

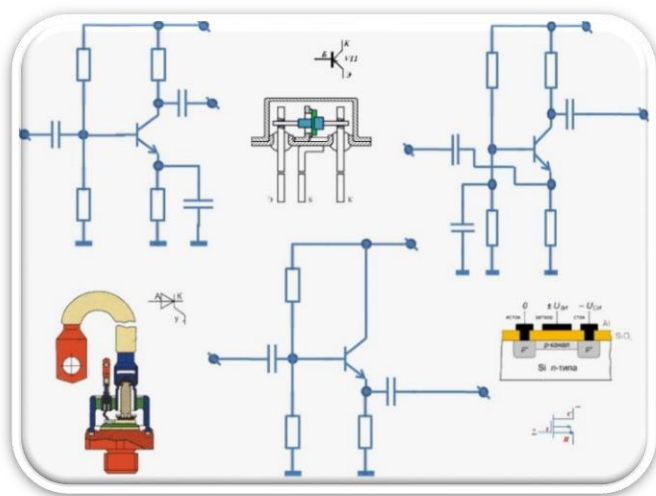
Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный  
университет  
Елабужский институт

Кафедра физики

А.В. Дерягин, М.Н. Самедов, В.Ю. Шурыгин

## ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ



Учебное пособие

Елабуга-2023

Печатается по решению Ученого совета Елабужского института КФУ  
(протокол № 1 от 27.01.2023)

УДК 537  
ББК 22.334  
Д 36

**Кафедра физики**

**Рецензенты:**

**Сабирова Ф.М.**, доцент кафедры физики Елабужского института КФУ, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**Матвеев С.Н.**, доцент кафедры математики, физики и методики преподавания ФГБОУ ВО НГПУ, кандидат физико-математических наук

Дерягин, А. В. Основы радиотехники / А.В. Дерягин, М.Н. Самедов, В.Ю. Шурыгин // Учебное пособие для бакалавров. – Елабуга: Центр оперативной печати «Абак», 2023. – 160 с.

Учебное пособие предназначено для организации аудиторной и самостоятельной работы студентов по дисциплине «Основы радиотехники» для обучающихся бакалавриата по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Автоматизация энергетических систем», 44.03.05 Профессиональное обучение (с двумя профилями подготовки), профиль «Математика и физика». Кроме этого, оно может оказаться полезным для освоения дисциплины «Радиотехника» для обучающихся по направлению подготовки 44.03.05, профиль «Технология и информатика» и др. направлений и нерадиотехнических профилей, в учебные планы которых включена данная дисциплина или аналогичные ей. Оно также адресовано учителям и педагогам дополнительного образования детей.

© Дерягин А.В., Самедов М.Н., Шурыгин В.Ю., 2023

## Оглавление

Введение.....	4
1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ .....	4
1.1. РЕЗИСТОРЫ .....	4
1.2. КОНДЕНСАТОРЫ .....	13
1.3. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ДРОССЕЛИ .....	18
1.4. ПОЛУПРОВОДНИКИ .....	22
1.5. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ .....	29
1.6. ДИОДЫ ШОТТКИ .....	30
1.7. СТАБИЛИТРОНЫ И СТАБИСТОРЫ .....	31
1.8. ВАРИКАПЫ.....	35
1.9. ТРАНЗИСТОР .....	38
1.10. ТИРИСТОРЫ .....	43
2. УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ .....	50
2.1. МЕЖКАСКАДНАЯ СВЯЗЬ .....	66
2.2. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ .....	72
2.3. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ.....	78
3. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ .....	82
3.1. LC ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ.....	83
3.2. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ.....	85
3.3. RC – ГЕНЕРАТОР .....	86
3.4. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	87
3.5. БАЛАНСНЫЕ КАСКАДЫ УПТ.....	90
3.6. УСИЛИТЕЛЬ ПТ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ .....	92
3.7. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ.....	95
3.8. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ .....	102
3.9. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.....	109
4. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ.....	118
4.1. МОДУЛЯЦИЯ.....	119
4.2. ДЕМОДУЛЯЦИЯ.....	123
4.3. ПРИЕМНИК ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ .....	124
4.4. Супергетеродинный приемник .....	126
4.5. ПРИНЦИП ТЕЛЕВИДЕНИЯ .....	134
4.6. ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ.....	142
5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ .....	147
5.1. ВЫПРЯМИТЕЛИ .....	149
5.2. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ .....	152
5.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ .....	154
5.4. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	155
5.5. ИМПУЛЬСНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ .....	157
5.6. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ .....	159
Литература .....	160

## Введение

---

Курс лекций предназначен для ознакомления студентов – бакалавров с некоторыми аспектами современной радиоэлектроники: теорией сигналов, электронными усилителями, генерированием электрических колебаний и частотной фильтрацией сигналов.

Для понимания материала необходимы знания раздела «электричество» курса общей физики, а также основ теории электрических цепей в объеме курса «электротехника», включая «метод комплексных амплитуд» при анализе колебаний. Последовательность изложения материала образует логическую цепь, которая делает затруднительным изучение его в произвольном порядке. Глубина изучения, как правило, доводится до количественных оценок параметров процессов, позволяющих учащимся самостоятельно проектировать несложные устройства.

## 1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

---

### 1.1. РЕЗИСТОРЫ

Один из самых распространенных радиоэлементов – **резист** (англ. resistor от лат. resisto – сопротивляюсь) по этому его часто называют сопротивлением.

Резисторы используются в качестве нагрузочных и токоограничительных элементов, делителей напряжения, добавочных сопротивлений и шунтов в измерительных цепях и т.д.

Основным параметром резистора является его сопротивление, характеризующее его способность препятствовать протеканию электрического тока. Сопротивление измеряется в Ом-мах. Участок проводника обладает сопротивлением в 1 Ом, если при приложенном напряжении в 1 Вольт через него протекает ток в 1 Ампер.

Резисторы подразделяются на постоянные, регулируемые и саморегулируемые (нелинейные).

Постоянный резистор обозначают символом в виде прямоугольника.

Номинальную мощность рассеивания обозначают специальным знаком, помещенным внутри символа (Рис. 1.1).

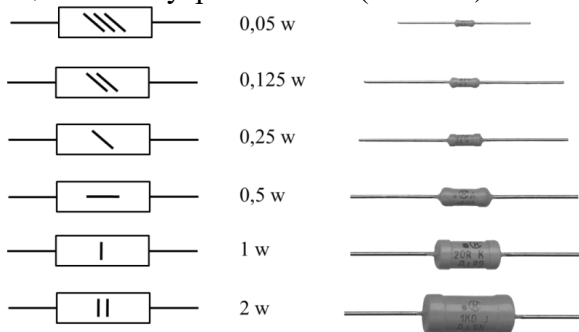


Рис. 1.1. Символы и обозначение резисторов

На принципиальной схеме номинальное сопротивление резистора и его порядковый номер указывают рядом с условным обозначением.

Если номинальное сопротивление указано целым числом, без размерности, то единица измерения Ом.

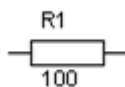
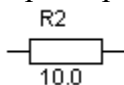


Рис.1.2.  $R1=100 \text{ Ом}$

Если номинальное сопротивление указано дробным числом с нулевой дробной частью, без размерности, то единица измерения



мОм.

Рис. 1.3.  $R2=10 \cdot 10^6 \text{ Ом}$

На резисторах отечественного производства номинальное сопротивление, допустимое отклонение от него, а если позволяют размеры то, и номинальную мощность рассеивания указывают в

виде полного или сокращенного (кодированного) обозначения. В кодированной системе:

буквой E, R, $\Omega$ , _	обозначают Ом
к, кОм, к $\Omega$ , кило Ом	$10^3 \Omega$
м, мОм, м $\Omega$ , мега Ом	$10^6 \Omega$
г, гОм, г $\Omega$ , гига Ом	$10^9 \Omega$

Если номинальное сопротивление выражено дробным числом, то буква указывающая порядок ставится вместо запятой.

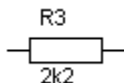


Рис. 1.4.  $R_3=2k2=2,2 \text{ к}\Omega=2200 \Omega$

### **M10=0,1 м $\Omega$ =100 к $\Omega$**

Кодированные буквенные обозначения установлены и для допустимых отклонений сопротивления от номинального.

Допустимому отклонению  $\pm 1\%$  соответствует буква Р

$\pm 2\%$	Л
$\pm 5\%$	И
$\pm 10\%$	С
$\pm 20\%$	В

Резистор технологически представляет собой керамический полый или сплошной цилиндр, покрытый токопроводящим веществом (2). Для увеличения сопротивления покрытие прорезается спиральной канавкой (рис. 1.5).

Электрический контакт обеспечивается обжимными чашками (1), выполненными из меди или латуни. Припайка к схеме осуществляется с помощью гибких медных выводов (4), которые обычно луженные или посеребренные. Диаметры D и d выбираются исходя из мощности, рассеиваемой резистором  $P=I^2R$ .

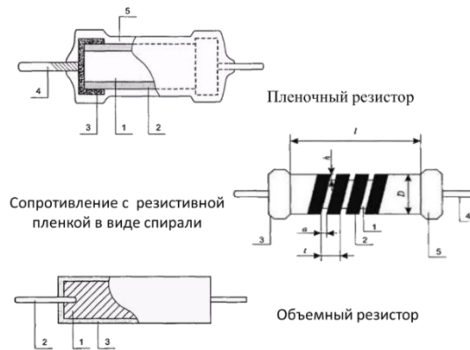


Рис. 1.5. Конструкция постоянных резисторов

Постоянные резисторы делятся на 5 основных типов:

**УЛМ** – углеродистые лакированные малогабаритные ( $-60^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$ ) в качестве токопроводящего вещества используют углеродистые соединения. Сверху резисторы покрывают эмалью зеленого цвета.

**ВС** – влагостойкие сопротивления ( $-60^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$ ). В отличие от УЛМ – гибкие выводы расположены в плоскости торца чашки.

**МЛТ** – металлизированные лакированные термостойкие ( $-60^{\circ}\text{C} \dots +120^{\circ}\text{C}$ )

Внешне они похожий на УЛМ, углеродистое напыление заменено напылением металла с большим удельным сопротивлением. Сверху резисторы покрывают эмалью красного цвета.

**ПЭ** – металлизированные эмалированные

**ПЭВ** – проволочные эмалированные влагостойкие

Резистор ПЭВ мощные, для облегчения конструкции за основу берут керамический полый цилиндр, поверх которого наматывают провод с большим удельным сопротивлением. Концы обмотки зажимают хомутами, которые являются контактными площадками.

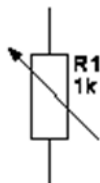
У резисторов ПЭ керамика пористая, легкая, с торца матовая, грязно белого цвета.

У резисторов ПЭВ керамика плотная, тяжелая, с торца глянцевая, белого цвета.

Первые три типа устроены следующим образом: на керамический стержень напыляется слой токопроводящего вещества, с обеих сторон одеваются контактные колпачки или хомутики и покрывают лаком.

Последние два типа отличаются от предыдущих тем, что вместо напыления наматывают провод из материала с большим удельным сопротивлением.

**Регулируемые резисторы**, т. е. резисторы, сопротивление которых можно изменять в определенных пределах (рис. 1.6). Применяют в качестве регуляторов усиления, громкости, тембра и т. д. Общее обозначение такого резистора состоит из базового символа и знака регулирования, причем независимо от положения



символа на схеме стрелку, обозначающую регулирование, проводят в направлении снизу вверх под углом  $45^\circ$ .

Рис. 1.6. Общее обозначение регулируемого резистора

**Переменные резисторы** (рис. 1.7), как правило, имеют минимум три вывода: от концов токопроводящего элемента и от щеточного контакта, который может перемещаться по нему. С целью уменьшения размеров и упрощения конструкции токопроводящий элемент обычно выполняют в виде незамкнутого кольца, а щеточный контакт закрепляют на валике, ось которого проходит через его центр.

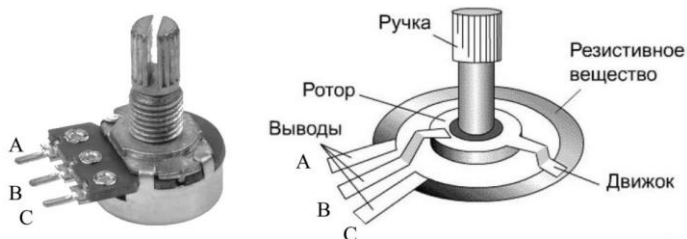


Рис. 1.7. Конструкция переменного резистора.



Таким образом, при вращении валика контакт перемещается по поверхности токопроводящего элемента, в результате сопротивление между ним и крайними выводами изменяется (рис. 1.8).

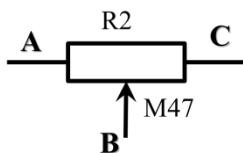


Рис. 1.8. Условные обозначения переменного резистора.

В непроволочных переменных резисторах обладающий сопротивлением токопроводящий слой нанесен на подковообразную пластинку из гетинакса или текстолита (резисторы СП, СПЗ-4) или впрессован в дугообразную канавку керамического основания (резисторы СПО).

Существуют две схемы включения переменных резисторов в электрическую цепь. В одном случае их используют для регулирования тока в цепи, и тогда регулируемый резистор называют реостатом, в другом — для регулирования напряжения, тогда его называют потенциометром.

Для регулирования тока в цепи переменный резистор можно включить двумя выводами: от щеточного контакта и одного из концов токопроводящего элемента. Однако такое включение не всегда допустимо. Если, например, в процессе регулирования, случайно, нарушится соединение щеточного контакта с токопроводящим элементом, электрическая цепь окажется разомкнутой, а это может явиться причиной повреждения прибора. Чтобы исключить такую возможность, второй вывод токопроводящего элемента соединяют с выводом щеточного контакта. В этом случае даже при нарушении соединения электрическая цепь не будет разомкнута.

К переменным резисторам, применяемым в радиоэлектронной аппаратуре, часто предъявляются требования по характеру изменения сопротивления при повороте их оси (рис. 1.9).

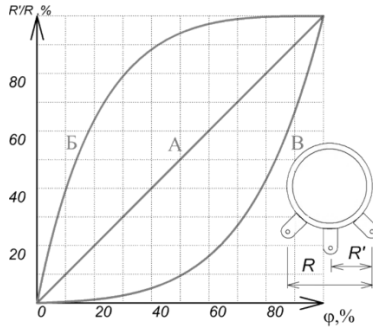


Рис. 1.9. Зависимость изменения сопротивления при повороте оси.

Так, для регулирования громкости в звуковоспроизводящей аппаратуре необходимо, чтобы сопротивление между выводом щеточного контакта и правым (если смотреть со стороны этого контакта) выводом токопроводящего элемента изменялось по показательному (обратному логарифмическому) закону. Только в этом случае наше ухо воспринимает равномерное увеличение громкости при малых и больших уровнях сигнала. В измерительных генераторах сигналов звуковой частоты, где в качестве частотозадающих элементов часто используют переменные резисторы, также желательно, чтобы их сопротивление изменялось по логарифмическому или показательному закону. Если это условие не выполнить, шкала генератора получается неравномерной, что затрудняет точную установку частоты.

Промышленность выпускает непроволочные переменные резисторы, в основном, трех групп: **A** - с линейной, **B** - с логарифмической и **B** - с обратно-логарифмической зависимостью сопротивления между правым и средним выводами от угла поворота оси  $\phi$ . Резисторы группы **A** используют в радиотехнике наиболее широко, поэтому характеристику изменения их сопротивления на схемах обычно не указывают.

Для регулирования громкости, тембра, уровня записи в стереофонической аппаратуре, частоты в измерительных генераторах сигналов и т. д. применяют вдвоенные переменные резисторы, сопротивления которых изменяются одновременно при повороте общей оси (или перемещении движка). На схемах символы входящих в них резисторов стараются расположить,

возможно ближе друг к другу, а механическую связь показывают либо двумя сплошными линиями, либо одной штриховой (рис. 1.10).

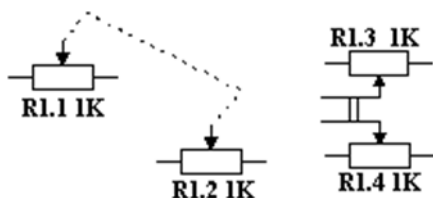


Рис. 1.10. Условное обозначение сдвоенного переменного резистора.

Если же сделать этого не удастся, т. е. символы резисторов оказываются на большом удалении один от другого, механическую связь изображают отрезками штриховой линии. Принадлежность резисторов к одному сдвоенному блоку показывают в этом случае и в позиционном обозначении.

**Подстроечные резисторы** — разновидность переменных. Узел щеточного контакта таких резисторов приспособлен для управления отверткой (рис. 1.11).

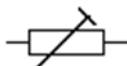


Рис. 1.11. Общий вид

Условное обозначение подстроечного резистора наглядно отражает его назначение: это, по сути, постоянный резистор с отводом, положение которого можно изменять (рис. 1.12).

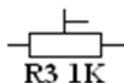


Рис. 1.12. Подстроечный резистор с номинальным сопротивлением 1кОм.

**Нелинейные резисторы** - в радиотехнике, электронике и автоматике находят применение нелинейные саморегулирующиеся резисторы, изменяющие свое сопротивление под действием

внешних электрических или неэлектрических факторов: к ним относятся угольные столбы, тензорезисторы (рис. 1.13), варисторы, терморезисторы и т.д. Угольный столб, представляющий собой пакет угольных шайб, изменяет свое сопротивление под действием механического усилия. Условное обозначение угольного столба состоит из базового символа резистора и знака нелинейного саморегулирования с буквой Р, которая символизирует механическое усилие — давление.



Рис. 1.13. Условное обозначение тензорезистора.

**Терморезисторы**, как говорит самоназвание, характеризуются тем, что их сопротивление изменяется под действием температуры. Токопроводящие элементы этих резисторов изготавливают из полупроводниковых материалов. Зависимость сопротивления терморезисторов от температуры имеет нелинейный характер, поэтому на схемах их изображают в виде нелинейного резистора со знаком температуры  $-t^{\circ}$  (рис. 1.14). Знак температурного коэффициента сопротивления (положительный, если с увеличением температуры сопротивление терморезистора возрастает, и отрицательный, если оно уменьшается) указывают только в том случае, если он отрицательный.

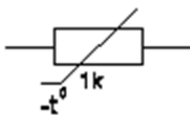


Рис. 1.14. Условное обозначение терморезистора.

Нелинейные полупроводниковые резисторы, известные под названием **варисторов (VARI (ABLE))** - переменный, изменяют свое сопротивление при изменении приложенного к ним напряжения (рис. 1.15). Существуют варисторы, у которых увеличение напряжения всего в 2—3 раза сопровождается уменьшением сопротивления в несколько десятков раз. На схемах их обозначают в виде нелинейного

саморегулирующегося резистора с латинской буквой U (напряжение) у излома знака саморегулирования.

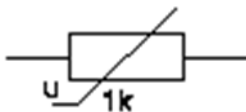


Рис. 1.15. Условное обозначение варистора.

В системах автоматики широко используют **фоторезисторы** — полупроводниковые резисторы, изменяющие свое сопротивление под действием света (рис. 1.16). Условное графическое обозначение такого резистора состоит из базового символа и знака фотоэлектрического эффекта—двух наклонных параллельных стрелок.



Рис. 1.16. Условное обозначение фоторезистора.

## 1.2. КОНДЕНСАТОРЫ

**Конденсаторы** (от лат. *condenso* - уплотняю, сгущаю) - это радиоэлементы с сосредоточенной электрической емкостью, образуемой двумя или большим числом электродов (обкладок), разделенных диэлектриком (специальной тонкой бумагой, слюдой, керамикой и т. д.). Емкость конденсатора зависит от размеров (площади) обкладок, расстояния между ними и свойств диэлектрика.

$$C = \frac{\epsilon_a \cdot S}{d}$$

$$S_a = S \cdot S_0$$

$\epsilon_a$  — **абсолютная диэлектрическая проницаемости** (величина, показывающая зависимость электрической индукции от напряжённости электрического поля)

$\epsilon$  — **относительная диэлектрическая проницаемости** — безразмерная величина, характеризующая свойства изолирующей

(диэлектрической) среды. Она показывает, во сколько раз взаимодействие между зарядами в однородной среде меньше, чем в вакууме.

$$\epsilon_0 - \text{диэлектрическая постоянная} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/М}$$

Важным свойством конденсатора является то, что для переменного тока он представляет собой сопротивление, величина которого уменьшается с ростом частоты.

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Как и резисторы, конденсаторы разделяют на конденсаторы постоянной емкости, конденсаторы переменной емкости (КПЕ), подстроечные и саморегулирующиеся. Наиболее распространены конденсаторы **постоянной емкости**. Их применяют в колебательных контурах, различных фильтрах, а также для разделения цепей постоянного и переменного токов и в качестве блокировочных элементов.

Основная единица измерения емкости – **фарад** – емкость такого уединенного проводника, потенциал которого возрастает на один вольт при увеличении заряда на один кулон. Это очень большая величина, которая на практике не применяется. В радиотехнике используют конденсаторы емкостью от долей пикофарада (пф) до-десятков тысяч микрофарад (мкФ).

«Микроф» -  $10^{-6}\text{Ф}$ ; «Наноф» -  $10^{-9}\text{Ф}$ ; «Пикоф» -  $10^{-12}\text{Ф}$

В сокращенной маркировке единицы измерения емкости обозначают буквами **П**; **М**; **Н**.

Конденсаторы постоянной емкости (рис. 1.17). Условное графическое обозначение конденсатора постоянной емкости две параллельные линии символизирует его основные части: две обкладки и диэлектрик между ними. Около обозначения конденсатора на схеме обычно указывают его номинальную емкость, а иногда и номинальное напряжение.

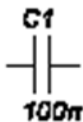


Рис. 1.17. Конденсаторы постоянной емкости.

В зависимости от размеров конденсатора номинальную емкость и допускаемое отклонение указывают в полной или сокращенной (кодированной) форме. В сокращенной маркировке единицы измерения емкости обозначают буквами:

μ или М	$10^{-6}\text{F}$
n или Н	$10^{-9}\text{F}$
p или П	$10^{-12}\text{F}$

При этом букву ставят после числа (если оно целое), либо на месте запятой (**4,7 пФ — 4П7; 22 пФ — 22П** и т.д.). Для указания допускаемого отклонения емкости от номинального значения используют те же кодированные обозначения, что и для резисторов.

В зависимости от того, в какой цепи используют конденсаторы, к ним предъявляют и разные требования. Так, конденсатор, работающий в колебательном контуре, должен иметь малые потери на рабочей частоте, высокую стабильность емкости во времени и при изменении температуры, влажности, давления и т. д.

Для работы в диапазоне звуковых частот, а также для фильтрации выпрямленных напряжений питания необходимы конденсаторы, емкость которых измеряется десятками, сотнями и даже тысячами микрофард. Такую емкость при достаточно малых размерах имеют *оксидные* конденсаторы. В них роль одной обкладки (анода) играет алюминиевый или танталовый электрод, роль диэлектрика – тонкий оксидный слой, нанесенный на него, а роль другой обкладки (катода) – специальный электролит, выводом которого часто служит металлический корпус конденсатора. В отличие от других, оксидные конденсаторы, полярны. Это значит, что включать их можно только в цепи постоянного или импульсного напряжения и только в той полярности, которая указана на корпусе. Невыполнение этого условия приводит к выходу конденсатора из строя, что иногда сопровождается взрывом.

Полярность включения оксидного конденсатора показывают на схемах знаком «+», изображаемого у той обкладки, которая символизирует анод.

**Оксидные конденсаторы** очень чувствительны к перенапряжениям, поэтому на схемах часто указывают не только их номинальную емкость, но и номинальное напряжение.

**Конденсатор переменной емкости** (рис. 1.18) состоит из двух групп металлических пластин, одна из которых может плавно перемещаться по отношению к другой. При этом движении пластины подвижной части (ротора) обычно вводятся в зазоры между пластинами неподвижной части (статора), в результате чего площадь перекрытия одних пластин другими, а следовательно, и емкость изменяются. Диэлектриком в КПЕ чаще всего служит воздух. В малогабаритной аппаратуре, например в транзисторных карманных приемниках, широкое применение нашли КПЕ с твердым диэлектриком, в качестве которого используют пленки из износостойких высокочастотных диэлектриков (фторопласта, полиэтилена и т. п.).

Условное обозначение КПЕ — это символ конденсатора постоянной емкости, перечеркнутый знаком регулирования. Однако из этого обозначения не видно, какая из обкладок символизирует ротор, а какая — статор. Чтобы показать это на схеме, ротор изображают в виде дуги.

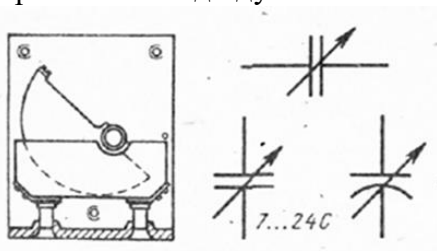


Рис. 1.18. Конденсаторы переменной емкости.

Основными параметрами КПЕ, позволяющими оценить его возможности при работе в колебательном контуре, являются минимальная и максимальная емкость, которые, как правило, указывают на схеме рядом с символом КПЕ.

**Подстроечные конденсаторы.** Для установки начальной емкости колебательного контура, определяющей максимальную частоту его настройки, применяют подстроечные конденсаторы, емкость которых можно изменять от единиц пикофарэд до



нескольких десятков пикофард (иногда и более). Основное требование к ним - плавность изменения емкости и надежность фиксации ротора в установленном при настройке положении.

Конструкция керамического подстроечного конденсатора (КПК) одного из наиболее распространенных типов. Он состоит из керамического основания (статора) и подвижно закрепленного на нем керамического диска (ротора). Обкладки конденсатора— тонкие слои серебра - нанесены методом вжигания на статор и наружную сторону ротора. Емкость изменяют вращением ротора.

Подстроечные конденсаторы обозначают на схемах основным символом, перечеркнутым знаком подстроечного регулирования (рис. 1.19).

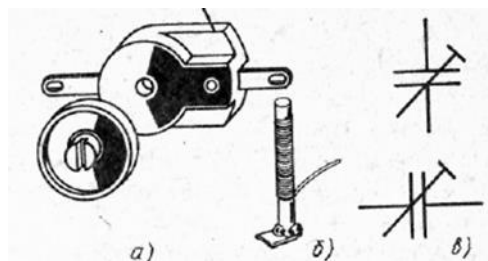


Рис. 1.19. Подстроечный конденсатор.

**Саморегулируемые конденсаторы.** Используя в качестве диэлектрика специальную керамику, диэлектрическая проницаемость которой сильно зависит от напряженности электрического поля, можно получить конденсатор, емкость которого зависит от напряжения на его обкладках. Такие конденсаторы получили название **варикондов** (от английских слов vari(able) — переменный и cond(enser)-конденсатор). При изменении напряжения, емкость вариконда изменяется. Вариконды можно использовать в различных устройствах автоматики, в генераторах качающейся частоты, модуляторах, для электрической настройки колебательных контуров и т.д. Условное обозначение вариконда (рис.1.20, а) — символ конденсатора со знаком нелинейного саморегулирования и латинской буквой U.

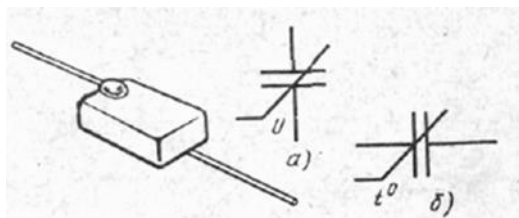


Рис. 1.20. Саморегулируемые конденсаторы.

Аналогично построено обозначение **термоконденсаторов** применяемых в электронных наручных часах. Фактор, изменяющий емкость такого конденсатора— температуру среды — обозначают символом  $t^\circ$  (рис. 1.20, б).

Конденсаторы могут быть различных типов. К примеру: **КТ** – конденсатор трубчатый устроен следующим образом

**КД** – дисковый

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot c} \approx \frac{1}{6.28 \cdot f \cdot c}$$

**МБМ** – металлобумажные малогабаритные



Рис. 1.21. Внешний вид конденсаторов.

### 1.3. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ДРОССЕЛИ

К числу элементов, без которых невозможно построить радиоприемник, телевизор, магнитофон и многие другие радиоприборы, относятся катушки и дроссели. Их важной характеристикой является **индуктивность** (рис. 1.22). В цепях переменного тока катушки и дроссели ведут себя как резисторы, сопротивление которых растет с увеличением частоты. Единица измерения индуктивности – **генри (Гн)**, **милигенри** ( $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$ ), **микрогенри** ( $1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$ ) и **наногенри** ( $1 \text{ нГн} = 10^{-9} \text{ Гн}$ ).

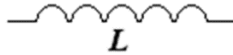


Рис. 1.22. Условное обозначение катушки индуктивности.

Важным параметром, характеризующим качество катушки, является **добротность**, численно равная отношению ее индуктивного сопротивления к переменному току данной частоты к сопротивлению постоянного тока. Чтобы увеличить добротность в катушку вводят **магнитопровод (сердечник)** из специального магнитного материала. В результате индуктивность катушки возрастает в несколько раз, что позволяет уменьшить число витков, а значит и сопротивление катушки постоянному току. Кроме того, используя магнитопровод, удастся значительно уменьшить размеры катушки и очень простым способом (перемещая магнитопровод) осуществлять регулировку их индуктивности.

Если при изменении тока на 1А на концах проводника возникает ЭДС самоиндукции в 1В, то такой проводник имеет индуктивность в 1 Гн.

**Катушка индуктивности и дроссель**, как и конденсатор, используются в цепях переменного тока. Это соленоид с сердечником или без него, который является либо элементом колебательного контура, либо применяется для создания индуктивного сопротивления переменному току. В первом случае его называют катушкой индуктивности, во втором – дросселем.

При прохождении переменного тока в катушке индуктивности возникает ЭДС самоиндукции:  $\varepsilon = -N d\Phi/dt$ , где  $\Phi$  – магнитный поток, проходящий через витки. Катушку характеризуют параметром **L** (индуктивность катушки), который определяется как коэффициент пропорциональности в формуле  $\varepsilon = -L di/dt$ . Индуктивность **L** измеряется в генри (1 Гн = 1 В·с/А).

Коэффициент **L** называется *индуктивностью цепи* и зависит только от конфигурации цепи и материала проводника, находящегося в переменном магнитном поле. Индуктивность цилиндрической катушки из *N* витков, площадью поперечного

сечения  $S$  и длиной  $l$ , в среде с магнитной проницаемостью  $\mu$  равна (в единицах СИ):

Индуктивность  $L$  измеряется в генри ( $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{А}$ ).

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

Для коротких катушек (рис. 1.23) точной формулы не существует. Индуктивность рассчитывается в таких случаях по приближенным выражениям:

$$L \approx \mu_0 \mu^* D^2 / (D/3 + L + t)$$

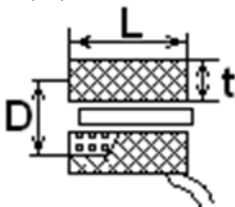


Рис. 1.23. Конструкция катушки индуктивности.

Здесь  $D$  – средний диаметр катушки. Величина  $\mu^*$  меньше обычной магнитной проницаемости материала сердечника и зависит от формы катушки, а также от положения сердечника (вставлен или выдвинут сердечник из катушки). Последнее обстоятельство используют при изготовлении катушек переменной индуктивности.

$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$  - абсолютная магнитная проницаемость,

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В} \cdot \text{С}}{\text{А} \cdot \text{М}}$  - магнитная постоянная,

$\mu$  – относит. магнит. проницаемость вещества,

На частотах порядка 1 кГц в качестве материалов для сердечников используют **ферриты**, а при радиочастотах – **магнитодиэлектрики**.

Для катушек индуктивности, применяемых в колебательных контурах, важным параметром является **добротность Q** – отношение индуктивного сопротивления к активному сопротивлению:

$$Q = \omega L/R.$$

Чтобы увеличить добротность, пользуются разными конструктивными приемами, но наибольший эффект дает введение в катушку магнитопровода (сердечника) из специального магнитного материала.

При внесении магнитопровода в катушку силовые линии магнитного поля концентрируются в магнитопроводе, так как его сопротивление магнитному потоку значительно меньше, чем воздуха. В результате магнитный поток, а, следовательно, и индуктивность катушки увеличиваются в несколько раз, что, позволяет уменьшить число витков, а значит, и сопротивление катушки постоянному току.

Для дросселей, кроме их индуктивного сопротивления  $\omega L$ , важно еще предельное значение силы тока, на которую они рассчитаны. От этого параметра зависят размеры и масса дросселя.

В цепях переменного тока катушки и дроссели ведут себя как резисторы, сопротивление которых растет с увеличением частоты.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Магнитопроводы для катушек, предназначенных для работы на радиочастотах, изготавливают из специальных материалов: ферритов (Рис. 1.25) и магнитодиэлектриков (Рис.1.24).

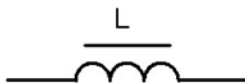


Рис. 1.24. Катушки с сердечником из магнитодиэлектриков.

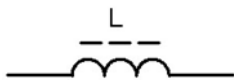


Рис. 1.25. Катушки с сердечником из ферритов.

В магнитодиэлектриках мельчайшие частички вещества, содержащего в своем составе железо, равномерно распределены в массе какого-либо диэлектрика (бакелита, стирола, аминопласта). Наиболее широко применяют магнитопроводы из альсифера (сплав алюминия, кремния и железа) и карбонильного железа.

Ферриты представляют собой твердые растворы окислов металлов или их солей, прошедшие специальную термическую обработку (обжиг). Получающееся при этом вещество — полупроводниковая керамика — обладает очень хорошими магнитными свойствами и малыми потерями даже на очень высоких частотах.

Если на одном сердечнике находится 2 и более катушек индуктивности, то такое устройство называется *трансформатором*.

**Трансформатор** — это устройство, преобразующее переменные напряжения и токи. Простейший трансформатор содержит две индуктивно связанные (т. е. расположенные достаточно близко одна к другой) катушки обмотки (рис. 1.26).

