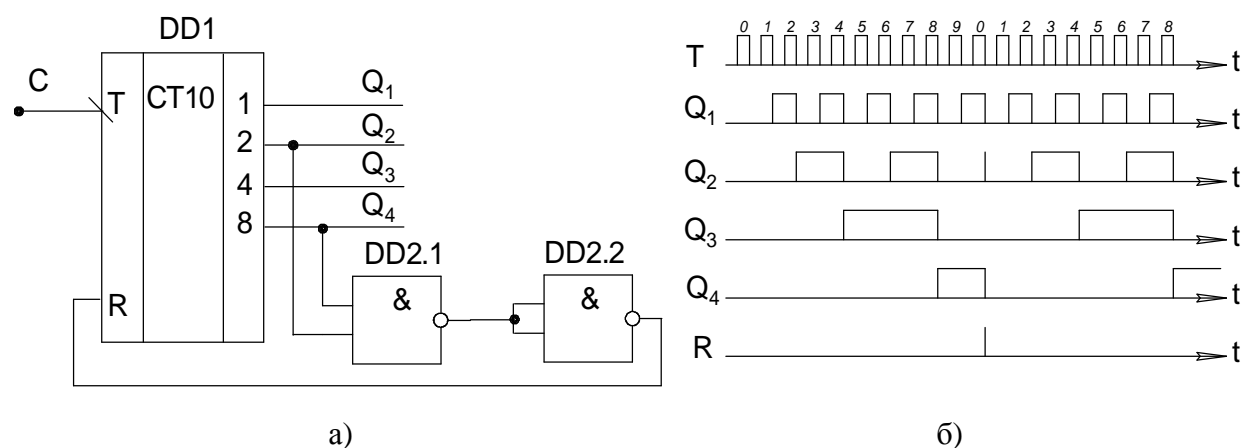


Рис.144. Схема двоично-десятичного счетчика(а) и временная диаграмма его работы(б).
0000). Если на входы системы DD2 подать сигналы Q_3 и Q_4 , то получится счетчик с коэффициентом пересчета $M=12$ и т.д.

Имеется много ИС, в которых счетчик совмещен с другими комбинационными схемами, например:

счетчик-дешифратор К176ИЕ8, К176ИЕ9,

счетчик-преобразователь в семисегментный код К176ИЕ3, К176ИЕ4.

Существуют реверсивные счетчики К561ИЕ11(М=16), К561ИЕ14(М=10); программируемые счетчики К561ИЕ15, К561ИЕ19; часовые счетчики К176ИЕ12, К176ИЕ13, К176ИЕ17, К176ИЕ18 и др.

Накапливающие сумматоры предназначены для последовательного суммирования нескольких чисел. Причем в каждом такте к предыдущей сумме добавляется очередное число.

Накапливающие сумматоры строятся на базе комбинационных сумматоров и параллельных регистров.

Установка в ноль сумматора происходит при поступлении сигнала на вход "R" регистра. Затем поступает первое число A1 и по сигналу "Прием" оно запоминается в регистре и поступает на выходные шины S и на вход В сумматора. При этом на выходе комбинационного сумматора DD1 формируется сумма двух чисел. В момент времени t₁ на сумматор поступает второе число A2, которое суммируется с числом A1 и по сигналу "Прием" запоминается в регистре DD2. Следующее число A3 складывается с суммой чисел A1 и A2 и т.д., т.е. в регистре накапливается сумма чисел.

4.5. Базовые логические элементы.

Основные требования к базовым логическим элементам(БЛЭ). Интегральные логические элементы, как известно, являются основной элементной

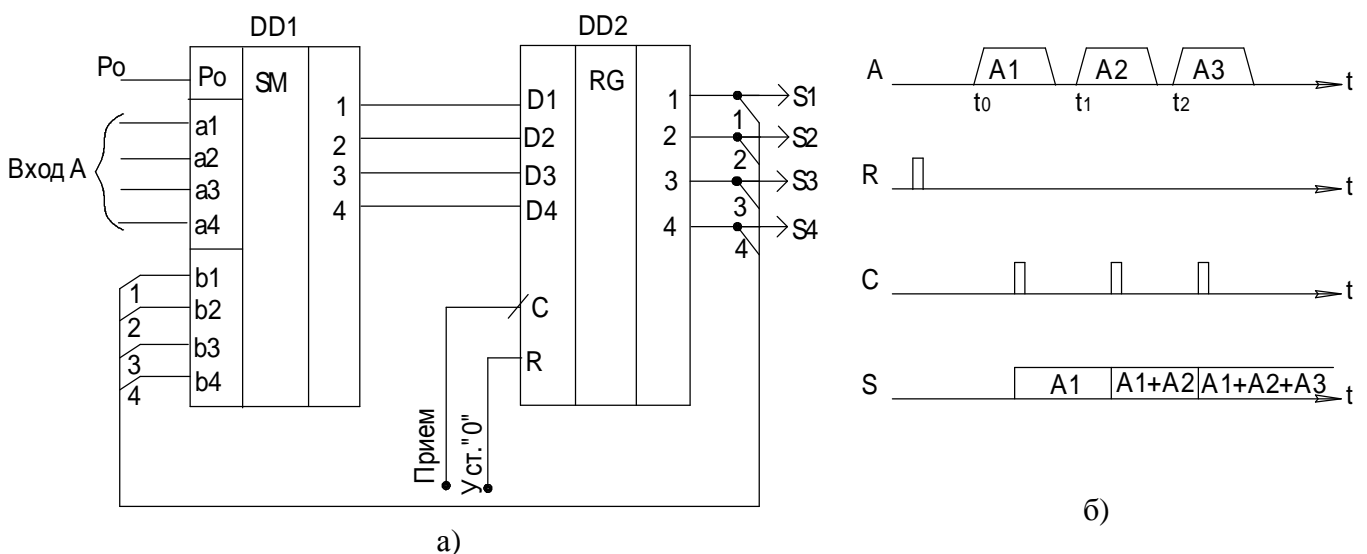


Рис.145. Схема накапливающего сумматора(а) и временная диаграмма его работы(б).
базой для построения цифровых устройств. Для надежной работы реальных

цифровых устройств, необходимо, чтобы все входящие в его состав элементы обладали целым рядом свойств, к которым относятся:

- совместимость уровней входных и выходных сигналов;
- нагрузочная способность;
- формирующее свойство;
- помехоустойчивость.

Совместимость уровней входных и выходных сигналов означает, что входные и выходные уровни сигналов 0 и 1 должны лежать в заданных пределах, при которых не нарушается работоспособность цифрового устройства. Обычно:

$$U_{\text{мин}}^1 < U_t^1 < U_{\text{мак}}^1; U_{\text{мин}}^0 < U_{(t)}^0 < U_{\text{мак}}^0$$

Нагрузочная способность логического элемента характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для ряда других элементов. Нагрузочная способность характеризуется: *коэффициентом объединения по входу* $K_{\text{об}}$, который численно равен максимальному числу выходов одностипных ЛЭ, которые могут быть подключены ко входу данного ЛЭ и *коэффициентом разделения по выходу*, который равен максимальному числу входов одностипных ЛЭ, которые могут быть подключены к выходу данного ЛЭ.

Формирующее свойство ЛЭ определяется видом его амплитудно-передаточной характеристики, под которой понимают зависимость его выходного напряжения от входного. $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

Помехоустойчивость ЛЭ определяется способностью логического элемента нормально работать при наличии различных помех. Помехи в цифровых устройствах носят, как правило, характер кратковременных импульсов. Различают внешние и внутренние помехи. Внешние помехи связаны с работой городского транспорта, электродвигателей, сваркой и т.д. Уменьшение влияния этих помех осуществляется экранированием аппаратуры.

Ко вторым относятся помехи, амплитуда и длительность которых зависит от работы самой схемы (помехи по цепям питания, наводки в шинах печатных плат, кабелях и т.д.). Допустимая амплитуда помехи зависит от ее длительности. Эта зависимость называется *характеристикой импульсной помехоустойчивости*.

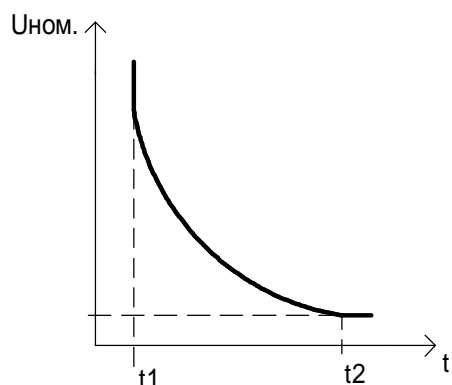


Рис.146. Характеристика импульсной помехоустойчивости.

чивости.

Из графика (рис.146) видно, что при малых длительностях помехи ЛЭ перестает быть чувствительным к сигналу помехи.

Классификация и область применения основных типов БЛЭ. В настоящее время при разра-

ботке ИС наибольшее распространение получили следующие базовые логические элементы (БЛЭ):

- *транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);*
- *эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);*
- *интегрально-инжекторная логика (И²Л);*
- *логика на одноступенчатых полевых транзисторах;*
- *логика на комплементарных полевых транзисторах (КМОП).*

В первых трех типах используются биполярные транзисторы, в последних – полевые транзисторы.

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются ИС, реализующие ТТЛ и ее разновидности (ТТЛШ). Интегральные схемы данного типа обладают средним быстродействием ($f_{\text{макс}}=20\div 50$ МГц) и средней потребляемой мощностью.

Интегральные схемы, реализующие ЭСЛ, являются наиболее быстродействующими, однако, они потребляют большую мощность и имеют нестандартные уровни входных и выходных сигналов.

Базовые элементы И²Л разработаны для БИС. Их отличает высокая степень интеграции, низкое напряжение питания, возможность регулировать в широких пределах быстродействие и потребляемую мощность.

Особенностью ИС, выполненных на полевых транзисторах, является малая потребляемая мощность и возможность работы в широких интервалах питающих напряжений. Микросхемы обладают высокой помехоустойчивостью и технологичностью изготовления.

Базовый элемент транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Большинство ИС, входящих в состав серий ТТЛ, выполнено на основе двух базовых схем: элемента И-НЕ и расширителя по ИЛИ.

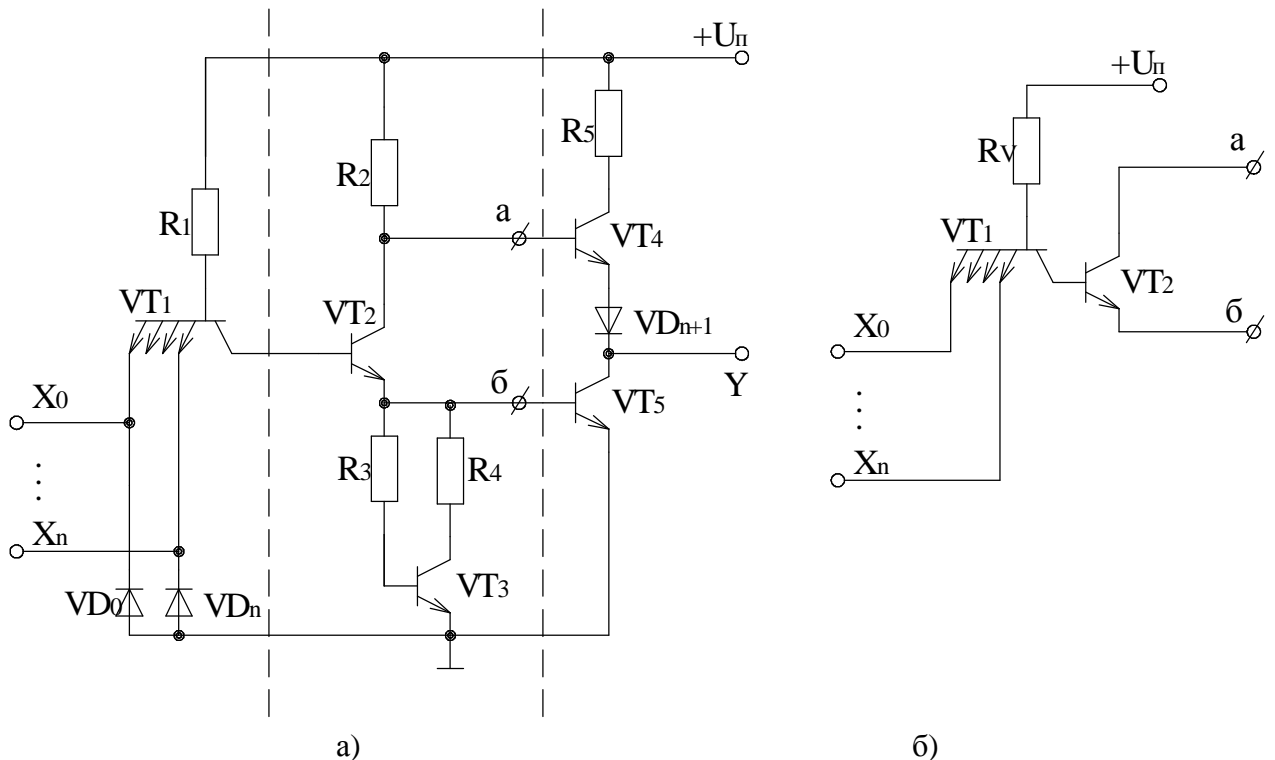


Рис.147. Логический элемент И-НЕ (а) и расширитель по ИЛИ (б).

Элемент И-НЕ состоит из трех каскадов: входного многоэмиттерного транзистора VT_1 , выполняющего функции логической операции И, фозорасщепителя VT_2 и двухтактного выходного усилителя мощности VT_4, VT_5 .

Если хотя бы на один эмиттер транзистора VT_1 подано напряжение логического “0” ($X_i \approx 0$), то он будет находиться в режиме насыщения и напряжение на базе VT_2 будет также близко к нулю. Транзистор VT_2 будет закрыт. При этом VT_5 закрыт, VT_4 открыт и напряжение на выходе $Y \approx U_{\Pi}$. Если на все эмиттеры транзистора VT_1 подать сигналы логической “1” (высокий уровень напряжения), то все эмиттерные переходы VT_1 будут заперты и ток от источника питания U_{Π} через переход база-коллектор транзистора VT_1 поступает в базу транзистора VT_2 , переводя его в режим насыщения. При этом VT_4 закрывается, а VT_5 выходит в режим насыщения. Напряжение на выходе $Y \approx U_{нас} \approx 0$.

Нелинейная цепь коррекции R_3, R_4, VT_3 позволяет повысить быстродействие элемента и приблизить его АПХ к прямоугольной. Сопротивление этой цепочки зависит от состояния транзистора VT_5 . Если VT_5 закрыт, сопротивление цепи максимально ($R_{ц} \approx R_3$), если открыт, то – минимально ($R_{ц} \approx R_4$) $R_3 \gg R_4$.

Построение выходного каскада по двухтактной схеме позволяет повысить быстродействие ЛЭ и снизить потребляемый ток. Резистор R_5 ограничивает величину сквозного тока через транзисторы VT_4, VT_5 .

Диоды VD_0 ч VD_n защищают элемент от появления на его входах недопустимых напряжений обратной полярности.

В состав ИС ТТЛ входят специализированные элементы для расширения функциональных возможностей, а именно:

— *ЛЭ И-НЕ с открытым коллектором.* Он отличается от рассмотренного выше элемента тем, что выходной каскад его выполняется по однотактной схеме без нагрузочного сопротивления (рис. 148).

В отличие от стандартного элемента, элементы ТТЛ с открытым коллектором могут объединяться по выходам. При этом реализуется логическая операция ИЛИ.

