

## **Усилительные каскады и электронные генераторы**

### Вопросы лекции:

1. Основы устройства электронных приборов.
2. Полупроводниковые диоды, тиристоры и транзисторы, их основные характеристики и область применения.
3. Необходимость электронных усилителей.
4. Транзисторные усилители, их режимы работы и основные характеристики.
5. Транзисторные инверторы: основные электрические схемы, область применения.

### **1. Основы устройства электронных приборов**

Электроника – это отрасль науки и техники, изучающая физические явления, основные параметры и характеристики электронных приборов, а также их практическое применение в различных отраслях народного хозяйства (устройствах передачи, приема, обработки и хранения информации).

Электроника подразделяется на техническую и физическую.

Физическая электроника занимается физическими процессами и основными параметрами и характеристиками электронных приборов.

Техническая электроника – практическое применение электронных приборов в различных устройствах.

Область применения: радиотехника, радиосвязь, ТЛВ, радиолокация, радионавигация, космическая электроника, промышленная электроника, в том числе в оборонной технике.

Основой электроники является ее элементная база, пассивные и активные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивная катушка и др., а также диоды, транзисторы, интегральные микросхемы, требующие подводы напряжения питания).

Основным элементом электроники является электронный прибор. Это – устройство, принцип действия которого основан на использовании энергии заряженных частиц (электронов, ионов, дырок) в различной среде (вакуум, разряженный газ, полупроводниковое вещество).

Приборы подразделяются на электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые.

Электровакуумные – применялись с начала 20-го века до 50-х годов, параллельно с ними применялись газоразрядные приборы, но основное применение в настоящее время находят полупроводниковые приборы.

Основоположником теоретических разработок и практического применения полупроводниковых приборов является академик А.Ф.Иоффе, директор физтеха.

В дальнейшем будут рассматриваться полупроводниковые приборы.

Основой устройства полупроводникового прибора является германиевая либо кремниевая пластина (кристалл). Чаще всего используется кремний  $SiO_2$ , т.к. он обладает лучшими характеристиками по плотности тока на единицу площади и стабильностью параметров в рабочем диапазоне температур.

Каким образом формируются заряженные частицы в кремниевом либо германиевом кристалле?

Известно, что абсолютно чистый  $Ge$  либо  $SiO_2$  не имеют свободных зарядов, носителей энергии, т.к. это четырехвалентное вещество, в котором нет свободных электронов или дырок на электронной орбите.

Как же образовать свободные электроны либо дырки? Для этого к чистому  $SiO_2$  добавляют другое 5-ти валентное вещество мышьяк, фосфор, сурьму (доноры), которое имеет на электронной орбите свободные электроны. Образуется примесный полупроводник с избытком электронов –  $N$ -типа.

Если добавить 3-х валентное вещество, акцепторы (алюминий, индий, бор), которые могут принимать электроны на свободное место на электронной орбите. Такие полупроводники называются  $P$ -типа, которые имеют в избытке положительные заряды (дырки).

Если соединить эти два примесных полупроводника  $N$  и  $P$ -типов, то на границе образуется очень тонкий слой (единицы МКН), в котором сосредоточены положительные и отрицательные заряды. Этот граничный слой называют электронно-дырочным  $p$ - $n$  переходом (рис.1.1,а), характеризующимся разностью потенциалов 3-5 В (образуется напряженность электрического поля).

Управлять ЭДП (зарядами) можно с помощью внешнего источника энергии.

При этом различают прямое включение  $p$ - $n$  перехода (рис.1.1,б) и обратное включение (рис. 1,в).

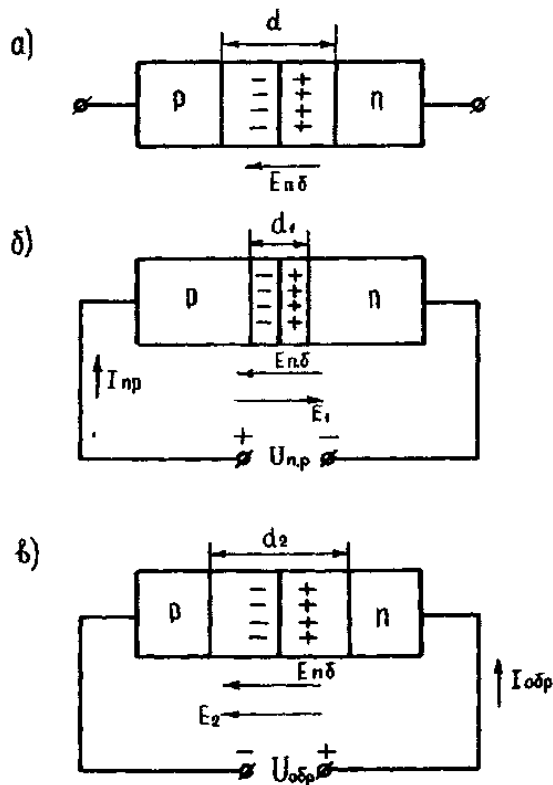


Рисунок 1. Физические процессы в электронно-дырочном переходе:

- а – образование потенциального барьера;
- б – прямое подключение  $p$ - $n$  перехода;
- в – обратное подключение  $p$ - $n$  перехода

Основной характеристикой ЭДП является ВАХ (вольтамперная характеристика). Это – зависимость тока через  $p$ - $n$  переход от приложенного к нему напряжения внешнего источника (рис. 2).