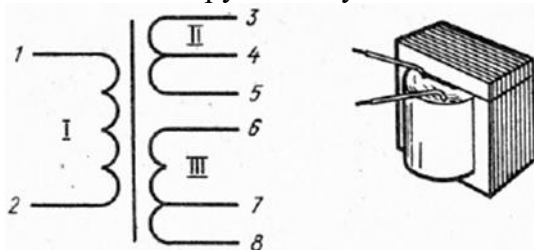


Рис. 1.26. Условное обозначение и внешний вид трансформатора.

Коэффициент трансформации:

$$U_1/U_2 = N_1/N_2 = K$$

$$P_1 = P_2$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

## 1.4. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники занимают промежуточное место по электропроводности между проводниками и непроводниками электрического тока. К группе полупроводников относится гораздо больше веществ, чем к группам проводников и непроводников, взятых вместе. Наиболее характерными представителями

полупроводников, нашедших практическое применение в технике, являются германий (**Ge**), кремний (**Si**), селен (**Se**), закись меди (**PbS**) и многие другие вещества.

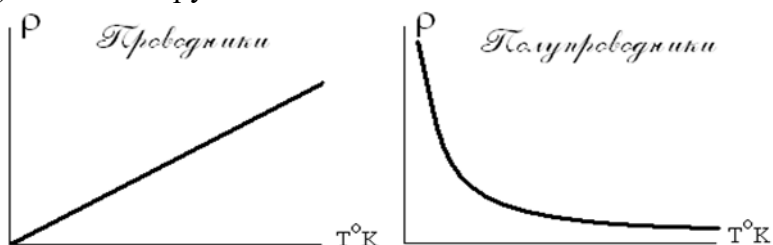


Рис. 1.27. Температурная зависимость сопротивления проводников и полу проводников.

При температуре близкой к абсолютному нулю (  $-273^{\circ}\text{C}$ ), полупроводники ведут себя подобно изоляторам. Большая же часть проводников при таких температурах становится сверхпроводниками, т.е.  $R=0$

С повышением температуры полупроводников их сопротивление току уменьшается, а у проводников увеличивается (рис. 1.27).

Электропроводность полупроводников под действием света (так называемая фотопроводимость) улучшается, а у проводников не изменяется.

Полупроводники способны преобразовывать энергию света (солнечные батареи) непосредственно в энергию электрического тока.

Ток в проводниках обуславливается только упорядоченным движением свободных электронов. В полупроводниках, кроме свободных электронов, имеются «дырки» — пустые места в кристаллической решетке вещества, положительные заряды которых равны, отрицательным зарядам электронов. В чистом полупроводнике число дырок равно числу свободных электронов. Если к такому полупроводнику приложить постоянное электрическое напряжение, то в нем возникнет упорядоченное движение электронов в сторону положительного полюса и дырок — в сторону отрицательного полюса источника

напряжения. Общее число носителей тока при комнатной температуре относительно невелико, поэтому электропроводность такого полупроводника, называемая собственной, также будет небольшой.

При введении в полупроводник некоторых других химических элементов можно резко изменить соотношение электронов и дырок. Такой полупроводник называют **примесным**. Полупроводник, в котором электронов больше, чем дырок, называют полупроводником с **электронной проводимостью** или полупроводником **n**-типа (**n** — первая буква латинского слова «**negativus**», что означает отрицательный). Тот же примесный полупроводник, в котором дырок больше, чем электронов, называют полупроводником с **дырочной электропроводностью** или полупроводником **p**-типа (**p** — первая буква латинского слова «**positivus**» — положительный).

Процесс введения примесей в полупроводник называется легированием. Валентность вещества, определяет число электронов на внешней оболочке атома. Если полупроводниковый материал химически чист (т.е. состоит из атомов одного сорта), то его называют собственным (**беспримесным**).

Полупроводник, в который введена примесь (т.е. часть атомов одного сорта заменена на атомы другого сорта), называют **примесным** или легированным.

Так, при легировании четырехвалентного германия (Ge) или кремния (Si) пятивалентным — фосфор (P), сурьма (Sb), мышьяк (As) в месте нахождения атома примеси появляется лишний свободный электрон. При этом примесь называют **донорной** (рис. 1.28).

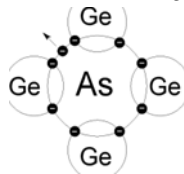


Рис. 1.28. Полупроводник с электронной проводимостью.

При легировании четырехвалентного германия (Ge) или кремния (Si) трехвалентным — алюминием (Al), индием (In), бором



(В), галлием (Ga) – возникает лишняя дырка. Такие примеси называют *акцепторными* (рис. 1.29).

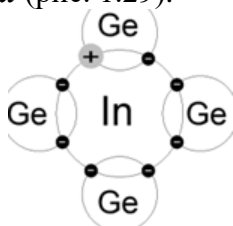


Рис. 1.29. Полупроводник с дырочной проводимостью.

В одном и том же образце полупроводникового материала один участок может обладать  $p$  - проводимостью, а другой  $n$  – проводимостью. Между такими областями возникает пограничный слой, через который диффундируют основные носители, стремясь уравнивать значения концентрации по обе стороны от слоя. В результате по обе стороны от границы возникает тонкий слой, в котором почти отсутствуют свободные носители заряда. Причем внешнее напряжение может изменять толщину этого слоя. Такой прибор называют **полупроводниковым диодом** (рис. 1.30).



Рис. 1.30. Условное обозначение полупроводникового диода.

Приставка «ди» в слове «диод» означает «два», она указывает, что в приборе имеются две основные «детали», два тесно примыкающих один к другому полупроводниковых кристалла: один с  *$p$ -проводимостью* (это зона  $p$ ), другой — с  *$n$  - проводимостью* (это зона  $n$ ) (рис. 1.31).

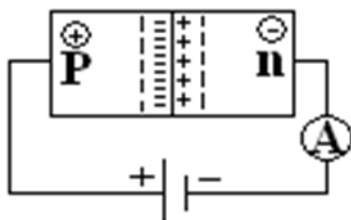


Рис. 1.31. Структурная схема диода.

Фактически же полупроводниковый диод — это один кристалл, в одну часть которого введена *донорная* примесь (зона *n*), в другую—акцепторная (зона *p*).

Полупроводниковый диод пропускает ток в основном только в одну сторону. Если от батареи подвести к диоду постоянное напряжение «плюсом» к зоне *p* и «минусом» к зоне *n*, то свободные заряды — электроны и дырки — хлынут к границе, устремятся к *p-n* -переходу. Здесь они будут нейтрализовать друг друга, к границе будут подходить новые заряды, и в цепи диода установится постоянный ток. Это так называемое прямое включение диода - заряды интенсивно движутся через него, в цепи протекает сравнительно большой прямой ток.

Теперь сменим полярность напряжения на диоде, осуществим, как принято говорить, его обратное включение - «плюс» батареи подключим к зоне *n*, «минус» — к зоне *p*. Свободные заряды оттянутся от границы, электроны отойдут к «плюсу», дырки — к «минусу» и в итоге *p-n* - переход превратится в зону без свободных зарядов, в чистый изолятор. А значит, произойдет разрыв цепи, ток в ней прекратится.

Небольшой обратный ток через диод все же будет идти. Потому что, кроме основных свободных зарядов (носителей заряда) — электронов в зоне *n* и дырок в зоне *p* — в каждой из зон есть еще и ничтожное количество зарядов обратного знака. Это собственные неосновные носители заряда, они существуют в любом полупроводнике, появляются в нем из-за тепловых движений атомов, именно они и создают обратный ток через диод. Зарядов этих сравнительно мало, и обратный ток во много раз меньше прямого. Величина обратного тока сильно зависит: от температуры окружающей среды, материала полупроводника и площади *p-n* перехода. С увеличением площади перехода возрастает его объём, а следовательно, возрастает число неосновных носителей, появляющихся в результате термогенерации и тепловой ток.

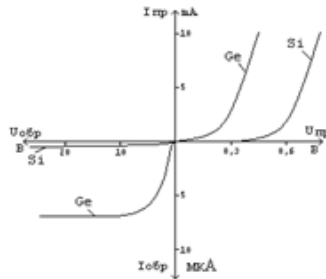


Рис. 1.32. Вольтамперная характеристика диода

**Важные параметры диода: допустимое обратное напряжение, допустимый прямой ток, прямое и обратное сопротивление** (рис. 1.32). Проходя через диод, прямой ток выделяет в нем некоторую тепловую энергию, нагревает прибор. А нагревание очень опасно для полупроводниковых материалов, оно увеличивает количество неосновных носителей заряда. Вот почему приходится ограничивать величину прямого тока и еще ограничивать рабочую температуру полупроводниковых приборов. Для германиевых диодов и транзисторов предельная рабочая температура  $+60^{\circ}\text{C}$ , а для кремниевых она значительно выше до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Прямое и обратное сопротивление, то есть сопротивление при разной полярности приложенного к диоду напряжения. Во всех случаях прямое сопротивление во много раз меньше обратного, и в этом отражена так называемая односторонняя проводимость диода.

Наиболее распространены два способа получения *p-n* перехода.

- а) Метод сплавления.
- б) Диффузионный метод.

В радиолюбительских конструкциях наиболее широко используют точечные и сплавные диоды.

Диоды используются в качестве детекторов, а также в маломощных выпрямителях для питания аппаратуры, потребляющей сравнительно небольшой ток.

Тонкая позолоченная проволока из вольфрама или фосфористой бронзы опирают на полупроводник *n* типа. Через контакт пропускают электрический ток. Место контакта разогревается, и электроны из полупроводника переходят в металл.

В результате при электродном участке полупроводника обедняется электронами и превращается в область **p** типа (рис. 1. 33).

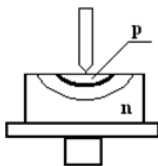


Рис. 1.33. Точечный диод

Наиболее распространена планарная конструкция **p-n** переходов, при которой p-n переход создается путём диффузии на одну из сторон пластины полупроводника.

1. Тонкая пластина подвергается термообработке, в результате чего появляется слой диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ - изолятор.

2. Используя методы фотолитографии, удаляют определённые участки в слое  $\text{SiO}_2$ , создавая окна и напыляя туда акцепторную примесь.

3. В результате диффузии атомов примеси в полупроводнике **n**-типа образуется **p**-область, а между ними **p-n** переход.

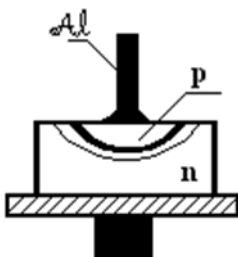


Рис. 1.34. Кремневый сплавной диод средней мощности

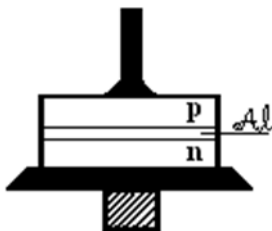


Рис. 1.35. Кремневый сплавной диод большой мощности

## 1.5. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

**Выпрямительные диоды** – предназначены для выпрямления низкочастотного переменного тока и обычно используются в источниках питания. Под выпрямлением понимают преобразование двухполярного тока в однополярный.

В качестве **выпрямительных** диодов в источниках питания для выпрямления больших токов используют плоскостные диоды, которые имеют большую площадь контакта  $p$  и  $n$  областей.

Основные параметры выпрямительных диодов даются применительно к их работе в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (без конденсатора, сглаживающего пульсации).

*Максимально допустимое обратное напряжение*  $U_{обр. max}$  ( $U_{обр. и max}$ ) - наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать.

*Максимально допустимый выпрямленный ток*  $I_{вп. ср max}$  — средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа.

*Максимальная частота*  $f_{max}$  — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.

*Средняя рассеиваемая мощность* диода  $P_{ср д}$  – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом при протекании тока в прямом и обратном направлении.

Превышение максимально допустимых величин ведет к резкому сокращению срока службы или пробоем диода.

Для увеличения выпрямленного тока можно применяться параллельное включение диодов.

**Однополупериодный выпрямитель** (рис. 1.36). Трансформатор служит для понижения амплитуды переменного напряжения. Диод служит для выпрямления переменного тока.

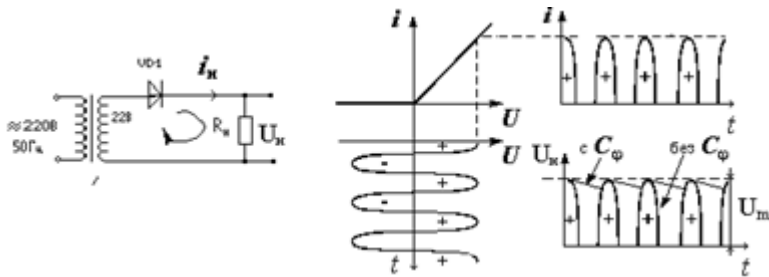


Рис. 1.36. Однополупериодный выпрямитель и временные диаграммы его работы.

**Двухполупериодный выпрямитель** (рис. 1.37). Предыдущая схема имеет существенный недостаток, в том, что у нее не используется часть энергии первичного источника питания (отрицательный полупериод). Недостаток устраняется в схеме двухполупериодного выпрямителя.

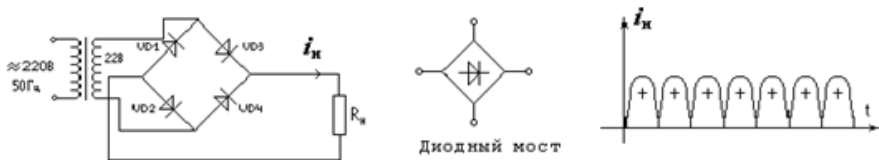


Рис. 1.37. Двухполупериодный выпрямитель и временные диаграммы его работы.

В первый положительный (+) полупериод, ток протекает так: +, VD3,  $R_H \downarrow$ , VD2, -.

Во второй – отрицательный (-) так: +, VD4,  $R_H \downarrow$ , VD1, -. В обоих случаях он через нагрузку протекает в одном направлении  $\downarrow$ -сверху вниз, т.е. происходит выпрямление тока.

## 1.6. ДИОДЫ ШОТКИ

Электрический переход, возникающий на границе металл – полупроводник, при определенных условиях обладает выпрямительными свойствами. Он создается путём напыления металла на высокоомный полупроводник, например, n-типа.

Прибор на основе такого перехода называется диодом Шоттки (рис. 1.38).

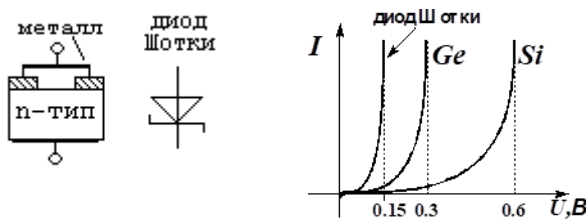


Рис. 1.38. Диоды Шоттки и ВАХ.

Главная особенность этого диода – это отсутствие неосновных носителей заряда в процессе его работы. Прямой ток обусловлен электронами, движущимися из кремния в металл. Следовательно, практически отсутствуют процессы их накопления и рассасывания, а потому диоды Шоттки имеют высокое быстродействие переключения.

Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,15 В. Это связано с тем, что тепловой ток примерно на три порядка превышает ток **p-n**-перехода.

В импульсных схемах диоды Шоттки широко используются в комбинации с транзисторами. Такие транзисторы называются транзисторами Шоттки – они имеют высокое быстродействие переключения.

## 1.7. СТАБИЛИТРОНЫ И СТАБИСТОРЫ

**Стабилитрон** – это полупроводниковый диод, изготовленный из слабо легированного кремния, который применяется для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона при обратном смещении имеет участок малой зависимости напряжения от тока, протекающего через него (рис. 1.39).

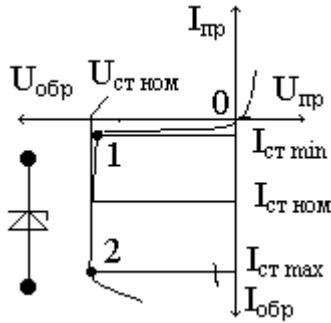


Рис. 1.39. Условное обозначение стабилитрона и его ВАХ.

Этот участок возникает за счёт электрического пробоя. На участке 1-2 напряжение на диоде остается практически постоянным при изменении тока через диод.

Стабилитрон характеризуется следующими параметрами:

**Номинальное напряжение стабилизации**  $U_{ст. ном}$  — номинальное напряжение на стабилитроне в рабочем режиме (при заданном токе стабилизации);

**номинальный ток стабилизации**  $I_{ст.ном}$  — ток через стабилитрон при номинальном напряжении стабилизации;

**минимальный ток стабилизации**  $I_{ст мин}$  — наименьшее значение тока стабилизации, при котором режим пробоя устойчив;

**максимально допустимый ток стабилизации**  $I_{ст мах}$  — наибольший ток стабилизации, при котором нагрев стабилитронов не выходит за допустимые пределы.

**Дифференциальное сопротивление**  $\Gamma_{ст}$  — отношение приращения напряжения стабилизации к вызывающему его приращению тока стабилизации:  $\Gamma_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$ .

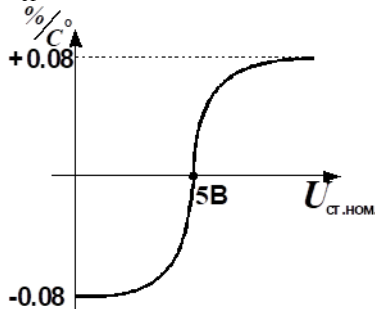




Рис. 1.40.  $TKH$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации:

$$TKH = \frac{\Delta U_{ст.ном.}}{U_{ст.ном.} \Delta T} 100\% ,$$

$\frac{\Delta U_{ст.ном.}}{U_{ст.ном.} \Delta T}$  – относительное изменение напряжения на

стабилитроне, приведённое к одному градусу.  $U_{ст.ном.} < 5В$  – при туннельном пробое (рис. 1.40).

$U_{ст.ном.} > 5В$  – при лавинном пробое.

К параметрам стабилитронов также относят **максимально допустимый прямой ток**  $I_{max}$ , **максимально допустимый импульсный ток**  $I_{пр.и\ max}$ , **максимально допустимую рассеиваемую мощность**  $P_{max}$ .

**Стабилитроны** предназначены для стабилизации напряжения на нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки, для фиксации уровня напряжения и т. д.

**Параметрический стабилизатор напряжения** (рис. 1.41). Он служит для обеспечения постоянства напряжения на нагрузке ( $U_H$ ) при изменении постоянного напряжения питания ( $U_{пит}$ ) или сопротивления нагрузки ( $R_H$ ).

Нагрузка (потребитель) включена параллельно стабилитрону. Ограничительное сопротивление ( $R_{огр}$ ) служит для установления и поддержания правильного режима стабилизации. Обычно  $R_{огр}$  рассчитывают для средней точки ВАХ стабилитрона. Схема обеспечивает стабилизацию напряжения за счёт перераспределения токов  $I_{VD}$  и  $I_H$ .

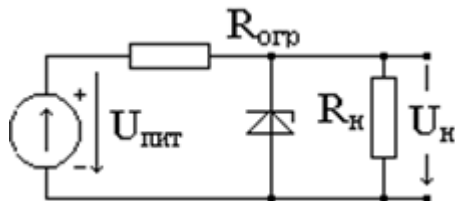


Рис. 1.41. Параметрический стабилизатор напряжения.

Расчёт схемы (обычно задано  $U_{пит}$  и  $R_H$ ):

1) Выбор стабилитрона  $VD_1$  из условий:  $U_{ст.ном.} \approx U_{вых.}$  и  $I_{ст.ном.} > I_{н.}$

2) Расчет  $R_{огр.} = \frac{U_{вх.} - U_{ст.ном.}}{I_{ст.ном.}}$

### Разновидности стабилитронов:

1. Прецизионные. Они имеют малое значение ТКН и нормированную величину  $U_{ст.ном.}$ . Малое ТКН достигается путем включения последовательно со стабилитроном ( $VD_2$ ), имеющим положительный ТКН диоды ( $VD_1$ ) в прямом направлении, ТКН которого отрицателен. Поскольку общий ТКН равен их сумме, то он оказывается малым по величине.

2. Двуханодный стабилитрон. Он состоит из двух стабилитронов, включенных встречно-последовательно, и применяется для стабилизации амплитуды переменных напряжений.

**Стабисторы** – это полупроводниковые диоды, в которых для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ (рис. 1.42).

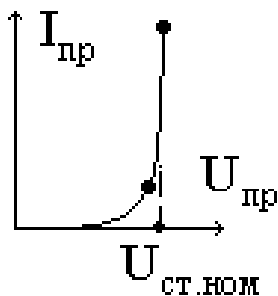


Рис. 1.42. ВАХ стабистора

В таких диодах база сильно легирована примесями ( $r_б \rightarrow 0$ ), а потому их прямая ветвь практически идет вертикально. Параметры стабистора аналогичны параметрам стабилитрона. Они применяются для стабилизации малых напряжений ( $U_{ст.ном.} \approx 0.6В$ ), ток стабисторов – от 1мА до нескольких десятков мА и отрицательный ТКН.

## 1.8. ВАРИКАПЫ

**Варикап** – (англ. Vari(able) – переменный, Cap(acitor) – конденсатор) это полупроводниковый диод, предназначенный для использования в качестве конденсатора, емкость которого зависит от величины обратного напряжения. При увеличении обратного напряжения емкость варикапа уменьшается (рис. 1.43).

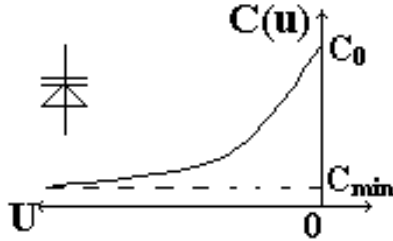


Рис. 1.43. Условное обозначение варикапа и график зависимости  $C(u)$ .

Варикап, предназначенный для умножения частоты сигнала, называют варактором.

Варикапы обычно используют для электронной перестройки резонансной частоты колебательных контуров.

### Туннельные и обращенные диоды

На границе сильно легированных (вырожденных) p-n структур с концентрацией примеси  $n \approx 10^{20}$  эл/см<sup>3</sup> имеет место туннельный эффект. Он проявляется в том, что при прямом смещении на ВАХ появляется спадающий участок с отрицательным сопротивлением.

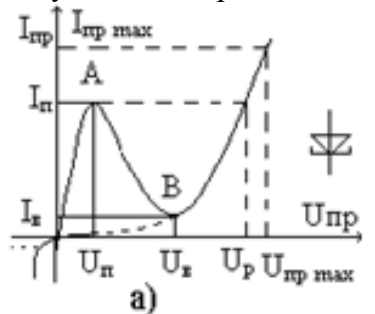


Рис. 1.44. ВАХ туннельного диода.

На этом участке (участок АВ) дифференциальное сопротивление становится отрицательным  $R_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I|_{\text{AB}} = \text{г.} < 0$ . Пунктиром на графике показана ВАХ диода (рис. 1.44).

Это позволяет использовать такой диод в усилителях и генераторах электрических колебаний в диапазоне СВЧ, а также в импульсных устройствах.

**Обращенные диоды** являются разновидностью туннельных диодов. В них концентрация примесей несколько меньше, чем в туннельных (рис. 1.45). За счет этого у них отсутствует участок с отрицательным сопротивлением.

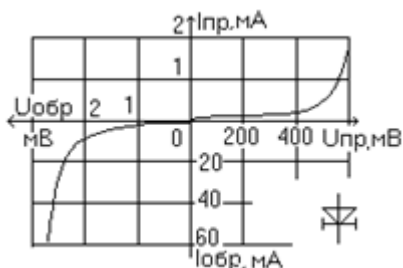


Рис. 1.45. ВАХ обращенного диода.

На прямой ветви до напряжений 0,3-0,4В имеется практически горизонтальный участок с малым прямым током, в то время как ток обратной ветви начиная с малых напряжений, за счет туннельного пробоя, резко возрастает. В этих диодах, для малых переменных сигналов, прямую ветвь можно считать не проводящей ток, а обратную – проводящей. Отсюда и название этих диодов.

Обращенные диоды используются для выпрямления СВЧ сигналов малых амплитуд (100-300) мВ.

### Диоды оптоэлектроники

**Оптоэлектроника** – раздел электроники, изучающий теорию и практическое применение устройств, в которых прием, передача и обработка информации происходит путем преобразования световых сигналов в электрические и наоборот. Элементами оптоэлектроники являются фотодиод и светодиод.

**Фотодиодом** называется фотоэлектрический прибор с одним *p-n*- переходом (Рис. 1.46). Фотодиод может включаться в схему как

с внешним источником питания (фотодиодный режим), так и без него.



Рис. 1.46. Фотодиод

**Светодиоды** – это излучающие полупроводниковые приборы (Рис. 1.47) с одним *p-n*- переходом, преобразующие электрическую энергию в некогерентное световое излучение. Излучение появляется в результате рекомбинации пар: электрон – дырка. Рекомбинация наблюдается, если *p-n*- переход включен в прямом направлении.



Рис. 1.47. Светодиод

Длина волны ( $\lambda$ ) излучаемого света однозначно определяется энергией кванта, которая при излучательной рекомбинации приблизительно равна ширине запрещенной зоны полупроводника. Для светодиодов, изготовленных из арсенида галлия,  $\lambda = 0,9-1,4$  мкм. Диоды красного, желтого и зеленого свечения изготавливают на основе фосфида галлия, с фиолетовым свечением – на основе карбида кремния и т.д.

Оптоэлектронная пара, или **оптонара**, содержит светоизлучатель и фотоприемник конструктивно связанные через оптическую среду. Прямая оптическая связь от излучателя к фотоприёмнику исключает все виды электрической связи между этими элементами.

### **Оптроны**

Под действием входного электрического сигнала светодиод генерирует световое излучение, а фотоприемник (фотодиод, фоторезистор и т.п.) генерирует ток под действием освещения (рис. 1.48).

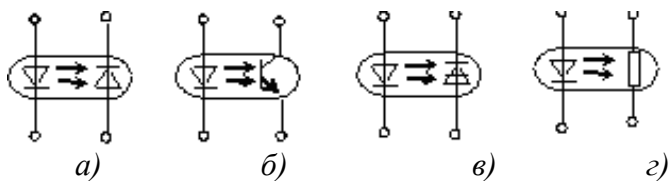


Рис. 1.48. Оптопары

На рис. 1.48. приведено схемное изображение оптопары, состоящей из светодиода и фотодиода (а), фототранзистора (б), фоторезистора (г). Оптопара используется как элемент электрической развязки в цифровых и импульсных устройствах, устройствах передачи аналоговых сигналов, системах автоматики для бесконтактного управления высоковольтными источниками питания и др.

## 1.9. ТРАНЗИСТОР

**Транзистор** — полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования, преобразования электрических колебаний представляет из себя прибор с двумя р-п-переходами и тремя зонами разной проводимости. В зависимости от чередования р и п – областей, различают два типа биполярных транзисторов: *р-п-р* и *п-р-п* – типа (рис. 1.49).

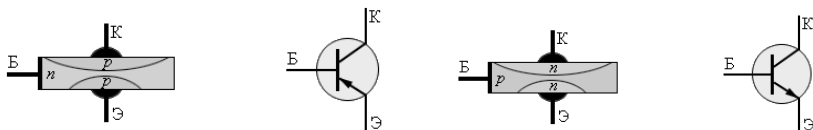


Рис. 1.49. Структуры и условные обозначения транзисторов.

Слово «транзистор» происходит от слов «трансфер» (в переводе с английского — «преобразователь») и «резистор».

Можно сказать, что транзистор представляет собой два полупроводниковых диода, с одной общей проводящей зоной. В зависимости от типа проводимости этой общей зоны, могут быть и два типа транзисторов, с двумя разными

последовательностями проводящих зон:  $p-n-p$  и  $n-p-n$ . Такие транзисторы с разной структурой, или, как их принято называть, транзисторы разной проводимости; не отличаются по принципу действия, по своим основным характеристикам и возможностям.

В зависимости от технологии изготовления биполярные транзисторы бывают: сплавные, эпитаксиально-диффузионные, планарные, мезатранзисторы и т. д.

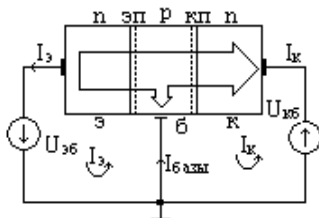


Рис. 1.50. Физическая модель биполярного транзистора и схема его включения

**Эмиттер** – область, выполненная из сильно легированного полупроводника. Она является инжектором носителей заряда в базу.

**База** – содержит малую концентрацию примесей ее толщина много меньше диффузионной длины  $w \ll L$  (толщина базы  $w = 1-10 \mu\text{м}$ ).

**Коллектор** – это область с высокой концентрацией примесей, он предназначен для поглощения носителей заряда, инжектируемых эмиттером.

Биполярный транзистор в активном (усилительном) режиме включают так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный в обратном. Поскольку база имеет малую концентрацию примесей по сравнению с соседними областями, то ЭП и КП располагаются в ее области.

Основные свойства транзистора определяются процессами, происходящими в базе. Принцип работы состоит в следующем.

При смещении ЭП в прямом направлении происходит ввод (инжекция) основных носителей заряда в базу, где они становятся неосновными – этот процесс называется - **инжекция**. В базе они первоначально группируются вблизи ЭП, а затем за счет диффузии или сил электрического поля происходит движение неосновных

носителей заряда от границы эмиттерного перехода, к границе запертого коллекторного перехода. Если распределение примесей в базе постоянно по её длине, то электрическое поле отсутствует и движение осуществляется за счёт диффузии, такие транзисторы называются – *диффузионными*. Если распределение примесей в базе неравномерно, то возникает электрическое поле, способствующее переносу неосновных носителей заряда от эмиттерного перехода, к коллекторному переходу, такие транзисторы называются *дрейфовыми*.

Достигнув границы запертого КП неосновные носители заряда попадают в сильное ускоряющее поле и переносятся им в область коллектора, где они снова становятся основными носителями – это *экстракция*. Для компенсации зарядов накапливающихся в области коллектора, от источника питания поступают заряды противоположного знака, они и создают управляемую составляющую тока коллектора  $\alpha I_K$  в коллекторной цепи транзистора.

Часть неосновных носителей заряда не достигает КП, рекомбинируют с основными носителями заряда в области базы, это создаёт ток базы  $I_B$ .

### Вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора

В основном используются два семейства статических вольт - амперных характеристик: *входных и выходных*.

**Семейство входных характеристик** (рис. 1.51) показывают зависимость ( $i_B$ ) тока базы от ( $U_{BЭ}$ ) напряжения база-эмиттер при фиксированных ( $U_{КЭ}$ ) напряжениях коллектор-эмиттер. Выглядят следующим образом:

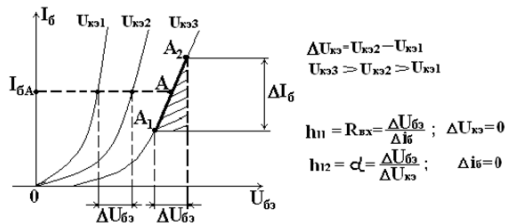


Рис. 1.51. Семейство входных характеристик



Аналитически ВАХ, т.е. зависимости токов транзистора от напряжения на его выводах  $i=f(u)$ . Однако, эти зависимости для наглядности представляют в виде графиков. Графики, необходимы для графического выбора режима работы транзистора и определения его параметров. Наибольший интерес, для биполярного транзистора, представляют:

**входные ВАХ** – это зависимость входного тока  $I_1$  от входного напряжения  $U_1$  при постоянстве выходного напряжения  $U_2$ , т.е.

$$I_1=f(U_1)|_{U_2=\text{const}};$$

**выходные ВАХ** (рис. 1.52) – это зависимость выходного тока  $I_2$  от выходного напряжения  $U_2$  при постоянстве входного тока  $I_1$ , т.е.

$$I_2=f(U_2)|_{I_1=\text{const}}.$$

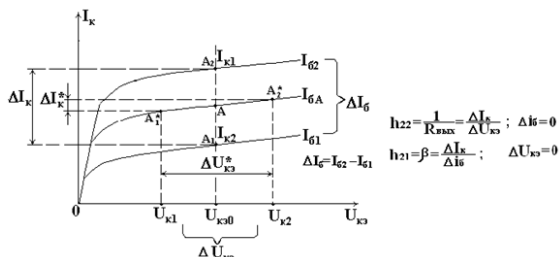


Рис. 1.52. Семейство выходных характеристик

ВАХ измеряют в предположении, что приложенные напряжения и токи во времени постоянны, а потому их называют статическими ВАХ.

По вольт – амперным характеристикам транзистора можно определить ряд параметров, не приводимых в справочной литературе, а также рассчитать цепи смещения, стабилизации режима, оценить транзистора в широком диапазоне импульсных и постоянных токов, мощностей и напряжений.

### Методика графического определения $h$ – параметров транзистора

Параметры  $h_{11э}$  и  $h_{12э}$  находят по входной характеристике (Рис. 1.51)  $U_{бэ} = f(I_{б})$  при  $U_{кэ}=0$ .

$h_{11э}$  – входное сопротивление транзистора. На линейном участке входной характеристике выбираем произвольно две точки, как можно дальше расположенных друг от друга. От этих точек

опускаем перпендикуляры на ось напряжения ( $\Delta U_{бэ}$ ) и ось тока ( $\Delta I_б$ ) и рассчитаем входное дифференциальное сопротивление, по формуле:

$$h_{11\dot{Y}} = \frac{\Delta U_{\dot{a}\dot{Y}}}{\Delta I_{\dot{a}}}; \quad \Delta U_{k\dot{Y}} = 0$$

Приращения  $\Delta U_{бэ}$  и  $\Delta I_б$  выбираю так, чтобы не выходить за пределы линейного участка, их можно примерно принять за (10-20) % от значений рабочей точки.