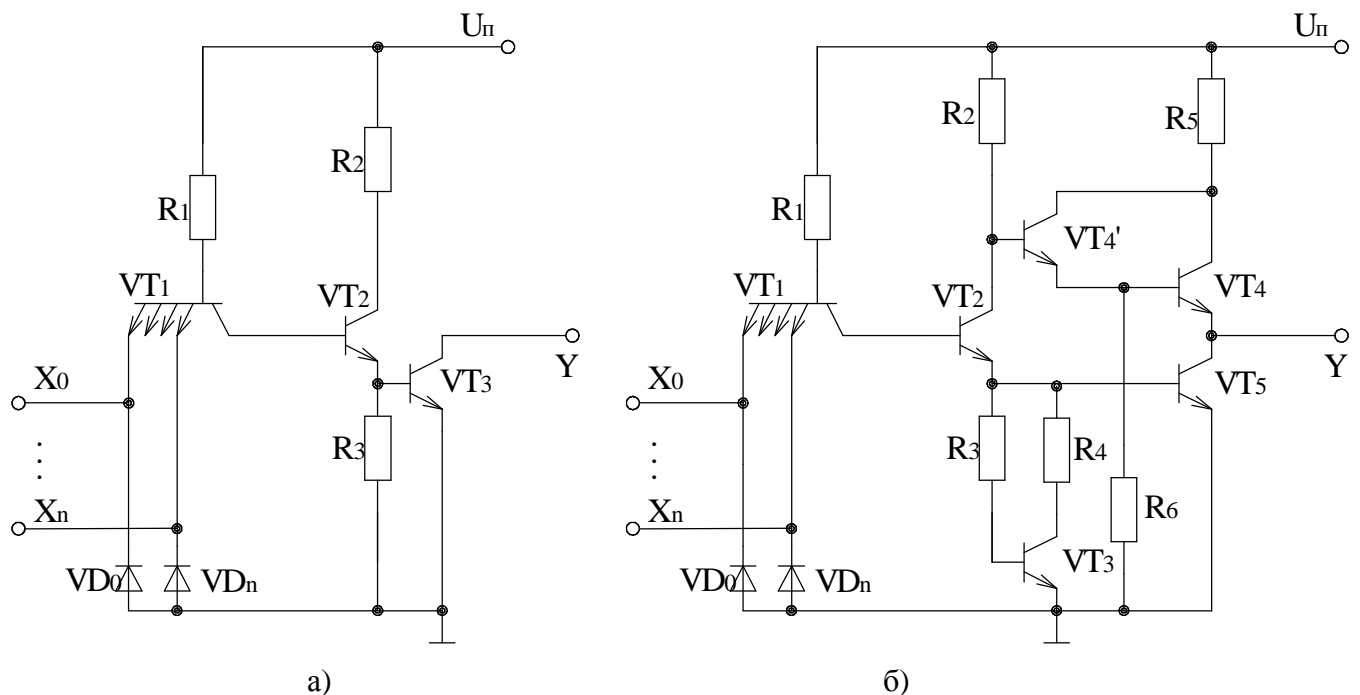


Рис.148 Логический элемент И-НЕ ТТЛ с открытым коллектором (а) и с повышенной нагрузочной способностью (б).

— *ЛЭ И-НЕ с повышенной нагрузочной способностью* предназначен для формирования выходных сигналов с большим коэффициентом разветвления. Схемотехнически данный элемент отличается использованием в выходном каскаде составного транзистора VT_4 .

— *Элемент И-НЕ с третьим (высокоимпедансным) состоянием.* Предназначен для совместной работы нескольких ЛЭ на общую шину. В схему элемента дополнительно ставятся несколько транзисторов. Для перевода в третье состояние на вход Z подают сигнал логической единицы. При этом оба выходных транзистора переходят в закрытое состояние.

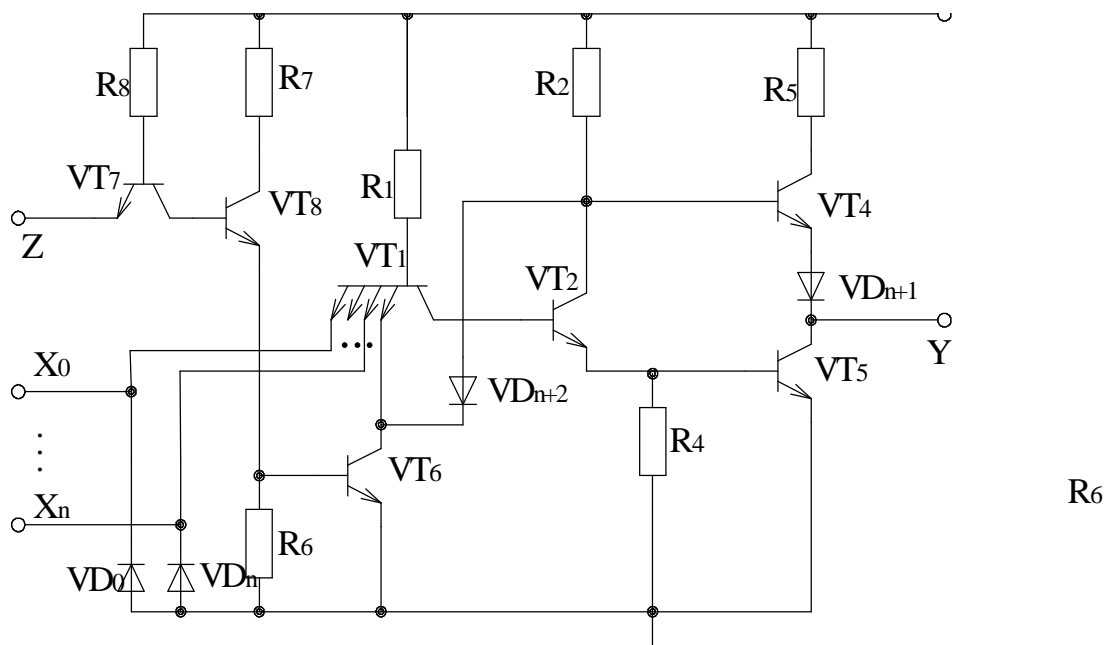


Рис.149 Логический элемент И-НЕ ТТЛ с третьим состоянием.

В настоящее время широко используются ЛЭ с транзисторно-транзисторной логикой с диодами Шотки (ТТЛШ), которые имеют низкое пороговое напряжение и в них отсутствует накопление заряда. Поэтому во время действия выходного сигнала диод Шотки открывается раньше, чем коллекторный переход транзистора, предотвращая накопление заряда в его базовой области. В БЛЭ ТТЛШ (рис 150) в выходном двухтактном усилителе используется составной транзистор VT_4 , работающий в режиме без насыщения. Операция “И” выполняется с использованием диодных ключей VD_0 ч VD_n .

При подаче на входы ключей высокого уровня диоды закрываются, транзисторы VT_1 и VT_5 входят в режим насыщения и на выходе элемента формируется сигнал низкого уровня $Y=0$. Если хотя бы один на один вход подается сигнал низкого уровня, то ток резистора R_1 замыкается на общую шину минуя эмиттерные переходы транзистора VT_1 . На выходной шине появляется сигнал высокого уровня ($Y=1$). ИС с ТТЛШ обеспечивают уменьшение потребляемой мощности в 5ч8 раз без снижения быстродействия.

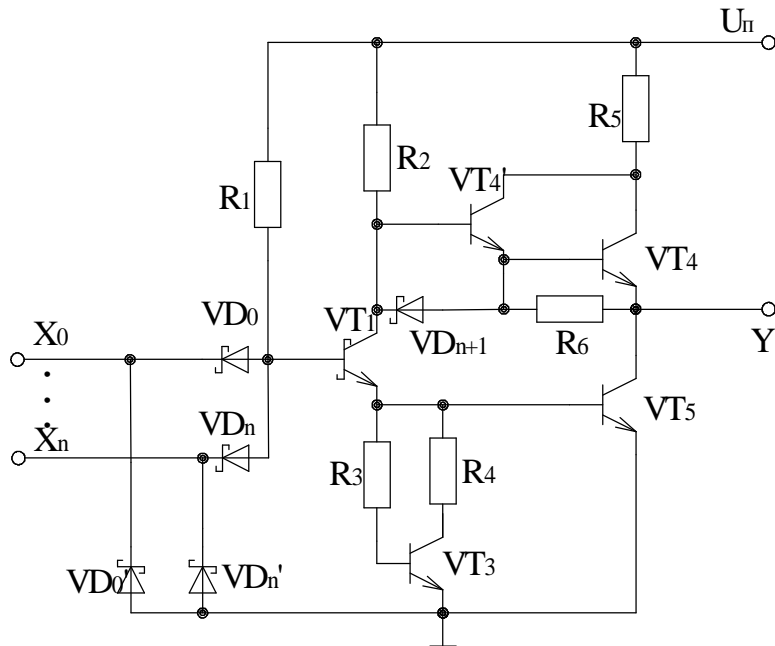


Рис.150 Схема БЛЭ ТТЛШ серии 555.

Статическими характеристиками БЛЭ ТТЛ являются:

- амплитудная передаточная характеристика $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$, которая соответствует характеристике инвертирующего усилителя,
- выходная характеристика $U_{\text{ВЫХ}}=f(J_{\text{Н}})$,
- входная характеристика $J_{\text{ВХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$.

Динамические характеристики БЛЭ определяются типовыми динамическими параметрами: временем задержки распространения импульса и временем

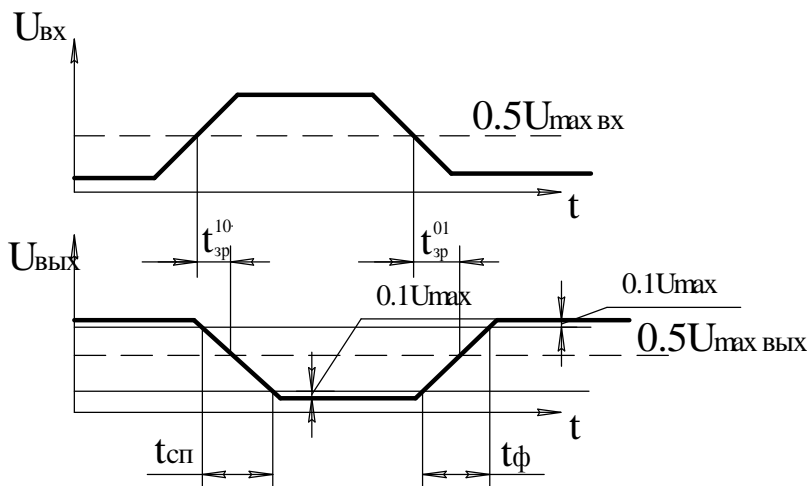


Рис.151 Временные параметры БЛЭ.

переключения выходного сигнала. Временем задержки распространения $t_{з.р.}$ называется временной интервал между перепадами входного и выходного напряжений. Различают два времени задержки распространения $t_{з.р.}^{10}$ и $t_{з.р.}^{01}$.

Длительностью переключения выходного сигнала называется временной интервал, в течение

которого выходное напряжение БЛЭ изменяется от 0,1 до 0,9 значения напряжения логического перепада. Различают длительность фронта t_{ϕ} и длительность спада $t_{\text{сп}}$.

Все интегральные схемы ТТЛ, выпускаемые промышленностью можно разделить на следующие группы:

- стандартные – серии 155,133.
- быстродействующие с диодами Шотки – серии 530, 531, 533, 1531.
- Маломощные с диодами Шотки – серии 533, 555, 1533.

Основные различия перечисленные выше серий в их быстродействии и потребляемой мощности. Типовые параметры БЛЭ различных серий ТТЛ приведены в таблице 6. Напряжение питания $+5^{\pm 5\%}$ ($+5^{\pm 10\%}$) равно или

Таблица 6

Серии	$t_{з.р.}$ нс	$P_{потр.}$ МВт	$U_{вых}^1$ В	$U_{вых}^0$ В	$J_{вых}^1$ мА	$J_{вых}^0$ мА
K155	10	10	$>2,4$	$<0,4$	4	16
K531	3	20	$>2,7$	$<0,5$	8	20
K555	10	2	$>2,7$	$<0,5$	1	8

Базовый элемент эмиттерно-связанной логики (БЛЭ ЭСЛ). ИС ЭСЛ являются самыми быстродействующими из существующих. Быстродействие здесь достигается уменьшением логического перепада между уровнями 0 и 1. При этом, естественно, снижается помехоустойчивость элемента.

Основой БЛЭ ЭСЛ является токовый ключ, выполненный на двух транзисторах (рис. 152). На базу транзистора VT_2 подано некоторое постоянное опорное напряжение $U_{оп}$.

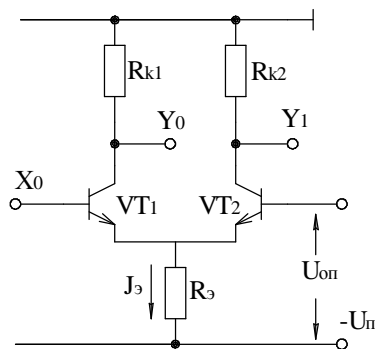


Рис.152 Токовый ключ БЛЭ ЭСЛ.

На базу второго транзистора VT_1 поступает входной сигнал X_0 , который может быть больше или меньше $U_{оп}$. В зависимости от этого токи между транзисторами VT_1 и VT_2 перераспределяются, а следовательно, и изменяется выходное напряжение Y_0, Y_1 . Ток, потребляемый ключом, при этом остается постоянным.

Быстродействие токового ключа велико, т.к., во-первых транзисторы не заходят в область насыщения и во-вторых перепад

между значениями лог.0 и лог.1 мало и составляет $\sim(0,6-0,7)$ в.

С токового ключа снимаются одновременно два сигнала: прямой и ин-

версный $Y_0 = \overline{X_0}, Y_1 = X_0$

Полная схема БЛЭ ЭСЛ приведена на рис. 153

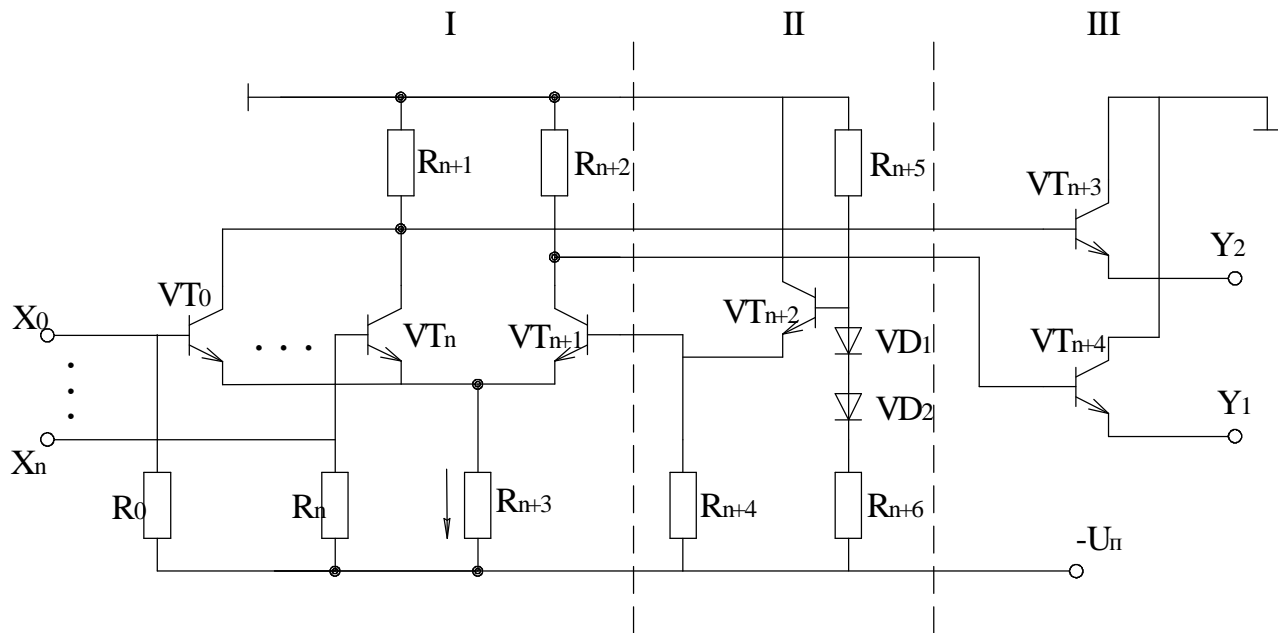


Рис.153 Схема БЛЭ ЭСЛ.