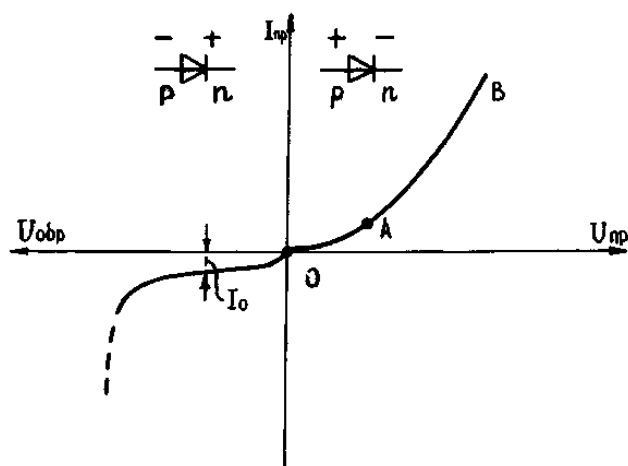


Рисунок 2. Вольтамперная характеристика  $p$ -  $n$  перехода

Таким образом,  $p$ - $n$  переход обладает вентильными свойствами.

## 2. Полупроводниковые диоды, тиристоры и транзисторы, их основные характеристики и область применения

### 2.1. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – это устройство, имеющее один и более ЭДП.

#### Классификация

По назначению:

- выпрямительные:

а) неуправляемые;

б) управляемые (тиристоры);

По мощности:

- маломощные  $< 0,3$  А;

- средней мощности до 10 А;

- большой мощности  $> 10$  А.

- стабилитроны;
- варикапы;
- оптоэлектронные (фото и светодиоды).

По конструкции: точечные, плоскостные (рис. 3).

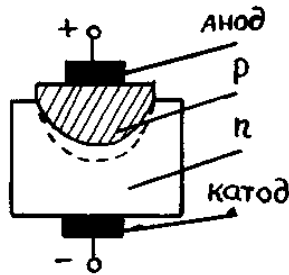


Рисунок 3. Плоскостной полупроводниковый диод

Основной характеристикой является ВАХ диода (рис.1.2).

Основные параметры диода:

- прямой ток, обратный ток;
- прямое напряжение, обратное напряжение;
- диапазон рабочих температур;
- среднее значение рассеиваемой мощности.

## 2.2. Тиристор – управляемый диод

Тиристор – полупроводниковый прибор с тремя и более  $p$ - $n$  переходами, ВАХ которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, который используется для переключений.

Структура тиристора и его вольтамперная характеристика показаны на рис. 4 и рис. 5.

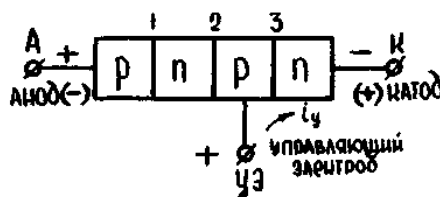


Рисунок 4. Структура тиристора

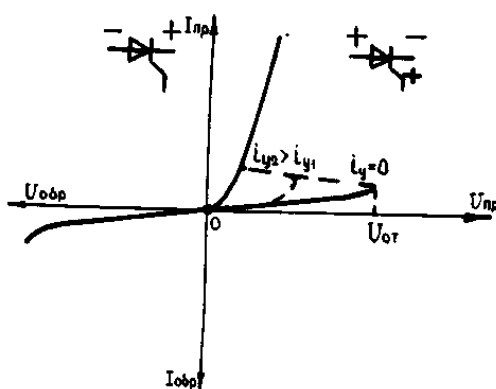


Рисунок 5. Вольтамперная статическая характеристика тиристора

Способы отпирания:

- увеличением  $U_{AK}$ ;
- подачей  $U_{упр}$  при  $U_{AK} = const$ .

Способы возврата в исходное состояние:

- разрыв цепи питания.

**2.3. Стабилитрон**

Полупроводниковый прибор с одним  $p$ - $n$  переходом неуправляемой проводимости, предназначенной для стабилизации  $U$ .

От диодов отличается тем, что в  $p$ - $n$  переходе используется большая концентрация носителей зарядов.