Графическое определение параметра  $h_{12\dot{Y}} = \frac{\Delta U_{\dot{a}\dot{Y}}}{\Delta U_{k\dot{Y}}}$ ;  $\Delta I_{\dot{a}} = 0$  затруднено, так как семейство входных характеристик при различных  $\Delta U_{кэ} > 0$  практически сливается в одну.

Параметры  $h_{22\dot{Y}}$  и  $h_{21\dot{Y}}$  определяются из семейства выходных характеристик (Рис. 1.52) транзистора  $I_к = f_1(U_{кэ})$ .

Параметр  $h_{21\dot{Y}} = \frac{\Delta I_{\dot{E}}}{\Delta I_{\dot{a}}}$  при  $U_{кэ} = \text{const.}$  находится в заданной рабочей точки **A** ( $I_{бA}$ ,  $U_{кэA}$ ). Приращение тока базы  $\Delta I_б$  следует брать вблизи выбранного значения тока базы  $I_{бA}|_{U_{кэ}=U_{кэA}}$ , как  $\Delta I_б = I_{б2} - I_{б1}$ . Этому приращению  $\Delta I_б$  соответствует приращение коллекторного тока  $\Delta I_к = I_{к2} - I_{к1}$ .

Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы рассчитаем по формуле  $h_{21\dot{Y}} = \frac{\Delta I_{\dot{E}}}{\Delta I_{\dot{a}}}$ ;  $\Delta U_{\dot{E}\dot{Y}} = 0$ .

Параметр  $h_{22\dot{Y}} = \frac{\Delta I_{\dot{E}}}{\Delta U_{\dot{E}\dot{Y}}}$ ;  $\Delta I_{\dot{a}} = 0$  определяется по наклону выходной характеристики (рис.10) в заданной рабочей точки **A** ( $I_{бA}$ ,  $U_{кэA}$ ), где  $\Delta U_{кэ} = U_{к2} - U_{к1}$  при  $I_б = I_{бA}$  приращение коллекторного напряжения, вызывающие приращение коллекторного тока  $\Delta I_к^*$ . При этом из семейства выходных характеристик следует выбирать ту характеристику, которая снята при выбранном значении тока базы  $I_б = I_{бA}$ .

Если рабочая точка не совпадает ни с одной траекторией, приведенной на графике, то такую траекторию надо провести самостоятельно, между и по аналогии с соседними, значения тока

базы которых известно, и присвоить ей значение тока базы равное  $I_{бА}$ .

### Основные параметры полупроводниковых приборов в кодированном виде включены в обозначение.

Маркировка состоит из шести элементов, например:

К Д 2 1 7 А или К С 1 9 1 Е

Первый элемент обозначает исходный материал из которого изготовлен полупроводниковый прибор: Г (-60÷+85°C) или 1 (-60÷+60°C) – Ge (германий); К (-60÷+150°C) или 2 (-60÷+85°C) – Si (кремний); 3 или А – GeAs.

Второй элемент – подкласс полупроводникового прибора по его функциональному назначению: Т биполярный транзистор, П полевой транзистор, Д – диод; С – стабилитрон, стабистор; В – варикап; И – туннельный диод; У – тиристор.

Третий элемент - назначение и электрические свойства.

Мощность	Частота		
	НЧ ( $\leq 0,3$ МГц)	СЧ (0.3÷3 МГц)	ВЧ (>3 МГц)
Малая ( $\leq 0,3$ W)	1	2	3
Средняя (0.3÷3W)	4	5	6
Большая (>3w)	7	8	9

4 и - 5 указывают порядковый номер разработки или электрические свойства (в стабилитронах – это напряжение стабилизации; в диодах – порядковый номер).

6 - Буква, указывает деление по параметрическим группам (в выпрямительных диодах – деление по параметру  $U_{обр,max}$ , в стабилитронах деление по ТКН).

## 1.10. ТИРИСТОРЫ

**Тиристорами** (рис. 1.53) называют полупроводниковые приборы с тремя и более р-п-переходами, имеющие S-образную вольт - амперную характеристику.

При изготовлении тиристора берут пластину полупроводника с параметрами области  $n_1$  и методом двухсторонней диффузии

формируют области  $p_1$  и  $p_2$ . Затем методом односторонней диффузии формируют область  $n_2$ . При такой технологии изготовления наименее легированной будет область  $n_1$ , а наиболее легированной - область  $n_2$ .

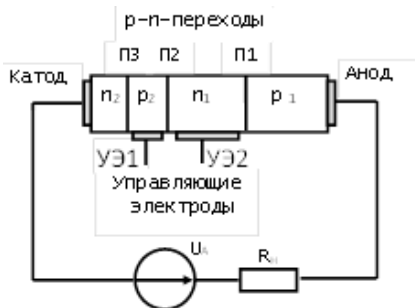


Рис. 1.53. Устройство тиристора.

Контакт к внешнему p-слою называют анодом, а к внешнему p-слою - катодом. Внутренние области p- и n-типа называют базами. Выводы от баз образуют управляющие электроды УЭ1 и УЭ2.

В зависимости от числа выводов тиристоры делят на:

- 1) диодные /динисторы/, имеющие два вывода - от анода и катода.
- 2) триодные /тиристоры/, имеющие выводы от анода, катода и одной из баз.

В начале своего развития тиристоры претендовали на роль многофункционального прибора. На них пытались делать триггеры, счётчики, мультивибраторы и другие самые разнообразные электронные устройства. Однако постепенно выяснилось, что по большинству направлений они не выдерживают конкуренции с другими полупроводниковыми приборами. Единственная область, в которой тиристоры продемонстрировали высокую конкурентоспособность - это мощные токовые ключи различного назначения, в качестве которых они сейчас успешно и широко используются.

При использовании в качестве токового ключа тиристор включается последовательно с источником питания и нагрузкой. В процессе работы тиристор может находиться в одном из двух

возможных состояний. В одном из них тиристор выключен или закрыт. В этом состоянии тиристор имеет высокое сопротивление и ток в нагрузке практически равен нулю. Во втором состоянии тиристор включен или открыт. В этом состоянии тиристор имеет малое сопротивление, и ток в цепи определяется сопротивлением нагрузки.

Рассмотрим физические процессы в тиристоре, для чего представим его в виде двух биполярных транзисторов (Рис. 1.54).

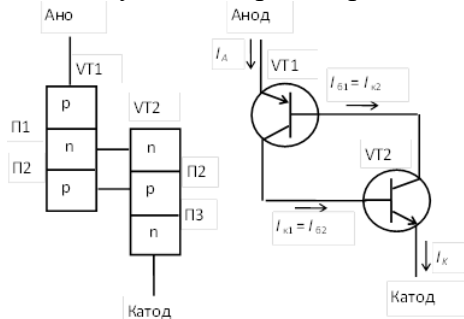


Рис. 1.54. Представление тиристора двумя биполярными транзисторами

На физические процессы в тиристоре основное влияние оказывают два фактора: зависимость коэффициента передачи по току  $\alpha$  от тока эмиттера и лавинное умножение носителей в обеднённом слое коллекторного перехода.

Если на анод подано отрицательное напряжение, то центральный переход П2 будет смещён в прямом направлении, а крайние переходы П1 и П3 - в обратном. В этом случае полярность напряжений на переходах соответствует режиму отсечки транзисторов VT1, VT2 и через тиристор будет протекать обратный ток двух последовательно включенных переходов П1 и П3.

При положительном напряжении на аноде крайние переходы П1 и П3 будут смещены в прямом направлении, а центральный переход П2 - в обратном. В этом случае полярность напряжений на переходах соответствует активному режиму работы транзисторов VT1 и VT2. Как видно из рис. 1.54, выходной ток транзистора VT1 является входным током транзистора VT2, а выходной ток транзистора VT2 - входным током транзистора VT1, т. е. транзисторы

VT1 и VT2 образуют двухкаскадный усилитель, выход которого соединён со входом. В такой схеме возможен регенеративный процесс лавинообразного нарастания тока.

При небольших положительных напряжениях на аноде через коллекторные переходы будут протекать обратные токи, которые будут усилены транзисторами VT1 и VT2. Но, так как эти токи малы, а при токе эмиттера  $I_{\epsilon} \rightarrow 0$  коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha \rightarrow 0$ , то в тиристоре установится ток, ненамного превышающий  $I_{к0}$ .

По мере роста напряжения на аноде ток тиристора будет возрастать за счёт лавинного умножения носителей заряда в переходе П2. Это само по себе приводит к увеличению тока тиристора. Но увеличение тока тиристора приводит к возрастанию коэффициентов передачи тока эмиттера транзисторов VT1 и VT2, что влечёт ещё большее увеличение тока тиристора.

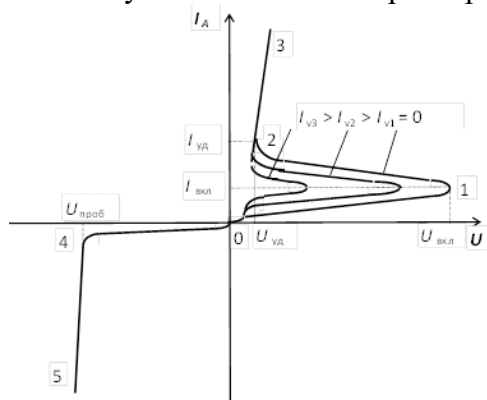


Рис. 1.55. Вольт-амперная характеристика тиристора.

При некотором токе коэффициент усиления по петле, образованной транзисторами VT1 и VT2 превысит единицу. При этом, если ток не ограничен, то в тиристоре возникает регенеративный процесс лавинообразного нарастания тока, заканчивающийся насыщением транзисторов VT1 и VT2, когда все их переходы будут смещены в прямом направлении. Такой процесс будет происходить в электронном ключе на транзисторе. Если ток ограничен, что имеет место при питании тиристора от источника

тока при снятии его вольт-амперной характеристики, то с ростом тока через тиристор напряжение на нём будет падать (рис. 1.55).

Если в цепи управляющего перехода протекает некоторый ток, то это приводит к увеличению тока тиристора и возрастанию коэффициентов передачи тока эмиттера транзисторов VT1 и VT2, что приводит к уменьшению напряжения, при котором начинается регенеративный процесс включения тиристора (рис. 1.55). Таким образом, изменяя ток управляющего электрода можно управлять напряжением включения тиристора.

Вольт-амперная характеристика тиристора имеет пять характерных участков (рис. 1.55).

Участок 0-1. Напряжение на аноде положительно, ток незначителен, то есть тиристор закрыт. Этот участок вольт-амперной характеристики соответствует режиму прямого запираания.

Участок 1-2. В точках 1 и 2 дифференциальное сопротивление тиристора равно нулю, а между ними - отрицательно. Это участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением тиристора. Координаты точек 1 и 2 являются параметрами тиристора:

$U_{\text{вкл}}$  - напряжение включения;

$I_{\text{вкл}}$  - ток включения;

$I_{\text{уд}}(I_{\text{выкл}})$  - ток удержания (ток выключения);

$U_{\text{уд}}(U_{\text{выкл}})$  - напряжение удержания (напряжение выключения).

Участок 2-3. На этом участке тиристор открыт и ток через него ограничен сопротивлением внешней цепи. Участок соответствует режиму прямой проводимости.

Участок 0-4. На этом участке напряжение на аноде отрицательно. Ток мал. Тиристор закрыт. Участок соответствует режиму обратного запираания.

Участок 4-5. На этом участке наблюдается резкое увеличение тока тиристора при увеличении отрицательного напряжения на аноде. Участок 4-5 соответствует режиму обратного пробоя.

Для выключения тиристора при его использовании в качестве токового ключа необходимо каким-либо способом уменьшить ток через тиристор до значения, меньшего тока удержания. Выключить

тиристор, подавая какие-либо воздействия на управляющий электрод, в большинстве типов тиристорov невозможно. Однако существуют тиристоры, которые могут быть выключены по управляющему электроду импульсом тока обратного знака. Такие тиристоры называют запираемыми по управляющему электроду.

Если в качестве управляющего используется электрод УЭ1, то тиристор называют управляемым по катоду, если в качестве управляющего используется электрод УЭ2, то тиристор называют управляемым по аноду.

Рассмотренные тиристоры при отрицательном напряжении на аноде закрыты. Такие тиристоры называют запираемыми в обратном направлении. Однако существуют тиристоры, проводящие в обратном направлении, которые как бы зашунтированы диодом.

Выпускаются тиристоры, имеющие симметричную вольт-амперную характеристику для обеих полярностей напряжения на аноде. Такие тиристоры называют симисторами (рис. 1.56).



Рис. 1.56. Условные графические изображения тиристоров на схемах.

Полупроводниковые приборы классифицируют по исходному материалу, рассеиваемой мощности, диапазону рабочих частот, принципу действия.



Основные параметры мощности полупроводниковых приборов в кодированном виде включены в обозначение.

**Первый элемент** обозначает исходный материал из которого изготовлен прибор: германий или его соединения – Г; кремний или его соединения – К.

Г – 1 + 60<sup>0</sup>С

К – 2 + 85<sup>0</sup>С

**Второй элемент** – подкласс полупроводникового прибора, для биполярных транзисторов вторым элементом является буква Т; П – полевой, Д – диод, С – стабилитрон, У – тиристор.

**Третий элемент** – назначение прибора (табл.1).

**Четвертый элемент** – двухзначное число от 01 до 99, обозначающий порядковый номер разработки.

**Пятый элемент** – буква русского алфавита, определяющая классификацию по параметрам приборов, изготовленных по единой технологии.

Пример: **ГТ 125 В** - германиевый низкочастотный малой мощности номер разработки 25 группы В

**Таблица 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ**

Мощность транзистора	Частота применения, МГц		
	до 3 нч	3 ÷ 30 сч	> 30 вч
Малая (≤ 0,3 w)	101 – 199	201 – 299	301 – 399
Средняя (0,3 ÷ 3 w)	401 – 499	501 – 599	601 – 699
Большая (> 3 w)	701 – 799	801 – 899	901 – 999

## 2. УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Усилитель — это устройство, преобразующее сигнал малой мощности в сигнал большей мощности за счёт энергии источника питания. Именно увеличение мощности выходного сигнала, по сравнению с мощностью входного, является характерной особенностью усилителя и отличает его от других преобразующих устройств, в которых изменяется либо напряжение, либо электрический ток, а мощность остаётся постоянной.

Биполярный транзистор имеет три вывода, а следовательно, может быть включен по трем схемам. Это схема с общим эмиттером (ОЭ), схема с общей базой (ОБ) и схема с общим коллектором (ОК).

Рассмотрим способ включения транзистора в схеме с ОЭ (рис. 2.1).

При включении биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером входной сигнал подаётся на базу относительно эмиттера, а выходной сигнал снимается с коллектора относительно эмиттера.

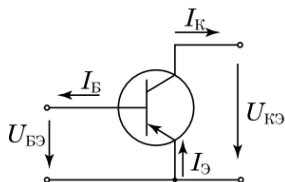


Рис.2.1. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером.

Работа транзистора характеризуется семействами входных и выходных характеристик (рис. 2.2). Эти характеристики (для схемы с ОЭ) приводятся в справочниках по транзисторам.

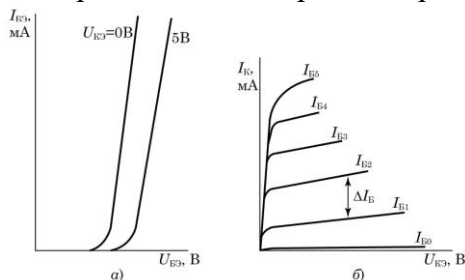


Рис.2.2. Характеристики транзистора а — входные, б — выходные

Усилительный каскад с общим эмиттером (рис. 2.3) является одним из самых распространённых и применяется в каскадах предварительного усиления многокаскадных усилителей. Название схемы «с общим эмиттером» означает, что вывод эмиттера является общим для входной и выходной цепи. В этом случае вывод эмиттера называется общим (обозначается знаком «⊥», также используется термин «земля»), а все потенциалы измеряются относительно него.

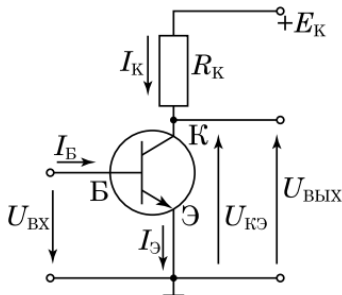


Рис.2.3. Усилительный каскад с общим эмиттером.

Величина ЭДС источника питания  $E_K$  выбирается несколько меньше максимально допустимого напряжения на коллекторе, задаваемого в характеристиках транзистора, в пределах  $E_K = (0,7 \dots 0,9)U_{KЭmax}$ .

Величина  $R_K$  выбирается из условия передачи максимальной мощности (согласованного режима):  $R_K \approx R_{ВЫХTr} = 1/h_{22}$ , что для биполярного транзистора составит  $0,5 \dots 10$  кОм.

Усилительный каскад с общим эмиттером (рис.2.3) можно представить в виде делителя напряжения с переменным резистором в нижнем плече (рис.2.4), функции которого выполняет транзистор.

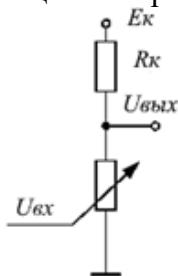


Рис.2.3. Усилительный каскад в виде делителя напряжения.

Анализ делителя показал, что изменение сопротивления нижнего плеча от бесконечности до нуля приводит к изменению выходного напряжения от  $+E_k$  до нуля.

Активным элементом, усилительного каскада (рис.2.3), служит биполярный транзистор обратной проводимости, следовательно, отрывается при положительном напряжении на его базе. В случае переменного входного сигнала, транзистор будет реагировать только на положительные полупериоды. В результате выходной усиленный сигнал будет искажен (рис.2.4).

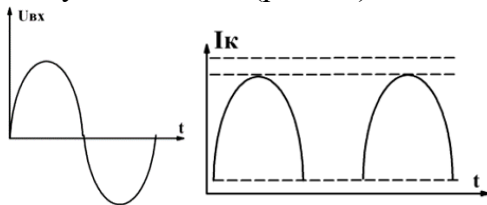


Рис2.4а. Входной сигнал. Рис2.4б. Выходной сигнал.

На входе сигнал синусоидальной форме (рис. 2.4, а), а на выходе – импульсный сигнал (рис. 2.4, б). Такого рода искажения называются «нелинейными» и связано это с нелинейной характеристикой транзистора. Важной характеристикой усилительного каскада является режим работы по постоянному току, который характеризуется положением рабочей точки – точки на нагрузочной характеристике, соответствующей нулевому уровню переменной составляющей входного напряжения. Положение рабочей точки определяется величиной и знаком постоянной составляющей входного напряжения  $U_{БЭ0}$ . В зависимости от положения рабочей точки на нагрузочной характеристике различают три класса усилителей:

- Класс «А» (рис. 2.5) — режим, при котором напряжение в выходной цепи изменяется в течении всего периода входного сигнала. В этом случае рабочая точка находится посередине участка нагрузочной характеристики, соответствующего линейному участку характеристик транзистора.

- Класс В – режим, при котором напряжение в выходной цепи изменяется в течении приблизительно половины периода входного

сигнала, т. е. входной сигнал является переменным и происходит потеря половины его периода.

- Класс С – режим, при котором напряжение в выходной цепи изменяется в течении времени значительно меньшего половины периода входного сигнала.

Помимо аналоговых классов усилителей, имеется импульсный Класс D, который характеризуется наличием только двух уровней выходного напряжения (максимальное и нулевое), то есть транзистор работает в ключевом режиме – либо полностью открыт, либо полностью закрыт.



Рис.2.5. Реальная и идеальная входная характеристика транзистора.

Во избежание нелинейных искажений, необходимо в базовой цепи задать некоторый начальный ток – ток смещения ( $i_{СМ}$ ). Таким образом, чтобы рабочая точка находилась на линейном участке входной характеристики.

Для этого можно в базовую цепь включить дополнительный источник тока (Рис.2.6).

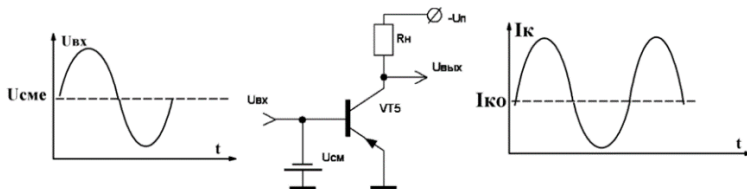


Рис.2.6. Усилительной каскад с ОЭ и временные диаграммы входного и выходного сигналов.

Чем больше напряжение смещения, тем больше коллекторный ток, а значит, и мощность, потребляемая транзистором больше. Для

экономного расходования батареи смещение на базу следует подавать как можно меньше.

Смещение на базу устанавливается с учетом уровня входного сигнала: чем меньше этот сигнал, тем меньше можно открывать транзистор, экономя при этом энергию батарей.

Существуют различные способы введения в базовую цепь постоянного тока смещения. Можно для этого использовать отдельную батарею (Рис.2.6), а можно подать на базу необходимое постоянное напряжение от коллекторной батареи:

1. использование дополнительного резистора  $R_6$  (Рис.2.7)

$$R_6 = (U_{\text{п}} - U_{\text{см}}) / i_{\text{см}}$$

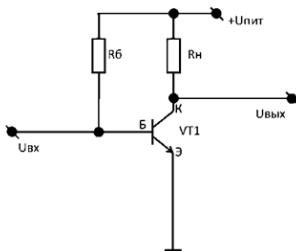


Рис.2.7. Схема с использованием дополнительного резистора  $R_6$ .

В данном случае, задаем начальный ток базы  $I_{\text{см}}$  (Рис.2.5), за счет коллекторной батареи.

Этот способ используется ограничено. Поскольку рабочая точка нестабильная и зависит от напряжения источника питания, от температуры полупроводника.

Дальнейшее усовершенствование усилителя направлено на повышение его термостабильности. Для этого используют резисторный делитель напряжения  $R_1$  и  $R_2$ .

2. Напряжения смещение задается с помощью резисторного делителя источника питания (Рис.2.8).

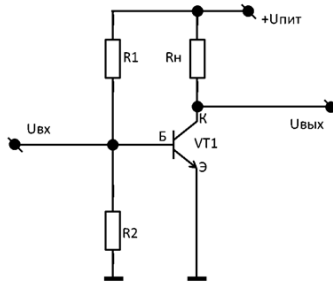


Рис.2.8. Потенциал базы задается делителем напряжения  $R_1$  и  $R_2$ .

Несложными расчетами можно показать, что, если  $R_2 \leq r_{БЭ}/10$ , то изменение  $r_{БЭ}$  до 50% вызывает изменение общего сопротивления нижнего плеча не более, чем на 7%. При этом АЧХ такого усилителя не хуже, чем у предыдущего. Однако его входное сопротивление уменьшается в 10 раз, что ограничивает его применение в качестве входного каскада при высокоомном источнике сигнала.

В цепи делителя  $R_1, R_2$  – течет ток делителя  $i_{дел}$ , который рассчитывается по закону Ома:

$$i_{дел} = U_{п} / R_1 + R_2$$

ток делителя выбирают приблизительно в 2 – 5 раз больше, чем ток смещения.

$$I_{дел} \approx (2 \div 5) I_б$$

В последовательных цепях течет один и тот же ток.

Падения напряжения  $U_{R1} = R_1 i_{дел}$

$$U_{R2} = R_2 i_{дел}$$

$$U_{п} = U_{R1} + U_{R2} \quad U_{R2} = U_{п} - U_{R1}$$

$$U_{R2} = U_{см}$$

При прохождении электрического тока по проводнику, он нагревается. Согласно закону Джоуля-Ленца количество теплоты, выделяющееся в проводнике  $Q = I^2 R t$ .

Даже если транзистор закрыт, в цепи коллектора течет неуправляемый ток. Причем при увеличении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ , ток возрастает в 2 раза.

Сопротивление металлических проводников незначительно увеличивается с повышением температуры, а у полупроводников сопротивление сильно уменьшается.

В цепи делителя течет ток, резисторы  $R_1$  и  $R_2$  нагревается, но сопротивление их остается постоянным. В цепи коллектора тоже течет ток, элементы этой цепи тоже нагреваются.  $R_n$  сопротивление постоянное, величина его не зависит от температуры, а сопротивление транзистора с ростом температуры уменьшается (Рис.2.9). Ток коллектора при этом возрастает, а следовательно, возрастает количество выделяемой теплоты. Прямая зависимость, чем больше температура, тем больше ток и наоборот. Прямая зависимость тока от температуры. Транзистор лавинообразно нагревается, наступает температурный пробой, транзистор выходит из строя. Следовательно, температуру полупроводниковых приборов необходимо стабилизировать.

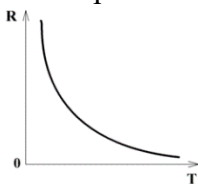


Рис.2.9. Температурная зависимость сопротивления полупроводника.

Существует 4 способа *термостабилизации*:

1. полупроводниковый прибор устанавливают на дополнительный теплоотвод (радиатор) — это пластина с большой площадью поверхности и хорошей теплопроводностью. В качестве материала радиатора используют медь, латунь, алюминий или железо;

2. используются если недостаточно первого. Осуществляет принудительный обдув с помощью электровентилятора;

3. используются если недостаточно первых двух. Полупроводниковые приборы погружают в жидкостные ванны;

4. автоматическая термостабилизация (Рис.2.10). В эмиттерную цепь транзистора включают дополнительное сопротивление  $R_э$ .



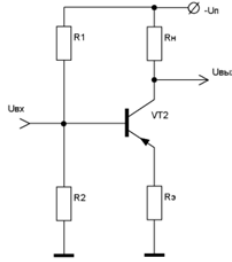


Рис.2.10. Усилительный каскад с автоматической термостабилизацией.

В этом случае, напряжение смещение  $U_{см} = U_{бэ}$  задается двумя элементами  $R_2$  и  $R_3$ . На этих резисторах падает напряжение, согласно закону Кирхгофа (Рис.2.11).

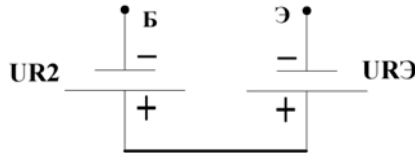


Рис.2.11. Эквивалентная цепочка  $R_2$ ,  $R_3$ .

Согласно (Рис.2.11) результирующее напряжение равно разности напряжений на отдельных участках:  $U_{бэ} = U_{R2} - U_{R3}$ .

В цепи коллектора течет ток ( $I_k = U_{п} / (R_{кэ} + R_n + R_3)$ ), выделяется тепло Джоуля ( $Q = I_k \cdot t$ ), транзистор нагревается и его сопротивление  $R_{кэ}$  уменьшается (Рис.2.9.), ток коллектора  $I_k$  возрастает, возрастает напряжения на  $R_3$  ( $U_{R3} = I_k \cdot R_3$ ). Если  $U_{R3}$  возрастает, то согласно ( $U_{см} = U_{R2} - U_{R3}$ )  $U_{см}$  убывает. Транзистор закрывается, ток коллектора уменьшается. Таким образом, мы стабилизируем ток коллектора. Напряжения источника питания постоянная величина, ток коллектора мы за стабилизировали. В единицу времени выделяется одно и то же количество теплоты. При включении транзистор нагревается до рабочей температуры. Дальнейшей рост температуры прекращается.

Для разграничения постоянных и переменных токов в цепи эмиттера, параллельно  $R_3$  устанавливают конденсатор  $C_э$

(Рис.2.12). Ток течет по пути наименьшего сопротивления, постоянный ток через  $R_Э$ , а переменный через  $C_Э$ .

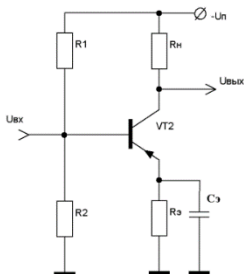


Рис.2.12. Блокировочный конденсатор  $C_Э$  в схеме с ОЭ.

Для постоянного тока  $\omega=0$ , согласно соотношению  $X_{CЭ} = 1/\omega \cdot C_Э$ , следует, что сопротивление конденсатора постоянному току стремится к бесконечности  $X_{CЭ} = \infty$ .

Для переменного тока, частота которого  $\omega \gg 0$  - сопротивление конденсатора стремится к нулю  $X_{CЭ} = 0$ .

Для того, чтобы конденсатор  $C_Э$  осуществлял шунтирование резистора  $R_Э$ , необходимо, чтобы емкостное сопротивление  $X_{CЭ}$  конденсатора было значительно ниже  $R_Э$  на всём диапазоне частот, на которых работает усилительный каскад. Величина емкостного сопротивления обратно пропорциональна частоте и с ростом частоты уменьшается. Следовательно, при определении величины ёмкости  $C_Э$  нам необходимо ориентироваться на наименьшую рабочую частоту каскада, которой является нижняя граничная частота  $f_H$ . Обычно достаточно, чтобы сопротивление  $X_{CЭ}$  на  $f_H$  было в 5 ... 10 раз меньше  $R_Э$ :  $R_Э = (5 \dots 10)X_{CЭ}$ .

Отсюда  $C_Э$ , в микрофарадах, равно:  $C_Э = \frac{10^7}{(1\dots2)2\pi f_H R_Э}$

Конденсатор  $C_Э$  осуществляет связь эмиттера с общим проводом.

**Эмиттер транзистора соединен с общим проводом по переменному току через блокировочный конденсатор  $C_Э$ .**

Отсюда и название схемы – *схема с общим эмиттером*.

Любой источник и приемник имеет свое внутреннее сопротивление. Сопротивление нагрузки и внутреннее

сопротивления источника тока должно быть одинокого. Тогда КПД будет максимальное.

Для того чтобы внутреннее сопротивление источника тока не влияло на напряжение смещение транзистора, на вход усилителя ставятся разделительные конденсаторы  $C_1$  (Рис.2.13).

На выходе усилителя кроме полезного напряжения присутствует постоянная составляющая напряжения. На выход усилителя также ставят разделительный конденсатор  $C_2$  (Рис.2.13), который легко пропускает переменное усиливаемое напряжение и не позволяет источнику сигнала шунтировать нижнюю часть делителя по постоянному току.

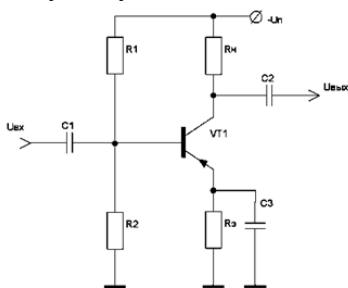


Рис.2.13. Окончательная схема с общим эмиттером.

Основные параметры усилителя. Для схемы с ОЭ.

Входное и выходное сопротивления являются важными параметрами усилителей. При согласовании усилителя с источником входного сигнала и с нагрузкой значения этих сопротивлений необходимо учитывать. Значения входного и выходного сопротивлений усилителя являются комплексными величинами и зависят от частоты сигнала.

Если интерес представляют активные составляющие входного и выходного сопротивлений, то пользуются следующими выражениями:

Входной сигнал, через разделительный конденсатор  $C_1$ , подключается параллельно  $R_2$  (Рис.2.13). Сопротивление конденсатора переменному току очень мало (можно не учитывать), следовательно, входное сопротивление будет определяться только сопротивлением  $R_2$

$$R_{BX} = R_2$$

Это сопротивление достаточно большее и составляет порядка 1-10кΩ.

КПД есть отношение выходной мощности, переданной в нагрузку, к сумме всех мощностей, потребляемых от всех источников питания и смещения.

КПД усилителя  $\eta = \frac{U_{\text{П}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$ , максимально и не превышает 50% если выходное напряжение равно половине напряжения источника питания. Это выполнится в том случае, если  $R_{\text{Н}}$  равно  $R_{\text{КЭ}}+R_{\text{Э}}$ , тогда несмотря на то, что выходной сигнал снимается с цепочки  $R_{\text{КЭ}}+R_{\text{Э}}$ , выходное сопротивление определяется резистором  $R_{\text{Н}}$ .

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Н}}$$

Это сопротивление, так же, достаточно большее и составляет порядка 1-10кΩ.

Исходя из этого  $R_{\text{ВХ}} \approx R_{\text{ВЫХ}}$ , появляется возможность соединять каскады между собой.

К важнейшим характеристикам усилителя относятся, коэффициент усиления. Коэффициентом усиления называется отношение установившихся значений выходного и входного сигналов. Используются следующие выражения для коэффициента усиления:

По напряжению  $K_{\text{U}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$

Для широко используемых транзисторов, он составляет (10 ÷ 300)

По току  $K_{\text{I}} = \Delta i_{\text{к}} / \Delta i_{\text{б}}$  (10 ÷ 300)

По мощности  $K_{\text{P}} = K_{\text{I}} \cdot K_{\text{U}}$  (100 ÷ 10 000)

Таким образом, схема с ОЭ обладает большим коэффициентом усиления по току, напряжению и мощности.

Схема с ОЭ поворачивает фазу сигнала на 180°.

В режиме покоя транзистора расчет каскада по постоянному току проводят графоаналитическим методом (Рис.2.14) с использованием статических выходных и входных ВАХ транзистора. Метод удобен при нахождении связи параметров режима покоя ( $U_{\text{кп}}$  и  $I_{\text{кп}}$ ) с амплитудными значениями переменных составляющих — выходного напряжения  $U_{\text{выхт}}$  и коллекторного тока  $I_{\text{выхт}}$ . При расчетах на выходных характеристиках проводят

линию нагрузки по постоянному току, положение которой определяется вторым законом Кирхгофа для коллекторной цепи каскада.

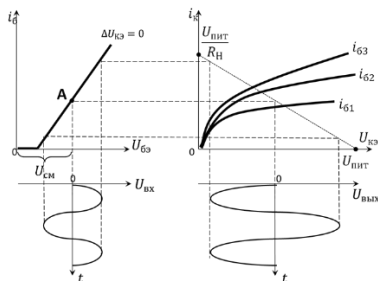


Рис.2.14. Графический анализ работы усилителя с ОЭ в классе А

Линию нагрузки строят по двум точкам, характеризующим режимы холостого хода (точка  $U_{пит}$ ) и короткого замыкания (точка  $U_{пит}/R_H$ ) в коллекторной цепи транзистора. Для первой точки: ток и напряжение холостого хода  $I_{кх} = 0$ ,  $U_{пит} = E_k$ ; для второй точки: напряжение и ток короткого замыкания  $U_{кз} = 0$ ;  $I_{кз} = E_k/(R_H)$ .