Функционально схему БЛЭ можно разбить на три узла: токовый ключ на транзисторах VT_0 – VT_{n+1} и резисторе R_{n+3} , источник эталонного напряжения, выполненный на диодах VD_1 , VD_2 , резисторах R_{n+5} , R_{n+6} и эмиттерного повторителя на транзисторе VT_{n+2} и выходные эмиттерные повторители на транзисторах VT_{n+3} , VT_{n+4} .

Если на все входы $X_0 \dots X_n$ подать напряжение близкое к логическому 0 ($\approx -1,7$ В) то все транзисторы VT_0 – VT_n будут закрыты и ток резистора R_{n+3} будет протекать через транзистор VT_{n+1} , к базе которого приложено напряжение $U_{оп}$. На коллекторе транзистора VT_n напряжение близко к нулевому и с эмиттерного повторителя VT_{n+3} снимается напряжение U_{Y_2} равное примерно $-0,9$ В (логическая 1).

Через резистор R_{n+2} протекает ток ключа и на нем падает напряжение $U_{R_{n+2}} \approx J_3 R_{n+2}$. Это напряжение поступает на эмиттерный повторитель VT_{n+4} . На выходе VT_{n+4} напряжение $U_{Y_1} \approx -1,7$ В (логический 0).

Если на один из входов $X_0 \dots X_n$ подать напряжение логической 1, то соответствующий транзистор перейдет в активный режим и ключ изменит свое состояние. Это приведет к тому, что на выходе U_{Y_2} будет формироваться логический 0, а на выходе U_{Y_1} - логическая 1.

Таким образом, рассмотренная схема реализует по выходу Y_2 операцию ИЛИ-НЕ, а по выходу Y_1 -операцию ИЛИ

$$Y_1 = (X_0 + X_1 + \dots + X_n), Y_2 = \overline{(X_0 + X_1 + \dots + X_n)}.$$

Для повышения помехоустойчивости БЛЭ ключ и эмиттерные повторители питаются по отдельным цепям питания. Действительно ток потребляемый

ключом постоянен, а ток потребляемый эмиттерными повторителями импульсный.

Статические характеристики БЛЭ приведены на рис.154

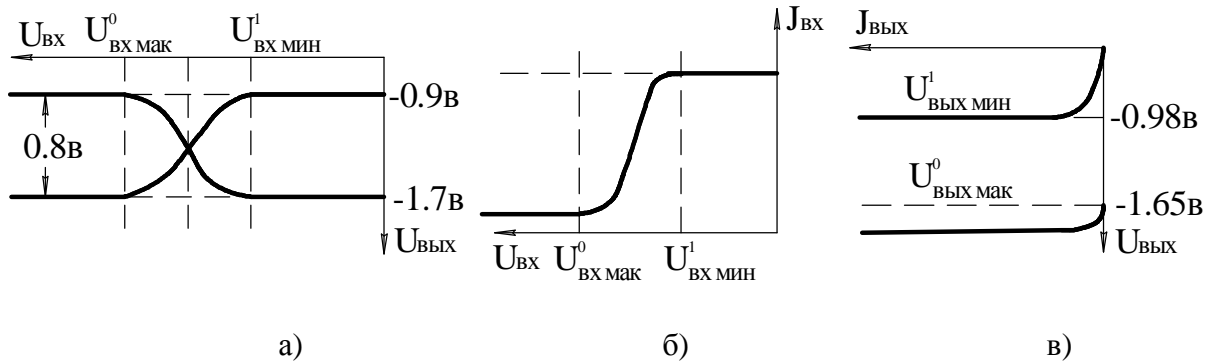


Рис.154 Статические характеристики БЛЭ ЭСЛ передаточная (а), входная (б), выходная (в).

Входное напряжение вблизи $U_{оп} = -1,3$ является запрещенным. Логический перепад выходного напряжения составляет примерно 0,88в. Выходное сопротивление элемента мало. Основные серии 100, 500, 1500. Напряжение питания $U_{п} = -5,2^{\pm 10\%}$ В.

Базовый элемент интегрально-инжекторной логики применяется в БИС и состоит только из полупроводниковых транзисторов, отличается высокой технологичностью и низким напряжением питания. Схема БЛЭ приведена

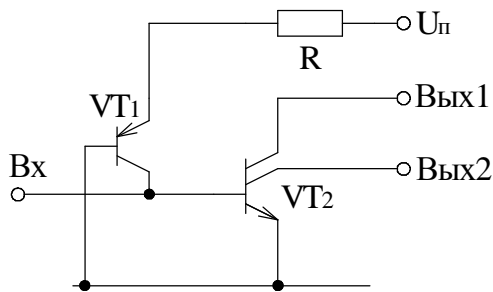


Рис.155 БЛЭ И²Л.

на рис. 155. Особенностью элемента является: отсутствие резисторов, использование импульсного токового принципа питания, малые логические перепады, что обеспечивает высокое быстродействие.

В состав БЛЭ входит многоколлекторный транзистор VT_2 и генератор базового тока транзистора, выполненного на транзисторе VT_1 . Ток инжектора задается

внешним резистором R , который является общим на группу элементов.

Важной особенностью элемента И²Л является возможность изменять ток инжектора в пределах от 1нА до 1мА и тем самым менять его быстродействие.

Принцип работы схемы И²Л заключается в следующем. Допустим сигнал на входе элемента присутствует (лог. 1). В этом случае ток инжектора втекает в базу транзистора VT_2 , насыщает его и на его выходах создается логический 0. Реально выходное напряжение равно 0,1ч0,2в. Если на вход элемента подключить сигнал "0" ($U_{вх} \approx 0,1ч0,2$ в), то транзистор запирается и ток инжектора не проходит через эмиттерный переход транзистора VT_2 . Напряжение на выходе элемента определяется внешними цепями и равно $\approx (0,6-0,7)$ в

Таким образом для БЛЭ И²Л справедливо $U^0=0,1\dots0,2$ в, а $U^1=0,6\dots0,7$ в.
 На рис 156 показана схема реализации логической операции $\underline{X}^1 \underline{X}^0$ и

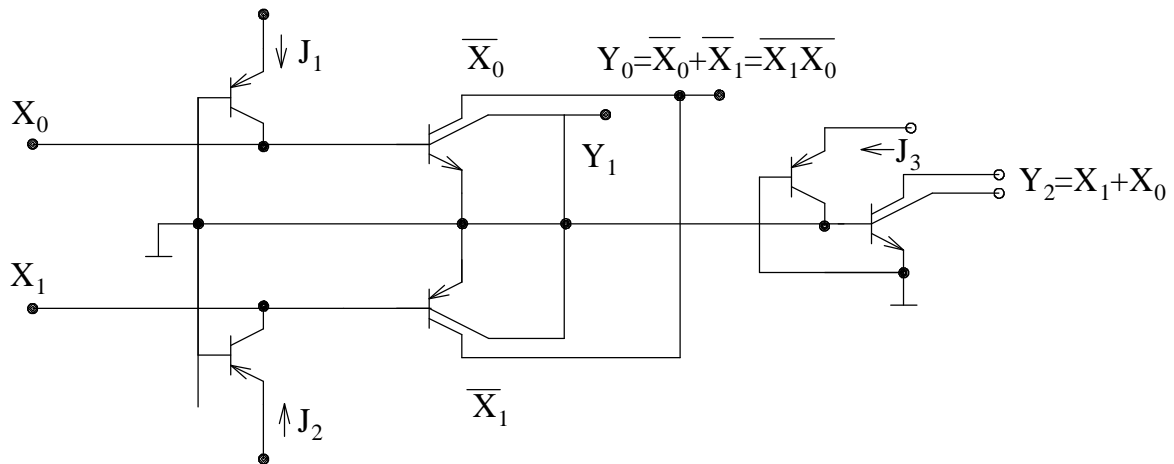


Рис.156 Реализация логической операции на БЛЭ И²Л.

$X_1 + X_2$

Ввиду небольшой помехоустойчивости БЛЭ И²Л используются только в составе БИС и СБИС.

Базовый логический элемент на МДП -транзисторах. Особенностью БЛЭ является то, что нагрузкой ключа является МДП-транзистор и в схеме отсутствуют пассивные элементы. Входное сопротивление транзисторов очень велико -до 10^{12} ом. На рис. 157 приведены схемы БЛЭ КМОП –типа, реализующие логические функции 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ. На входах элемента установлены диоды для защиты от обратного напряжения и статического напряжения. БЛЭ КМОП –типа отличается минимальным потреблением в статическом режиме $J_{\text{потр.ст}} \approx 0,1 \text{ч} 0,5 \text{мкА}$. Однако потребление резко возрастает при работе в динамическом режиме (в сотни и тысячи раз). Уровень логического нуля $U_0=0$, а уровень единицы $U_1=U_{\text{п}}$. Благодаря такому большому перепаду БЛЭ обладает большой помехоустойчивостью. Микросхемы, построенные на основе БЛЭ КМОП –типа могут работать в широком интервале напряжения питания (от 3в до 18в). Основные серии 176, 164, 561, 564, 1561, 1564. Микросхемы этих серий могут работать друг с другом и отличаются быстродействием. Входные токи составляют мкА, выходные 0,5ч1мА. Исключение составляют микросхемы К562ЛН1, К561Н2, К561ЛУ4, которые обеспечивают выходной ток до 8мА. Максимальная рабочая частота не превышает 5МГц.

Особый интерес представляют микросхемы серии К1554, которые относятся к КПОП структурам, но по функциональному назначению соответствуют серии К555. Микросхемы работают в интервале напряжений (2-6)в, обеспечивают нагрузочный ток до 24мА и имеют быстродействие 100ч150 МГц.

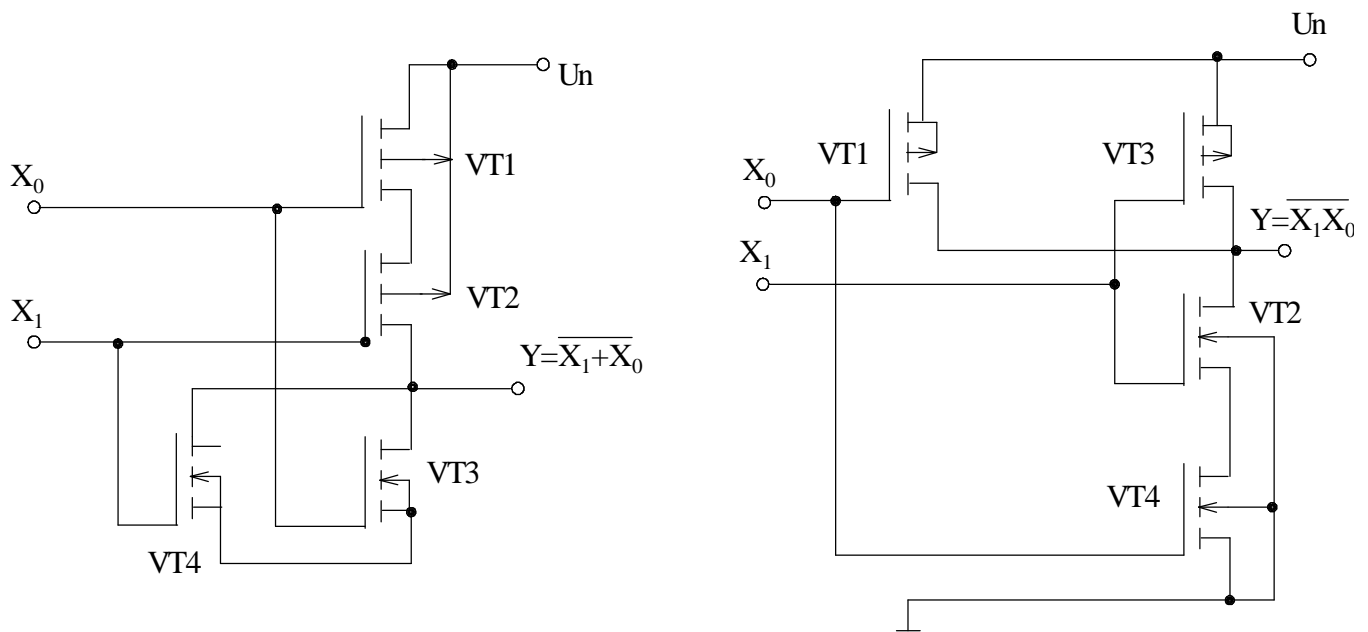


Рис.157 Схема БЛЭ КМОП –типа,реализующая операцию ИЛИ-НЕ (а) и И-НЕ (б)

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что называется системой счисления?
2. Правило перевода числа из десятичной системы в систему с основанием q .
3. Как перевести число из двоичной системы счисления в десятичную?
4. Сколько ФАЛ существует для одной переменной X_1 ?
5. Сколько ФАЛ существует для двух переменных X_1 и X_2 ?
6. Поясните операцию логического умножения.
7. Приведите условное обозначение операций И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ;
8. Перечислите основные способы записи ФАЛ;
9. Что представляет собой ДНФ и КНФ записи ФАЛ;
10. Что такое карта Вейча?
11. Представьте карты Вейча для двух, трех и четырех переменных?
12. В чем заключается минимизация неопределенной ФАЛ?
13. На какие группы подразделяются цифровые устройства?
14. Что называется дешифратором?
15. Что представляет собой шифратор?
16. Каково назначение преобразователя кода?
17. Запишите ФАЛ, описывающую работу мультиплексора.
18. Что такое демультимплексор?
19. Что представляет собой одноразрядный комбинационный сумматор?
20. Назначение цифровых компараторов.
21. Приведите классификацию триггеров.
22. Нарисуйте синхронный RS-триггер на ЛЭ И-НЕ.
23. Что представляет собой Д-триггер?

24. Что представляет собой Т-триггер?
25. Нарисуйте схему двухступенчатого jk-триггера.
26. Назовите особенности работы триггера с динамическим управлением.
27. Классификация регистров.
28. Нарисуйте четырех разрядный параллельный регистр на Д-триггерах.
29. Какие операции могут выполняться в сдвигающих регистрах?
30. Что называется счетчиком?
31. Какой счетчик называется двоичным?
32. Нарисуйте счетчик с коэффициентом пересчета $K_{пер}=10$.
33. Что представляет собой накапливающий сумматор.
34. Назовите основные требования к БЛЭ.
35. Что такое коэффициент разветвления по выходу?
36. Назовите основные типы БЛЭ и область их применения?
37. Приведите схему базового элемента 3И-НЕ ТТЛ.
38. Назначение диодов Шотки в схемах БЛЭ ТТЛШ.
39. Нарисуйте токовый ключ БЛЭ ЭСЛ.
40. Нарисуйте БЛЭ КМОП –типа, реализующий операцию 2И-НЕ.

5. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

5.1. Полупроводниковые запоминающие устройства (ЗУ)

Классификация и основные характеристики запоминающих устройств. В цифровых электронных приборах широко применяются запоминающие устройства для хранения и выдачи информации. В простейшем случае для хранения информации могут использоваться триггеры, регистры, магнитные диски и ленты.

В зависимости от выполняемых функций ЗУ подразделяются на: оперативные, постоянные и внешние запоминающие устройства.