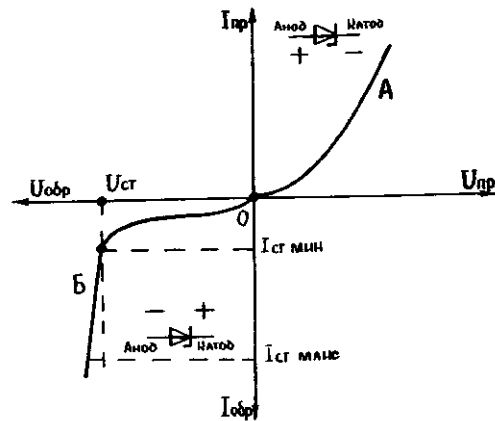


Рисунок 6. Вольтамперная статическая характеристика стабилитрона

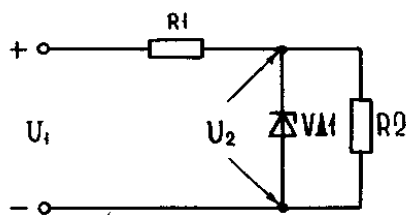


Рисунок 7. Схема стабилизации напряжения

Вольтамперная характеристика стабилитрона показана на рис.2.4, а схема стабилизации на рис.2.5.

## 2.4. Транзисторы

Транзистор – электропреобразовательный прибор с одним или несколькими ЭДП, пригодный для усиления мощности электрических сигналов, имеющий три и более выводов.

Транзисторы бывают:

- биполярные (носителями энергии являются электроны и дырки);
- полевые (управление движением зарядов осуществляется электрическим полем).

Устройство биполярного транзистора и условные обозначения показаны на рис. 8. (Использовать кадр Лектор-2000)

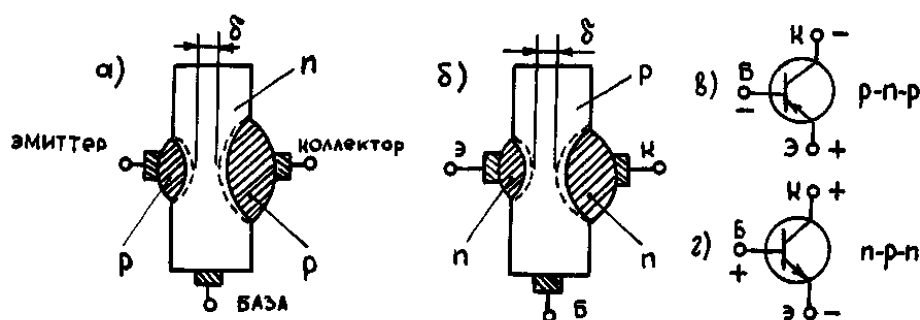


Рисунок 8. Биполярные транзисторы:

а – *p-n-p* типа;

б – *n-p-n* типа;

в, г – условные графические обозначения

Отличительные признаки полевого транзистора: управления движением электронов между истоком и стоком осуществляется электрическим полем между затвором и истоком. Полевые транзисторы бывают с *n*-каналом и *p*-каналом и с изолированным затвором – МДП типа.

Полевые транзисторы имеют большие входное и выходное сопротивления и коэффициент усиления. Но они дороже, чем биполярные транзисторы.

### 3. Необходимость электронных усилителей

Необходимость в усилении электрических сигналов возникает при измерениях неэлектрических величин, автоматизации, контроле технологических процессов, в преобразователях постоянного тока в переменный, в регуляторах напряжения и тока, при создании различных устройств автоматического регулирования и управления.

В качестве активных элементов в современных усилителях применяют биполярные и полевые транзисторы, которые заменили электронные лампы, применявшиеся до недавнего времени практически во всех электронных усилителях. Усилители на электронных лампах и транзисторах способны усиливать очень слабые электрические сигналы (токи порядка  $10^{-14}$  А, напряжение порядка  $10^{-7}$  В).



Источниками усиливаемых сигналов могут быть различные преобразователи неэлектрических физических величин в электрические параметры: микрофоны, считывающие головки магнитных накопителей и др.

Усилительные устройства, выполненные на любом из усилительных элементов, включают: источник постоянного напряжения (источник питания); усилительный активный элемент; пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), обеспечивающие режим работы усилителя, связь его с источником сигнала и нагрузкой, и температурную стабилизацию.

Показать структурную схему усилителя, кадр Л-2000.

## **4. Транзисторные усилители, их режимы работы и основные характеристики**

### **2.1. Схемы транзисторных усилителей**

В качестве примера на рис. 9 приведены простейшие схемы усилителей, которые чаще других встречаются на практике: усилители на биполярных транзисторах с  $p-n-p$  (рис. 9,а) и  $n-p-n$  (рис. 9,б) переходами, включенными по схеме с общим эмиттером; усилители на полевых транзисторах с  $n$  (рис. 9,в) и  $p$  (рис. 9,г) каналами по схеме с общим истоком.