При подаче на вход каскада переменного напряжения  $U_{вх}$  переменный ток базы  $i_b$  будет изменяться в соответствии с входной характеристикой. Одновременно и по такому же закону станет менять свои значения переменный ток коллектора.

При уменьшении входного напряжения картина меняется на обратную. Из данного анализа следует, что каскад ОЭ изменяет (инвертирует) фазу входного сигнала на  $180^\circ$ .

Инверсия — такое действие над входным сигналом, при котором все составляющие его спектра изменяют фазу на  $180^\circ$

### Схема с ОБ

#### База транзистора соединен с общим проводом по переменному току через блокировочный конденсатор СЗ.

Элементы схемы (сопротивления) находится на тех же самых местах (Рис.2.15.), а следовательно, несет те же функции как с ОЭ. Напряжение  $U_{вх}$  подается на эмиттер транзистора.

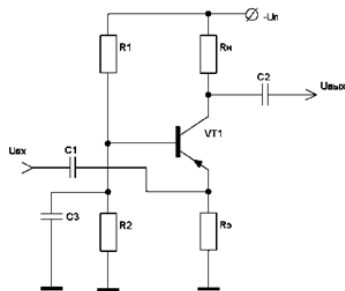


Рис.2.15. Усилительный каскад с общей базой

Сопротивление конденсатора  $C1$  и  $C2$  входному переменному току  $= 0$ . Входное сопротивление будет определяться сопротивлением база – эмиттерного перехода.

$R_{вх} = R_{бэ}$ , это сопротивление мало и составляет **(10-100 Ом)**

Выходная цепочка, аналогично схеме ОЭ. Выходное сопротивление определяется  $R_n$ .

$R_{вых} = R_n$  и составляет (1-10кΩ)

$R_{вх} \ll R_{вых}$  по этому схему с ОБ называют трансформатором сопротивления, т.е. ОБ преобразует малое входное сопротивление в большее выходное.

$K_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$  (**10 ÷ 100**) чуть меньше чем у схемы с ОЭ

$K_i = \Delta i_k / \Delta i_э \leq 1$  Усиление по току не происходит.

Коэффициент усиления по мощности приблизительно равно коэффициенту усиления по напряжению, т.к.  $K_i \approx 1$ .

$K_p = K_U$

Схема с ОБ, не поворачивает фазу сигнала. Входной и выходной сигнал одинаковой фазы.

### Схема с ОК

Коллектор транзистора соединен с общим проводом по переменному току через конденсатор  $C_f$  фильтра источника питания.

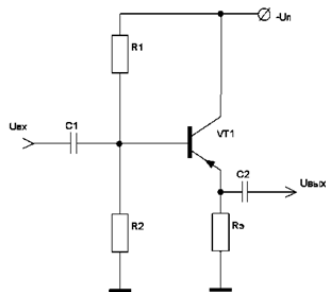


Рис.2.16. Усилительный каскад с общей коллектором.

$$R_{вх} = R2 \text{ (1-10к}\Omega\text{) как ОЭ}$$

$$R_{вых} = Rн \text{ (10-100 Ом)}$$

$R_{вх} \gg R_{вых}$  по этому схему с ОК называют трансформатором сопротивления, т.е. ОК преобразует большее входное сопротивление в малое выходное.

$$K_u = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} \leq 1$$

$$K_i = \Delta i_k / \Delta i_{э} \text{ (10 } \div \text{ 100) чуть меньше чем у схемы с ОЭ}$$

$$K_p = K_i$$

### Дроссельный усилитель

Если нагрузка транзистора является дроссель ( $R_n$  – дроссель) то усилитель называют дроссельный.

Простейшие электрическая схемы дроссельного усилителя приведены на рис. 2.17. (Для упрощения рисунка, в последующих схемах отсутствуют цепи смещения и термостабилизации, однако надо иметь в виду их наличие). В них использованы те же обозначения, что и в схеме резисторного усилительного каскада (Рис.2.13.). Назначение элементов схемы в основном также остается прежним, с тем отличием, что нагрузкой усилителя служит дроссель.

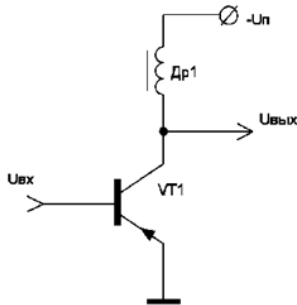


Рис.2.17. Дроссельный усилитель.

Для постоянного тока он представляет собой низкоомную нагрузку, поэтому потери напряжения источника питания практически отсутствуют. Поэтому дроссельный усилительный каскад позволяет обеспечить несколько большее усиление, чем резисторный усилитель.

**Положительные стороны** дроссельного усилителя; - по постоянному току нет потерь, все  $U_n$  приложено к коллектору; КПД ближе к 50%.

Дроссельному усилителю, однако, присуще больше недостатков, чем достоинств. Для него характерна, во-первых, зависимость сопротивления нагрузки от частоты сигнала  $X_L = \omega L = 2\pi fL$ , поэтому даже в области средних частот он вносит частотные искажения. Во-вторых, два нелинейных элемента (транзистор и дроссель), имеющиеся в схеме дроссельного усилителя, создают нелинейные искажения.

Если ко всем перечисленным недостаткам добавить более высокую стоимость изготовления, больший вес и габариты дроссельного усилителя, то станет ясным, почему он в настоящее время применяется ограниченно.

### Трансформаторный усилитель

Если нагрузка транзистора является трансформатор ( $R_n$  – трансформатор) то усилитель называют трансформаторный (Рис.2.18.).



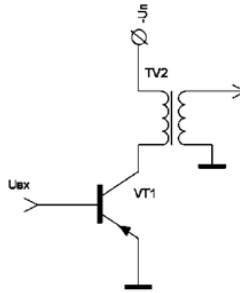


Рис.2.18. Трансформаторный усилитель

**Положительная сторона;** первый и последующие каскады разделены по постоянному току. Трансформатор  $T_p$  может быть повышающим (понижающим), в  $3 \div 5$  раз, что дает дополнительное увеличение выходного напряжения (тока). Трансформатор дает согласование по сопротивлению между каскадами.

**Отрицательная сторона;**

Хотя усиление велико, оно значительно меняется с частотой. Отсюда плохая частотная характеристика. Трансформаторы громоздки и дороги.

**Резонансный усилитель.**

Если нагрузка транзистора является колебательный контур ( $R_H$  – колебательный контур) то усилитель называют резонансным.

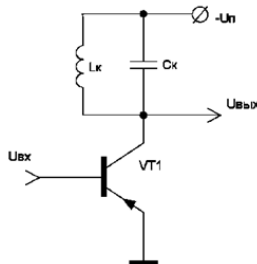


Рис.2.19. Резонансный усилитель.

Другое название резонансного усилителя - *избирательный* (селективный, полосовой) это усилители, имеющие узкую полосу пропускания и усиливающие сигналы только в пределах этой полосы.

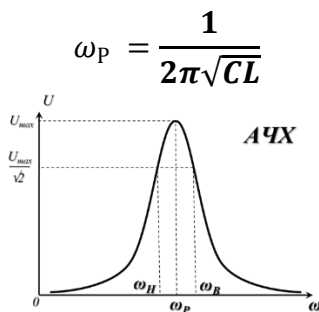


Рис.2.20. Амплитудно - частотная характеристика резонансного усилителя

**Коэффициент усиления** резонансного усилителя максимальный при совпадении частоты входного сигнала ( $\omega$ ) с резонансной частотой ( $\omega_p = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$ ) и резко уменьшается на других частотах.

Если максимальная значения коэффициента усиления принять за единицу, то действующая значения будет  $= \sqrt{2} \cdot K_{max} = 0.7 \cdot K_{max}$ . считается, что коэффициент усиления имеет равномерное АЧХ в диапазоне частот от  $\omega_H$  до  $\omega_B$ . Этот диапазон называют - полоса пропускания резонансного усилителя.

**Положительная сторона** - наибольший коэффициент усиления, обладает избирательностью

**Отрицательная сторона;** - узкая полоса усиливаемых частот.

## 2.1. МЕЖКАСКАДНАЯ СВЯЗЬ

Для передачи сигнала от одного каскада многокаскадного усилителя на вход другого каскада применяют различные схемы, называемые схемами межкаскадной связи. Эти схемы одновременно служат и для передачи сигнала от одного каскада другому, а также для придания усилителю определённых свойств. Существует три вида схем межкаскадной связи:

1. Резисторная;
2. Трансформаторная;
3. Гальваническая;

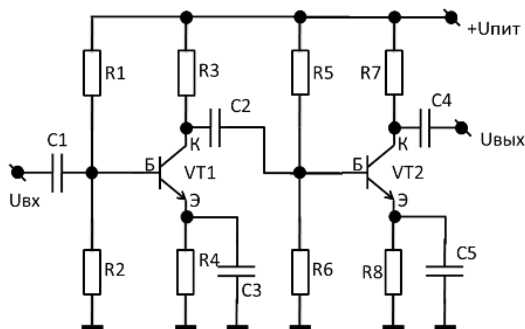


Рис.2.21. Емкостная или резистивная межкаскадная связь

В резисторных каскадах (рис.2.21) используется резисторная (точнее резисторно-конденсаторная) схема межкаскадной связи. Здесь через резистор  $R_3$  на коллектор транзистора подаётся питающее напряжение, и на этом же резисторе выделяется напряжение усиленного каскадом сигнала. Разделительный конденсатор  $C_2$  преграждает путь постоянной составляющей напряжения из выходной цепи на вход следующего каскада.

Резисторные каскады не обладают дрейфом нуля, передаваемым на следующий каскад, и позволяют обеспечить необходимые напряжения на усилительный элемент при питании многокаскадного усилителя от одного источника. Эти каскады могут усиливать сигналы в очень широкой полосе частот, потребляют малую мощность от источника питания, нечувствительны к магнитным полям, имеют малые габариты, вес и стоимость. Поэтому резисторные каскады наиболее употребительны в качестве каскадов предварительного усиления.

#### **Положительные стороны;**

Первый и последующие каскады разделены по постоянному току. Каждый каскад содержит полный набор элементов для самостоятельной работы, что позволяет собирать и отлаживать схему в любом удобном порядке.

#### **Отрицательные стороны;**

Большое количество элементов. Увеличенное потребление энергии от источника питания, за счет наличия делителя напряжения в каждом каскаде.

## Трансформаторная или индукционная межкаскадная связь

В этих каскадах (рис.2.22) для межкаскадной связи используется трансформатор  $Tr1$ , через первичную обмотку которого, включаемую в выходную цепь  $VT1$ , на коллектор подаётся напряжение питания, а к вторичной присоединяют входную цепь следующего каскада. Переменная составляющая выходного тока, проходя через первичную обмотку, создаёт в ней напряжение сигнала, трансформирующееся во вторичную обмотку и подающееся на вход следующего каскада.

Коэффициент усиления по напряжению у трансформаторных каскадов обычно в 2, 10 раз выше, чем у резисторных, но усиливаемая полоса частот много уже. Размеры, вес и стоимость трансформаторного каскада в несколько раз больше тех же параметров резисторного каскада; трансформатор чувствителен к наводкам от внешних магнитных полей. Но применение трансформатора с соответствующим коэффициентом трансформации позволяет создать для усиленного каскада оптимальное сопротивление нагрузки и получить наибольшую мощность и сигнала при хорошем КПД. Поэтому, несмотря на недостатки, трансформаторные каскады очень часто используют для мощного усиления сигналов с неширокой полосой частот (например, звуковых); кроме того, трансформаторы часто применяют в качестве входного и выходного устройства в усилителях переменного тока для симметрирования и согласования цепей.

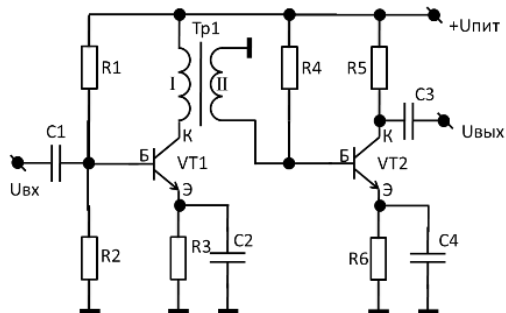


Рис. 2.22. Трансформаторная межкаскадная связь

### Положительные стороны;

Первый и последующие каскады разделены по постоянному току. Трансформатор  $Tr1$  может быть повышающим (понижающим), что дает дополнительное увеличение выходного напряжения (тока). Трансформатор дает согласование по сопротивлению между каскадами.

### Отрицательные стороны;

Большое количество элементов. Наличие большого тяжелого трансформатора, который является основным источником искажения на краях диапазона.

## Гальваническая или непосредственная межкаскадная связь

Простейший вид гальванической связи – непосредственная связь. При непосредственной связи выходной электрод транзистора предыдущего каскада прямо соединяется проводником с входным электродом следующего. В этом случае потенциал базы транзистора  $VT2$  равен потенциалу коллектора  $VT1$ , следовательно, режимы каскадов зависят друг от друга (рис.2.23). Схема получается проще, чем при емкостной связи, так как исключаются конденсаторы связи и делители, создающие смещение в последующих каскадах. В результате отсутствия частотно зависимых элементов (конденсаторов, катушек индуктивности) уменьшает частотные и фазовые искажения на нижних частотах, повышается коэффициент усиления и КПД устройства.

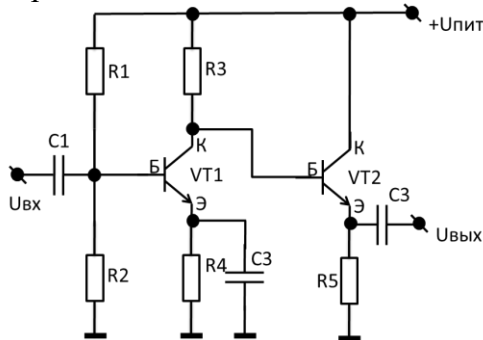


Рис. 2.23. Гальваническая межкаскадная связь

Если в усилителе все связи непосредственные, то можно усиливать колебания любой низкой частоты, вплоть до  $f=0$ , когда усиливаются изменения постоянной составляющей тока, т.е. получается усилитель постоянного тока.

В усилителях низкой частоты взаимное влияние исходных режимов каскадов приводит к усилению их нестабильности, вызванной повышением температуры или другой причиной. Поэтому особо жесткие требования предъявляются к стабилизации тока коллектора.

Исходный режим первого транзистора создается включением специальных элементов, определяющих величину смещения. Их роль выполняет делитель  $R1 - R2$ . Для стабилизации режима включен резистор эмиттерной стабилизации  $R4$ . Напряжение смещение первого транзистора задается  $U_{см1}=U_{R2}-U_{R4}$ . В следующем каскаде потенциал базы  $VT2$  задан потенциалом коллектора предыдущего транзистора, а потенциал эмиттера – напряжением на резисторе  $R5$ . При этом смещение вычисляется как разность потенциалов коллектора  $VT1$  и эмиттера  $VT2$ :  
$$U_{см2}=(U_{R2}+U_{к1})-U_{R5}$$

#### **Положительные стороны;**

Малое число деталей. Не большое потребление энергии от источника питания. Отсутствие частотно зависимых элементов

#### **Отрицательные стороны;**

Нет разделения между каскадами по постоянному току. При выходе из строя элементов одного каскада, приводит к выходу из строя элементов последующих каскадов.

Сборку и отладку схему производят в строго определенном порядке (начиная с первого каскада).

При проектировании схем радиоэлектронных устройств часто желательно иметь транзисторы с параметрами лучше тех моделей, которые предлагают фирмы производители радиоэлектронных. Нам обычно требуются больший коэффициент усиления по току  $h_{21}$ , большее значение входного сопротивления  $h_{11}$  или меньшее значение выходной проводимости  $h_{22}$ .

Улучшить параметры транзисторов позволяют различные схемы составных транзисторов. Наибольшее распространение

получила схема Дарлингтона. В простейшем случае это соединение двух транзисторов одинаковой проводимости. Пример схемы Дарлингтона на p-n транзисторах приведен на рисунке 2.24.

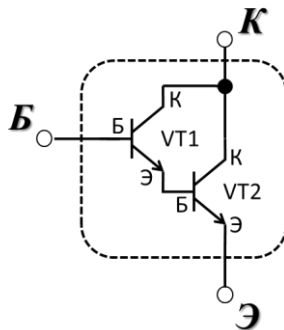


Рис. 2.24. Составной транзистор по схеме Дарлингтона

Приведенная схема эквивалентна одиночному p-n транзистору. В данной схеме ток эмиттера транзистора VT1 является током базы транзистора VT2. Ток коллектора составного транзистора определяется в основном током транзистора VT2. Основным преимуществом схемы Дарлингтона, является высокое значение коэффициента усиления по току  $h_{21}$  ( $\beta$ ), которое можно приблизительно определить как произведение коэффициентов передачи тока базы ( $h_{21}$ ) входящих в схему транзисторов:

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

Входное сопротивление составного транзистора:

$$R_{вх} = R_{вх1} + R_{вх2} (\beta_1 + 1)$$

Выходная мощность составного транзистора определяется мощностью последнего транзистора, входящего в схему:

$$P_{вых} \approx P_{вых2}$$

VT1 – качественный транзистор. VT2 – обычно мощный

В результате получается мощный транзистор с большим коэффициентом усиления

Составной транзистор является частным случаем гальванической связи.

## 2.2. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилителем мощности называют любой усилитель тока, поскольку нагрузка усилителя является низкоомный потребитель. На низкоомном сопротивлении нельзя создать большие падения напряжения, поэтому для получения большой выходной мощности усиливают ток, а не напряжения.  $P=UI=I^2R$

Усилители подразделяются: трансформаторные и без трансформаторные, однотактные и двухтактные, с однополярным и двух полярным источником питания.

### Однотактный УМ

Однотактным без трансформаторным усилителям мощности с однополярным источником питания является схема с ОК. Мы его достаточно подробно разбирали раньше.

**Однотактный усилитель мощности с трансформаторным выходом.**

Схема однотактного усилителя мощности, в котором используется режим класса А, показана на рис.2.25. В выходной цепи протекают значительные токи, поэтому вводятся ограничения на выбор величины сопротивления  $R3$  ( $R3 = 1...10$  Ом). Ввиду малой величины  $R3$  возникают трудности, связанные с применением блокировочного конденсатора  $C2$  для исключения отрицательной обратной связи по переменному току, поскольку величина  $C2$  должна быть достаточно большой (сотни тысяч мкФ). Поэтому  $C2$  не ставят в цепь эмиттера. Возникающая, при этом ООС снижает коэффициент усиления, но расширяет полосу пропускания усилителя и уменьшает нелинейные искажения в каскаде.

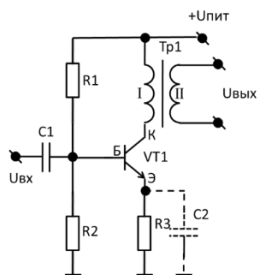


Рис. 2.25. Однотактный усилитель мощности с трансформаторным выходом



Резистор R3 – отвечает за автоматическую термостабилизацию, увеличение которого приводит к уменьшению тока коллектора, а следовательно, выходной мощности.

Усилитель работает в классе А. Тр1 – обязательно понижающий. Для того чтобы создать большую выходную мощность на Rн, необходимо создать большую мощность во вторичной обмотке трансформатора. Поскольку  $I_k U_{пит} = P_1 = P_2 = I_{вых} U_{вых}$ , то необходимо создать аналогичную мощность в первичной обмотке трансформатора. Для этого R3 выбирают  $\approx 0,1 \div 1 \Omega$ . В этом случае С2 – необязательно.

Протекание относительно большого тока в первичную обмотку трансформатора, создает магнитное поле, который намагничивает сердечник трансформатора. Для перемагничивания его переменным током тратится много энергии. Поэтому КПД усилителя около 35%

Избавится от постоянного тока в обмотках трансформатора, позволяют усилительные каскады, собранные по двухтактным схемам.

## Двухтактный трансформаторный УМ

Двухтактные УМ ввиду возможности использования режимов АВ, В, С и D характеризуются лучшими энергетическими показателями. На рисунке 2.26 приведена схема двухтактного УМ с трансформаторной связью.

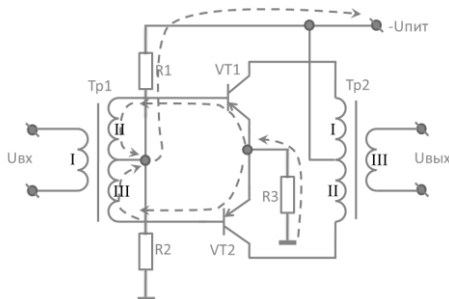
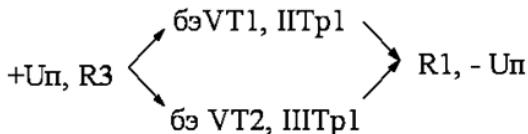


Рис. 2.26. Двухтактный трансформаторный УМ

Где  $R_1, R_2$  – делитель напряжения источника питания.  $R_3$  – автоматическая термостабилизация.  $U_{см} = U_{R2} - U_{R3}$ , Транзисторы работают в классе **В**, рабочая точка находится в начале линейного участка входной характеристики, то есть в режиме покоя оба транзистора закрыты.

Ток смещения течет по 2м параллельным ветвям



Трансформатор  $Tr_1$  – согласующий, выполняет роль фазоинверсного каскада. Имеет две симметричные вторичные обмотки.

В обмотках II и III  $Tr_1$  протекают одинаковые токи по величине, но противоположные по направлению. Создают магнитные поля уничтожающий друг друга. Несмотря на то, что в обмотках течет ток смещения - сердечник трансформатора не намагничивается. Транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  закрыты – в обмотках  $Tr_2$  – ток не течет.

По приходу положительного полупериода входного сигнала в обмотках II и III  $Tr_1$  индуцируется входной ток, который в обмотке III  $Tr_1$  совпадает с током смещения, а в обмотке II  $Tr_1$  –направлен в противоположную сторону. Ток смещения  $VT_1$  уменьшается, транзистор был закрыт, еще больше закрывается, а ток смещения  $VT_2$  увеличивается –  $VT_2$  открывается пропорционально входному сигналу.

Основной ток течет -  $+Uп, R_3$ , эк  $VT_2, III Tr_2, -Uп$ . (Рис. 2.27.)

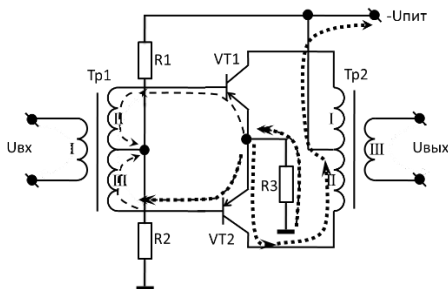


Рис. 2.27. Двухтактный трансформаторный УМ

Во вторые полупериоды входного сигнала VT2 закрывается, а VT1 открывается. Основной ток течет - +Uп, R3, эк VT2, ПТр2, -Uп

Трансформатор Тр2 – выходной. Объединяет усиленный по отдельности положительный и отрицательный полупериоды входного сигнала. Полный период входного сигнала усиливается за два такта отдельными транзисторами.

**Положительная сторона;** КПД – 78%. Меньше линейных искажений, т.к. через трансформаторы не течет постоянный ток.

**Отрицательная сторона;** тяжелый выходной трансформатор. Тр – основной источник искажений (на краях диапазона). Трансформатор не может пропустить через себя весь звуковой диапазон частот.

Избавится от тяжелого согласующего трансформатора позволяет транзисторный фазоинверсный каскад (Рис. 2.28.).

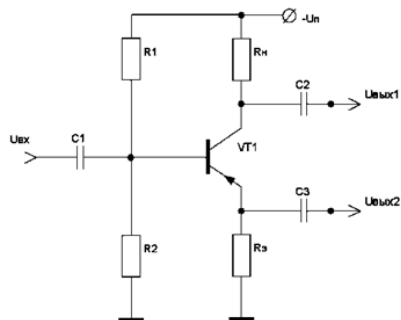


Рис. 2.28. Транзисторный фазоинверсный каскад

Это – усилитель, имеющий один вход и два взаимно – инверсных выхода. Строится усилители на основе комбинации усилителей ОЭ, ОК. По выходу 1 – это ОЭ, поворачивает фазу входного сигнала на 180°. По выходу 2 – это ОК, не поворачивает фазу. Коэффициент усиления по напряжению схема с ОК около 1. Для того что бы амплитуда выходного сигнала по выходу один (**Uвых1**) было такой же, как и на выходе два (**Uвых2**), резисторы Rк и Rэ выбирают равны по величине.

$$R_k \cong R_e$$

## Бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности

Трансформаторы имеют большие размеры и массу, высокую стоимость, большие линейные и нелинейные искажения, создают дополнительные потери мощности. Поэтому широко используются бестрансформаторные двухтактные усилители мощности, в которых транзисторы работают в режиме В либо близком к нему режиме АВ (Рис. 2.29.). Их КПД обычно составляет 78...90 %. Цепи смещения не обозначены. Схема требует фазоинверсный каскад.

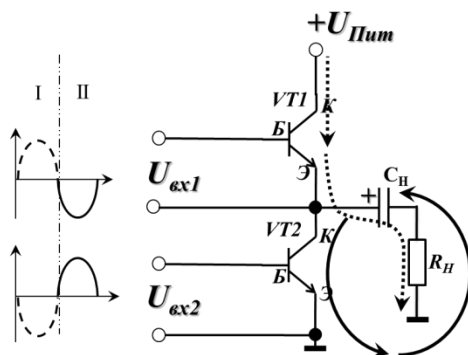


Рис. 2.29. Двухтактный УМ на транзисторах одинаковой структуры

I полупериод: на  $U_{вх1}$  подается положительное напряжение, а на отрицательное  $U_{вх2}$  -. Транзистор  $VT1$  открывается пропорционально входному сигналу, а  $VT2$  был закрыт, еще больше закрывается. Ток течет  $+U_{п}, ЭК1, C_{н}, R_{н}, -U_{п}$

II полупериод: на  $U_{вх2}$  подается положительное напряжение, а на отрицательное  $U_{вх1}$  -. Транзистор  $VT2$  открывается пропорционально входному сигналу, а  $VT1$  - закрывается. Ток течет  $+C_{н}, R_{н}, ЭК2, -C_{н}$

**Недостаток.** С ростами частоты коэффициент усиления падает поскольку уменьшается время зарядки накопительного конденсатора  $C_{н}$ . Конденсатор накапливает малое энергии и отдает малую мощность в нагрузку.

Избавиться от этого недостатка позволяет использование двухполярного питания (Рис. 2.30.).

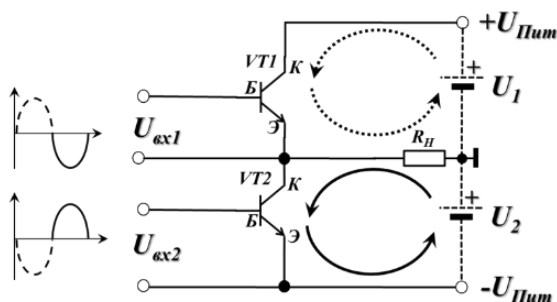


Рис. 2.30. Двухтактный УМ с двухполярным источником питания.

Отказ от накопительного конденсатора требует использования двух одинаковых источников питания.

Избавиться от инверсного каскада позволяют выходные каскады на комплементарных (взаимодополняющих) парах. Комплементарной называется пара транзисторов, имеющих близкие характеристики и параметры, но различную структуру р-р и п-р-п. Принципиальная схема каскада с двухполярным питанием, в котором транзисторы работают в режиме класса В, показана на рис. 2.31.

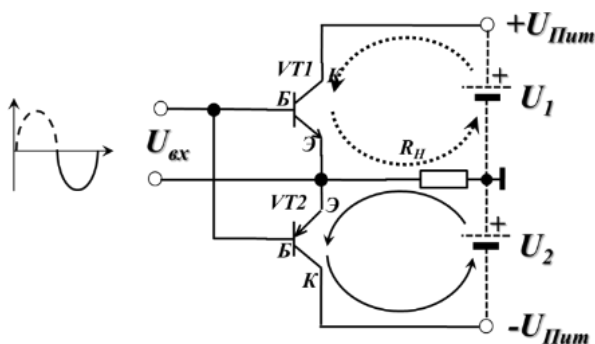


Рис. 2.31. Двухтактный УМ на комплементарных парах

Входной сигнал подают между базой и эмиттером обоих транзисторов. VT1 открывается положительным полупериодом входного сигнала, а VT2 – отрицательным.

## 2.3. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Обратная связь осуществляется подачей части  $U$  и  $I$  с выхода устройства на его вход.

Обратная связь применяется в автогенераторах, генерирующих высоко и низкочастотные колебания, очень широко используют в усилителях.

Если в автогенераторах применяется положительная обратная связь, поддерживающая колебания, то в усилителях обычно применяют отрицательную обратную связь, позволяющая уменьшить нелинейные искажения и нестабильность усилителя, а также изменить в желаемую сторону входное и выходное сопротивление.

Структурную схему усилителя с обратной связью можно представить в виде 2-х усилителей (Рис. 2.32).

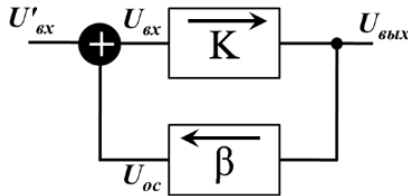


Рис. 2.32. Структурная схема усилителя с обратной связью

Верхний усилитель имеет в направлении, показанном стрелкой, коэффициент передачи напряжения  $K$ , связанный соотношением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K U_{\text{ВХ}} \quad (1).$$

Нижний усилитель служит для передачи напряжения обратной связи. Его коэффициент передачи  $\beta$  в направлении, указанном стрелкой, равен  $\beta = \frac{U_{\text{ОС}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$  или  $U_{\text{ОС}} = \beta U_{\text{ВЫХ}} \quad (2)$

Напряжение обратной связи является частью выходного напряжения усилителей.

Коэффициент  $\beta$  показывает какая часть выходного напряжения передается обратно на вход, поэтому его называют коэффициентом обратной связи. Обычно  $|\beta| \leq 1$ , поэтому вместо нижнего усилителя можно применить пассивный линейный четырехполюсник.

Напряжение на входе усилителя, охваченного обратной связью равно:

$$U_{вх} = U'_{вх} + U_{ос}$$

Отсюда:  $U'_{вх} = U_{вх} - U_{ос}$  подставим (2) и (1),

$$U'_{вх} = U_{вх} - \beta U_{вых} = U_{вх} - \beta K U_{вх} = U_{вх} (1 - \beta K)$$

Следовательно, для усилителя, охваченного обратной связью

$$K' = U_{вых} / U'_{вх} = K \cdot U_{вх} / (1 - \beta K) U_{вх} = K / (1 - \beta K)$$

Полученное соотношение, связывающее коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью, и усилителя без обратной связи, является основным соотношением в теории усилителей с обратной связью.

Если  $\beta K$  – положительная величина, вызывающая увеличение усиления, то обратную связь называют положительной.

Если  $\beta K$  – отрицательная величина, то обратная связь отрицательная, при этом коэффициент усиления с обратной связью меньше коэффициента усиления усилителя без обратной связи.

При  $\beta K = 1$  коэффициент усиления усилителя, охваченного положительной обратной связью, обратиться в  $\infty$ . Фактически это означает, что на выходе усилителя имеется напряжение при отсутствии входного напряжения, приложенного извне, т.е. усилитель само возбуждается и превращается в генератор. Другими словами: *обратная связь называется отрицательной, если часть выходного сигнала усилителя подается на его вход в противофазе.*

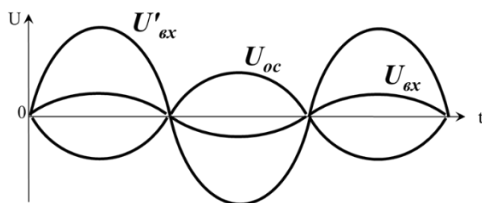


Рис. 2.33а. Отрицательная Обратная Связь.

**Положительная обратная связь** – входной сигнал и сигнал обратной связи приходят синфазно или складываются.

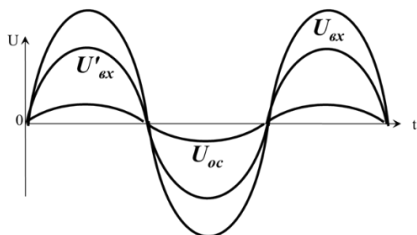


Рис. 2.336. Положительная Обратная Связь.

Из выше сказанного мы установили, что обратная связь может быть положительной и отрицательной. Цепь обратной связи может быть общей, охватывающей все или несколько каскадов усилителя, или местной, охватывающей отдельные каскады. По способу подачи обратной связи различают ОС по напряжению и ОС по току. В первом случае напряжение обратной связи пропорционально величине выходного напряжения усилителя, во втором случае - пропорционально току, протекающему через нагрузку усилителя. Помимо этого, обратная связь может подключаться на вход усилителя или последовательно, или параллельно, а сигнал сниматься с выхода либо токовый, либо напряжением. В результате получим 8 видов обратной связи (Рис. 2.34).

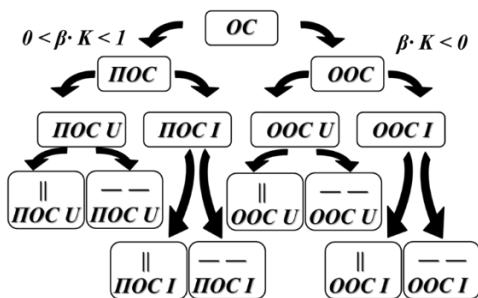


Рис. 2.34. Виды обратной связи.