В зависимости от материала, ЗУ подразделяются на полупроводниковые и магнитные.

Современные ЗУ в настоящее время выполняются, как правило, в виде интегральных микросхем.

Основными параметрами ЗУ являются:

- емкость ЗУ M - это максимальное количество информации, которое может храниться в ЗУ. Емкость измеряется в байтах, в килобайтах, в мегабайтах, в битах и т.д.
- организация ЗУ, под которой понимают число слов (N), хранимых в ЗУ, определенной разрядности n $M=Nn$
- быстродействие ЗУ - определяется временем выполнения операций *записи и считывания*. Время выполнения операции включает в себя время поиска и время записи или считывания информации.

В большинстве ЗУ применяется адресный (произвольный) доступ к хранимой информации. По схемно-техническим признакам ИС памяти подразделяются на два класса: на биполярных транзисторах и на МДП-транзисторах. Электрические параметры микросхем памяти подразделяются на статические и динамические. К статическим параметрам относятся: напряжение питания $U_{п}$, потребляемая мощность $P_{потр.}$, уровень напряжения и токи входных сигналов лог. 0 и лог.1 ($U_{вх}^0, J_{вх}^0, U_{вх}^1, J_{вх}^1$), уровень напряжения и токи выходных сигналов лог. 0 и лог.1 ($U_{вых}^0, J_{вых}^0, U_{вых}^1, J_{вых}^1$) и другие. Указанные параметры характеризуют возможность работы ИС памяти со схемами управления.

Динамические параметры характеризуют временные процессы в микросхемах при записи, считывании или программировании ИС. Для характеристики динамических параметров ИС памяти в справочной аппаратуре приведены временные диаграммы их работы.

Условное обозначение полупроводниковых ИС памяти соответствует ГОСТ 1948-74.

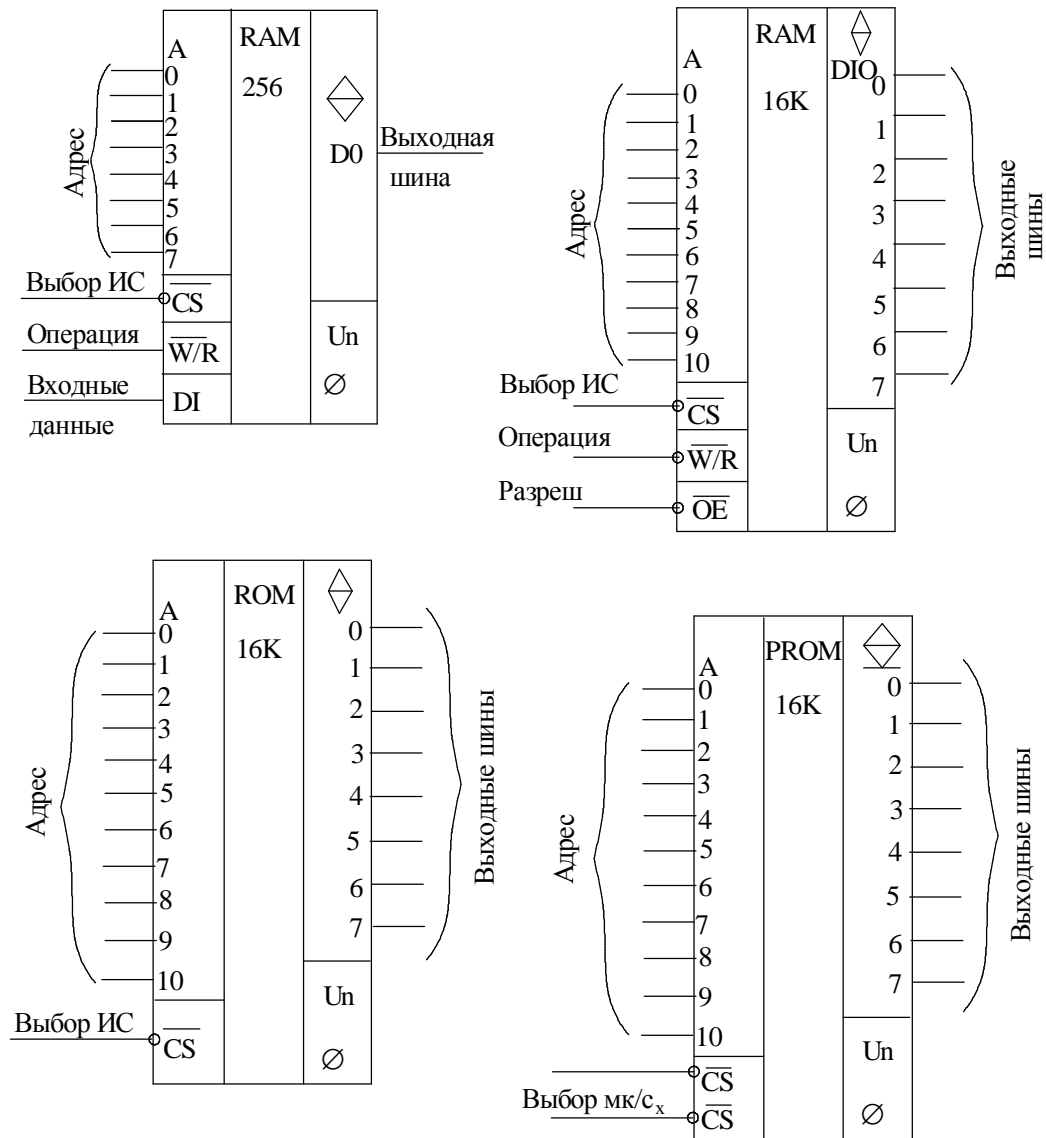


Рис.155 Условное обозначение ИС памяти: ОЗУ с отдельными информационными шинами записи и чтения (а), с совмещенными шинами (б), ПЗУ масочное (в), ПЗУ программируемые (г).

Условное обозначение выводов микросхем памяти:

- | | | | |
|-----|---------------------------|----------------|----------------------------|
| A | — адрес, | D0 | — выходные данные, |
| W/R | — операция запись-чтение, | DIO | —совмещенные входы-выходы, |
| OE | — стробирование по входу, | ER | — стирание, |
| D | — данные, | U _п | — напряжение питания. |
| D1 | — входные данные, | | |

На центральном поле микросхемы обозначается выполняемая функция. RAM -ОЗУ, ROM -массочное ПЗУ, PROM -программируемое ПЗУ, FПOM-репрограммируемое ПЗУ. Внизу пишется емкость в БИТах.

В правом верхнем углу указывается состояние выходных шин:

- ◊ — выход имеет три состояния: 0,1,∞
- ◊ — выходная шина представляет открытый коллектор,
- ◊ — выходная шина представляет собой открытый эмиттер.

В маркировке ИС после серии: ОЗУ обозначаются -РУ, массочные ПЗУ-РЕ, программируемые ПЗУ-РТ, репрограммируемые ПЗУ с электрическим стиранием-РР, репрограммируемое ПЗУ с ультрафиолетовым стиранием-РФ, регистровые-ИР.

Оперативные ЗУ - это такие ЗУ, которые применяются для хранения, приема и выдачи оперативной информации, т.е. той информации, которая может изменяться в процессе работы прибора.

Оперативные ЗУ подразделяются на статические ЗУ и динамические ЗУ. В статических ЗУ элементами памяти являются статические триггера, а в динамических ОЗУ- конденсаторы.

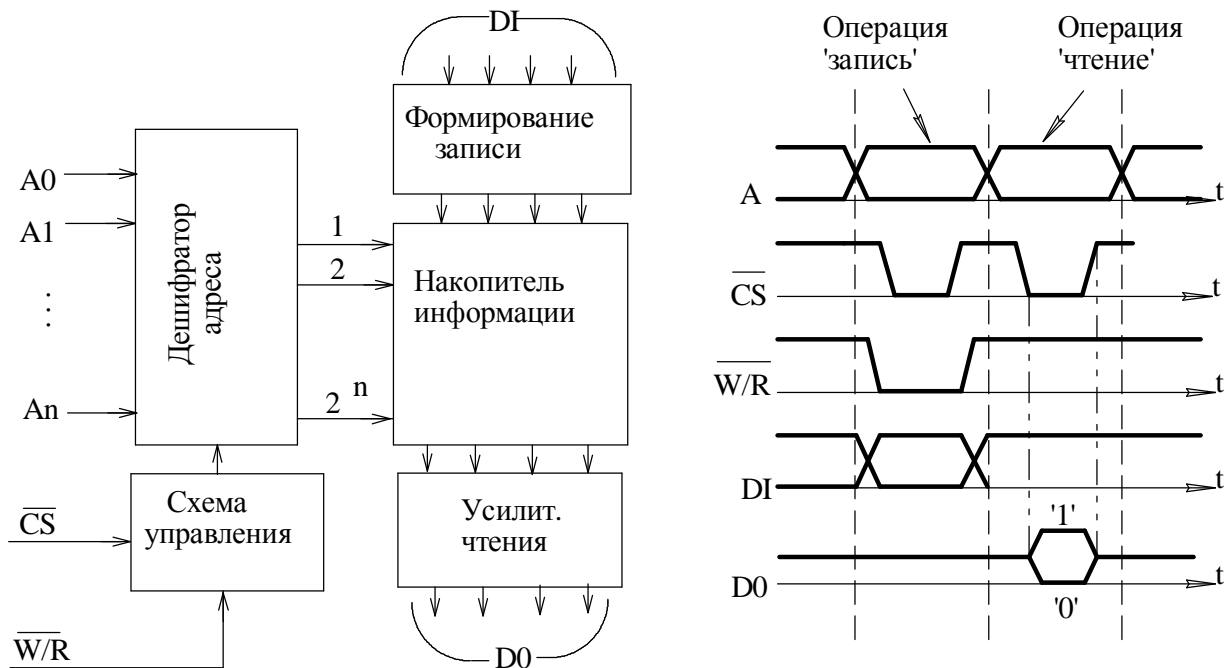


Рис.156. Структурная схема статического ОЗУ (а) и временная диаграмма его работы (б).

Статические ОЗУ (рис.156) выполняются с произвольным доступом к информации. В зависимости от способа поиска информации в накопителе различают структуры с одномерной и двухмерной адресацией.

Адрес ячейки, в которую надо записать информацию (DI) или сосчитать ее (DO) поступает на дешифратор адреса. Дешифратор адреса выбирает в накопителе требуемую ячейку. Операция определяется управляющим сигналом W/R. Микросхема работает только при поступлении сигнала "выбор

микросхемы" \overline{CS} при отсутствии сигнала \overline{CS} выходные шины D0 находятся в третьем состоянии ($R_{\text{вых}} \approx \infty$).

ОЗУ относятся к энергозависимым системам, т.е. при отключении питания информация разрушается.

ОЗУ часто строятся на МДП-транзисторах, поскольку они обладают минимальной потребляемой мощностью. Например серия К 537, имеющая более 10 разновидностей ИС, обеспечивает хранение информации в объемах от 1К до 256К и выше. Микросхемы питаются от источника +5В, согласуются с уровнями ТТЛ, имеют наибольшее энергопотребление и выходные шины с тремя устойчивыми состояниями.

В динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда на конденсаторе. Наличие заряда на конденсаторе соответствует лог. 1, а отсутствие заряда соответствует лог. 0. Так как конденсатор склонен к саморазрядке, то в динамических ОЗУ имеется операция регенерации. Она заключается в том, что примерно один раз в 2 мсек все конденсаторы восстанавливают свой заряд. Второй особенностью динамических ОЗУ является то, что в целях уменьшения количества контактов ИС, адрес подается в два такта- сначала младшие разряды по сигналу \overline{RAS} , а затем старшие разряды по сигналу \overline{CAS} .

Микросхемы динамических ОЗУ отечественного производства представлены серией К565РУ емкостью от 16К до 1024К. Структура микросхемы- одноразрядная. По сигналу \overline{RAS} принимаются младшие разряды адреса, а по \overline{CAS} сигналу - старшие. Внутри микросхемы коды адреса строк и столбцов фиксируются в регистрах, а затем дешифрируются и осуществляют выборку элементов памяти.

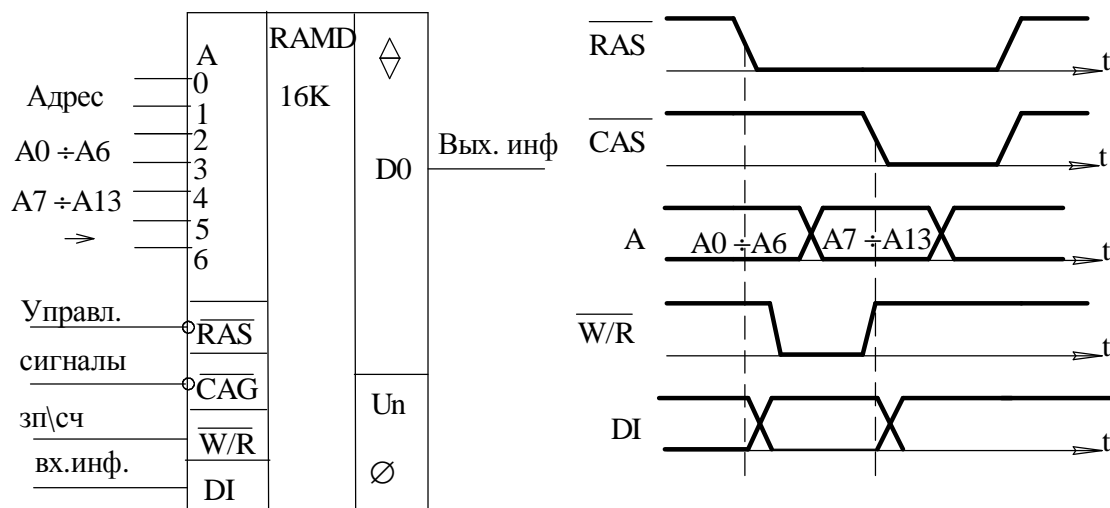


Рис.157. Динамическое ОЗУ (а), временная диаграмма работы (б).

Постоянные ЗУ предназначены для хранения постоянной информации, т.е. такой информации, которая не меняется в течение всего времени работы цифрового устройства. В ПЗУ возможен только режим считывания

информации без ее разрушения. ПЗУ имеет многоразрядную структуру и адресную выборку. По способу программирования они подразделяются на три группы :

- *масочные МПЗУ,*
- *программируемые ППЗУ,*
- *репрограммируемые РПЗУ.*

К *масочным* относятся ПЗУ, информация в которые однократно записывается в процессе изготовления ИС. Запись информации может выполняться с помощью специально разработанной маски, с помощью которой формируется накопитель ПЗУ.

Масочные ПЗУ имеют адресную выборку и предназначены для хранения стандартной информации, например, кодов символов алфавита, цифр и т.д. Микросхемы отличаются простотой, низкой стоимостью, однако время изготовления таких ИС велико.

Программируемые ПЗУ, как и *масочные* имеют адресную выборку, однако программируются один раз непосредственно у потребителя.

Операция программирования заключается в пережоге части плавких перемычек на поверхности кристалла. Перемычки могут быть изготовлены из нихрома, поликремния и имеют собственное сопротивление в несколько десятков ом.

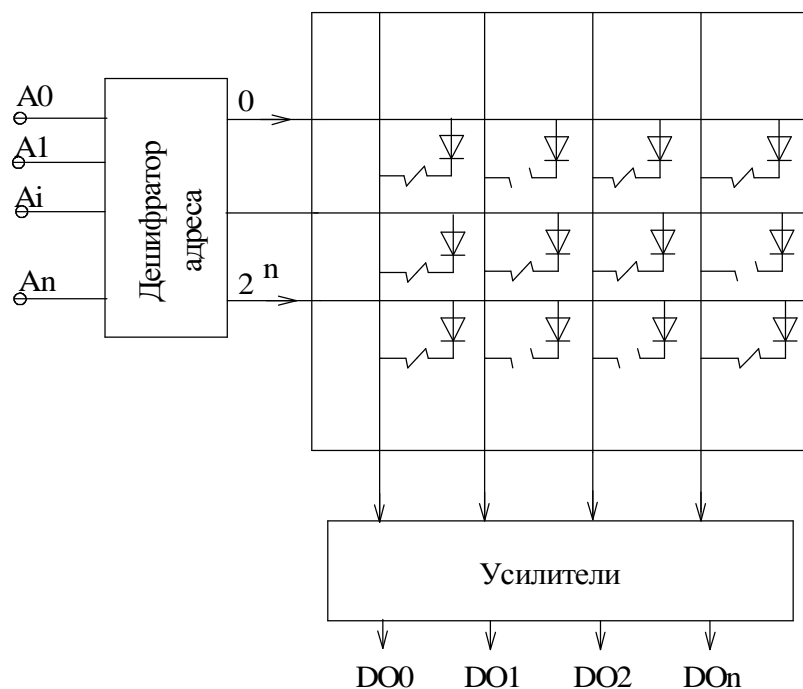


Рис.158. Программируемое ПЗУ.

Программирование производится на специальном программаторе путем пропуска импульсов тока через перемычки амплитудой $\approx 20 \div 30$ мА.

Недостатком таких ППЗУ является то, что повторное программирование недопустимо.

Репрограммируемые ППЗУ допускают многократное стирание и запись информации. Их можно подразделить на две группы: РПЗУ с

записью и стиранием электрическими сигналами и РПЗУ с записью электрическими сигналами и стиранием ультрафиолетовым излучением.

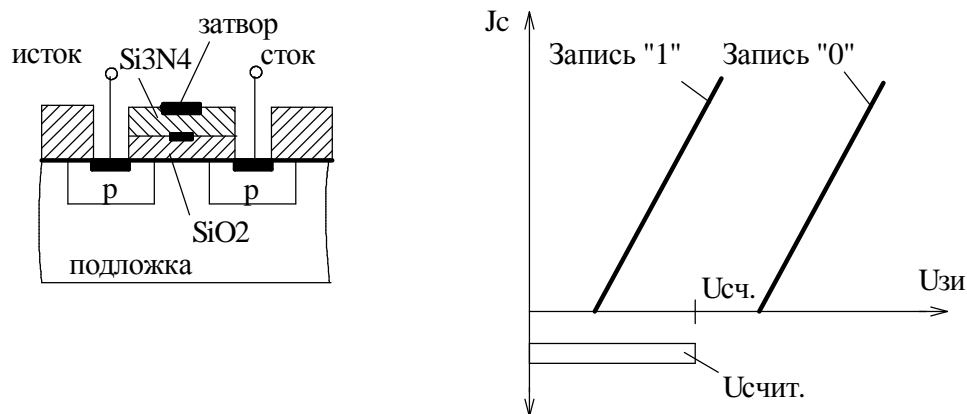


Рис.159. Элемент памяти РПЗУ (а), передаточная характеристика транзистора (б).

Элемент памяти представляет собой МДП-транзистор с индуцированным каналом, имеющий двухслойный диэлектрик под затвором. Если к затвору относительно подложки приложить положительное напряжение (30÷40)В, то под действием сильного электрического поля электроны перемещаются к затвору и накапливаются на границе раздела двух диэлектрических слоев. Электрический заряд снижает пороговое напряжение и смещает токовую характеристику влево. Это состояние соответствует лог. 1 (рис.159). Если электрического заряда нет, то это состояние соответствует лог. 0.

Чтобы уничтожить электрический заряд необходимо на затвор подать потенциал отрицательной полярности амплитудой (30÷40)В. При этом электроны вытесняются в подложку и передаточная функция смещается вправо. Режим вытеснения заряда называется режимом стирания (электрическое стирание). Стирание информации может производиться путем облучения кристалла ИС ультрафиолетовым светом (ультрафиолетовое стирание). После стирания информации производится запись новой, на программаторе.

Гарантированный срок хранения информации в РПЗУ — 5-7 лет, количество циклов перезаписи для микросхем с ультрафиолетовым стиранием около 100 и с электрическим стиранием около 10000.

Для снижения потребляемой мощности в ПЗУ используется динамический режим питания. При этом напряжение питания на ИС памяти подается только при обращении к ней. Потребляемая мощность уменьшается в сотни раз.

5.2 Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

Цифро-аналоговый преобразователь предназначен для преобразования входной величины, представленной числовым кодом, в эквивалентную аналоговую величину. Эти преобразователи широко используются в системах

автоматического управления, в цифровых системах обработки информации, в вычислительной технике.

В ЦАП в качестве входного сигнала используются цифровые коды, а выходным сигналом является, как правило, напряжение.

Принцип работы ЦАП состоит в суммировании эталонных значений напряжений (токов), соответствующих разрядам входного кода, причем в суммировании участвуют только те эталоны, для которых в соответствующих разрядах стоит "1". В этом случае входное напряжение определяется

следующим образом:
$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{2} K_n + \frac{U_0}{4} K_{n-1} + \frac{U_0}{8} K_{n-2} + \dots + \frac{U_0}{2^n} K_1,$$

где U_0 — опорное (эталонное) напряжение,

k — коэффициенты двоичных разрядов, принимающие значение 0 или 1,

n — разрядность входного кода.

Основные характеристики ЦАП подразделяются на статические и динамические.

К статическим параметрам относятся:

— *разрядность (n)*

— *абсолютная разрешающая способность ЦАП* - т.е. минимальным значением изменения сигнала на выходе, обусловленное изменением входного кода на единицу (цена младшего разряда), определяется как $U_0/2^n$

— *абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы $D_{\text{шк}}$* представляет собой отклонение значения выходной напряженности от номинального расчетного, соответствующего конечной точке характеристики преобразования (измеряется в единицах младшего разряда (ЕМР) или в процентах рис. 160.);

— *нелинейность преобразования δL* - это отклонение реальной характеристики преобразования от расчетной (линейной). Величина δL измеряется в единицах младшего разряда или в процентах:

$$\delta L = \frac{\delta L}{U_{\text{макс}}} 100 \quad \text{где } \delta L \text{ - абсолютное значение нелинейности}$$

Из динамических характеристик наиболее существенными являются:

— *время установления выходного сигнала $t_{\text{уст}}$* , - это интервал времени от подачи входного кода до появления выходного напряжения;

— *максимальная частота преобразования $f_{\text{преобр}}$*

При построении ЦАП в качестве эталонов используются токи или напряжения. Принцип построения ЦАП, реализующих метод суммирования токов, иллюстрируются на рис.161.

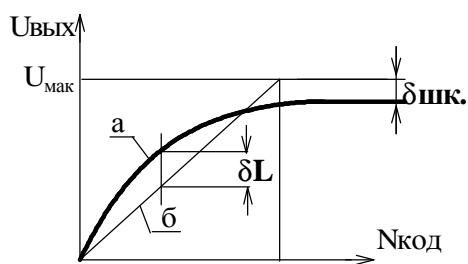


Рис.160. Характеристики преобразования ЦАП Реальная(а) и идеальная(б).

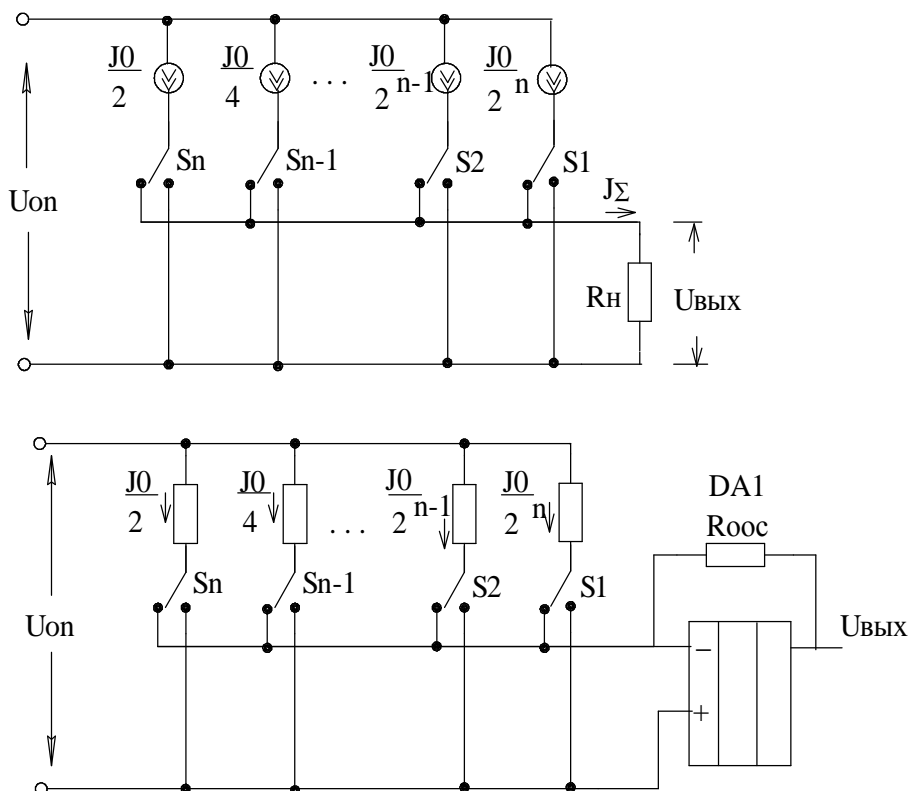


Рис.161. Структурная схема ЦАП с суммированием токов (а) и ее реализация (б).

Данное устройство (рис. 161.а) содержит n источников тока, которые подключаются с помощью ключей S к общей нагрузке R_n . На общей нагрузке R_n будут протекать только токи тех разрядов, в которых значение цифры-единица. Если нагрузка R_n постоянна, то выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально входному коду. На практике для получения выходного напряжения, пропорционального входному коду, в качестве нагрузки используется операционный усилитель, играющий роль преобразователя тока в напряжение. Действительно в ОУ напряжение между входами равно нулю.

$$U_{\text{вых}} = J_y \cdot R_{\text{оос}}$$

Выходное напряжение в ОУ прямо пропорционально выходному току ЦАП и не зависит от сопротивления выходной нагрузки.

Недостатком рассмотренной выше схемы ЦАП является широкий диапазон величин сопротивлений в резистивной матрице для формирования разрядных токов. К тому же эти резисторы должны иметь прецизионную точность изготовления.

Поэтому в современных ЦАП используются резистивные матрицы типа R-2R. Эти матрицы включают в себя резисторы двух номиналов R и 2R (рис.162).

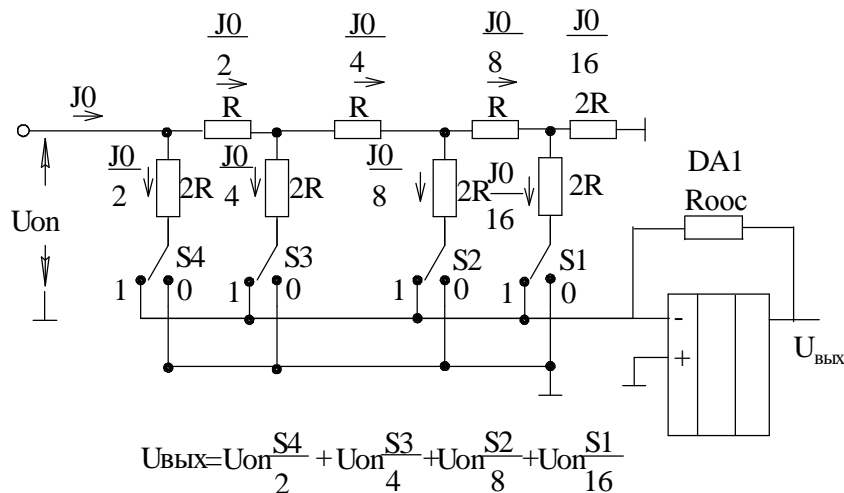


Рис.162. ЦАП с матрицей R-2R.

В резистивной матрице происходит последовательное деление тока на два. В результате выходное максимальное напряжение на выходе ЦАП при N=111...1 равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{оп}} \frac{R_{\text{ооc}}}{R} \left(1 - \frac{1}{2^n} \right)$$

Входное сопротивление резистивной матрицы, а следовательно, и ток J_0 постоянны и не зависят от состояния ключей (кода). При $R_{\text{ооc}} = R$ величина выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ макс}}$ меньше $U_{\text{оп}}$ на величину младшего разряда.

Точность и стабильность параметров ЦАП, в основном, зависят от стабильности источника $U_{\text{оп}}$ и точности изготовления резисторов R в матрице. В качестве материала для резисторов используют пленку поликремния, обладающую высокой стабильностью собственного сопротивления.

Для уменьшения погрешностей, возникающих из-за транзисторов токовых ключей, площади транзисторов выполняются пропорциональными протекающему через них току. ЦАП выпускаются в виде ИС, обычно с внешним источником $U_{\text{оп}}$ и ОУ. На рис 163 изображены ИС ЦАП серии К572

Микросхема К572ПА1 представляет собой резистивную матрицу на 10 разрядов и токовые ключи. Входы ОУ подключаются к выходным шинам J_1, J_2 , а выход ОУ ко входу Y. Сопротивление обратной связи $R_{\text{ооc}}=R$ находится внутри кристалла, что увеличивает стабильность работы ЦАП.

Микросхема К572ПА2 имеет разрядность –12 и содержит два дополнительных двенадцатиразрядных регистров для хранения входной

информации. Прием в регистры производится подачей сигнала 1 на входы C_1 и C_2 . Существуют другие серии ИС с повышенным быстродействием, например К1108ПА1, К1118ПА1 и др.

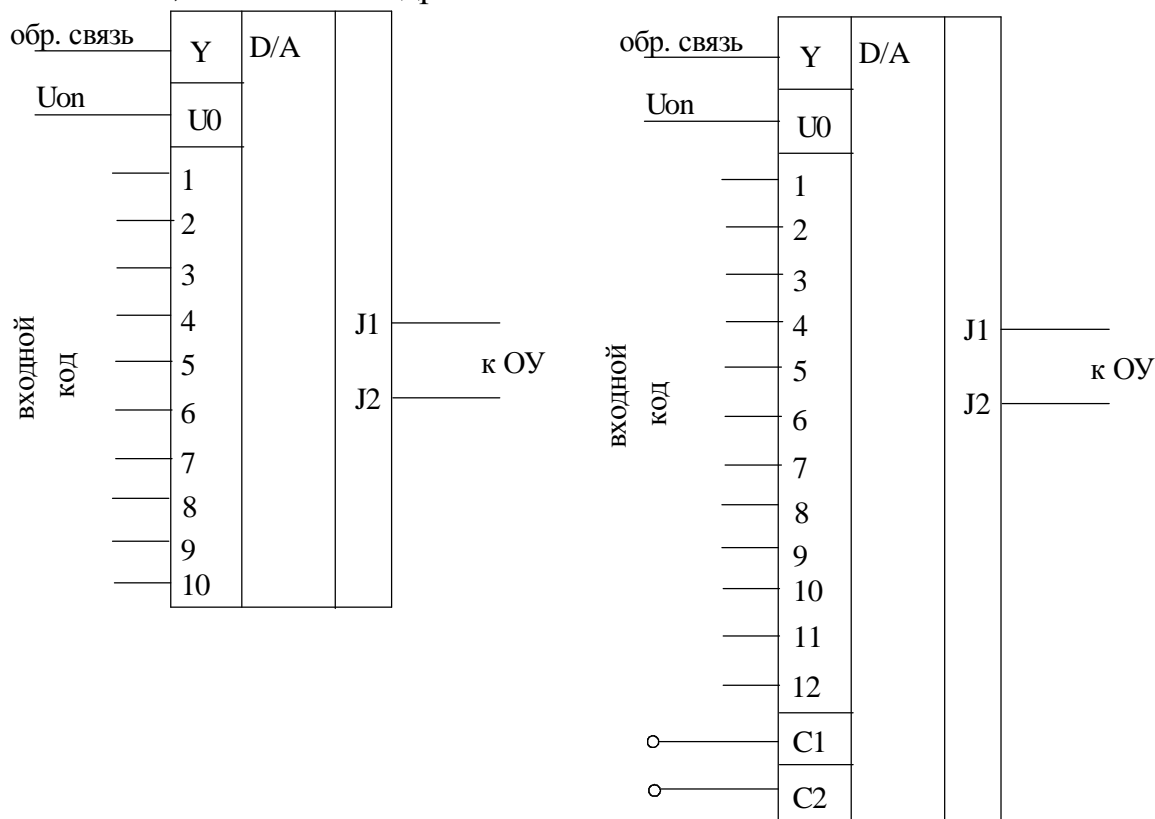


Рис 163. ИС ЦАП серии К572ПА1(а) и К572ПА2(б)

5.3 Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

Аналого-цифровой преобразователь – это устройство, предназначенное для преобразования непрерывно-изменяющейся во времени физической величины в эквивалентные ей значения цифровых кодов.