Так или иначе, все виды связи используются в радиоустройствах. Однако на практике наиболее часто используют последовательную отрицательную обратную связь по току и параллельную отрицательную обратную связь по напряжению.



В одиночных усилительных каскадах с ОЭ, последовательная ООС по току, устанавливается исключением блокировочного конденсата  $C_3$  (Рис. 2.35).

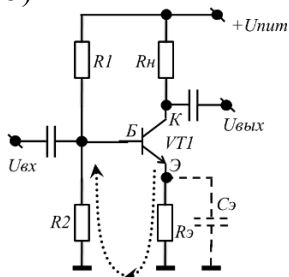


Рис. 2.35. Последовательная ООС по току.

Ток коллектора, на эмиттере резистор, создает напряжение, которое прикладывается к базе последовательно с входным.

Усилитель с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению (Рис. 2.36).

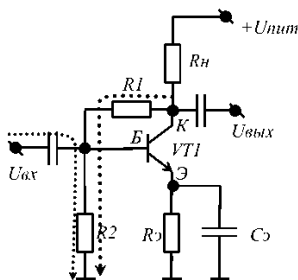


Рис.2.36. Параллельной отрицательной обратной связью по напряжению.

Выход усилителя соединен параллельно входу посредством  $R1$ . Входное напряжение ( $U_{вх}$ ) выделяется на  $R2$ , часть выходного напряжения ( $U_{ос}$ ), так же выделяется на  $R2$ . Схема с ОЭ поворачивает фазу сигнала на 180 градусов, т.е. на  $R2$  из  $U_{вх}$  вычитается  $U_{ос}$ , следовательно, организуется ООС.

Частотно – зависимая обратная связь применяется для изменения амплитудно-частотной характеристики усилителя. Одним из примеров является избирательный усилитель с двойным Т-образным мостом.

### 3. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*Электронный генератор* – это устройство, преобразующее электрическую энергию источника постоянного тока, в энергию незатухающих электрических колебаний требуемой формы, частоты и мощности.

По принципу работы различают генераторы с самовозбуждением (автогенераторы) и генераторы с внешним возбуждением, которые являются усилителями мощности высокой частоты. Электронные автогенераторы подразделяются на *автогенераторы синусоидальных (гармонических) колебаний* и автогенераторы колебаний не синусоидальной формы, которые принято называть *релаксационными (импульсными) автогенераторами*.

Наиболее распространенные схемы автогенераторов содержат усилительный элемент и колебательную систему, связанные между собой цепью положительной обратной связи (Рис.3.1).

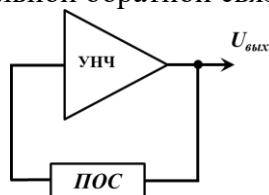


Рис.3.1. Структурная схема автогенератора.

Различают два типа автогенераторов. Это **LC** и **RC** генераторы. Любой **LC** автогенератор содержит колебательную систему (обычно колебательный контур), источник электрической энергии, за счет которого в контуре поддерживаются незатухающие колебания. Транзистор, с помощью которого регулируется подача энергии от источника в контур, и элемент обратной связи, посредством которого осуществляется подача необходимого возбуждающегося переменного напряжения из выходной цепи во входную.

### 3.1. LC ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ

Простейшая схема транзисторного генератора типа LC показана на рис. 3.2. Такая схема называется генератором с трансформаторной связью и используется обычно в диапазоне высоких частот.

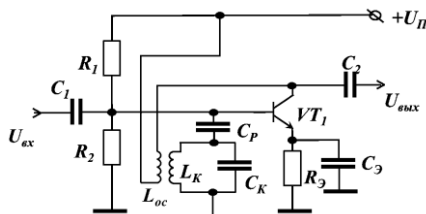


Рис.3.2. Транзисторный LC генератор.

Элементы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_э$  и  $C_э$  предназначены (так же, как и в усилителях) для обеспечения необходимого режима по постоянному току и его термостабилизации. С помощью конденсатора  $C_p$ , емкостное сопротивление которого на высокой частоте незначительно, один конец обмотки  $L_к$  соединяется с базой транзистора.

В момент включения источника питания в колебательном контуре возникают затухающие колебания. Верхним проводом колебательный контур, через разделительный конденсатор  $C_p$  соединен с базой транзистора, нижним – через блокировочный конденсатор  $C_э$  – с эмиттером. По переменному току колебательный контур включен между базой и эмиттером транзистора. Транзистор работает в классе **В** или **С**. В цепи коллектора возникают импульсы тока, которые протекают через катушку связи  $L_{oc}$ . В момент быстрого изменения тока в катушке связи, в катушку колебательного контура индуцируется ЭДС. Импульсы ЭДС до заряжают конденсатор контура до первоначального значения, в результате в контуре возникают незатухающие колебания.

Работу генератора иллюстрируют временные диаграммы на Рис.3.3.

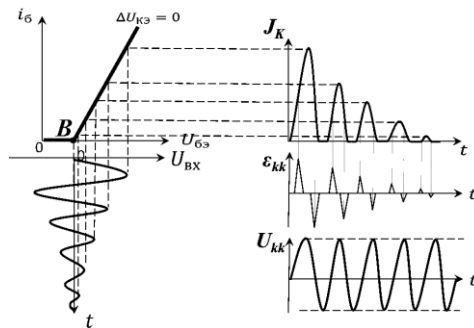


Рис. 3.3. Временные диаграммы работы LC генератора.

Незатухающие колебания в контуре установятся только при выполнении двух основных условий: баланс фаз и баланс амплитуд.

**Баланс фаз** – конденсатор колебательного контура, пополняется энергией, строго определенной промежутки времени. Не раньше не позже лишь после того, как конденсатор потерял часть энергии.

**Баланс амплитуд** - конденсатор колебательного контура, пополняется энергией строго дозировано. Сколько конденсатор потерял энергии, столько же должно восполниться, не больше, не меньше.

Недостатком такого генератора является небольшая мощность выходного сигнала, т.к. он снимается непосредственно с контура. LC генераторы высокочастотные, конденсатор  $C_K$  имеет маленькую емкость. А следовательно в нагрузку отдает маленькую мощность.

Для увеличения выходной мощности, катушки колебательного контура  $L_K$  и катушки обратной связи  $L_{oc}$ , меняют местами, а выходной сигнал снимают с коллектора транзистора (Рис.3.4).

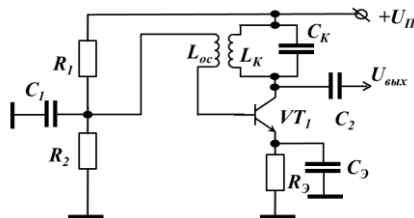


Рис. 3.4. Схема LC генератора с мощным выходом.

LC-контур включен последовательно с транзистором по отношению к источнику питания. Элементы LC-контура находятся под более высоким напряжением, что приводит к выбору конденсатора большего размера.

### 3.2. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ

Чтобы избавиться от этого недостатка и сохранить достоинства, LC-контур включают через разделительный конденсатор  $C_p$  параллельно (Рис. 3.5).

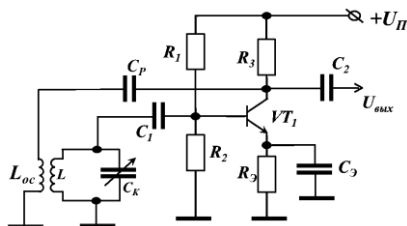


Рис. 3.5. Схема LC генератора с параллельным питанием.

Конденсатор  $C_p$  и  $C_1$  не пропускает постоянную составляющую тока в индуктивную катушку  $L_{oc}$  и  $L$  (соответственно). Такой генератор называют генератором с параллельным питанием.

Генератор с параллельным питанием избавляет от недостатка генератора с последовательным питанием и является технологически выгодной. Одна обкладка конденсатора  $C_k$  соединена с общим проводом и позволяет применять вдвойне конденсаторы для синхронного управления несколькими контурами.

Другие, достаточно широко распространенные схемы LC – генераторов, в которых напряжение ПОС снимается с части колебательного контура, то есть используется неполное включение колебательного контура. Поскольку контур в этом случае имеет три точки соединения, то схемы LC – генераторов получили название трехточечных (рис. 3.5).

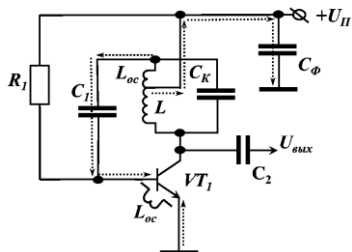


Рис. 3.5. Трехточечная схема LC генератора.

Колебательный контур данной схемы находится в коллекторной цепи, а верхняя половина контура соединена с базой  $VT_1$  через разделительный конденсатор  $C_1$  и с эмиттерами транзистора через фильтр источника питания  $C_\Phi$ . В результате колебательный контур находится в выходной цепи, а катушка обратной связи – во входной. Данный генератор обладает автоматическим балансом фаз.

### 3.3. RC – ГЕНЕРАТОР

В диапазоне звуковой частоты схему генератора можно упростить, заменой колебательного контура, RC цепочками.

Для начала вспомним, что генератор - это усилитель с положительной обратной связью. Схема с ОЭ поворачивает фазу сигнала на  $180^\circ$ , т.е. если часть выходного сигнала подать на вход, получим ООС. Для организации ПОС необходимо еще раз повернуть фазу сигнала на  $180^\circ$ . В данной схеме, обратная связь осуществляется с помощью трёх RC-цепочек.

Ток через резистор и напряжение на нем ( $I_R$  и  $U_R$ ) совпадает по фазе, ток через конденсатор и напряжение ( $I_C$  и  $U_C$ ) на нем сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .

Во всех элементах последовательной цепи ток один и тот же – **Иобщ**, а общее напряжение **Uобщ** равно векторной сумме напряжений  $U_R$  и  $U_C$  на отдельных участках. Чем больше  $X_C$  какой-либо RC- цепочки, тем больше напряжение  $U_C$  на конденсаторе и тем ближе к  $90^\circ$  сдвиг фаз между общим током **Иобщ** и общим напряжением **Uобщ**. А чем больше  $R$ , тем больше активное сопротивление всей цепи, тем меньше сдвиг фаз между

**Юбщ** и **Уобщ**. Существует частота, на которой при данном соотношении сдвиг фаз между **Юбщ** и **Уобщ** равен  $60^\circ$ . Три таких цепочки поворачивают фазу сигнала в сумме на  $180^\circ$ . На этом принципе строят RC генераторы (Рис. 3.6).

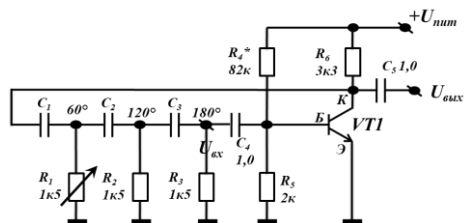


Рис. 3.6. Схема RC генератора.

### 3.4. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В устройствах автоматики и измерительных устройствах часто регистрируются значения таких величин, как мощность, угол сдвига фаз, давление, температура, световой поток и т.д. Эти электрические и неэлектрические величины во многих случаях удобно преобразовывать в медленное изменение тока или напряжения, частота которых составляет единицы или даже доли герца.

Для усиления таких медленно изменяющихся токов или напряжений необходимы усилители, полоса пропускания которых имеет нижнюю границу равную нулю (Рис. 3.7). Усилители, обладающие такими свойствами, носят названия усилителей постоянного тока (**УПТ**) независимо от того, какая из величин – ток или напряжение – подлежат усилению.

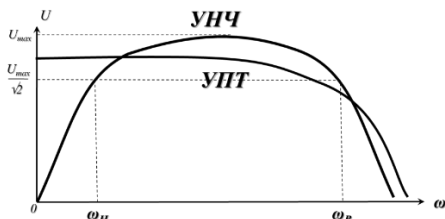


Рис. 3.7. Амплитудно - частотная характеристика УНЧ и УПТ.

Электрические сигналы, воздействующие на вход УПТ, во многих случаях малы по величине напряжения порядка долей  $\mu\text{В}$ , а токи порядка  $10^{-16}\text{А}$ . Для усиления столь слабых сигналов одного каскада обычно недостаточно, а соединение каскадов между собой сопряжено с преодолением больших трудностей. В УПТ могут быть применены трансформаторы, и разделительные конденсаторы. Поэтому единственной схемой межкаскадной связи, является гальваническая (или непосредственная) связь. Такая связь вносит в УПТ ряд специфических особенностей, затрудняющих как построение усилителя, так и его эксплуатацию.

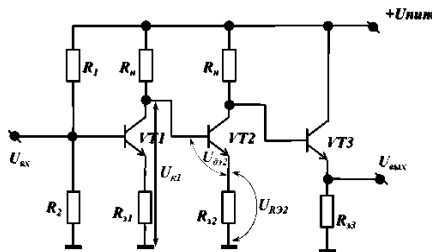


Рис. 3.8. Трех каскадный УПТ прямого усиления.

Усиление постоянного тока или напряжения можно осуществлять двумя принципиально различными методами: непосредственно по постоянному току и с предварительным преобразованием постоянного тока в переменный. В соответствии с этим УПТ делятся на два основных типа: усилители прямого усиления (Рис. 3.8) и усилители с преобразованием.

Усилительные каскады выполнены по схеме с ОЭ. Поэтому расчетные соотношения при выборе режима покоя и режима усиления, такие же, как в УНЧ.

Практическое осуществление гальванической связи затрудняется тем, что на базу следующего транзистора, кроме полезного сигнала подается постоянное напряжение коллектора предыдущего каскада, которое необходимо компенсировать.

В приведенной схеме компенсация постоянной составляющей выходного напряжения достигается с помощью резисторов ( $R_3$ ) последующего транзистора. Так сопротивление резистора  $R_{32}$  подбирается такой величины, чтобы постоянное падение



напряжения на нем было больше падения напряжения на  $R_{э1}$  на разность  $U_{бэ}$  последующего транзистора:

$$U_{э2} = U_{э1} + (U_{кэ1} - U_{бэ2})$$

Еще более сложной задачей является обеспечение высокой стабильности работы усилителя при изменениях напряжения источника питания, режимов работы транзисторов, параметров, входящих в схему элементов. Любое, даже очень медленное изменение перечисленных величин вызывают значительное изменение выходного напряжения.

Изменение выходного напряжения, не связанного с входным напряжением и обусловленные внутренними процессами в усилителе, называют дрейфом нуля усилителя (Рис. 3.9).

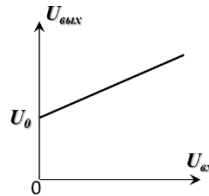


Рис. 3.9. Передаточная характеристика УПТ.

Напряжение дрейфа на выходе усилителя может оказаться одного порядка с  $U_{сиг}$  и даже больше, что приводит к недопустимым искажениям усиливаемого сигнала.

Поэтому наряду с такими методами уменьшения дрейфа, как стабилизация напряжения источника питания, применяют глубокую ООС.

Помимо этого, требование стабильности режима особенно трудновыполнимо вследствие зависимости параметров транзистора от температуры.

Температурный дрейф транзистора обусловлен изменением обратного тока коллектора  $I_{кбо}$  и коэффициента усиления по току  $\beta$ . Поэтому в схемах УПТ более целесообразно применить **кремневые транзисторы**, у которых  $I_{кбо}$  на несколько порядков меньше, чем у германиевых. *Кремниевые транзисторы имеют малые начальные коллекторные токи, поэтому главным источником дрейфа нуля остаётся температурное смещение входных характеристик, равное примерно - 2,5мВ/1°С*

(кремниевый транзистор имеет пороговое напряжение  $0,7\text{ В}$ , в то время как германий –  $0,3\text{ В}$ ; кремний выдерживает температуры около  $200^\circ\text{ С}$ , германий –  $85^\circ\text{ С}$ ).

Повышение устойчивости работы УПТ путем введения в его схему ООС не дает большого эффекта, т.к. в результате уменьшается коэффициент усиления каскадов растет их число, а следовательно требуется увеличение мощности источника питания и усложнение схемы. Поэтому основными методами устойчивости УПТ является применение *балансных (мостовых)* схем и преобразование постоянного напряжения в переменное.

### 3.5. БАЛАНСНЫЕ КАСКАДЫ УПТ

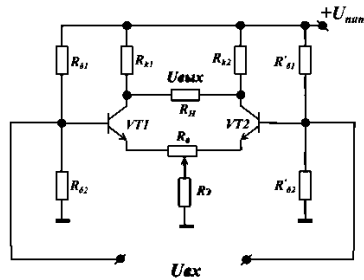


Рис. 3.10. Балансная схема УПТ.

Данная схема представляет собой мост, плечами которого являются резисторы  $R_{к1} = R_{к2}$  и внутреннее сопротивление  $VT1$  и  $VT2$ . К одной из диагоналей моста подводится напряжение источника питания, а в другую диагональ включен нагрузочный резистор  $R_n$  с которого снимается выходное напряжение.

Резисторы  $R'_{б1} = R_{б1}$  и  $R_{б2} = R'_{б2}$  входят в делители напряжения  $U_p$  и служат для выбора исходного режима работы каскадов (*выбор рабочей точки*).

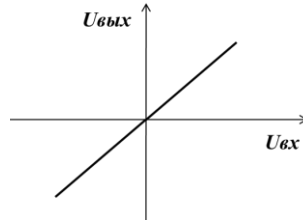


Рис. 3.11. Амплитудная характеристика балансной схемы УПТ.

Для нормальной работы схемы она должна быть строго симметричной. В этом случае в исходном состоянии мост окажется сбалансированным, а напряжение на его выходе = 0. Для обеспечения симметрии схемы и регулировки токов транзисторов в режиме покоя используется переменный резистор  $R_0$ , величина которого:  $R_0 \approx (0,01 \div 0,05) R_э$ .

На резисторе  $R_э$  создается падение напряжения за счет токов эмиттера обоих транзисторов, которое используется в качестве напряжения ООС в режиме покоя

$$U_э = (I_{э1} + I_{э2}) R_э.$$

Любая одновременно возникающая нестабильность токов транзисторов будет ослабляться за счет отрицательной связи.

При построении многокаскадных схем УПТ балансные каскады можно соединять друг с другом непосредственной связью. При этом коллекторы предыдущего каскада соединяются с базами последующих каскадов.

В некоторых случаях выходной сигнал в балансном каскаде снимается с одного из коллекторов, а выходные сигналы поступают на базы обоих транзисторов (Рис. 3.12).

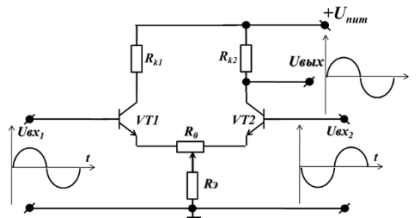


Рис. 3.12. Дифференциальный усилитель.

Такая схема имеет симметричный вход и не симметричный выход. Фазы выходного сигнала совпадают с фазами сигнала  $U_{вх1}$  и противоположны фазе сигнала  $U_{вх2}$ . Элементы схемы можно подобрать так, что выходное напряжение будет пропорционально разности входных напряжений и в идеальном случае не будет изменяться, если  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  получают равное приращение одного знака. Такой усилительный каскад называют *дифференциальным*.

### 3.6. УСИЛИТЕЛЬ ПТ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

В УПТ с преобразователем - усиливаемое напряжение (ток) преобразуются в колебания, амплитуда которых изменяется во времени пропорционально входному сигналу. Для этого усиливаемый сигнал подают на модулятор. Одновременно на вход которого поступает переменное напряжение фиксированной частоты (**300 – 1000 Гц**) от вспомогательного генератора, входящего в состав усиливающего устройства (Рис. 3.13).

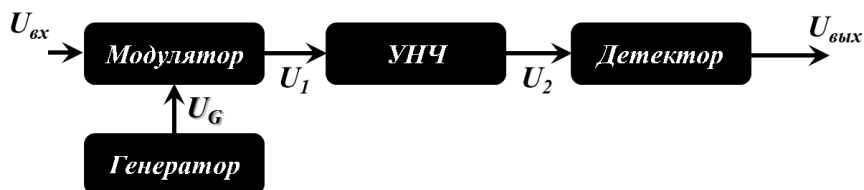


Рис. 3.13. Структурная схема УПТ с преобразователем.

Полученное в результате преобразования напряжения усиливается до нужной величины с помощью обычного усилителя переменного напряжения и подается на демодулятор (детектор), который позволяет получить из модулированных колебаний – напряжение такой же формы, которое было подано на вход усилителя (Рис. 3.14).

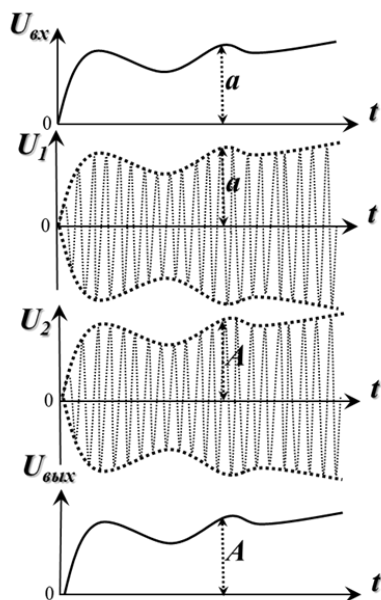


Рис. 3.14. Формы напряжения в различных точках усилителя.

### Схема диодного модулятора

Схема диодного модулятора представлена на рис.3.15.

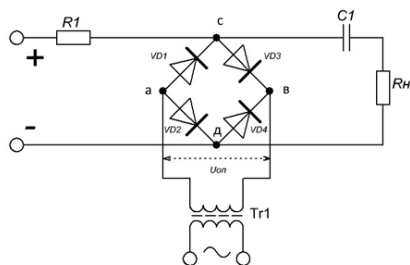


Рис. 3.15. Схема диодного модулятора.

На протяжении того полупериода изменение  $U_{оп}$ , когда потенциал точки «а» выше потенциала точки «в», все диоды моста открыты, ток от трансформатора проходит через две параллельные ветви VD1 – VD3 и VD2 – VD4.

В рассмотренную часть периода, мост - имеющий малое сопротивление  $R$  закорачивает источник сигнала и почти все напряжение  $U_{вх}$  оказывается приложенным к  $R_H$ . Напряжение между точками «с» и «д» практически равно 0.

Во вторую половину периода изменений напряжения  $U_{оп}$ , когда потенциал точки «а» ниже потенциала точки «в», все диоды моста закрыты. Конденсатор «С» заряжается от источника сигнала через резистор  $R1$ . Падение напряжения на нем очень мало и практически напряжение  $U_{сд}$ , равно входному. Таким образом, диодный мост напоминает ключ, который периодически замыкает и размыкает цепь входного сигнала.

Поскольку вольт - амперная характеристика диодов практически не начинается с нуля, диодные модуляторы начинают работать при сравнительно больших входных напряжениях (порядка  $10\text{mВ}$ ), т.е. чувствительность таких модуляторов невелика. Более высокую чувствительность (до  $1\text{Мв}$ ) имеют транзисторные модуляторы (Рис. 3.16).

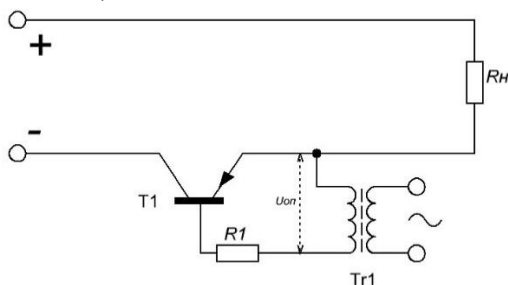


Рис. 3.16. Схема транзисторного модулятора.

## ДЕМОДУЛЯТОРЫ

В демодуляторе (детекторе) происходит операция обратная модуляции. Работа демодулятора состоит в том, что из спектра модулированного сигнала выделяется полезный сигнал. Особенностью схем демодуляторов является наличие опорного (коммутирующего) источника переменного напряжения, имеющего ту же частоту, что и переменное напряжение сигнала. Схема балансного демодулятора (Рис. 3.17).

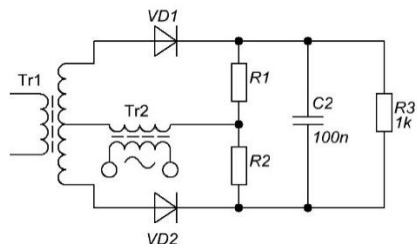


Рис. 3.17. Схема балансного демодулятора.

Усиленное переменное напряжение сигнала подается через трансформатор **Tr<sub>1</sub>** со средней точкой, а опорное напряжение – через **Tr<sub>2</sub>**.

При отсутствии входного сигнала к диодам **VD1** и **VD2** приложено опорное напряжение. Во время положительного полупериода, диоды открываются и через них проходят одинаковые импульсы тока, которые создают на **R1** и **R2** напряжения, равные по величине, но противоположные по знаку. Напряжение на выходе при этом равно нулю.

При подаче входного сигнала во вторичных обмотках трансформатора **Tr<sub>1</sub>** индуктируются равные напряжения, которые прикладываются к диодам последовательно с опорным напряжением. При положительной фазе входного сигнала, напряжение на обмотке **I** совпадает по фазе с опорным, а на обмотке **II** – находится в противофазе с ним.

Импульсы тока диода **VD1** увеличиваются, а импульсы тока диода **VD2** уменьшаются. Это приводит к увеличению напряжения на **R1** и к уменьшению его на **R2**. На выходе образуются положительные импульсы напряжения, которые сглаживаются конденсатором.

### 3.7. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

*Радиоэлектронная аппаратура (РЭА)* построена из отдельных блоков и функциональных узлов, реализованных на основе некоторой элементной базы, то есть *компонентов и элементов*.

*Компоненты* - это конструктивно законченные самостоятельные изделия. К ним относятся дискретные радиоэлементы и интегральные микросхемы (ИМС).

*Элементы* могут быть *активными* (диоды, транзисторы биполярные, транзисторы полевые) и *пассивными* (резисторы, конденсаторы и др.). И те, и другие могут быть дискретными (тогда это компоненты) или интегральными. Интегральные элементы являются неотделимыми частями микросхемы и не существуют как отдельные изделия.

Применение электронных устройств для решение все более сложных задач приводит к постоянному усложнению их электрических схем. Анализ развития электронной техники показывает, что примерно в течение 5...7 лет сложность электронных устройств повышается в 10 раз.

Такой рост сложности электронных устройств на дискретных элементах, приводит к ряду проблем:

1. снижение надежности устройства за счет большого числа элементов и электрических соединений между ними,
2. большие габариты и вес,
3. возрастание потребляемой мощности,
4. слабые возможности автоматизации производства РЭА,
5. трудность получения одинаковых параметров электронных приборов.

Стремление избавиться от этих недостатков привело к появлению и развитию микроэлектроники.

*Микроэлектроника* — это область электроники, которая занимается разработкой и применением интегральных микросхем (ИМС) и аппаратуры на основе ИМС.

ИМС — это микроэлектронное, конструктивно законченное, изделие, выполняющее определенную функцию (усиление, генерацию, логическую операцию и др.) преобразования и обработки сигналов и имеющее высокую плотностью упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов в единице объема.

При изготовлении ИМС используется групповой метод производства, при котором на одной подложке одновременно



изготавливается множество однотипных элементов или целых микросхем, что позволяет получить изделия с одинаковыми параметрами.

Процесс развития электронной техники сопровождается постоянным усложнением аппаратуры, а следовательно, ростом количества отдельных элементов, повышением требования к качеству аппаратуры. **Первое** поколение аппаратуры электронной техники возникло с появлением электронно-вакуумной лампы в **1904**г. Аппаратура первого поколения имела большое количество ламп и дискретных элементов. Совершенствование аппаратуры происходило в направлении ее миниатюризации за счет уменьшения габаритов и массы активных и пассивных элементов.

**Второе** поколение электронной техники появилось вслед за созданием в **1948** году нового активного элемента транзистора. Аппаратура этого поколения так же состояла из дискретных транзисторов и дискретных пассивных элементов.

На этом этапе были созданы микромодули, выполняемые из микроминиатюрных элементов установленных на микроплатах. Однако минимизация на основе дискретных элементов не позволила уменьшить количество элементов в аппаратуре и обеспечить более высокую надежность. Дальнейшее уменьшение габаритов, массы и потребления энергии стало невозможным.

**Третье** поколение аппаратуры начало свое существование с появлением в **1959** году нового микроэлектронного узла – полупроводниковой интегральной микросхемы, в которой активные и пассивные элементы и их соединения выполнены в виде сочетания связанных р-п – переходов в одном исходном полупроводниковом материале. В настоящее время технологический цикл позволяет подготовить одновременно несколько тысяч ИМС с количеством элементов порядка **5 000**.

Четвертое поколение – это БИС. Количество элементов в БИС достигает **50 000**

Интегральная микросхема – это устройство с высокой плотностью упаковки электрически связанных элементов, выполняющее определенную функцию и рассматриваемое как

единое целое. В зависимости от технологии изготовления ИМС подразделяются на полупроводниковые ИМС и пленочные ИМС.

В полупроводниковом ИМС все активные и пассивные элементы, а также соединения выполнены в виде сочетания неразрывно связанных *p-n*-переходов в одном полупроводниковом кристалле.

Гибридные или пленочные ИМС называют ИС, которые содержат диэлектрическую подложку (основание), все элементы на поверхности которой выполняются в виде однослойных или многослойных пленочных структур.

По характеру выполняемых функций различают аналоговые и цифровые ИСМ.

Аналоговая ИС выполняет функции преобразования и обработки электрических сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Такие ИМС применяются в качестве усилителей, генераторов гармонических колебаний, фильтров, детекторов и т.д.

Цифровая интегральная схема предназначена для преобразования и обработки электрических сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (двоичный или другой цифровой код). Цифровые ИМС называются **логическими ИМС**.

Аналоговые и цифровые ИМС разрабатываются и изготавливаются сериями. Серия ИМС - это совокупность ИМС, выполняющих различные функции, но имеющие единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного применения в радиоэлектронной аппаратуре.

Система буквенно-цифрового обозначения состоит из четырех основных элементов.

**1 элемент** – цифра, соответствующая конструктивно-технологической группе микросхем:

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

**2 –й элемент** – две цифры от 00 до 99 – указывают на порядковый номер разработки серии микросхем.

Первый и второй элементы образуют число, обозначающее серию микросхем. Микросхемы широкого применения имеют в начале обозначения букву **К**, которая входит в обозначение серии.

**3 –й элемент** – две буквы – обозначают функциональное назначение микросхем.

### **Г- генератор**

ГС – генератор синусоидальных сигналов

ГГ – генератор прямоугольных сигналов

ГФ – генераторы специальной формы

ГП – прочие генераторы

### **Д – детекторы**

ДА – амплитудные

ДС – частотные

ДИ – импульсные

ДП – прочие

### **К – коммутаторы и ключи**

КТ – тока

КН – напряжения

### **Л – логические элементы**

ЛИ – элемент И

ЛН – элемент НЕ

ЛИ – элемент ИЛИ

ЛА – элемент И-НЕ

ЛР – элемент И – ИЛИ – НЕ

ЛП – прочие

### **Х – схемы, выполняющие одновременно несколько функций**

ХА – аналого

ХЛ – цифровые

ХК – комбинированные

### **Н – наборы элементов**

НД – диод

НТ – транзисторов.

НЕ – ёмкости.

НК – комбинированные

### **П – преобразователь сигналов**

ПС – частоты,

ПД – напряжения или тока

ПА – аналого-цифровые

ПВ – цифро-аналоговые

ПР – код-код

### **Е – схемы источников вторичного питания**

ЕВ – выпрямители,

ЕМ – преобразователи,

ЕН – стабилизаторы напряжения непрерывные,

ЕК – стабилизатор напряжения импульсные.

### **Т – триггеры**

ТВ – универсальные

ТР – с раздел запуском

ТМ – с задержкой,

ТТ – счетные,

ТД – динамические,

### **У – усилители**

УВ – усилитель ВЧ;

УР - усилитель ПЧ,

УН – усилитель НЧ,

УК – широкополосные,

УИ – усилители импульсные,

УТ – усилитель постоянного тока,

УД – операционные усилители,

### **Ф – фильтры**

ФВ – РЧ,

ФН - НЧ,

ФЕ – полосовые,

### **А – формирователи**

АФ – импульсные прямоуг. фильтры,

АФ – импульсные спец. фильтры

### **Р – схемы запоминающих устройств,**

РУ - ОЗУ,

РТ - ПЗУ,

РР – ППЗУ,  
РФ – ПЗУ с ультрафиолет. стиранием и электрическим  
запоминанием,

### **И - схемы цифровых устройств**

ИР – регистры,  
ИМ – сумматоры,  
ИЕ – счетчики  
ИВ – шифраторы,  
ИД – дешифраторы,  
ИП – АЛУ,

### **В - схемы вычислительных средств**

ВЕ – микро ЭВМ,  
ВМ – микропроцессор,  
ВВ – схема управления вводом – выводом,  
ВТ – схема управления памятью,  
ВХ – микрокалькулятор,  
ВГ – контроллеры.

**4 -й элемент**– порядковый номер разработки микросхемы в данной серии.

Например: К153УД5 - Операционный усилитель в виде полупроводниковой ИМС, серия 153, порядковый номер разработки в данной серии – 5.

Иногда перед условным обозначением стоят две буквы – они указывают тип корпуса. Например:

\*\* – тип корпуса

КР – пластмассовый корпус

КМ – керамо-металлический

КЕ – металло-полимерный

Внешне микросхемы отличаются друг от друга конструкциями корпусов и выводов (Рис. 3.18).

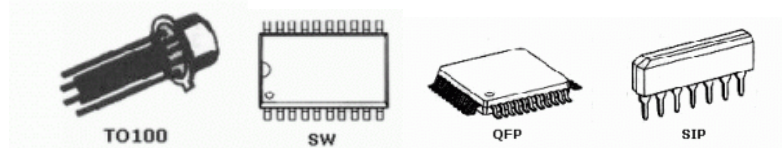


Рис. 3.18. Внешний вид ИМС.