В качестве аналоговой величины может быть напряжение, ток, угловое перемещение, давление газа и т.д.

Процесс аналого-цифрового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

- *выборку значений исходной аналоговой величины* в некоторые заданные моменты времени, т.е. дискретизация сигнала во времени;
- *квантование* (округление преобразуемой величины до некоторых известных величин) полученной в дискретные моменты времени значения аналоговой величины по уровню;
- *кодирование* – замена найденных квантовых значений некоторыми числовыми кодами.

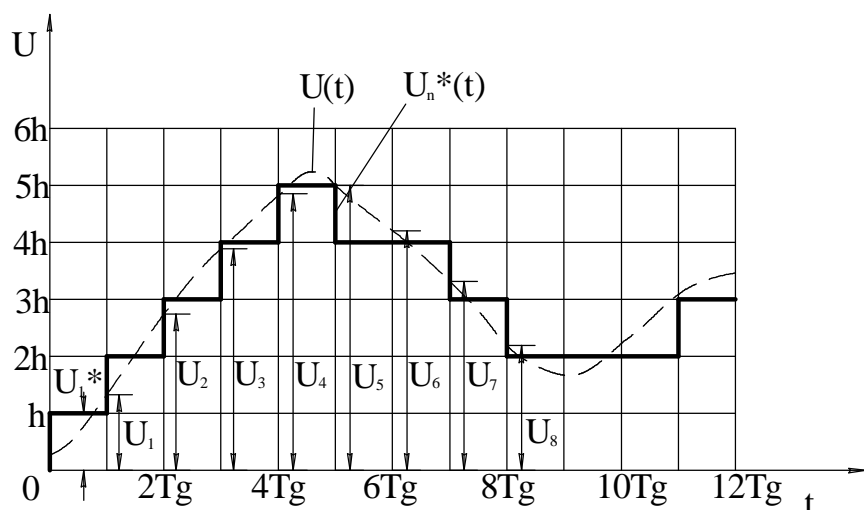


Рис 164. Принцип аналого-цифрового преобразования.

Операция квантования по уровню функции $U(t)$ заключается в замене бесконечного множества её значений на некоторое конечное множество значений $U_n^*(t)$, называемых уровнями квантования. Для выполнения этой операции весь диапазон изменения функции $D=U(t)_{\max}-U(t)_{\min}$ разбивают на некоторое число уровней N и производят округление каждого значения функции $U(t)$ до ближайшего уровня квантования $U_n^*(t)$.

Величина $h=D/N$ носит название шага квантования. В результате процесса аналого-цифрового преобразования аналоговая функция $U(t)$ заменяется дискретной функцией $U_n^*(t)$.

В аналитической форме процесс аналого-цифрового преобразования может быть представлен выражением:

$$K_{ni} = \frac{U(t)_i}{h} \pm \delta k_i$$

где $U(t)_i$ - значение функции $U(t)$ в i -м шаге,

h - шаг квантования,

δk_i - погрешность преобразования на i -м шаге.

Процесс квантования по уровню связан с внесением некоторой погрешности e_i , значение которой определяется неравенством

$$-\frac{h}{2} \leq e \leq +\frac{h}{2}$$

Погрешность зависит от разрядности.

Основные параметры АЦП делятся на статистические и динамические.

К статистическим относятся:

- вид преобразуемой величины: напряжение, ток, угловое перемещение и т.д.,
- диапазон изменения входных величин,
- разрядность,
- абсолютная разрешающая способность,

- абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы $\delta_{шк}$,
- нелинейность преобразования δL .

К динамическим параметрам относится максимальная частота преобразования $f_{пр}$.

В зависимости от принципа действия АЦП делятся на АЦП параллельного преобразования, АЦП поразрядного взвешивания, следящие АЦП и интегрирующие АЦП. Аналого-цифровые преобразователи параллельного преобразования реализуют метод непосредственного считывания и являются самыми быстродействующими. В качестве примера рассмотрим принцип работы микросхемы К1107ПВ1.

Микросхема имеет 6 разрядов и обеспечивает быстродействие до 20 МГц.

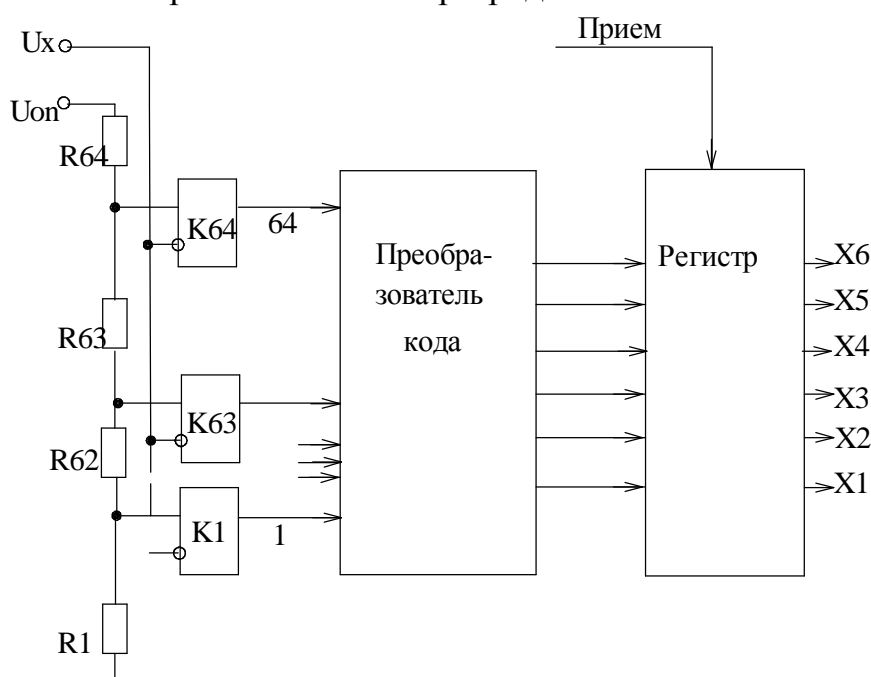


Рис 165. Структурная схема параллельного АЦП.

Устройство содержит делитель $R_1 \div R_{64}$, 64 компаратора, преобразователь кода и регистр. На входы компараторов поступают входной сигнал U_x и напряжение с делителя. При этом на выходах компараторов формируется 64^{ex} разрядный единичный код. Число единиц в нем равно числу уровней квантования. Полученный единичный код поступает на вход преобразователя кода, в котором он преобразуется в 6-и разрядный двоичный код. Полученный двоичный код записывается в регистр и выдается на выходные шины. В данном АЦП время преобразования занимает один такт.

АЦП поразрядного взвешивания (или поразрядного кодирования) выполняет одно преобразование за n тактов.

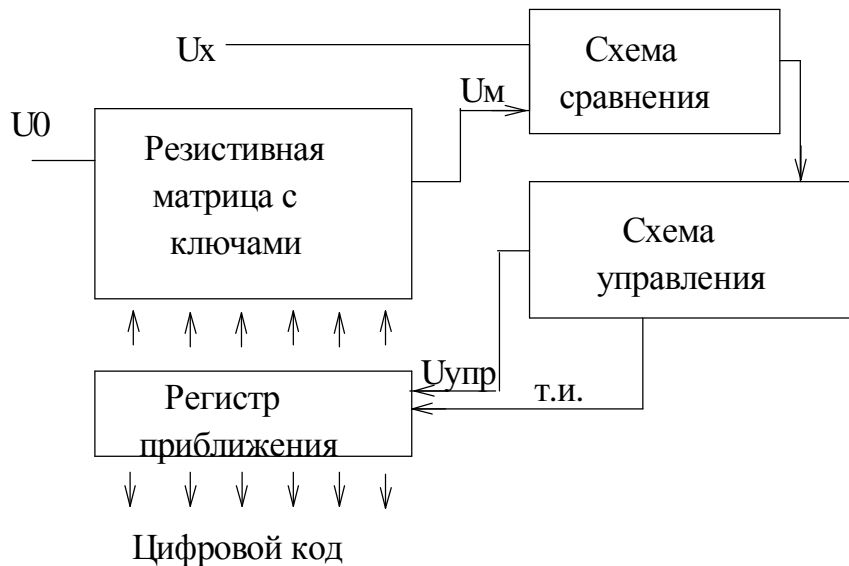


Рис 166. Структурная схема АЦП поразрядного кодирования.

Основой АЦП является регистр последовательных приближений. Он представляет собой сдвигающий регистр, в котором последовательно, начиная со старшего разряда формируется логическая единица. В зависимости от сигнала $U_{упр}$, поступающего на его вход, эта единица или остается или заменяется логическим "0". Резистивная матрица формирует аналоговое напряжение, эквивалентное "весу" цифрового кода, поступающего на матрицу с регистра приближений. Схема сравнения сравнивает напряжения U_x и U_m , и в зависимости от их величин формирует сигнал $U_{упр}$ на уровне лог."0" или лог."1".

Рассмотрим пример:

Пусть $U_x=7$ в, а $U_0=10$ в, тогда в первом такте в старшем разряде регистра формируется лог."1" и $U_m=5$ в, $U_m < U_x$; $U_{упр}=1$. Следовательно, в старшем разряде остается лог."1".

Во втором такте, в следующем $n-1$ разряде формируется лог."1" и $U_m=5$ в+ $2,5$ в= $7,5$ в; $U_m > U_x$; $U_{упр}=0$. Следовательно, единица в $n-1$ разряде заменяется на лог."0" и $U_m=5$ в.

В третьем такте в разряд $n-2$ регистра записывается лог."1" и $U_m=5$ в+ $1,25$ в= $6,25$ в, $U_m < U_x$; $U_{упр}=1$. Следовательно, лог."1" в $n-2$ разряда остается.

В четвертом такте в разряд $n-3$ регистра записывается лог."1" и $U_m=5$ в+ $1,25$ в+ $0,625$ в= $6,875$ в, $U_m < U_x$; $U_{упр}=1$. Следовательно, лог."1" остается в разряде $n-3$.

Процесс преобразования повторяется n тактов, в результате с регистра приближений снимается код преобразованной аналоговой величины.

АЦП поразрядного взвешивания нашли широкое применение при разработке ИС ввиду своей простоты и достаточно хорошего быстродействия.

Такие ИС могут иметь в своем составе генератор тактовых импульсов и источник эталонного напряжения или не иметь их.

В качестве примера рассмотрим АЦП, выполненное на ИС К1113ПВ1.

ИС предназначена для преобразования однополярного или биполярного аналогового напряжения ($U_{вх}=0 \div 10\text{в}$ или $U_{вх} = -5\text{в} \div +5\text{в}$) в десятиразрядный двоичный код. Нелинейность преобразования $\pm 0,1\%$, время преобразования 30мкс. Для работы ИС требуется два источника питания +5в и -15в.

В микросхему встроен внутренний источник опорного напряжения и генератор тактовых импульсов.

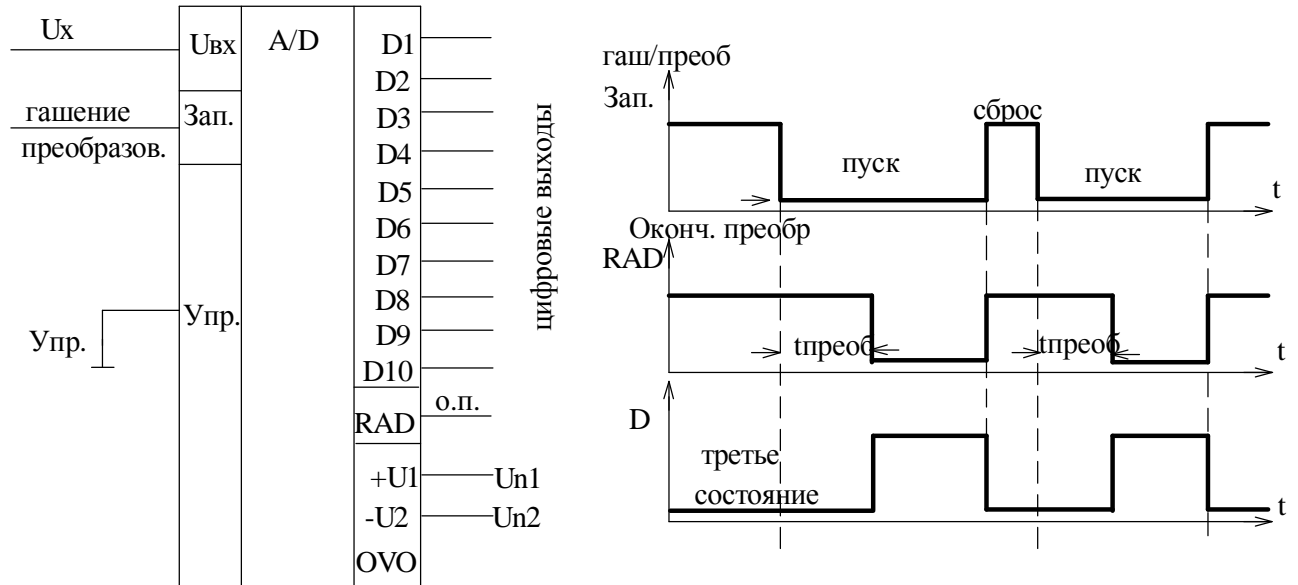


Рис 167. ИС К1113ПВ1 (а) и временная диаграмма ее работы (б).

Запуск АЦП производится лог."0". Цифровая информация с выходных шин снимается через 30мкс после поступления сигнала "Гашение-преобразование". $T_{\text{преобр.}}=30$ мкс. Работа АЦП поясняется временной диаграммой его работы (рис. 167. б)

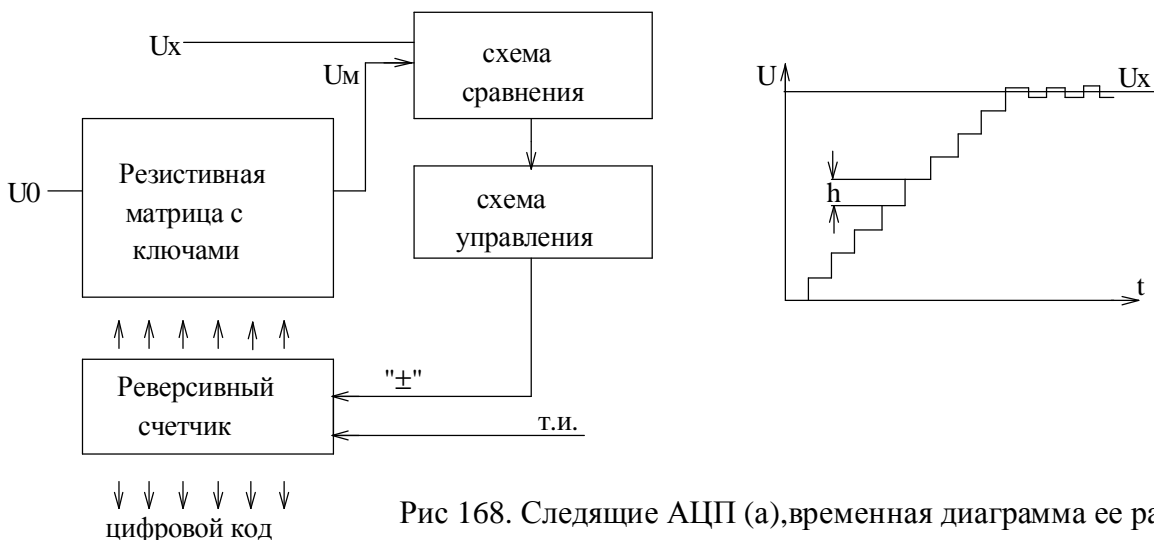


Рис 168. Следящие АЦП (а),временная диаграмма ее работы (б).

Следящие АЦП в отличие от АЦП поразрядного взвешивания имеют в своем составе вместо регистра последовательных приближений реверсивный счетчик.

Работа АЦП поясняется временной диаграммой работы(б). Управление реверсивным счетчиком производится по управляющей шине “±” в зависимости от соотношения сигналов U_x и U_m . При изменении входного сигнала U_x , изменяется код реверсивного счетчика и напряжение с матрицы U_m “следит” за U_x .

Интегрирующие АЦП относятся к медленнодействующим преобразователям. Принцип их действия основан на преобразовании аналоговой величины во временной интервал t_x и формировании число-импульсного (единичного) кода путем заполнения этого интервала импульсами опорной частоты f_0 . Значение единичного кода определяется соотношением:

$$N_{(1)} = t_x * f_0$$

Число-импульсный код поступает на счетчик, на выходе которого формируется цифровой код. Структурная схема такого АЦП приведена на рис.169 а

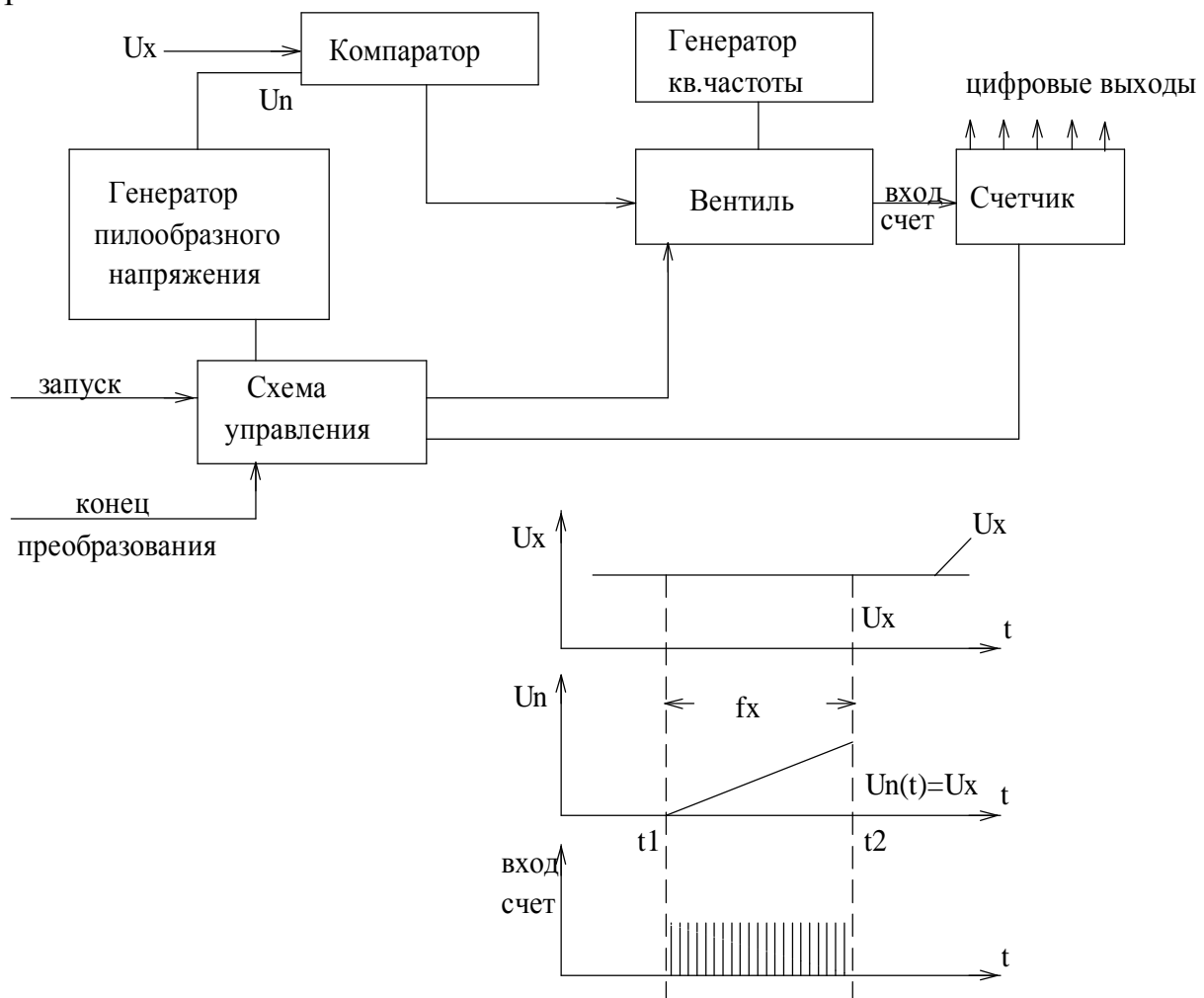


Рис 169. Структурная схема (а) и временная диаграмма работы (б) интегрирующего АЦП.

Максимальное время преобразования зависит от разрядности АЦП и определяется

$$T_{\text{пр.макс}} = f_0 * 2^n,$$

где f_0 – период частоты кварцевого генератора.

Погрешность интегрирующего АЦП определяется, в основном, изменением наклона пилообразного напряжения, которое определяется постоянной времени RC интегратора (генератора пилообразного напряжения). Под воздействием внешних дестабилизирующих факторов, особенно температуры, постоянная времени, а следовательно, и наклон пилообразного напряжения меняется, что приводит к значительным погрешностям преобразования. Поэтому в настоящее время для построения интегрирующих АЦП используют принцип двойного интегрирования.

Принцип работы АЦП двойного интегрирования заключается в том, что сначала в течении некоторого фиксированного временного интервала T_1 интегрируется аналоговая преобразуемая величина U_x , а затем интегрируется эталонное (опорное) напряжение противоположной полярности U_{on} . Временной интервал T_2 пропорционален преобразуемой величине U_x .

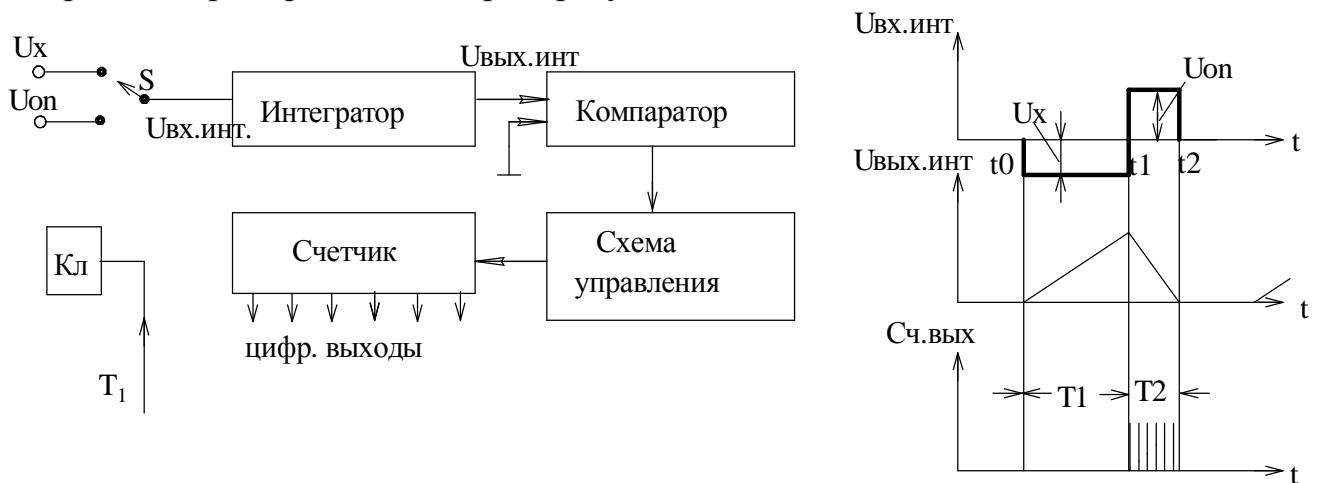


Рис 170. Структурная схема АЦП двойного интегрирования (а) и временная диаграмма его работы (б).

Действительно в течении интервала времени T_1 напряжение на выходе интегратора изменяется по линейному закону

$$U_{\text{вых.инт.}} = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} U_x dt = -\frac{U_x}{RC} t, \text{ при } U_x - \text{const}$$

В течении интервала времени T_2 выходное напряжение на выходе интегратора изменяется от $U_{\text{вых.инт.макс}}$ до 0, т.е.

$$U_{\text{ВЫХ.ИНТ.}} = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{ОП}} dt = -\frac{U_{\text{ОП}}}{RC} t, \text{ при } U_{\text{ОП}} = \text{const}$$

Следовательно,

$$\frac{U_x}{RC} T_1 = \frac{U_{\text{оп}}}{RC} T_2 \quad T_2 = \frac{T_1}{U_{\text{оп}}} \cdot U_x$$

Таким образом интервал времени T_2 зависит от постоянной величины $T_1/U_{\text{оп}}$ и переменной U_x и не зависит от параметров интегратора. В этом можно убедиться на графике рис.171.

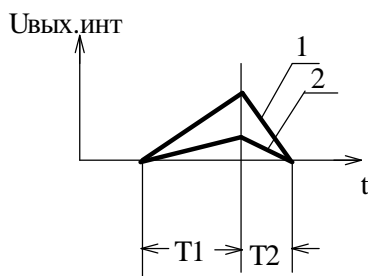


Рис 171. Напряжение на выходе интегратора при постоянной времени $\phi_1 = R_1 C_1$ (1) и $\phi_2 = R_2 C_2$ (2) при $\phi_1 \neq \phi_2$

АЦП двойного интегрирования обеспечивает высокую точность преобразования в условиях промышленных помех в широком интервале температур и широко используется в измерительной технике и автоматизированных системах управления.

Например, основу всех мультиметров составляет АЦП двойного интегрирования, выполненная на микросхеме К572ПВ2 или К572ПВ5. ИС практически одинаковые, но первая работает на светодиодные индикаторы, а вторая – на жидкокристаллические индикаторы.

Микросхема К572ПВ2 совместно с источником опорного напряжения, несколькими резисторами и конденсаторами выполняет функции АЦП двойного интегрирования с автоматической установкой нуля ОУ и определением полярности входного сигнала.

Основные технические параметры ИС:

- разрядность – 3,5 десятичных разряда,
- входное сопротивление – $50_{\text{МОМ}}$,
- входное напряжение - $\pm 1,999 U_{\text{оп}}(\text{В})$,
- быстродействие – (2-9) Гц,
- потребляемый ток – 1,8 мА
- напряжение питания – 9В

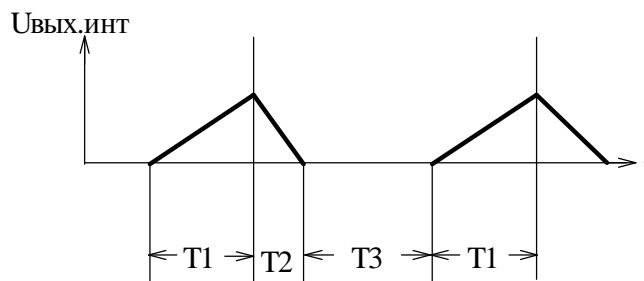
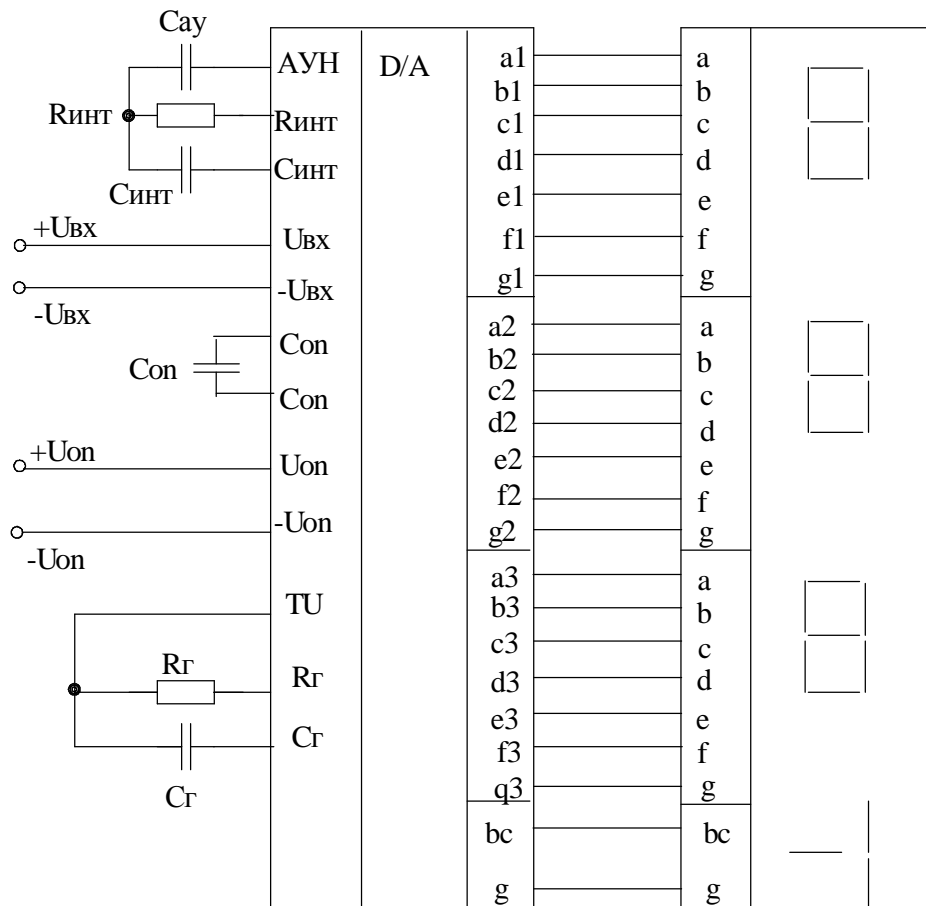


Рис 172. ИС К572ПВ2 (а) и выходное напряжение на выходе генератора (б).

Работа ИС происходит под воздействием тактовых импульсов $f_{ти}$ внутреннего генератора импульсов в три этапа. На первом этапе T_1 , длительностью 4000 периодов $f_{ти}$, происходит интегрирование напряжения U_x , на втором этапе, длительностью от 0 до 8000 периодов, $f_{ти}$ происходит интегрирование опорного напряжения $U_{оп}$ и на третьем этапе, длительностью от 4000 до 12000 периодов $f_{ти}$, происходит автоматическая установка нуля ОУ. Весь цикл преобразования занимает 16000 тактов.