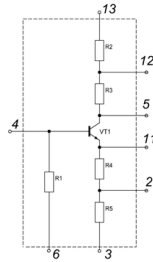


Рис. 3.19. Внутренняя начинка микросхемы К119УН1

### 3.8. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Рассматривая УПТ прямого усилителя, мы остановимся на дифференциальных усилителях.

*Дифференциальный усилитель* является основой построения операционных усилителей (ОУ) – усилителей постоянного и переменного токов с большим коэффициентом усиления, предназначенных для выполнения различных операций над аналоговыми величинами. Условно графическое обозначение (Рис. 3.20).

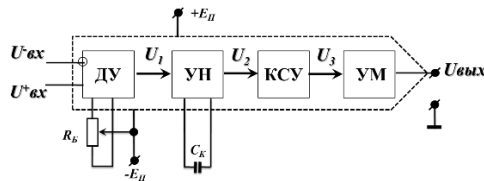


Рис. 3.20. Условно графическое обозначение дифференциального усилителя.

ОУ может иметь очень большой (свыше 100 000) коэффициент усиления по напряжению, низкое напряжение питания, мощный выход. В общем случае ОУ содержит:

1. ДУ входной дифференциальный усилитель
2. УН усилитель напряжения - служит для развязки входа-выхода усилителя и усиления сигнала дифференциального усилителя.

3. КСУ – каскад сдвига уровня. Обеспечивает сдвиг усиленного входного сигнала по постоянной составляющей, что необходимо для нормальной работы усилителя мощности.

4. УМ - Усилитель мощности - служит для согласования выходного сопротивления ОУ с низкоомной нагрузкой.

ОУ имеет несколько типов схем включения: - это инвертирующий, и не инвертирующий усилители, дифференциальный усилитель и повторитель напряжения.

**Инвертирующий усилитель** – усиливает входной сигнал и инвертирует его (переворачивает) (рис. 3.21):

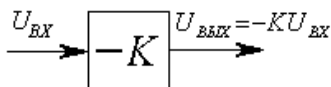


Рис. 3.21. Условное графическое обозначение инвертирующего усилителя.

Знак “-” означает, что выходной сигнал находится в противофазе с входным.

Принципиальная схема инвертирующего усилителя изображена на рисунке 3.22.

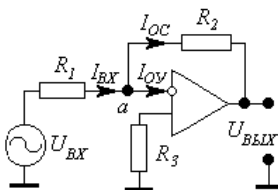


Рис. 3.22. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

Где  $R_1$ ,  $R_2$  – резисторы образуют цепь параллельно-параллельной отрицательной обратной связи.

$R_3$  – служит для устранения раз баланса ОУ за счет входных токов и выбирается из условия  $R_3 = R_1 // R_2$

$$U_{ВЫХ} = -\frac{R_2}{R_1} U_{ВХ}; \text{ отсюда } K = -\frac{R_2}{R_1}.$$

$K_u$  зависит только от величины сопротивлений обратной связи  $R_1$  и  $R_2$  и равен отношению  $R_2/R_1$ . Входное сопротивление такого усилителя =  $R_1$ .

*Не инвертирующий* усилитель не изменяет фазу входного сигнала относительно выходного и имеет большое входное сопротивление (рис. 3.23).

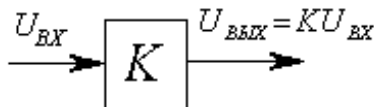


Рис. 3.23. Условное графическое обозначение не инвертирующего усилителя.

Принципиальная схема не инвертирующего усилителя изображена на рисунке 3.24.

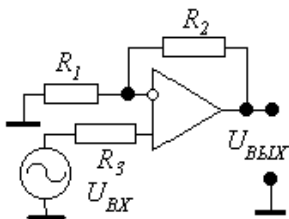


Рис. 3.24. Принципиальная схема не инвертирующего усилителя.

Здесь  $U_{ВХ} = \frac{R_1 U_{ВЫХ}}{R_1 + R_2}$ , а  $U_{ВХ}^+ = U_{ВХ}$ . Подставим записанное в исходное уравнение и, разрешив это уравнение относительно  $U_{ВЫХ}$ , получим

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \frac{R_1 + R_2}{R_1}.$$

Отсюда  $K = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ .

Если  $R_1 = \infty$ , то  $K_u = 1$ , и такой усилитель называется повторителем напряжения (Рис. 3.25.). Благодаря последовательной обратной связи по входу он имеет практически  $R_{вх} \rightarrow \infty$ , а благодаря параллельной обратной связи по выходу он имеет  $R_{вых} \rightarrow 0$ .



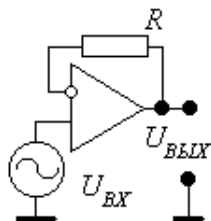


Рис. 3.25. Принципиальная схема повторителя напряжения.

**Дифференциальный (разностный)** усилитель на ОУ является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего усилителей и позволяет преобразовать сигнал плавающего источника (не имеющего связи с общей шиной) в сигнал относительно общей шины.

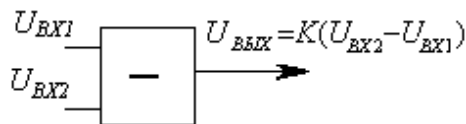


Рис. 3.26. Условное графическое обозначение дифференциального усилителя.

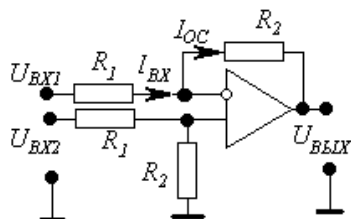


Рис. 3.27. Принципиальная схема дифференциального усилителя.

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_2}{R_1} (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}).$$

Идеальный разностный усилитель при подаче на оба входа одинаковых напряжений, т.е.  $U_{ВХ1} = U_{ВХ2}$ , имеет на выходе напряжение равное нулю. Такие входные напряжения называются синфазными  $U_{сс}$ . В общем случае синфазный сигнал представляет собой среднее значение двух входных напряжений, т.е.  $U_{сс} = \frac{U_{ВХ1} + U_{ВХ2}}{2}$ . Если  $U_{ВХ1} = -U_{ВХ2}$ , то  $U_{сс} = 0$ .

Разность двух входных напряжений называется дифференциальным сигналом  $U_{дс} = U_{вх2} - U_{вх1}$ . Поскольку усилитель разности усиливает только разностный (дифференциальный) сигнал, то такой усилитель часто называют дифференциальным усилителем.

Для уменьшения выходного напряжения смещения сопротивление резистора  $R_2$  выбирают равным сопротивлению параллельно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_{oc}$ , т.е.

$$1/R_2 = 1/R_1 + 1/R_{oc} \quad R_2 = R_1 R_{oc} / R_1 + R_{oc}$$

**Суммирующий усилитель** является частным случаем инвертирующего усилителя, на выходе которого получается инвертированный сигнал, пропорциональный алгебраической сумме входных сигналов (рис. 3.28):

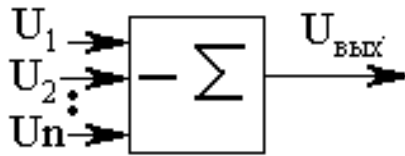


Рис. 3.28. Условное графическое обозначение суммирующего усилителя.

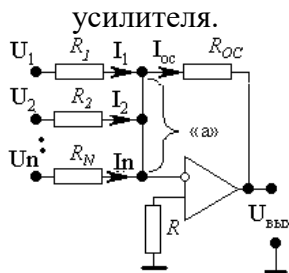


Рис. 3.29. Принципиальная схема суммирующего усилителя.

для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что

$$I_{вх} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_{oc} ,$$

Расписав каждый из токов по закону Ома:  $I_1 = U_1/R_1$ ,  $I_2 = U_2/R_2$ , ...,  $I_n = U_n/R_n$ ,  $I_{oc} = -U_{вых}/R_{oc}$ , получим выражение связывающее входные и выходное напряжения

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

Усиление каждого входного сигнала равно отклонению сопротивления  $R_{oc}$  к сопротивлению соответствующего входного резистора.

Выходное напряжение сумматора равно:

$$U_{вых} = (U_1 R_1 + U_2 R_2 + U_3 R_3) R_{oc}$$

**Интегратор.** Схема интегратора строится на основе инвертирующего усилителя путем замены  $R_{oc}$  на  $C$ . Вместо резистора обратной связи, включен конденсатор.

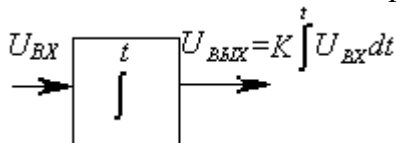


Рис. 3.30. Условное графическое обозначение интегратора.

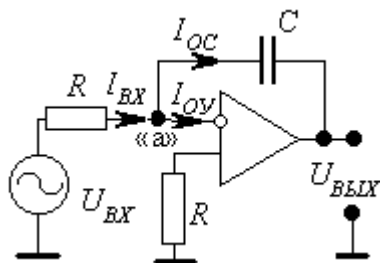


Рис. 3.31. Принципиальная схема интегратора.

Это устройство предназначено для выполнения математической операции интегрирования. В интеграторе скорость изменения  $U_{вых}$  пропорциональна напряжению на входе и обратно пропорциональна постоянной времени  $\tau = R_1 C$

$$U_{вых} = -(1/RC) \int_0^t U_{вх} dt$$

Для синусоидального входного сигнала интегратор является фильтром нижних частот, коэффициент усиления которого обратно пропорционален частоте входного сигнала.

**Дифференциатор** - предназначен для выполнения математической операции дифференцирования (рис. 3.32).

Выходное напряжение дифференциатора пропорционально скорости изменения входного напряжения.

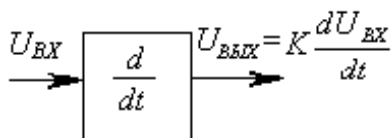


Рис. 3.32. Условное графическое обозначение дифференциатора.

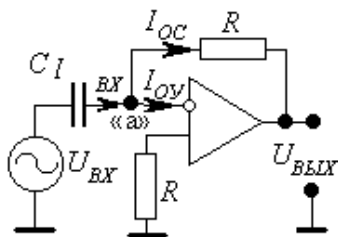


Рис. 3.33. Принципиальная схема дифференциатора.

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_1 \cdot C \cdot \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$$

При синусоидальном входном напряжении дифференциатор работает как фильтр частот, коэффициент усиления которых пропорционален частоте входного сигнала.

Недосток дифференциатора – чувствительность к шумам высокой частоты. Устраняется этот недостаток ограничением усиления на внешних частотах при помощи резистора  $R_{\text{п}}$ , включенного последовательно с емкостью  $C$ . В этом случае схема будет работать как дифференциатор до частот, меньших частоты, определяемой выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{\text{п}} C}$$

Рассмотрим несколько конкретных микросхем МС **К157УД1** – представляет собой универсальный операционный усилитель средней мощности, предназначенный для применения в аппаратуре магнитной записи и воспроизведения звука. Напряжение питания  $\pm 3\text{в} \dots \pm 20\text{в}$ ,  $I_{\text{вых. max}} = 300 \text{ мА}$ ,  $K_u = 5 \cdot 10^4$ . Частота среза АЧХ – 0,5 МГц

МС К157УД2 – двухканальный ОУ универсального назначения, обладает низким уровнем собственных шумов, большим диапазоном входных дифференциальных напряжений, имеет защиту от короткого замыкания на выходе:

$U_{п} = \pm 3в... \pm 18в$ , частота среза АХЧ – 1 МГц

УН 15 – сдвоенный УМ НЧ в номинальной выходной мощностью 2х6 W на нагрузку 2Ω (47 тр)  $U_{п} = 15 \div 28в$ .

### 3.9. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Полевые транзисторы являются разновидностью полупроводниковых, используются для усиления и генерации электрических колебаний различных частот.

Полевой транзистор - полупроводниковый прибор, в котором выходной ток управляется входным напряжением. Транзистор называется *полевым* т.к. входное напряжение создает электрическое поле, влияющее на выходной ток.

В биполярных транзисторах, существенную роль играют 2-а типа носителей электрического тока: *основные и неосновные*. В полевых транзисторах ток создается основным типом носителей, а неосновные существенную роль не играют. Управление биполярным транзистором осуществляется с помощью входного тока базы, что связано со сравнительно малым входным сопротивлением (порядка десятка Ом)

Входное сопротивление полевого транзистора порядка  $10^8 - 10^{15}$  Ом ( $10 \div 100$  МΩ)

Технология изготовления полевых транзисторов значительно проще, чем биполярных. В микросхемах они занимают значительно меньшую площадь на один транзистор и потребляют гораздо меньший ток. Это позволяет создавать большие и сверхбольшие интегральные схемы (пластинки кремния размером 4х5мм содержат несколько десятков тысяч транзисторов).

Различают 2 –а типа полевых транзисторов:

- 1.- транзисторы с управляющим *p-n* переходом,
- 2.-транзисторы с изолированным затвором.

Транзисторы с управляющим *p-n* переходом представляют собой тонкую пластинку (подложку) кремния *n* или *p* типа, содержащую два близко расположенных *p-n* перехода. На противоположных концах структуры созданы два омических контакта – *исток* и *сток* (рис. 3.34).

В кремнии *n*-типа диффузией образованы области *p-n* типа, которые соединяются электрически и служат затвором.

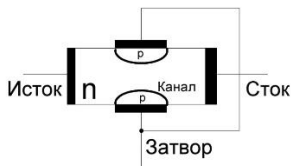


Рис. 3.34. Транзистор с управляющим *p-n* переходом.

Принцип работы полевого транзистора с управляющим переходом основан на изменении площади поперечного сечения проводящего канала.

С увеличением  $U_{зи}$  *p-n* – переходы расширяются и уменьшают ширину канала, сопротивление канала увеличивается, а ток через канал уменьшается.

При достаточно большом  $U_{зи}$  верхний и нижний *p-n* – переходы смыкаются, в этом случае транзистор полностью закрыт, а входное напряжение  $U_{зи}$  – называют *напряжением отсечки*  $U_{отс}$ .

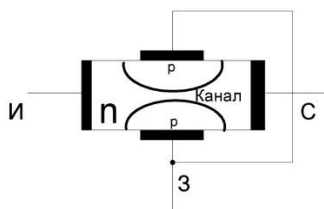


Рис. 3.35. Смыкание *p-n* – переходов.

Увеличение  $U_{си}$  приводит к перекрытию канала у стока и прекращению дальнейшего возрастания тока через транзистор.

Такое напряжение ( $U_{си}$ ) называют *напряжением перекрытия канала*, а ток – *током насыщения*.

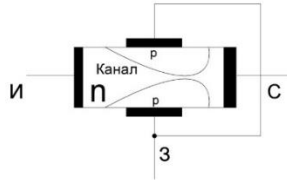


Рис. 3.36. Перекрытие канала у стока.

Существуют два вида вольт - амперных характеристик полевых транзисторов. Это: **стоко-затворная характеристика** – показывает зависимость  $I_{зи}$  от  $U_{зи}$  при  $U_{си} = const$ ,

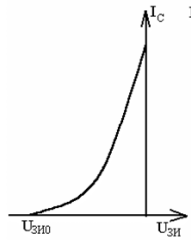


Рис. 3.37. Стоко-затворная характеристика.

**стоковая характеристика** – показывающая зависимость  $I_c$  от  $U_{си}$  при  $U_{зи} = const$ .

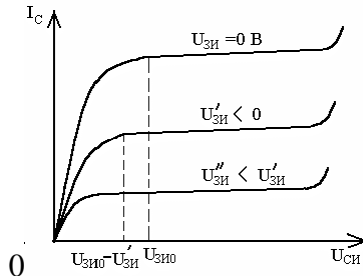


Рис. 3.38. Стоковая характеристика.

Основным параметром, используемым при расчете усилительного каскада с полевым транзистором, является статическая крутизна характеристики прямой передачи, т. е. отношение изменения тока стока к напряжению между затвором и истоком:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3И}} \Big|_{U_{СИ} = const} \quad \frac{mA}{B}$$

Дифференциальное выходное сопротивление здесь определяется как

$$R_{ВЫХ} = R_i = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C}, \text{ Ом, } \left| U_{3И} = const \right|.$$

Оно составляет, примерно десятки — сотни килоомов. Статический коэффициент усиления по напряжению  $\mu = \Delta U_{СИ} / \Delta U_{3И} = S \cdot R_i$ .

Междуэлектродные емкости затвор-исток  $C_{3И}$  затвор-сток  $C_{3С}$  и сток-исток  $C_{СИ}$ . Для маломощных транзисторов  $C_{3И}=3$  пФ,  $C_{3С}=2$  пФ и  $C_{СИ}=0,2$  пФ.

Т.е. аналогичны соответствующим определениям для биполярных транзисторов.

**Полевые транзисторы с изолированным затвором** — это транзисторы, имеющие один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала. В качестве изолирующего слоя используют или *диэлектрик* (транзисторы типа металл – диэлектрик – полупроводник или МДП – транзистор) или окисел кремния (транзисторы типа метал – окисел – полупроводник или МОП-транзистор).

В зависимости от способа образования канала МОП-транзисторы делятся на транзисторы с **индуцированным каналом** и транзисторы с **встроенным каналом** (Рис. 3.39).

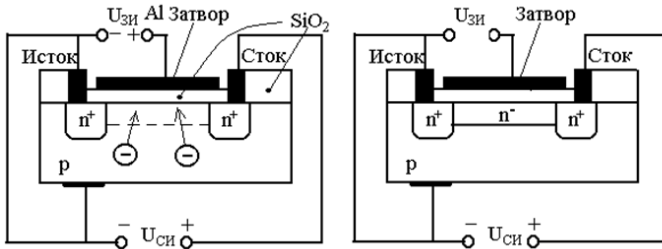


Рис. 3.39. МОП- транзисторы индуцированный и встроенным каналом.



В отсутствие  $U_3$  области истока и стока образуют два включенных навстречу диода. Поэтому приложенное напряжение  $U_{си}$  не вызывает существенного тока. При некотором  $U_3$  индуцируется (или наводится) проводящий канал за счет приложения к изолирующей прокладке дырок и  $n$ -материала подложки.

**Основные разновидности полевых транзисторов сведены в таблицу.**

Тип транзистора	с каналом $n$ – типа		с каналом $p$ – типа	
	полярность напряжений	Вольт - амперная характеристика	полярность напряжений	Вольт - амперная характеристика
с управляющим $p$ - $n$ переходом				
МОП со встроенным каналом				
МОП с индуцированным каналом				

Полевой транзистор имеет, как и биполярный транзистор три внешних вывода и может быть включен по трем различным схемам: с общим истоком (**ОИ**), общим стоком (**ОС**) и общим затвором (**ОЗ**).

Наиболее широкое применение на практике нашла схема с **ОИ** и **ОС**:

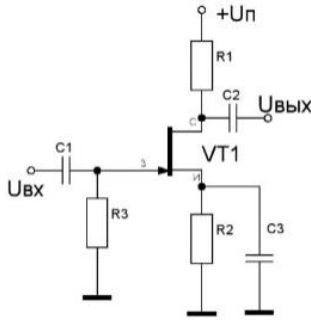


Рис. 3.40. Схема с общим истоком.

Начальное напряжение на затворе  $U_{0з}$  отрицательной полярности относительно истока, обеспечивается за счет начального тока стока.  $I_{ос}$ , проходящего через резистор  $R_u$ ;  $U_{0з} = I_{ос} \cdot R_u$  и прикладывается к затвору через  $R_3$ .

Резистор  $R_u$  кроме функции автоматического смещения на затворе выполняет функцию термостабилизации режима работы усилителей по постоянному току, стабилизируя  $I_{ос}$ . Чтобы на этом резисторе не выделялось напряжение за счет переменной составляющей тока стока, его шунтируют конденсатором  $C_u$ , емкость которого определяется из условия:

$$C_u \gg 1/(\omega R_u) / (10 \div 20).$$

Входное сопротивление усилителя на ПТ определяется резистором  $R_3$  ( $R_3 = 0,1 \div 0,03 \cdot R_{уз}$ , равному нескольким мегаоммам. Сопротивление  $R_c$  выбирают из соотношения  $R_c \approx (0,05 \div 0,15) R_i$ . Обычно  $R_c \approx 10^3 \div 10^4$  Ом и определяет выходное сопротивление усилителя  $R_{вых} = R_c$

т.е.  $R_{вых} \ll R_{вх}$ .

Коэффициент усиления определяется произведением статической крутизны характеристики и выходного сопротивления:

$$K_u = -S \cdot R_c, \quad \text{крутизна характеристик}$$

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}; \quad \Delta U_{си} = 0$$

Знак минус указывает на то, что усилительный каскад **ОИ** меняет фазу усиливаемого сигнала на  $180^\circ$ .

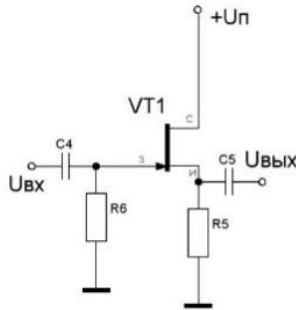


Рис. 3.41. Схема с общим стоком.

Усилитель с ОС, называют истоковым повторителем. Элементы выбираются аналогично схеме ОИ

$$R_{вх} = R_3$$

$$R_{вых} = R_u = 1/S$$

$$K_u = S \cdot R_u / 1 + SR_u$$

Для транзисторов с изолированным затвором и встроенным каналом схемы, обеспечивающие режим каскада, в основном те же, что и для ПТ с управлением р-п-переходом.

В схемах по МДП - транзисторах с индуцированным каналом, полярность напряжений на стоке и затворе относительно истока совпадают. Поэтому для задания режима используют источник питания, подавая напряжение на затвор с помощью делителя от источника питания или со стока.

### *Комбинированные усилительные каскады*

Высокое входное сопротивление, высокая радиоактивная стойкость, низкий уровень шумов, простота технологии – обуславливают широкое применение полевых транзисторов в усилительной технике. Однако усилительные каскады, использующие только ПТ, применяются крайне редко, т.к. имеют небольшой коэффициент усиления. Поэтому применяют каскады, в которых используются сочетание ПТ с биполярным – так называемые комбинированные каскады. В них наилучшим образом реализуются достоинства обоих активных элементов: высокое входное сопротивление полевых и значительное усиление биполярных транзисторов.

В комбинированных схемах возможны девять вариантов соединения ПТ и БТ.

Наиболее часто используются 4-е варианта соединения ПТ и БТ: **ОИ – ОЭ, ОС – ОЭ, ОИ – ОБ, ОС – ОК.**

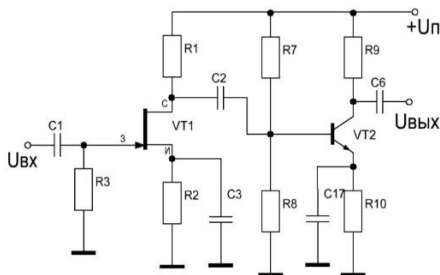


Рис. 3.42. Схема ОИ – ОЭ.

Схема ОИ – ОЭ обеспечивает максимальное усиление и большое входное сопротивление.

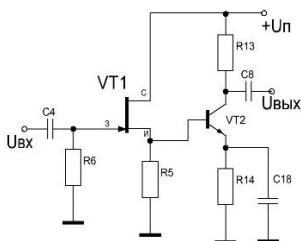


Рис. 3.43. Схема ОС – ОЭ.

Схема ОС – ОЭ – достаточно большое усиление, большое  $R_{вх}$ , высокое быстродействие и стабильность.

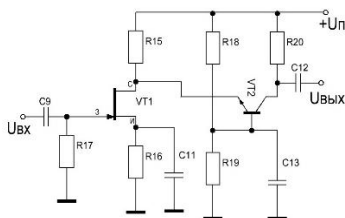


Рис. 3.44. Схема ОИ – ОБ.

Схема ОИ – ОБ – малые шумы и одно направленность сигнала, т.е. отсутствие реакции выхода на вход.

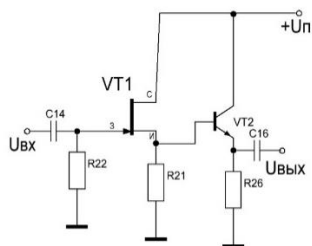


Рис. 3.43. Схема ОС – ОК.

Схема ОС – ОК - применяется как повторитель напряжения

Схема ОС – ОБ – обеспечивает одно направленность, как схема ОИ – ОБ, и синфазность входного и выходного напряжения.

Схема ОИ – ОК наряду с преобразованием входного и выходного сопротивления способна обеспечить усиление сигнала.

Комбинированные каскады, у которых ПТ в первом каскаде включен по схеме с общим затвором, используются ограниченно, т.к. в них теряется одно из главных преимуществ ПТ – высокое входное сопротивление, и потому рассматривать не будем.

## 4. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

---

Если в проводнике течет переменный электрический ток, то излучается электромагнитная волна. Такой проводник называют передающей антенной. На некотором расстоянии от него находится другой проводник, который называют приемной антенной. По линии связи — от передающей антенны к приемной — можно передавать информацию без соединительных проводов, используя электромагнитную волну. Главный процесс в такой системе беспроводной электросвязи — это излучение. И поэтому ее называют системой радиосвязи — «радио» можно перевести на русский как «связанный с излучением», это слово происходит от латинского «радиус» — «луч».

Включив в передающую антенну микрофон, а в приемную антенну — громкоговоритель (головной телефон) получим простейшую линию радиотелефонной связи (Рис. 4.1). Микрофон создаст в передающей антенне меняющийся ток, который будет излучать радиоволны. Они в свою очередь наведут ток в приемной антенне, а громкоговоритель воспроизведет с его помощью звук, копию звука с микрофона.

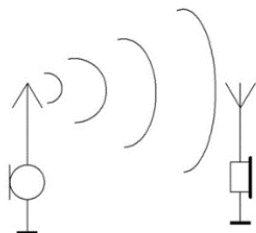


Рис. 4.1. Простейшая линия радиотелефонной связи.

Несмотря на простоту такой системы, на практике она неприменима. Чтобы передающая антенна эффективно излучала электромагнитные волны, эта антенна должна быть как можно выше, во всех случаях ее высота должна быть соизмерима с длиной волны. Это требование связано с самим механизмом излучения: трудно представить себе, чтобы громкоговоритель размером с

булавочную головку эффективно излучал звук. Хорошо, если высота антенны равна половине  $\lambda$ , неплохо, если четверти  $\lambda_{(м)} = \frac{300000}{f(\text{кГц})}$ .

Теперь подсчитаем: даже на средней звуковой - частоте 1000 Гц длина волны оказывается 300 км и, если смириться с тем, что высота антенны составляет всего 1 % от  $\lambda$  то понадобится антенна высотой 3 км. Построить такую высокую антенну непросто. А ведь нужно еще излучать и более низкие частоты, для которых антенну пришлось бы делать намного выше.

Выход такой: создавать радиоволны нужно с помощью токов высокой частоты, а каждому передатчику разрешать работать только на одной, именно за ним закрепленной частоте. Во-первых, это позволит в приемнике с помощью резонансных фильтров отделять сигнал нужной станции от всех остальных. А во-вторых, для эффективного излучения высокочастотному току понадобятся уже сравнительно небольшие антенны. Так, например, частоте 150 кГц, одной из самых низких высоких частот, применяемых для радиовещания, соответствует длина волны 2 км. Высота антенны, если принять для нее 10% от длины волны, составит 200 м.

Использование высокочастотных токов в линии беспроводной связи создает новые проблемы — на передатчике нужно как-то записать информацию в высокочастотном токе, а в приемнике нужно эту информацию извлечь.

## 4.1. МОДУЛЯЦИЯ

Модуляция: изменяя тем или иным способом высокочастотный ток, записывают в нем информацию. Включив в передающую антенну телеграфный ключ, а в приемную — приемный телеграфный аппарат, можно создать линию беспроводной радиотелеграфной связи.

Чтобы записать в высокочастотном токе речь или музыку и таким образом заставить радиоволны переносить эту информацию к приемнику, можно просто включить угольный микрофон в антенну. Так же, как его включали в цепь

постоянного тока. Под действием звуковых волн сопротивление микрофона меняется, а значит, будет меняться и амплитуда высокочастотного тока, как в свое время менялся ток в линии телефонной связи. Этот процесс называется амплитудной модуляцией. Высокочастотный ток, модулированный по амплитуде, излучает модулированные радиоволны — их интенсивность тоже меняется, повторяя все изменения звукового давления перед микрофоном. Модулированные радиоволны наводят в приемной антенне модулированный высокочастотный ток, а довольно простой электронный блок (заранее назовем его детектором) позволяет расшифровать этот ток и получить переменный ток низкой частоты, точную копию звука.

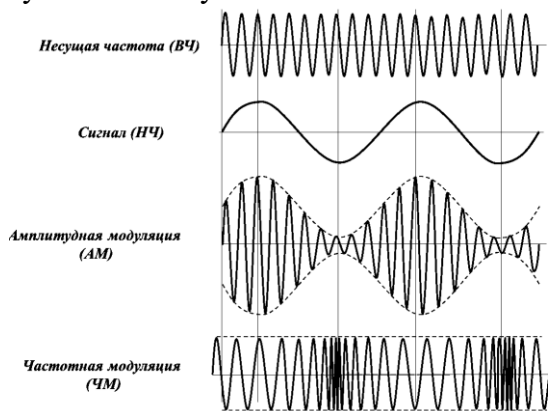


Рис. 4.2. Виды модуляции.

Амплитудная модуляция, сокращенно АМ, — это лишь один из способов зашифровывания информации в высокочастотном токе. Другой распространенный способ — частотная модуляция ЧМ. Здесь амплитуда высокочастотного тока остается неизменной, а под влиянием микрофона в сравнительно небольших пределах меняется сама частота переменного тока. Сделать это несложно: генератор высокочастотного тока в передатчике — это всегда генератор, частоту которого определяют параметры колебательного контура. Существуют несложные схемы, которые под действием микрофонного тока в небольших пределах меняют емкость контура и таким образом осуществляют частотную модуляцию.



Передатчики многоканальных линий радиосвязи часто работают в импульсном режиме, это позволяет использовать много разных способов модуляции. Например, менять амплитуду импульса (амплитудно-импульсная модуляция, АИМ), ширину импульса (широтно-импульсная модуляция, ШИМ), время его появления (фазово-импульсная модуляция, ФИМ) или отображать изменения микрофонного тока в различных комбинациях импульсов (импульсно-кодовая модуляция, ИКМ).

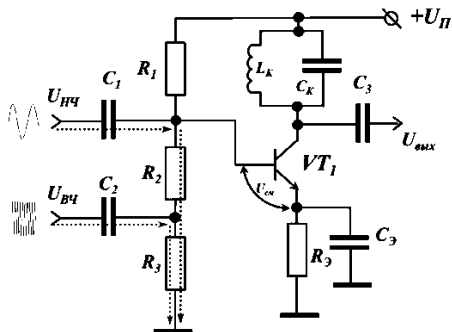


Рис. 4.3. Модулятор на биполярном транзисторе.

В модуляторе в качестве нелинейного элемента используется транзистор ( $VT_1$ ), включенный по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой транзистора является колебательный контур  $C_k, L_k$ , который используется в качестве полосового фильтра и настраивается на частоту первой гармоники несущего колебания  $\omega_0$ . Также модулятор содержит делитель напряжения  $R_1, R_2, R_3$  подающий напряжение смещения для выбора положения рабочей точки транзистора, резистор  $R_3$  обеспечивающий температурную стабилизацию рабочей точки, разделительные конденсаторы  $C_1, C_2, C_3$  разделяющие ток питания от тока сигнала. Модулирующий сигнал подается на базу транзистора. Несущее колебание подается на  $R_3$  вместе с напряжением смещения поступают на базу  $VT_1$ . Модулированный сигнал снимается с коллектора.

Достоинством данного модулятора является высокий КПД, т. к. транзистор работает в режиме отсечки коллекторного тока. Временные диаграммы сигналов схемы, поясняющие процесс

формирования АМ сигнала в режиме отсечки коллекторного тока показаны на рисунке 4.4.

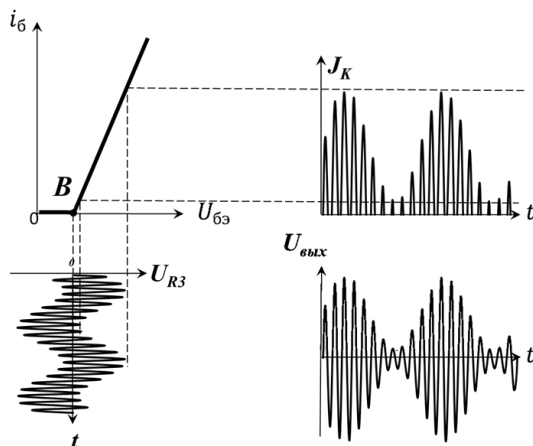


Рис. 4.4. Модулятор на биполярном транзисторе.

### Модулятор на полевом транзисторе

Модулятор (рис. 4.5) построен в виде Г-образного аттенюатора с полевым транзистором в вертикальном плече. Сопротивление транзистора изменяется управляющим сигналом. Учитывая передаточную характеристику применяемого транзистора, на его затвор необходимо подать постоянное напряжение смещения  $3\text{В}$ . Амплитуда переменной составляющей управляющего сигнала должна быть около  $1\text{В}$ . При этом получается 30%-пая модуляция. Входной сигнал может иметь амплитуду до  $1\text{В}$ .

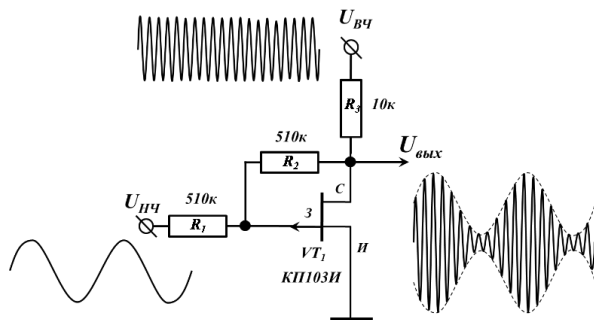


Рис. 4.5. Модуляция на полевом транзисторе.

### Частотная модуляция с помощью варикапа.

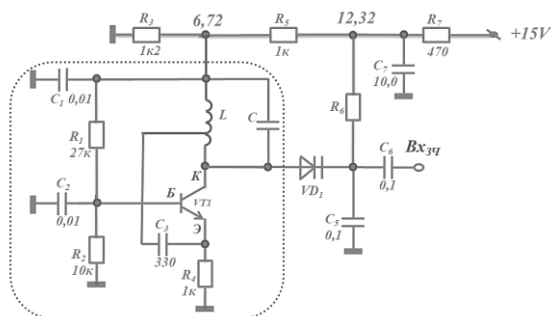


Рис. 4.6. Принципиальная схема частотного модулятора.

Изменение частоты автогенератора по закону модулирующего сигнала  $V_x$  ЗЧ осуществляется путем подачи на варикап  $VD_1$  сигнала звуковой частоты. В зависимости от уровня прикладываемого напряжения изменяется емкость варикапа  $a$ , следовательно, частота автогенератора. Таким образом формируется сигнал с частотной модуляцией (ЧМ).

## 4.2. ДЕМОДУЛЯЦИЯ

Обратный процесс модуляции называется *демодуляцией* или *детектированием*.

Естественно, что для всех этих способов модуляции существуют свои способы детектирования, извлечения информации из модулированного сигнала,

Детектирование: модулированный высокочастотный ток преобразуют таким образом, чтобы извлечь записанную в нем информацию. Слово «детектор» в переводе на русский означает «обнаружитель», оно происходит от того же корня, что и «детектив» — «сыщик».

**Детектирование:** - модулированный высокочастотный ток преобразуют таким образом, чтобы извлечь записанную из него информацию.

**Детектор – обнаружить.** Англ. detect – обнаружить

Самый из простых устройств для «обнаружения» записанной информации детекторный приемник (АМ модуляция).

### 4.3. ПРИЕМНИК ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

В приемной антенне циркулирует только наведенный радиоволнами ток высокой частоты с изменяющейся, модулированной амплитудой. А для того, чтобы получить низкочастотный ток, нужно прежде всего преобразовать спектр этого высокочастотного тока, пропустить его через нелинейный элемент. Только в результате нелинейных процессов в спектре могут появиться новые составляющие и, в частности, низкочастотный ток, который нам необходим.

Детекторный приёмник (Рис. 4.7) — самый простой, базовый вид радиоприёмника. Не имеет усилительных элементов и не нуждается в источнике электропитания — использует исключительно энергию принимаемого радиосигнала.

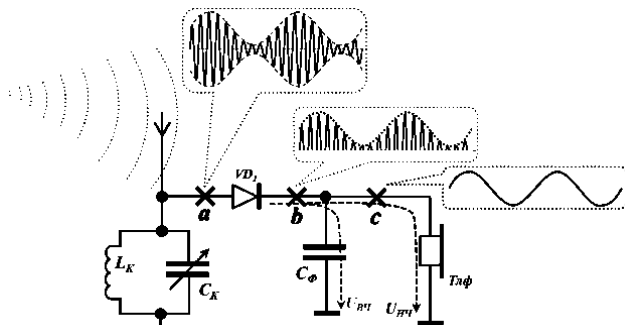


Рис. 4.7. Детекторный приёмник.

Он состоит из колебательного контура, к которому подключены антенна и заземление, и диодного (в более раннем варианте кристаллического) детектора, выполняющего демодуляцию амплитудно-модулированного сигнала. Сигнал звуковой частоты с выхода детектора, как правило, воспроизводится высокоомными наушниками. Настройка приёмника на частоту радиостанции производится изменением индуктивности контурной катушки или ёмкости конденсатора (последний может отсутствовать, его роль выполняет ёмкость антенны).

Базовым приемником можно считать так называемый приемник прямого усиления, структурная схема которого (рис. 4.8.) соответствует принципу получения звукового сообщения из радиосигнала.



Рис. 4.8. Блок-схема приёмника прямого усиления.

Приемники прямого усиления характеризуются условной формулой, в которой детектор обозначается латинской буквой V (вариант – преобразователь, детектор), а - число каскадов, образующих усилителей радио- и звуковой частоты, - соответствующими цифрами, стоящими перед этой буквой и после нее.

Например: 0 – V – 0                      Детекторный приемник.

2 – V – 1                      2 каскада УВЧ – V – 1 каскад УНЧ.

По своему назначению различают усилители **РадиоЧ** и **звуковой Ч**. Первый используют для усиления, принятых модулированных колебаний высокой частоты, прежде чем они будут про детектированы, т.е. до детектора; второй – для усиления колебаний звуковой частоты, выделенных детектором.

В приемнике прямого усиления принимаемый сигнал усиливается без какого-либо изменения несущей частоты (рис. 4.9).

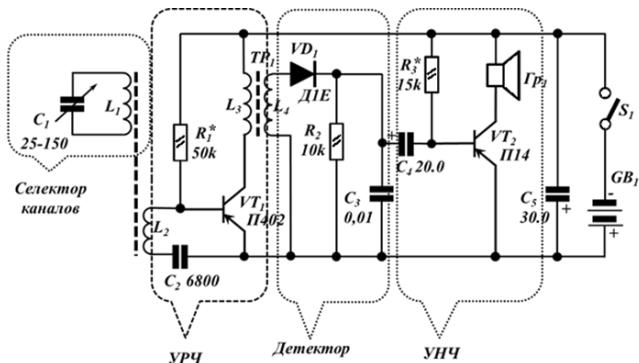


Рис. 4.9. Приёмник прямого усиления 1 – V – 1.

«+» простота схемы, малое число деталей, отсутствие искажений сигнала.

«-» плохая избирательность (количество настроенных контуров), чувствительность незначительная.

#### 4.4. Супергетеродинный приемник

Приемник супергетеродинного типа (предложен Э. Армстронгом в 1918 г.) обеспечивает очень высокую и практически одинаковую избирательность во всех диапазонах волн, а также более равномерное усиление в высокочастотном тракте. Это достигается путем введения в главный тракт приемника (рис.4.10) преобразователя частоты, состоящего из смесителя, гетеродина и усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

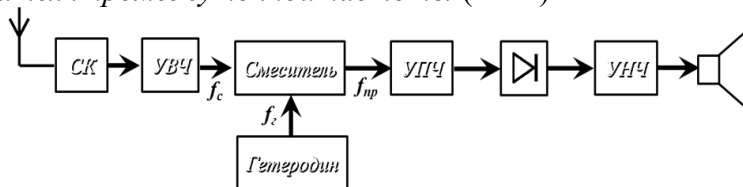


Рис. 4.10. Структурная схема супергетеродинного приемника.

Особенности: принимаемый сигнал преобразуется в единый для всех радиоприемников (ПЧ – 465 кГц), основное усиление

сигнала, избирательность сигнала происходят в УПЧ. Высокая чувствительность, коэффициент усиления несколько миллионов.

**Смеситель** – усилитель с нелинейной характеристикой на вход которой подается 2 сигнала. Первый сигнал принимаемой радиостанции, второй – от гетеродина. На выходе ставится колебательный контур, который выделяет разность 2-х частот.

$$f_{\text{пром}} = f_{\text{гетеродин}} - f_{\text{сигнала}}$$

**Гетеродин** – местный генератор ВЧ не моделированных колебаний.

**УПЧ** – резонансный усилитель, настроенный на  $f = 456 \text{ кГц}$ .

Супергетеродин по сравнению с приемником прямого усиления обладает значительно лучшей чувствительностью и селективностью, что обеспечивает ему прием большего числа радиовещательных станций и лучшую отстройку их одной от другой. Эти характерные для супергетеродинного приемника качества проще, чем на несущей частоте радиостанции, добиться необходимого устойчивого усиления принятого сигнала и значительного ослабления помех со стороны соседних по частоте станций благодаря применению нескольких резонансных колебательных контуров.

### Детектор ЧМ сигналов

Наиболее распространенными методами детектирования ЧМ колебаний, являются методы, основанные на преобразовании исходного ЧМ колебания в АМ или ФМ колебание с последующим амплитудным или фазовым детектированием соответственно. Для этого преобразования могут использоваться любые цепи с линейно изменяющейся АЧХ, например, LC-контур, расстроенный относительно частоты ЧМ сигнала так, что середина левого или правого ската его АЧХ совпадает с несущей частотой сигнала. Упрощенная схема и диаграммы работы ЧМ-детектора с такой цепью приведены на рис. 4.11.

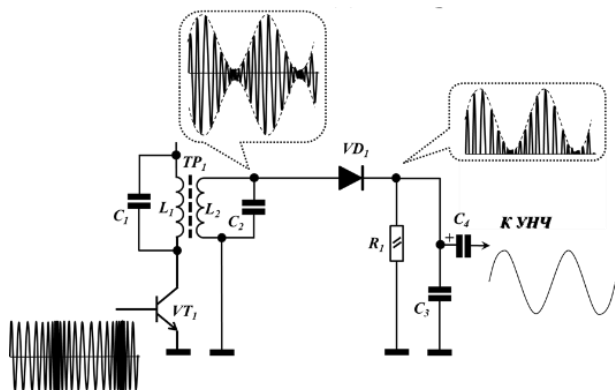


Рис. 4.11. Частотные детекторы с амплитудным преобразованием

Для улучшения характеристик детектора вместо одиночного контура может использоваться сбалансированная пара LC-контуров (рис. 4.12). Детектор содержит два резонансных контура, два диода и два фильтра НЧ, выполненных на RC-цепочках. Резонансные контуры несколько расстроены относительно несущей частоты ЧМ сигнала.

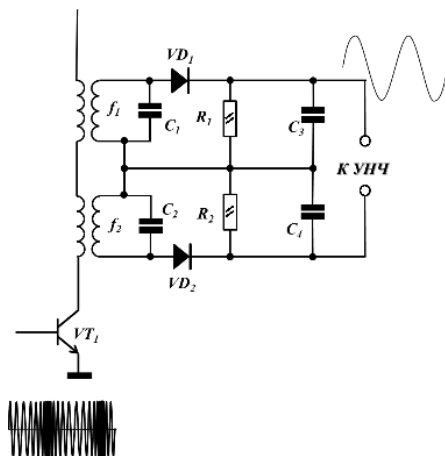


Рис. 4.12. Упрощенная схема ЧМ-детектора с двумя контурами.

Контурсы ЧД настроены на частоты  $f_1$  и  $f_2$  расположенные симметрично по обе стороны от центральной частоты. В результате выходное напряжение изменяется пропорционально частоте модулированных колебаний.



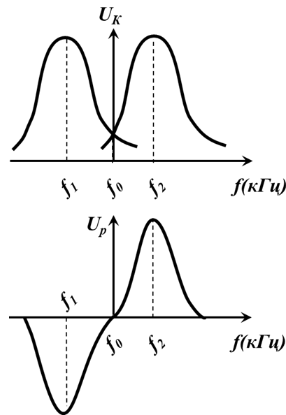


Рис. 4.13. Диаграммы, поясняющие работу ЧМ-детектора с двумя контурами.

Автоматическая регулировка усиления, — процесс, при котором выходной сигнал некоторого устройства, как правило электронного усилителя, автоматически поддерживается постоянным по некоторому параметру (например, амплитуде простого сигнала или мощности сложного сигнала), независимо от амплитуды (мощности) входного сигнала (рис. 4.14).

**APУ** - применяется для поддержания уровня сигнала на выходе приемника при больших и быстрых изменениях уровня сигнала на входе.

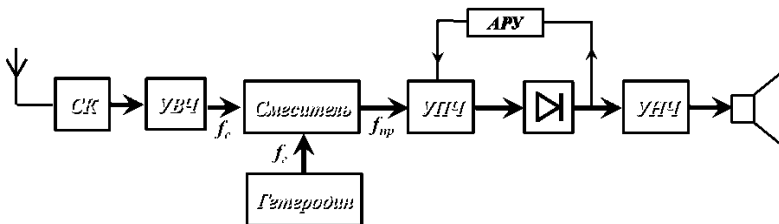


Рис. 4.14. Структурная схема приемника с обратной АРУ.

Изменения уровня сигнала на входе приемника появляются при изменении расстояния между источником излучения и приемным устройством при изменении условий распространения радиоволн

(магнитные бури, погодные условия); при интерференции радиоволн, пришедших в точку приема по разным путям и т.д.

В бытовых приемниках применяется система обратной АРУ, в которой регулирующее напряжение вырабатывается выпрямителем выходного напряжения УПЧ и подается для регулировки усиления или коэффициента передачи предшествующих выпрямителю каскадов.

В первом случае изменяется постоянная составляющая тока эмиттера приводят к изменению коэффициента усиления каскада.

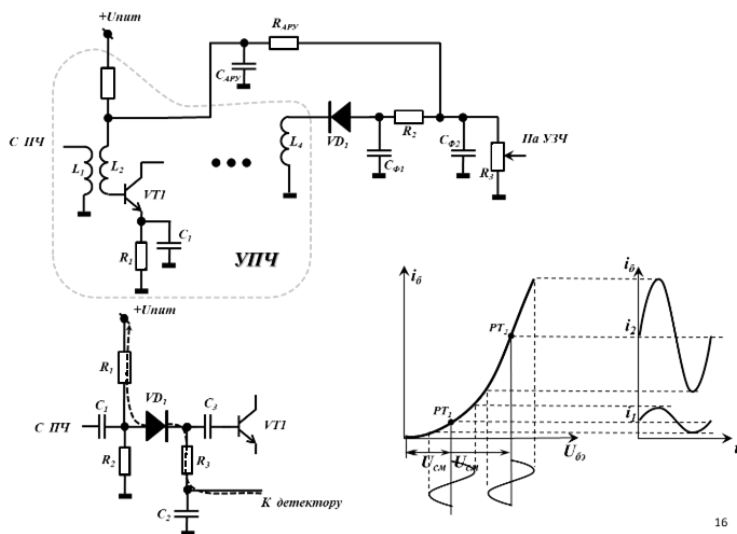


Рис. 4.15. Функциональная схема и диаграммы АРУ.

Схема АРУ, использующая изменение величины межкаскадной связи, строится на основе изменения коэффициента передачи в управляемом делителе напряжения, одно из сопротивлений которого образовано диодом.

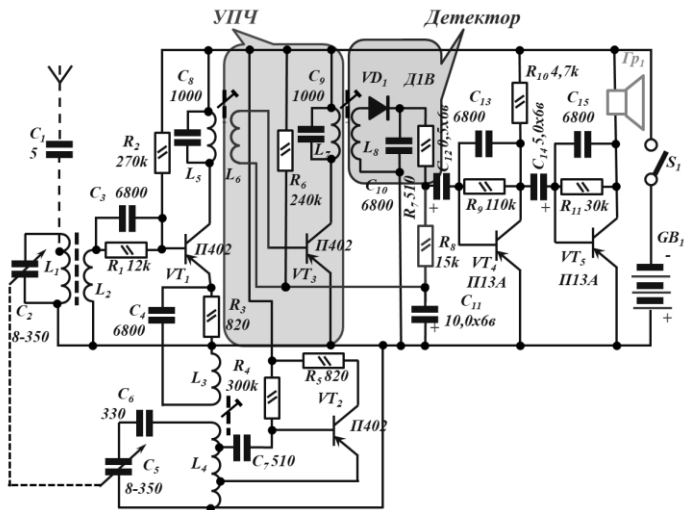


Рис. 4.16. Супергетеродинный приемник на пяти транзисторах.

Ток составляющей высокой частоты после детектора  $VD_1$  проходит через конденсатор  $C_{10}$  и катушку  $L_8$ . Путь тока составляющей звуковой частоты лежит через сопротивления  $R_7$  и конденсатор  $C_{12}$ . Нагрузкой детектора по звуковой частоте следует считать входное сопротивление транзистора  $VT_4$ . Ток постоянной составляющей протекает через сопротивления  $R_7$  и  $R_8$ , катушку  $L_6$ , переход база — эмиттер транзистора  $VT_3$ , корпус приемника. Эта составляющая используется в системе АРУ (автоматическая регулировка усиления). Назначение АРУ заключается в том, чтобы так регулировать усиление сигнала, что громкость приема различных радиостанций становится примерно одинаковой. Это достигается тем, что сигналы близких и мощных радиостанций усиливаются слабее, а отдаленных радиостанций — сильнее. АРУ работает следующим образом. Ток смещения транзистора  $VT_3$  проходит от положительного полюса источника питания, через переход эмиттер — база этого транзистора, катушку  $L_6$ , сопротивление  $R_8$  к отрицательному полюсу источника питания. Этот ток, как известно, определяет величину тока коллекторной цепи. Ранее было сказано, что при малых токах коллекторной цепи коэффициент усиления транзистора уменьшается. Следовательно,

уменьшая или увеличивая этот ток, можно в известных пределах регулировать степень усиления сигнала с помощью транзистора  $VT_3$ . Это и используется в рассматриваемой схеме АРУ. Ток постоянной составляющей продетектированного сигнала протекает через транзистор от базы к эмиттеру, т. е. в противоположном направлении по отношению к току смещения, который протекает от эмиттера к базе, следовательно, результирующее смещение на базе будет определяться этими токами. Так как токи имеют взаимно противоположное направление, то результирующий ток равен их разности. При поступлении сильного сигнала увеличивается постоянная составляющая продетектированного сигнала. Она уменьшает общий ток смещения транзистора, что приводит к уменьшению коллекторного тока, и усиление сигнала уменьшается. При поступлении слабого сигнала постоянная составляющая, наоборот, имеет незначительную величину, при которой ток смещения на базе почти не изменяется и близок к максимальному. Ток коллекторной цепи при этом также максимален, и усиление сигнала наибольшее.

### Автоматическая подстройка частоты (АПЧ)

АПЧ позволяет устранить расстройку приемника, вызванную нестабильностью частоты гетеродина.

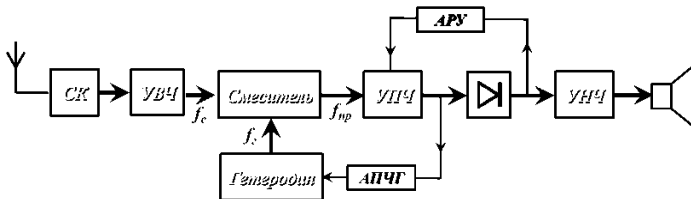


Рис. 4.17. Структурная схема приемника с АПЧ

Наиболее часто система АПЧ применяется в приемниках с диапазоном УКВ, поскольку абсолютные уходы частоты гетеродина в этом диапазоне весьма значительны. В диапазоне КВ при сильных замираниях сигнала система АПЧ может перестроить приемник на другую станцию.

Система АПЧ работает следующим образом (Рис. 4.18.). Если разность частоты гетеродина и сигнала не равна ПЧ приемника, вырабатывается соответствующее управляющее напряжение, воздействующее на частоту гетеродина, и изменяет ее так, чтобы эта разность приблизилась к ПЧ.

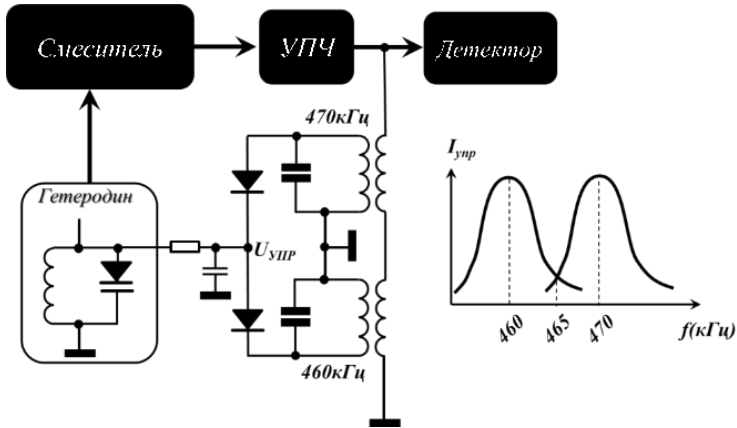


Рис. 4.18. Схема системы АПЧ

## 4.5. ПРИНЦИП ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Любую картинку, которую мы видим, можно представить себе, как сложную мозаику из мельчайших светящихся точек, определенным образом расположенных в пространстве.

В современных системах передачи изображения, таких, как телевидение или фототелеграф, картинка передается по одной линии связи. Информация о яркости элементов изображения передается поочередно.

Передающая телевизионная трубка: большое количество фотоэлементов, поочередно включаемых электронным лучом — иконоскопа. Ее основа (Рис. 4.19.) — мозаичный фотокатод, пластинка, покрытая мельчайшими светочувствительными крупинками, каждая из которых фактически представляет собой микроскопический фотоэлемент. Картинка, которую нужно превратить в серию электрических сигналов, с помощью объектива проектируется на светочувствительную мозаику фотокатода. При этом каждая крупинка-фотоэлемент получает свою порцию света и, как полагается фотоэлементу, создает свою электродвижущую силу, пропорциональную освещенности: чем больше света падает на крупинку-фотоэлемент, тем большую ЭДС она вырабатывает. В итоге на фотокатode создается невидимая электрическая картинка, повторяющая картинку световую. Электронный луч, двигаясь по фотокатоду от одной его точки к другой выбивает из каждой крупинке - фотокатода вторичные электроны. Количество вторичных электронов, выбитых с какого-либо участка фотокатода, зависит от того, насколько интенсивно этот участок освещен. Именно вторичные электроны, частично отбиваясь на сопротивление нагрузки, создают в нем ток, пропорциональный освещенности той или иной точки фотокатода.

В электронно-лучевой трубке формирование и отклонение электронного луча осуществляется электрическими или магнитными полями.

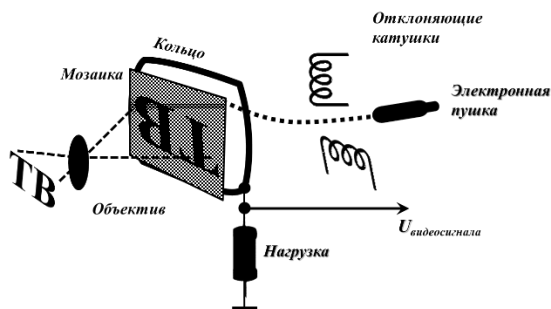


Рис. 4.19. Передающая телевизионная трубка.

Отклонение луча в пространстве осуществляется с помощью магнитных полей. В телевизионных системах производится строчная развертка изображения: луч строку за строкой прочерчивает экран в горизонтальном направлении, постепенно смещаясь вниз. Чтобы перемещать электронный луч, достаточно иметь две системы отклонения — горизонтальную и вертикальную. Первую из них называют строчной разверткой, вторую — кадровой разверткой. Магнитное отклонение луча осуществляется расположенными вне трубки отклоняющими катушками: меняя в них ток, меняют и магнитное поле, отклоняющее электронный луч.

Для отклонения луча в комплекте с трубкой согласованно работают два генератора — кадровой и строчной. Первый из них дает меняющееся напряжение, которое сравнительно медленно сдвигает луч сверху вниз, второй дает меняющееся напряжение, которое заставляет луч сравнительно быстро двигаться справа налево, прочерчивать строку за строкой. Чтобы луч двигался равномерно необходимо, чтобы к отклоняющим пластинам подводилось пилообразное, то есть равномерно нарастающее, напряжение.

Во время обратного хода луч может внести путаницу, вторично попадая на одни и те же точки светочувствительного катода. Чтобы этого не случилось, на время обратного хода луч убирают, подав запирающее напряжение на управляющий электрод.

Приемная трубка (кинескоп): электронный луч прочерчивает люминофорный экран, создает в разных точках свечение различной яркости.

В кино смена кадров происходит 24 раза в секунду, почти такая же частота — 25 кадров в секунду — принята и для телевидения. В телевидении для того, чтобы уменьшить мелькания картинки, передаются не целые кадры, а полукадры и сменяют они друг друга в два раза чаще. Сначала, например, передаются все четные строки (первый полукадр), потом все нечетные (второй полукадр) и так далее. При этом число полных кадров остается таким же, как в кино (то есть 25 кадров в секунду), а картинка меняется в два раза чаще (50 раз в секунду), что как раз и уменьшает мелькания экрана.

С увеличением числа строк возрастает четкость картинки, однако одновременно сильно расширяется спектр телевизионного сигнала. В разных странах существуют разные телевизионные стандарты, выбрано разное число строк телевизионного раstra. В Великобритании, например, 405 строк, в США и Канаде — 525 строк, во Франции — 819 строк. В России, Венгрии, Польше, ГДР, Чехословакии, Болгарии и многих других странах стандартом установлено деление кадра на 625 строк.

Повышение четкости, увеличение числа строк сопровождается расширением спектра телевизионного сигнала.

Спектр телевизионного сигнала не остается постоянным, в процессе передачи он меняется и зависит от того, какая картинка, какое изображение в данное время передается. Чем мельче детали картинки, тем выше частота телевизионного сигнала.

Будем считать, что нижняя граница спектра начинается с нуля и попробуем определить, чему же равна наивысшая частота спектра, его верхняя частотная граница. Чтобы подсчитать эту наивысшую частоту, представим себе, что передается картинка в виде шахматной доски с мельчайшими клеточками, размер каждой клеточки равен высоте строки. Расчет будем вести для нашего стандарта, то есть для кадра, разделенного на 625 строк. Если бы кадр был квадратным, то на нем разместилось бы  $625 \times 625 \approx 390000$  клеточек. А поскольку кадр продолговатый,



соотношение его сторон по стандарту равно 4:3, то клеточек будет больше, то есть примерно 520000.

Это значит, что по мере развертки такого изображения уровень сигнала на выходе иконоскопа будет меняться 520 000 раз. Если предположить, что черным клеточкам соответствует один положительный полупериод телевизионного сигнала, а белым — отрицательный и что луч иконоскопа обегает этот кадр за 1 сек, то окажется, что телевизионный сигнал имеет частоту 260 кГц. В действительности за 1 сек. передается не один кадр, а 25, и максимальная частота оказывается еще в 25 раз выше, то есть примерно составляет 6 МГц (рис. 4.20).

Из расчета видно, что с увеличением числа строк резко возрастает высшая частота спектра, а это влечет за собой дополнительные трудности в усилении и преобразовании телевизионного сигнала и увеличение полосы частот, которую должен занимать в эфире передатчик.

Для нормальной модуляции нужно, чтобы несущая частота радиопередатчика была бы по крайней мере в несколько раз выше, чем максимальная модулирующая частота. Это значит, что для передачи видеосигнала нужен передатчик с несущей частотой в несколько десятков мегагерц, то есть передатчик, работающий на ультракоротких волнах.

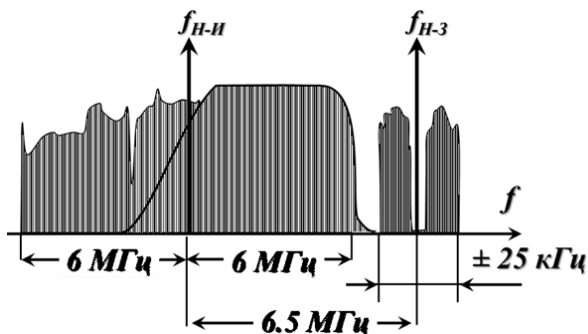


Рис. 4.20. Спектр телевизионного сигнала.

Чтобы уменьшить полосу частот, занимаемую телепередатчиком, одну из его боковых полос в антенну не пускают, и в эфир излучается только одна боковая полоса частот.

Одновременно с видеосигналом на близкой к нему частоте передается звуковое сопровождение, причем для улучшения качества звука — с частотной модуляцией (рис. 4.21).

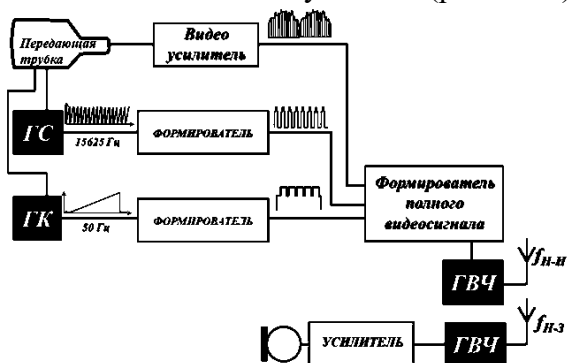


Рис. 4.21. Формирование телевизионного сигнала.

Основные узлы телевизора — преобразователь частоты с переключением каналов, усилитель ПЧ, детекторы звука и изображения, видео усилитель, усилитель НЧ, генераторы строчной и кадровой развертки, системы синхронизации и питания. Когда-то телевизионные приемники строились по разным схемам, были и приемники прямого усиления, и сдвоенные супергетеродины с двумя самостоятельными каналами промежуточной частоты — для звукового сигнала и сигнала изображения. Все современные телевизоры строятся по так называемой схеме одноканального приема, которая очень упрощенно показана на рисунке 4.22.

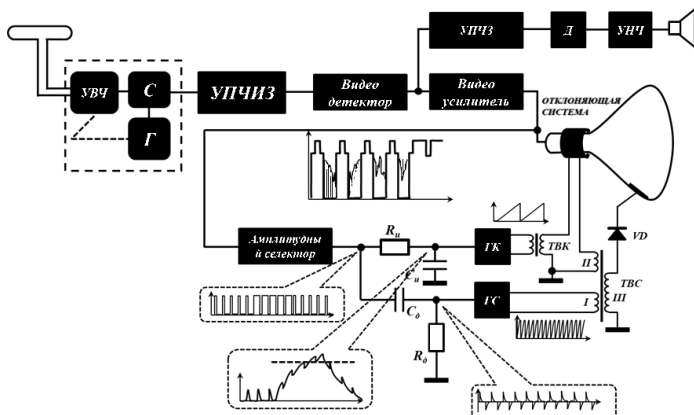


Рис. 4.22. Упрощенная блок-схема телевизионного приемника черно белого изображения.

Первый каскад телевизора — усилитель ВЧ, второй — преобразователь частоты. Оба каскада находятся в едином блоке, переключателе телевизионных каналов ПТК, (некоторые его образцы назывались переключателем телевизионных программ ПТП).

В последние годы вместо ПТК используют, как их называют, селекторы каналов — СКМ (метровый диапазон) и СКД (дециметровый диапазон).

Высокочастотный сигнал, принимаемый антенной, поступает в селектор каналов. Все современные телеприемники собраны по супергетеродинной схеме. Поэтому СК содержит УВЧ, гетеродин и смеситель. С вывода «СК» сигнал промежуточной частоты поступает на вход УПЧИ, где он усиливается.

После преобразователя в телевизоре получается сигнал промежуточной частоты, причем в телевизоре частота эта весьма высокая —  $38 \text{ МГц}$  (несущая), — а усилитель ПЧ пропускает очень широкую полосу частот—около  $7 \text{ МГц}$ . В этой полосе оказываются и видеосигнал, и звуковой сигнал. После усилителя ПЧ весь сигнал промежуточной частоты целиком поступает на нормальный амплитудный детектор (видеодетектор). Здесь из высокочастотного модулированного сигнала выделяется сам видеосигнал, который подается на видео

усилитель, а с него прямо на управляющий электрод кинескопа и меняет яркость свечения различных точек люминофорного экрана по мере того, как электронный луч движется по этому экрану.

Что же касается звука, то для него прием идет по схеме с двойным преобразованием частоты — вторым преобразователем здесь по совместительству работает сам видеодетектор, в нем рождается сигнал второй промежуточной частоты звука (6,5 МГц). На выходе ВД образуются биения с разностью частот 6,5 мГц, которые подаются на вход УМЧЗ, усиливаются и поступают на частотный детектор, выделяют звуковой сигнал низкой частоты. УНЧ усиливает его по напряжению и мощности.

Генераторы развертки, которые дают пилообразные напряжения каждый своей частоты — кадровый (ГК) 50 Гц, строчный (ГС) — 15625 Гц. Через отклоняющие обмотки современных кинескопов нужно пропускать значительный ток, поэтому каждый блок развертки содержит два каскада — собственно генератор (мультивибратор или чаще блокинг-генератор) и усилитель на сравнительно мощном транзисторе.

От усилителя строчной развертки требуется некоторая дополнительная мощность — он по совместительству используется еще и для получения высокого напряжения, которое подается на второй анод кинескопа.

В усилителе строчной развертки имеется выходной трансформатор (трансформатор выходной строчный, сокращенно ТВС), с одной из его обмоток пилообразное напряжение подводится к отклоняющим катушкам. В строчном трансформаторе есть повышающая обмотка, с которой напряжение подается на выпрямитель, а с него через фильтр на второй анод кинескопа. Именно благодаря высокой скорости изменения тока во время обратного хода, на этой повышающей обмотке, имеющей всего несколько сот витков, получается напряжение в полтора — два десятка киловольт, и сам строчный трансформатор представляет собой сравнительно небольшую деталь.

Чтобы электронный луч в кинескопе двигался в такт с лучом в передающей трубке, в телевизионный сигнал подмешивают импульсы синхронизации - кадровые и строчные. В телевизоре эти импульсы выделяют и направляют к генераторам развертки. Синхронизирующие импульсы навязывают генераторам свой ритм, и именно таким образом достигается идеальное согласование разверток изображения на передатчике и в приемнике. Чтобы синхронизирующие импульсы не попадали на экран, не портили изображения, их спаривают с гасящими импульсами, которые вводятся в видеосигнал на момент обратного хода луча и с помощью которых гасится электронный луч (уровень гасящих импульсов выше уровня черного; они попросту запирают кинескоп, прерывают электронный луч на время его обратного хода). Чтобы за время кадрового синхронизирующего импульса не сбилась частота генератора строчной развертки, в кадровый синхроимпульс врезают несколько строчных. Именно строгая последовательность синхроимпульсов обеспечивает точное попадание на свои места строчек четных и нечетных полукадров.