Многоканальные АЦП широко используются для преобразования нескольких однотипных аналоговых величин. Такие АЦП включают в себя аналоговый коммутатор и один из рассмотренных выше АЦП.



Рис 173. Многоканальный АЦП.

Преобразование происходит последовательно параметр за параметром. Аналоговый коммутатор поочередно подключает на вход АЦП через усилитель все входные сигналы.

5.4 Таймеры

Таймером называется устройство, предназначенное для формирования импульсных сигналов с регулируемой длительностью и скважностью. Таймеры делятся на две группы: одноктактные и многотактные.

Одноктактные таймеры применяются для формирования импульсов длительностью от 1мксек до часа и более. Многотактные таймеры включают в себя одноктактный таймер и счетчик и предназначены для формирования временных интервалов длительностью в десятки часов.

Наиболее распространенным типом одноктактного таймера является ИС К1006ВИ1 (NE555)

Таймер состоит из четырех функциональных устройств: двух компараторов DA1 и DA2, RS-триггера DD1, усилителя мощности DA3. Внутренний резистивный делитель задает пороговые напряжения равные $2U_{п}/3$ для компаратора DA1 и $U_{п}/3$ для компаратора DA2. Напряжение питания $U_{п}=5...16,5$ в. потребляемый ток $I_{п}=0,7U_{п}$. Входные токи таймера не превышают 0,5мкА. Максимальная частота 10МГц. Таймер имеет второй высокоомный выход 2.

Таймеры широко используются во многих импульсных устройствах.

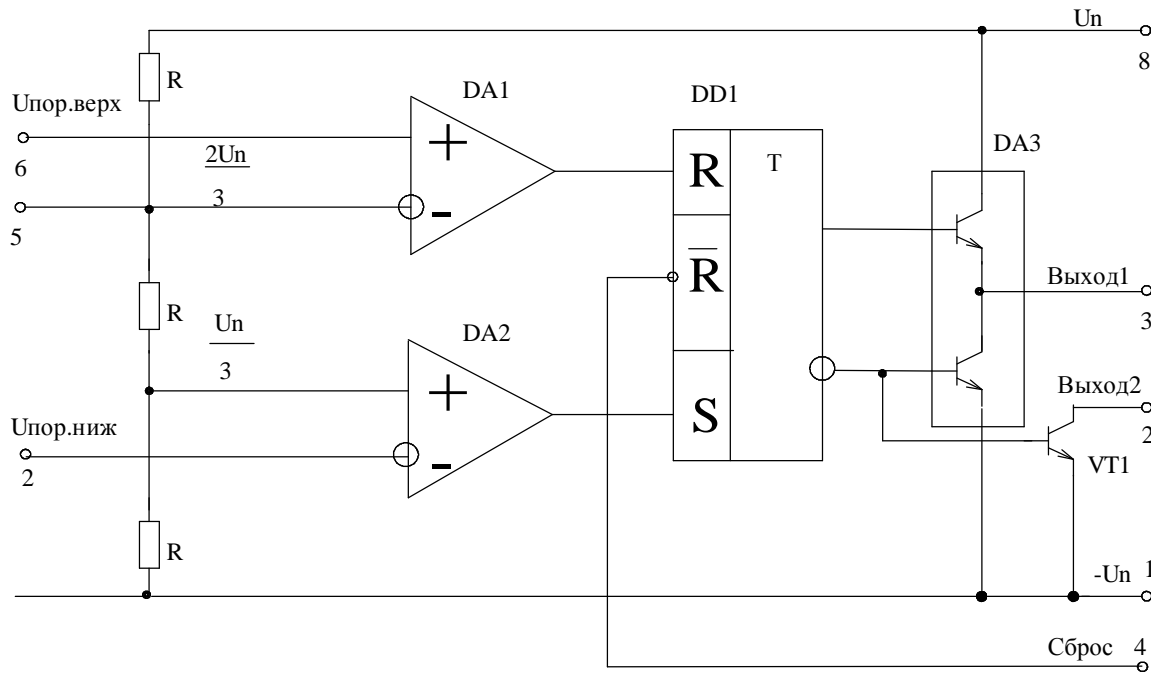


Рис 174. Структурная схема одноконтурного таймера К1006ВИ1.

На рис.175 приведена схема одновибратора, выполненная на таймере.

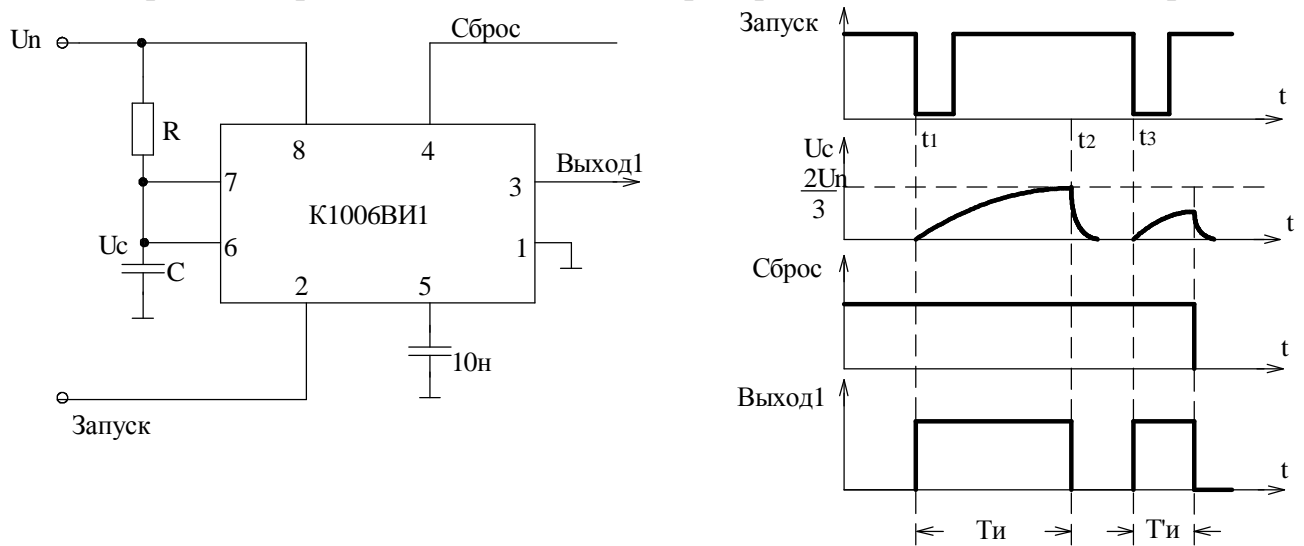


Рис 175. Схема одновибратора на ИС К1006ВИ1(а) и временная диаграмма работы (б).

Для работы таймера в режиме одновибратора на объединенные входы к.7 и 6 подключается цепочка RC. При поступлении на вход 2 запускающего импульса амплитудой меньше $U_{\text{н}}/3$ триггер DD1 переворачивается и на выходе 1 формируется прямоугольный импульс. Одновременно запирается транзистор VT1 и конденсатор C начинает заряжаться через резистор R. Напряжение $U_{\text{с}}$ на входах 6,7 возрастает по экспоненте и в момент времени t_2 достигает уровня $2U_{\text{н}}/3$. При этом срабатывает компаратор DA1, триггер DD1 возвращается в

первоначальное состояние, открывается транзистор VT1, конденсатор С разряжается и формируется задний фронт импульса на выходе 1. Длительность импульса $T_{и}$ зависит от постоянной времени RC. Длительность импульса $T_{и} \approx 1,1RC$.

Схема мультивибратора на базе таймера приведена на рис.176.

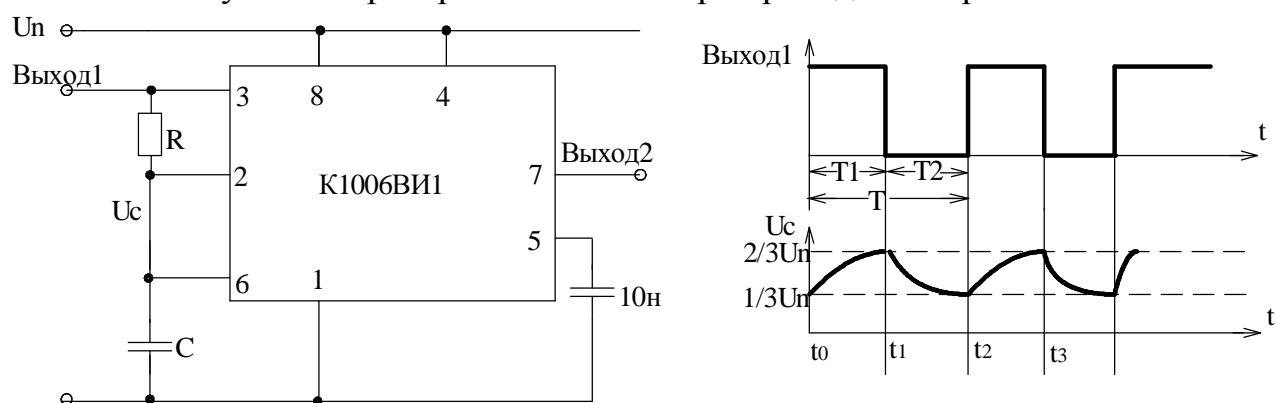


Рис 176. Схема мультивибратора (а) и временная диаграмма его работы (б).

Здесь входы к2 и к6 объединены и подключены на интегрирующую цепочку RC. Напряжение на емкости С U_C меняется по экспоненциальному закону между уровнями $U_{п}/3$ и $2U_{п}/3$. Период импульсов мультивибратора равен $T \approx 1,4RC$. Скважность равна 2.

Существует большое количество других схем, построенных на базе таймера K1006ВИ1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация ЗУ.
2. Назовите основные технические параметры ЗУ.
3. Условные обозначения ЗУ.
4. Что такое ОЗУ?
5. Что означает адресная выборка в ЗУ?
6. В чем отличие динамического ОЗУ от статистических?
7. Назначение ПЗУ.
8. На какие группы подразделяются полупроводниковые ПЗУ?
9. На каком принципе построены РПЗУ?
- 10.Какие функции выполняет ЦАП?
- 11.Основные технические параметры ЦАП.
- 12.Принцип работы ЦАП.
- 13.Что представляет собой резистивная матрица R-2R?
- 14.Условное обозначение ИС K572ПА1.
- 15.Где применяются ЦАП?

16. Назначение АЦП.
17. Принцип работы АЦП.
18. Назовите основные параметры АЦП.
19. Классификация АЦП.
20. Поясните принцип работы АЦП поразрядного взвешивания.
21. Поясните принцип работы интегрирующего АЦП.
22. Почему АЦП двойного интегрирования нашли широкое применение в измерительной аппаратуре?
23. Как строится многоканальный АЦП?
24. Какое устройство называется таймером?
25. Нарисуйте структурную схему таймера К1006ВИ1.
26. Нарисуйте схему мультивибратора на основе таймера К1006ВИ1.

Заключение

В настоящее время электроника развивается очень стремительно, т.к. она определяет прогресс во многих отраслях науки и техники. Особая роль отводится интегральной электронике. Каждый год разрабатываются все новые и новые микросхемы, улучшаются их характеристики и параметры. Уже созданы большие интегральные схемы с количеством полупроводниковых элементов более 4 миллионов на одном кристалле. Существуют АЦП с разрядностью 24. Разработаны сигнальные микропроцессоры и интегральные схемы, в которых объединены первичные преобразователи информации со схемами электронного обрамления.

Однако развитие интегральной электроники сталкивается с рядом принципиальных проблем, обусловленных предельными возможностями интегральной электроники - ее быстродействия. Важнейшей проблемой является проблема межсоединений элементов в интегральных схемах, ограничивающих их быстродействие за счет паразитных параметров.

Современные устройства схемотехнической электроники имеют время задержки $10^{-9} \dots 10^{-10}$ с/вентиль и максимальную скорость обработки информации $10^9 \dots 10^{10}$ оп/с. Такие характеристики достаточно эффективны для больших массивов информации в реальном масштабе времени, решения задач искусственного интеллекта и т.д.

Одним из возможных путей дальнейшего развития электроники может являться использование динамических неоднородностей в качестве носителя информации при обработке больших массивов. В устройствах функциональной электроники массив информационных сигналов может быть обработан целиком, а не в виде отдельных бит информации, как в схемотехнической электронике. При этом возможна обработка информации в аналоговом и цифровом виде одновременно. Это позволяет достигнуть производительности более 10^{15} оп/с.

Важным свойством функциональной электроники является использование в процессах обработки информации элементарных функций высшего порядка, например, Фурье-преобразование, операции свертки, корреляции и автокорреляции и т.д.

Таким образом, можно предполагать, что дальнейшее развитие электроники пойдет не только по пути микроминиатюризации классической схемотехнической электроники, но и по пути развития функциональной электроники, способной решить сложные вопросы обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Радио и связь, 1996. – 768 с. ,
2. Евреинов Э.В. и др. Цифровая и вычислительная техника. – М.: Радио и связь, 1991. – 420 с. ,
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. ,
4. Цифровые и аналоговые микросхемы. Справочник. / Под редакцией С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1989. – 496 с.
5. Титце У., Шейк К. Полупроводниковая схемотехника. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
6. Антонова О.А., Глудкина О.П. и др. Электроника и основы электроники. /Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Высшая шко ла, 1993. – 445 с.
7. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1992. – 300 с.
8. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989. – 399 с.
9. Аксененко А.Г., Шурагин И.И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1990. – 497 с.
10. Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
11. Угрюмов Е.П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ. – М.: Высшая школа, 1987. – 318 с.
12. Токхейм Р. Основы цифровой электроники./ Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
13. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. – М.: Радио и связь, 1989. – 528 с.
14. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядной связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

Содержание

Введение	3
1.История развития электроники и классификация электронных устройств	4
2.Элементная база электронных устройств	6
2.1. Электровакуумные приборы	6
2.2. Полупроводниковые диоды	12
2.3. Полупроводниковые транзисторы	18
2.4. Полупроводниковые резисторы	29
2.5. Фотоэлектрические приборы	31
2.6. Интегральные схемы	34
2.7. Индикаторные приборы	35
Контрольные вопросы	40
3. Аналоговые и импульсные электронные устройства	42
3.1. Расчет нелинейных электрических цепей	42
3.2. Аналоговые усилители. Классификация. Основные характеристики и параметры усилителей.	46
3.3. Обратная связь в усилителях	49
3.4. Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером	50
3.5. Усилительный каскад по схеме с общим коллектором	55
3.6. Дифференциальный усилитель	56
3.7. Многокаскадные усилители	58
3.8. Усилители постоянного тока	59
3.9. Избирательные усилители	60
3.10. Усилители мощности	61
3.11. Операционные усилители	64
3.12. Аналоговые компараторы	72
3.13. Генераторы гармонических колебаний на базе транзисторов и ОУ	74
3.14. Импульсные электронные устройства	75
3.15. Источники вторичного электропитания	80
Контрольные вопросы	91
4. Цифровые электронные устройства	93
4.1. Системы счисления	93
4.2. Классификация логических устройств	101
4.3. Комбинационные цифровые устройства	102
4.4. Типовые функциональные узлы последовательных цифровых устройств	107
4.5. Базовые логические элементы	118
Контрольные вопросы	129

5. Электронные устройства хранения и преобразования информации	131
5.1. Полупроводниковые запоминающие устройства	131
5.2. Цифро-аналоговые преобразователи	136
5.3. Аналого-цифровые преобразователи	140
5.4. Таймеры	149
Контрольные вопросы	151
Заключение	

Список литературы