Амплитудный селектор (разделитель) синхроимпульсов. Транзистор, к входу которого подводится весь видеосигнал, надежно закрыт постоянным положительным смещением, он открывается только в момент появления синхроимпульсов; только они создают ток в коллекторной цепи и напряжение на нагрузке. Здесь же в коллекторной цепи происходит отделение кадровых синхроимпульсов от строчных. Кадровые импульсы выделяет так называемая интегрирующая цепочка  $R_{II}C_{II}$ ; ее конденсатор  $C_{II}$  заряжают все импульсы коллекторного напряжения, но только длительные кадровые импульсы успевают зарядить его до сравнительно большого напряжения  $U_k$ . Строчные импульсы выделяет дифференцирующая цепочка  $R_dC_d$ ; по ее нагрузочному резистору  $R_d$  ток идет только в момент заряда конденсатора  $C_d$ , то есть только в момент изменения напряжения на коллекторе. Поэтому одинаковые импульсы зарядного тока, а значит, и одинаковые импульсы напряжения  $U_c$  появляются и под действием

основных импульсов строчной синхронизации, и под действием строчных импульсов, врезанных в кадровый импульс.

Кадровые СИ через интегральную цепочку поступают в ГКР, который вырабатывает пилообразное напряжение, подаваемое через ТВК на отклоняющие системы, для управления электрическим лучом по вертикале.

Строчные СИ через дифференциальную цепочку поступают в ГСР, где формируется пилообразное напряжение, подаваемое на ТВС. С вторичной обмотки ТВС напряжение подается на строчные отклонения системы для управления электрическим лучом по горизонтали, и через высоковольтный выпрямитель – на питание анода кинескопа.

#### 4.6. ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Используя люминофоры красного, синего и зеленого свечения и передав по телевизионному каналу информацию об окраске объекта, можно воспроизвести многоцветную картинку.

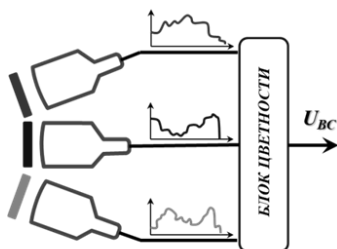


Рис. 4.23. Передающая телевизионная трубка цветного изображения.

Выделение трех составляющих цветов производится с помощью светофильтров передающего устройства следующим образом:

После преобразования в блоке цветности (БЦ), получают яркостной сигнал (такой же, какой получился бы с одной черно-белой трубкой) и 2 цветоразностных сигнала. Яркостной сигнал передается на приемное устройство с помощью амплитудной модуляции.

Недостаточную информацию о зеленом цвете получают на месте приема путем обратного преобразования.

Любой цвет радуги можно получить, смешивая в определенной пропорции краски трех основных цветов — красного, синего и зеленого.

Передав по каналам связи три составляющие многоцветного объекта — красную, синюю и зеленую, а затем в месте приема сложив их на общем экране, можно получить цветное телевизионное изображение. Иногда, например, создаются три совершенно одинаковых телевизионных канала, для одновременной передачи трех составляющих цветной картинки. Или по очереди передаются три кадра — красный, синий и зеленый.

Само сложение трех картинок на общем экране тоже можно осуществить по-разному. Например, взяв за основу масочный кинескоп, в котором три электронных луча одновременно рисуют три совмещенные друг с другом картинки трех основных цветов.

В 60-е годы в СССР и Европе велась работа по сравнению нескольких систем цветного телевидения. Выбор производился из американской NTSC, французской SECAM и немецкой PAL.

**NTSC** (National Television System Committee – национальный комитет телевизионных систем); **Secam** (Sequential a mema're – последовательная с памятью функции); **Pal** (Phase Alternation line – со строчно-переменной фазой)

Во всех этих системах используется широкополосный яростный сигнал, а добавочная цветная информация передается на под несущей (под несущих), расположенной в спектре яркостного сигнала. Различие заключается в способах модуляции под несущей.

В США, Японии и на американском континенте принята для вещания цветная система NTSC, в ФРГ – PAL, в СССР и во Франции с 1 октября 1967 года введена советско-французская система SECAM – III.

Блок схема цветного телевизора отличается от блок-схем чёрно-белого телевизора тем, что в него добавлен блок цветности и монохромный кинескоп заменен на цветной.

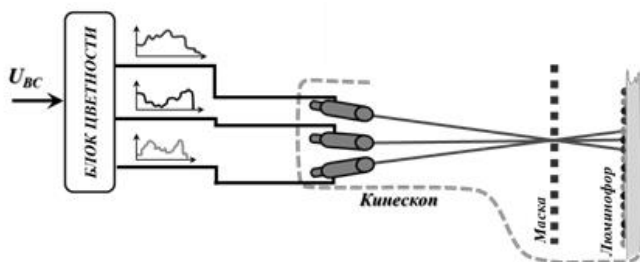


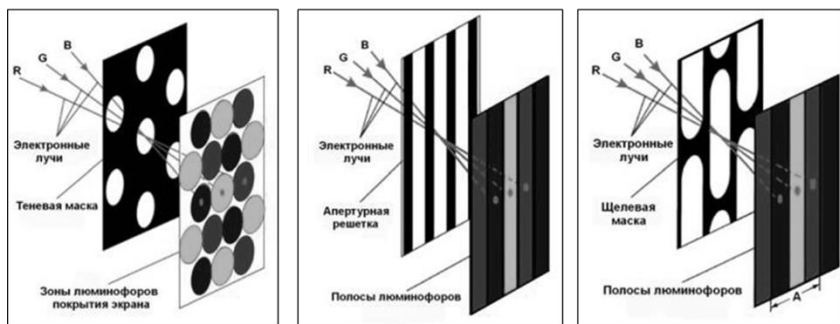
Рис. 4.24. Дополнительные элементы телевизионных приемников цветного изображения.

### *Цветные кинескопы*

В большинстве промышленных цветных телеприемниках применяют трехлучевые трубки с теневой маской и однолучевой кинескоп с цветоделительной сетки.

Различают трубки хроматрон и трубки с сигнальным штриховым импульсом.

#### *ЭЛТ с апертурной решеткой*



*ЭЛТ с теневой маской*

*ЭЛТ с щелевой маской*

Рис. 4.24. Разновидности цветных кинескопов.

На мозаичном экране этого кинескопа примерно полтора миллиона мельчайших (диаметр меньше 0,3 мм) точек трех разных сортов люминофоров - с красным, синим и зеленым свечением, примерно по пятьсот тысяч точек каждого цвета. Люминофорные



точки расположены в строгом порядке, тройками, место каждой точки на экране выдерживается с точностью до 0,005 мм. Перед экраном — тонкая (толщина 0,15 мм) стальная маска, и в ней столько же мельчайших дырочек, сколько люминофорных троек на экране, то есть около пятисот тысяч.

В масочном кинескопе три электронных луча, их одновременно перемещает общая отклоняющая система, но током каждого луча можно управлять в отдельности. Все три луча попадают на экран, только пройдя через отверстие в маске. А поскольку лучи приходят к маске под разными углами, то и отверстие они тоже проходят под разными углами и попадают в разные точки экрана. В масочном кинескопе все рассчитано так, чтобы каждый луч попал на люминофорные точки только одного цвета. Поэтому один луч рисует только красную картинку, второй — только синюю, третий — только зеленую. А на электроды, управляющие током этих лучей, соответственно подаются три разных сигнала — один несет информацию о красной составляющей картинки, второй о синей, третий о зеленой. В итоге на экране «одна в другой» появляются три картинки трех основных цветов, а так как точечная структура экрана издали незаметна, то эти картинки сливаются в одну многоцветную.

Сигналы цветности вписывают в спектр черно-белого видеосигнала, практически не ухудшая этим основного изображения: на экране черно-белого телевизора из-за сигналов цветности создается едва заметная мелкая рябь.

В мире существует несколько совместимых систем цветного телевидения. По основной своей идее все они одинаковы, главное различие в способах записывания информации в сигналах цветности. В нашей стране цветное телевидение развивается на основе советско-французской системы СЕКАМ, в которой сигналы цветности передаются по очереди, через строку. В приемнике один из сигналов попадает на линию задержки и, двигаясь по ней, дожидается прихода второго сигнала. У черно-белого и цветного телевизоров много общих узлов, различия появляются только после детектора, когда начинается выделение и переработка сигналов цветности. В целом же цветной телевизор намного сложнее черно-

белого по своей схеме, по технологии обработки электрических сигналов.

В цветном телевизоре сигналы цветности вместе с основным черно-белым сигналом сложным образом преобразуются, и в итоге восстанавливаются три исходных цветовых сигнала, в которых заключена информация о красной, синей и зеленой составляющих цветной картинке. Эти три сигнала подаются на три управляющих электрода цветного кинескопа.

В трубки с сигнальным штрихованным экраном, люминофор наносят вертикально, полосками. Все три луча движутся в одной плоскости и зажигают большую поверхность люминофорных покрытий, яркость картинке возрастает.

## 5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Источником питания называют устройство, которое предназначено для снабжения электрических схем электроэнергией. Обычно, для питания электрических схем требуется постоянное стабилизированное напряжение. Именно от стабильности напряжения питания зависит точность и надежность работы электрических схем.



Рис. 5.1. Структурная схема источника питания.

Первичным источником электроэнергии является переменное напряжение 220В, 50Гц.

1) SW – выключатель питания, рассчитывается на ток, превышающий ток нагрузки в 5 – 10 раз.

2) C – конденсатор, включенный параллельно выключателю, предназначен для защиты контактов выключателя от обгорания в момент выключения.

3) Стабилизатор переменного напряжения – предназначен для стабилизации амплитуды переменного напряжения. Он уменьшает изменение амплитуды переменного напряжения ПИЭЭ и тем самым улучшает работу следующих за ним блоков.

4) Силовой трансформатор – преобразует амплитуду переменного напряжения до необходимой величины и обеспечивает гальваническую развязку между первичным источником электрической энергии и нагрузкой. Трансформатор выбирается из противоречивых условий: обеспечение максимального тока в нагрузке, минимальных потерь и геометрических размеров. Для снижения размеров и веса трансформатора питающее напряжение 50 Гц преобразуют в переменное напряжение высокой частоты. При работе трансформатора на высоких частотах его необходимо экранировать металлическим кожухом. Если требуется получить

несколько разных напряжений, то вторичная обмотка транзистора может состоять из нескольких обмоток.

7. Выпрямитель осуществляет преобразование переменного напряжения в выпрямленное (постоянное по знаку).

8. Сглаживающий фильтр предназначен для снижения пульсации выпрямленного напряжения.

9. Стабилизатор постоянного напряжения - служит для поддержания постоянного напряжения на заданном уровне, при изменении сопротивления нагрузки или амплитуды питающего напряжения.

10. Нагрузка – потребитель электрической энергии.

11. Защита – отключает напряжение на нагрузке, если ток нагрузки больше допустимой величины  $I_{нагр} > I_{н \max}$  или напряжение на нагрузке больше допустимого  $U_{нагр} > U_{н \max}$ .

Основной характеристикой источника питания является его внешняя, выходная характеристика или нагрузочная характеристика -  $U_{вых} = f(I_{вых})$ . Идеальный источник питания имеет  $R_{вых} \rightarrow 0$ .

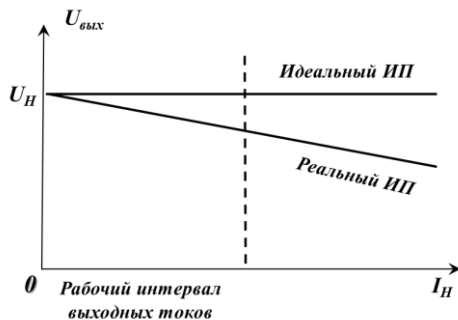


Рис. 5.2. Внешняя характеристика источника питания.

Реально выходное сопротивление рассчитывается из выражения:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}}$$

## 5.1. ВЫПРЯМИТЕЛИ

Основные параметры:

1. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int^T U(t) dt$$

2. Коэффициент пульсации:  $K_{пл} = U_{m1}/U_0$ , где  $U_{m1}$  - амплитуда первой гармоники напряжения пульсаций.

У идеального выпрямителя коэффициент пульсации равен нулю, но такого не существует.

В зависимости от числа полупериодов, используемых при выпрямлении, различают следующие выпрямители:

1. **Однофазный однополупериодный выпрямитель** (рис.5.3).

Принцип его работы основан на односторонней проводимости диода VD.

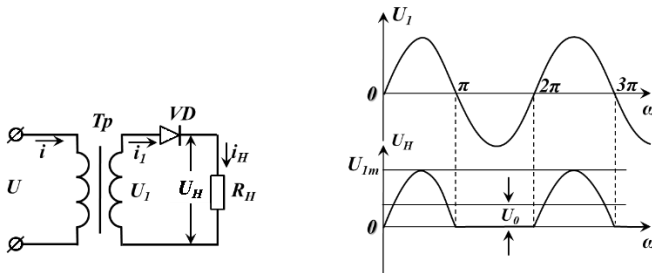


Рис. 5.3. Однополупериодный выпрямитель и диаграммы его работы.

Среднее значение напряжения за период при однополупериодном выпрямлении составляет:

$$U_0 = \frac{U_{1m}}{\pi} = \frac{U_{1m}}{1,57} \approx 0,318 U_{1m}.$$

Отсюда, коэффициент пульсаций  $K_{пл} = U_{1m1}/U_0 = 1,57$ , где  $U_{1m1} = U_{1m}/2$ , где  $U_{1m1}$  - амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке. Таким образом, коэффициент пульсаций велик, что является главным недостатком данной схемы.

Диод выбирается из следующих соотношений:

$I_{н.макс} < I_{ДОП}$ ;  $U_{ОБР.ДОП} > U_{1m}$ , где  $I_{ДОП}$  – максимально допустимый ток диода,  $I_{н.макс}$  – максимальный ток нагрузки,  $U_{ОБР.ДОП}$  – максимально допустимое напряжение на диоде.

Такие выпрямители находят ограниченное применение в маломощных устройствах т.к. характеризуются плохим использованием трансформатора (через трансформатор протекает постоянная составляющая тока, что вызывает его подмагничивание и приводит к необходимости увеличивать его габаритные размеры) и большим значением коэффициента пульсаций.

## 2. Двухполупериодные выпрямители (рис. 5.4).

а) Двухполупериодная мостовая схема.

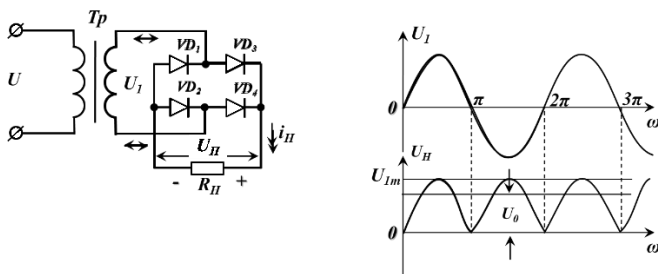


Рис. 5.4. Мостовая схема выпрямителя и диаграммы его работы.

Эту схему иногда называют однофазной мостовой. Она получила наиболее широкое распространение. Ее основу составляет диодный мост, состоящий из четырех диодов. Среднее значение напряжения за период при двухполупериодном выпрямлении составляет:

$$U_0 = \frac{2U_{1m}}{\pi} = \frac{U_{1m}}{1,57} \approx 0,636U_{1m}.$$

Отсюда, коэффициент пульсаций  $K_{пл} = U_{1m1}/U_0 = 0,67$ , где  $U_{1m1} = U_{1m}/2$ , где  $U_{1m1}$  – амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке. Малое значение коэффициента пульсаций является преимуществом данной схемы.

Диоды мостовой схемы выбираются также как в предыдущей схеме:

$I_{н.маx} < I_{доп}$ ;  $U_{обр.доп} > U_{1m}$ , где  $I_{доп}$  – максимально допустимый ток диода,  $I_{н.маx}$  – максимальный ток нагрузки,  $U_{обр.доп}$  – максимально допустимое напряжение на диоде.

В таком выпрямителе отсутствует подмагничивание трансформатора постоянным током – это его достоинство, а недостатком является большое число диодов, что приводит к увеличенному падению напряжения на выпрямителе. Поэтому такие выпрямители в основном применяются при выпрямлении высоких напряжений (более 5В).

б) Двухфазный двухполупериодный выпрямитель. Схема состоит из двух диодов и трансформатора со средней точкой. Диоды схемы проводят ток поочередно, каждый в течение одного полупериода.

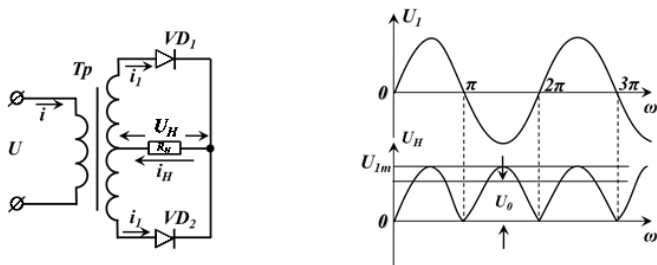


Рис. 5.5. Двухполупериодная схема выпрямителя и диаграммы его работы.

Диоды выбираются из следующих соотношений:

$I_{н.маx} < I_{доп}$ ;  $U_{обр.доп} > 2U_{1m}$ , где  $I_{доп}$  – максимально допустимый ток диода,  $I_{н.маx}$  – максимальный ток нагрузки,  $U_{обр.доп}$  – максимально допустимое напряжение на диоде.

Двухфазный двухполупериодный выпрямитель применяется в источниках питания с небольшим напряжением. Он по сравнению с однофазным мостовым выпрямителем позволяет уменьшить вдвое число диодов и тем самым понизить потери напряжения на выпрямителе.

Выпрямители без сглаживающих фильтров применяются сравнительно редко, лишь там, где пульсации напряжения на нагрузке не существенны.

## 5.2. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Выпрямленное напряжение имеет существенные пульсации, поэтому для их уменьшения необходимо использовать сглаживающие фильтры.

Основные параметры:

$$\text{Коэффициент сглаживания } K_C = \frac{K_{\text{ПЛ.ВХ}}}{K_{\text{ПЛ.ВЫХ}}} = \frac{U_{1\text{м.ВХ}}}{U_{1\text{м.ВЫХ}}},$$

где  $K_{\text{ПЛ.ВХ}}$  и  $K_{\text{ПЛ.ВЫХ}}$  – коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра.

В простейшем случае для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения используется конденсатор  $C$  с большей емкостью, который включается параллельно нагрузке (рис.5.6.).

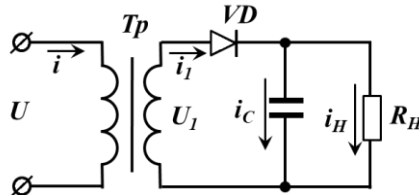


Рис. 5.6. Емкостной сглаживающий фильтр.

Для емкостного фильтра, у которого вход и выход фактически совпадают под  $K_{\text{ПЛ.ВХ}}$  и  $K_{\text{ПЛ.ВЫХ}}$  понимают коэффициенты пульсаций до и после подключения фильтра.



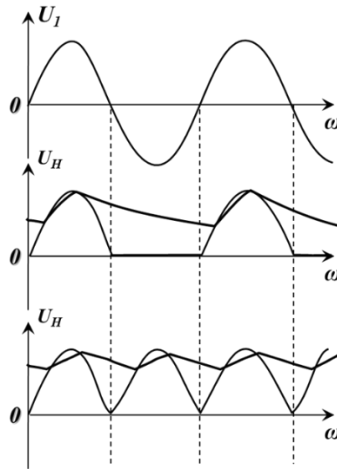


Рис. 5.7. Временные диаграммы работы емкостного фильтра.

На практике широко используют и следующие типы фильтров: RC, RL, LC типа Г и П – образные.

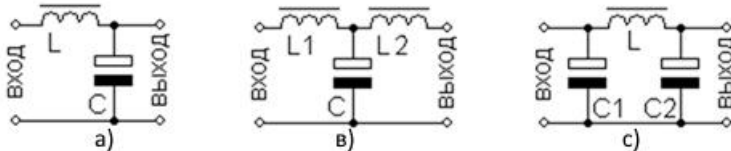


Рис. 5.8. LC-фильтры. а) Г-образный. в) Т-образный. с) П-образный.

Наилучшее сглаживание обеспечивает П-образный LC-фильтр. Наличие дросселя L фильтра утяжеляет конструкцию источника питания.

Стабилизаторы постоянного напряжения, это устройства, которые должны поддерживать постоянным выходное напряжение при изменении постоянного напряжения на входе или при изменении тока нагрузки. Основным параметром является коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ , который показывает во сколько раз относительное изменение на выходе меньше относительного изменения на входе.

$$K_{ст} = (\Delta U_{вх} / U_{0вх}) / (\Delta U_{вых} / U_{0вых}) = K_0 / K_{\Delta}$$

где  $K_0 = U_{0\text{ВЫХ}} / U_{0\text{ВХ}}$  коэффициент передачи постоянного напряжения;  $K_{\Delta} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$  – коэффициент передачи изменения напряжений.

По принципу действия стабилизаторы делятся на параметрические (без обратной связи) и компенсационные (с регулирующей обратной связью). Компенсационные стабилизаторы в свою очередь делятся на параллельного и последовательного типа.

### 5.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

Их принцип действия основан на особенностях вольтамперной характеристике некоторых элементов, таких как стабилитроны и стабилсторы. Их ВАХ имеет участок малой зависимости напряжения от тока, протекающего через элемент. Схема параметрического стабилизатора на стабилитроне приведена на рис. 5.9. Стабилитрон включен параллельно сопротивлению нагрузки  $R_H$ , а резистор  $R_{огр}$  называется токоограничительным. Поскольку напряжение на стабилитроне при различных токах, протекающих через него, изменяется незначительно, то это же относится и к напряжению на нагрузке.

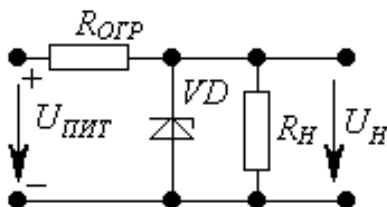


Рис. 5.9. Схема параметрического стабилизатора на стабилитроне.

Основными параметрами стабилизатора являются:

- Напряжение на нагрузке  $U_H = U_{ст.ном}$ , где  $U_{ст.ном}$  – номинальное напряжение стабилизации стабилитрона.

- коэффициент передачи изменения напряжений  $K_{\Delta} = \Delta U_{\text{ВХ}} / \Delta U_{\text{ВЫХ}}$ . Для параметрического стабилизатора определяется так  $K_{\Delta} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}} = (1 + R_{огр} / R_{диф})$ , где  $R_{диф}$  - дифференциальное сопротивление стабилитрона. Обычно  $K_{\Delta} \approx 10 \dots 15$ . Например, если входное напряжение имеет  $\Delta U_{\text{В}} = 2\text{В}$ , то у выходного оно составит  $\Delta U_{\text{ВЫХ}} \approx 0,2\text{В}$  при  $K_{ст} = 10$ .

Для уменьшения нестабильности выходного напряжения используют многокаскадные параметрические стабилизаторы. В таких стабилизаторах выход первого каскада соединен со входом второго и е.

Параметрические стабилизаторы используются в маломощных источниках (с током 10...15мА), а также в качестве источников опорного напряжения.

## 5.4. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В них выходное постоянное напряжение поддерживается за счет изменения сопротивления регулирующего элемента, специально вводимого в схему.

В стабилизаторе последовательного типа регулирующий элемент включается последовательно с нагрузкой (рис. 5.10).

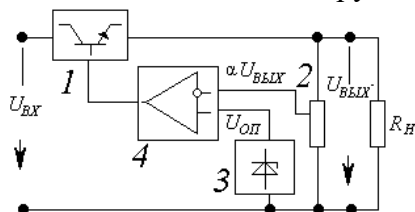


Рис. 5.10. Стабилизатор последовательного типа.

Работа стабилизатора описывается соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{р.э.}}$$

Сопротивление регулирующего элемента, а следовательно, и напряжение на нем, возрастает с увеличением напряжения на нагрузке и уменьшается при уменьшении выходного напряжения, за счет чего и стабилизируется выходное напряжение. Регулятор напряжения состоит:

1- регулирующий элемент.

2- Элемент измерения выходного напряжения. Он пропорционален выходному  $\alpha U_{\text{ВЫХ}}$ , где  $\alpha$  – коэффициент передачи делителя выходного напряжения.

3- источник опорного напряжения, который создает постоянное напряжение  $U_{оп}$ , которое не зависит от нагрузки и входного напряжения.

4- усилитель сигнала рассогласования (ошибки). Он сравнивает два входных напряжения и вырабатывает напряжение рассогласования  $U_{вых.оу} = K_{оу}(U_{оп} - \alpha U_{вых})$ , которое поступает на регулирующий элемент и изменяет его сопротивление так, что напряжение  $U_{вых.оу} = U_{вых}$ . Отсюда следует, что  $U_{вых.оу} = K_{оу}(U_{оп} - \alpha U_{вых})$ . Разрешим последнее относительно  $U_{вых}$ , получим  $U_{вых} = U_{оп} K_{оу} / (1 + \alpha K_{оу})$ . Учитывая, что  $K_{оу} \rightarrow \infty$ , получим  $U_{вых} = U_{оп} / \alpha$ . Из уравнения следует, что выходное напряжение определяется от  $U_{оп} / \alpha$  и не зависит от  $U_{вх}$  и  $R_{н}$ .

Коэффициент стабилизации схемы равен:  $K_{ст} = K_{оу}$

Принципиальная схема стабилизатора последовательного типа (рис. 5.11) состоит:

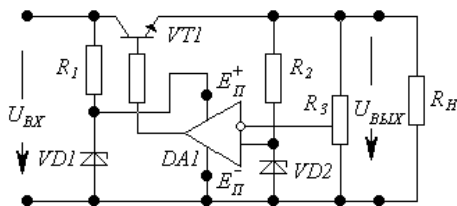


Рис. 5.11. Принципиальная схема стабилизатора последовательного типа.

$R_1, VD1$  - параметрический стабилизатор напряжения, служит для питания операционного усилителя.

$R_2, VD2$  - параметрический стабилизатор, является источником опорного напряжения.

Операционный усилитель  $DA1$ , выполняет роль усилителя сигнала ошибки. Транзистор  $VT1$ , выполняет роль регулирующего элемента.

*Компенсационный стабилизатор параллельного типа* (рис. 5.12):

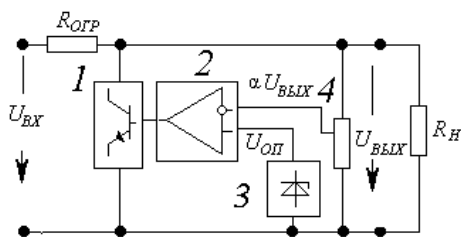


Рис. 5.12. Компенсационный стабилизатор параллельного типа

Здесь регулирующий элемент 1 включен параллельно нагрузке. Схема работает так, что

$$U_{BВIX} = U_{BХ} - I_{BВIX} R_{OГP} = const$$

а избыточное выходное напряжение выделяется на токоограничительном сопротивлении  $R_{Oзр}$ .

Компенсационные стабилизаторы непрерывного типа обеспечивают большой коэффициент стабилизации и хорошее подавление пульсации выпрямленного напряжения. Однако они имеют малый КПД, т. к. их регулирующий элемент, транзистор, работает в активном режиме, режиме класса *A* и на нем выделяется значительная мощность. Коэффициент полезного

$$\eta = \frac{P_H}{P_{BХ}} 100\% \text{ (КПД стабилизатора составляет около } 50\%)$$

## 5.5. ИМПУЛЬСНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Значительно более высокий КПД имеют стабилизаторы импульсного типа. В них регулирующий элемент работает в режиме ключа за счет чего уменьшается мощность выделяемая на нем.

Схема импульсного стабилизатора напряжения и временная диаграмма, поясняющая принцип его работы приведена на рис. 5.13.

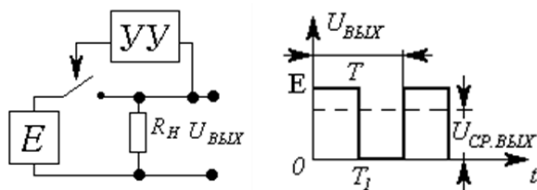


Рис. 5.13. Схема импульсного стабилизатора напряжения и временная диаграмма его работы.

Принцип работы импульсного стабилизатора основан на периодическом подключении на время  $T_1$  источника питания  $E$  к нагрузке  $R_n$ . При этом среднее напряжение за период составляет  $U_{\text{ср.вых}} = ET_1/T$ .

Следовательно, управлять средним значением выходного напряжения можно двумя способами: путем изменения длительности импульса  $T_1$  при  $T = \text{const}$ . Это используется в так называемых импульсных регуляторах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), или путем изменения частоты импульсов  $f = 1/T$  при постоянной длительности  $T_1 = \text{const}$ , — это используется в регуляторах с частотно импульсной модуляцией (ЧИМ).

Схема импульсного стабилизатора напряжения (рис. 5.14) работает так. Генератор вырабатывает прямоугольные импульсы с периодом  $T$ , длительность  $T_1$  которых зависит от напряжения на входе  $U_1$ . Эти импульсы управляют состоянием ключа, периодически подключая источник постоянного напряжения  $E$  к сопротивлению нагрузки. Фильтр низких частот служит для создания на нагрузке среднего значения напряжения.

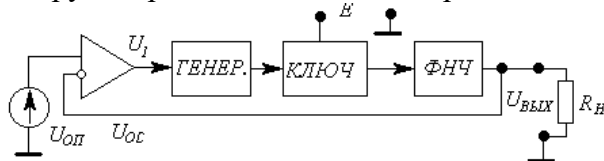


Рис. 5.14. Схема импульсного стабилизатора напряжения

Источник опорного напряжения и усилитель ошибки вырабатывают сигнал для управления длительностью импульса  $T_1$  генератора. Если выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  возрастает, то

вырабатывается сигнал  $U_I$ , который уменьшает длительность импульса  $T_I$ , и выходное напряжение уменьшается.

Поскольку генератор работает на высокой частоте  $10 \div 100$  кГц, то емкости сглаживающего фильтра (ФНЧ) должны быть небольшими.

КПД импульсных стабилизаторов до 85%, так как регулирующий элемент работает в импульсном ключевом режиме.

## 5.6. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Источники питания непрерывного типа имеют плохие массогабаритные показатели, так как силовой трансформатор работает на частоте 50 Гц. Кроме того, для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения требуются конденсаторы с большой емкостью. Для улучшения массогабаритных показателей источника питания необходимо повышать частоту переменного напряжения, это значительно уменьшит размеры и вес трансформатора, и параметры сглаживающего фильтра.

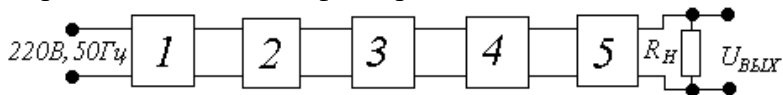


Рис. 5.15. Схема импульсного источника питания.

1 – выпрямитель, 2 – импульсный преобразователь, 3 – выпрямитель,

4 – сглаживающий фильтр, 5 – стабилизатор напряжения.

Выпрямленное напряжение поступает на импульсный преобразователь, который преобразует его в переменное напряжение, с частотой в несколько кГц. В состав импульсного преобразователя обычно входят и высокочастотный трансформатор, с помощью которого переменное напряжение трансформируется до необходимой величины. В дальнейшем оно выпрямляется (выпрямитель 2), сглаживается (сглаживающий фильтр) и стабилизируется (стабилизатор напряжения). КПД в таких стабилизаторах приближается к 100%.

## Литература

1. Алгинин Б. Е. Кружок электронной автоматики: Пособие для руководителей кружков: из опыта работы. - М.: Просвещение, 1990. - 192 с.
2. Борисов В. Г. Кружок радиотехнического конструирования: Пособие для руководителей кружков: -2-е изд., перераб. и доп. - М. Просвещение, 1990г. -224с.
3. Гершензон Е. М. Основы радиоэлектроники. Учеб. пособие для студентов физ.-мат. Фак. Пед. инс-тов.- М.; просвещение,1986. – 319 с.; ил.
4. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для вузов. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Радио и связь, 1985.- 488 с.
5. Тули М. Карманный справочник по электронике: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1993г. - 176 с.
6. Сворень Р. А. Электроника шаг за шагом: Практическая энциклопедия юного радиолюбителя; / Рис. С. Величкина. - Переизд. - М.: Дет. Лит., 1986. -431 с.
7. Наундорф Уве. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. Серия Мир электроники Издательство Техносфера 2008. 472с.
8. Джонс М.Х. Электроника - практический курс (пер. с англ. Воронова Е.В., Ларина А.Л.) Изд. 2-е, испр. Серия Мир электроники Издательство Техносфера 2006. 512с.
9. Опадчий Ю., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс) Учеб. для вузов. Под ред. О. П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком. 2005. -768с.: ил.
10. Новожилов О.П. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров. - 2-е изд. испр. и доп. – М.: Юрайт, 2013. – 653 с.
11. Самедов М.Н., Шибанов В.М. Электроника: учебно-методическое пособие. – Елабуга: изд-во ЕИ КФУ, 2013. – 160 с.
12. Дерягин А. В. Лабораторный практикум. Радиоэлектроника / Учебно-методическое пособие для студентов физико-математического и инженерно-технологического факультетов. – Елабуга: изд-во ЕИ КФУ, 2013. - 50с



**Дерягин Александр Владимирович**  
**Самедов Магамед Насиб оглы**  
**Шурыгин Виктор Юрьевич**

## **ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ**

Учебное пособие

*Техническое редактирование и компьютерная верстка*

*М.Н. Самедова*

Подписано к печати 25.01.2023. Формат 60x841/16. Бумага ВХИ.  
Гарнитура «Times». Печать ризографическая. Усл. печ.9,89 л. Печ.  
10,6 л. Тираж 30 экз. Заказ № 231502 Отпечатано: Центр  
оперативной печати «АБАК» 423602, г. Елабуга, ул. Пролетарская,  
34 тел.: +7 (85557) 3 36 71