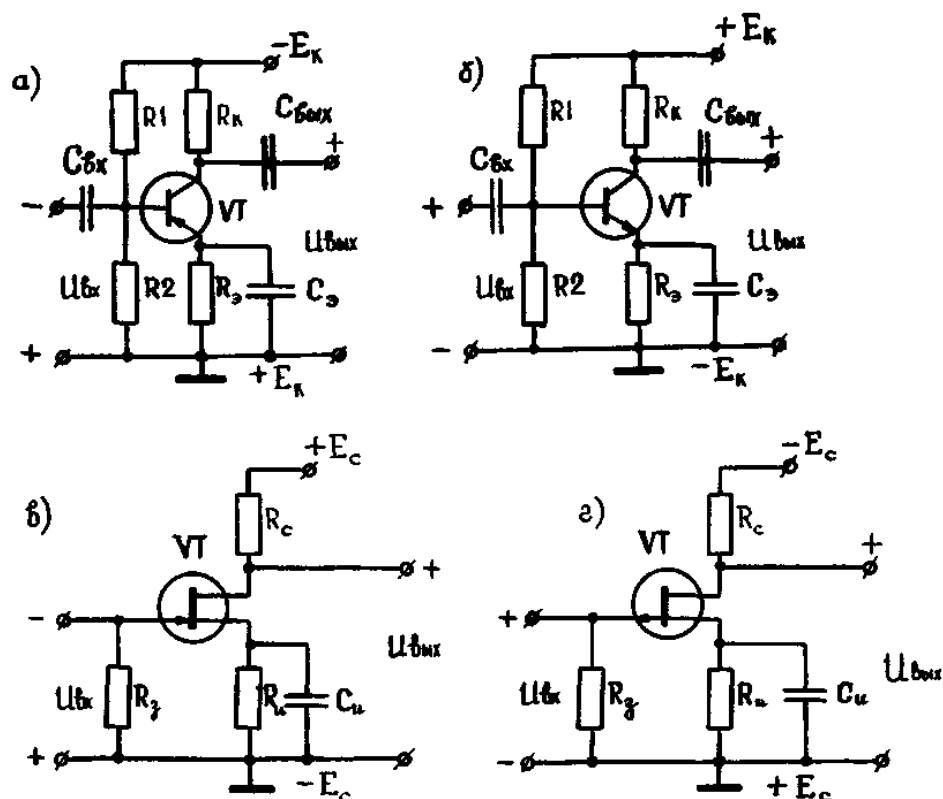


Рисунок 9. Схемы усилителей:

а,б – на биполярных транзисторах соответственно с  $p-n-p$  и  $n-p-n$  переходами; в,г – на полевых транзисторах с  $n$  и  $p$  каналами

Процесс усиления во всех схемах заключается в преобразовании энергии источника питания в энергию выходного сигнала, действующего в нагрузке усилителя. Управление процессом усиления осуществляется входным сигналом малой мощности, воздействующим на активный усилительный элемент, причем мощность выходного сигнала в нагрузке значительно больше мощности входного (усиливаемого) сигнала за счет отбора энергии от мощности источника питания. Нагрузкой являются электрические двигатели, сигнальные устройства, громкоговорители, нагреватели и т.д.

Рассмотрим назначение элементов наиболее распространенных схем усилителей (рис. 9а,б).

Резисторы  $R1$  и  $R2$  составляют делитель напряжения, необходимый для выбора тока смещения базы (выбора рабочей точки на характеристиках транзистора).

$C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  – разделительные входной и выходной конденсаторы по постоянному току.

$R_{\text{к}}$  – резистор в коллекторной цепи, ограничивающий ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}} = E_{\text{к}} / R_{\text{к}}$ .

$R_{\text{э}}$  и  $C_{\text{э}}$  – резистор и шунтирующий конденсатор, служащие для уменьшения влияния температуры на характеристики усилительного элемента путем создания обратной связи.

Обратная связь осуществляется за счет подачи части энергии выходного сигнала усилителя на его вход. Они бывают искусственными и паразитными, положительными (усиливают входной сигнал) и отрицательными (ослабляют входной сигнал).

Падение напряжения на резисторе  $R_{\text{э}}$  при прохождении по нему тока создает отрицательную обратную связь в усилителе, улучшающую его динамические характеристики.

Схемы двухтактных транзисторных усилителей мощности с трансформаторным выходом будут рассмотрены на СРПП и при выполнении домашнего задания.

## **2.2. Режимы работы усилительного элемента**

В зависимости от положения рабочей точки в режиме покоя на характеристиках транзисторов, а также величины усиливаемого сигнала различают три основных режима работы усилительного элемента, или классов усиления:  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Рассмотрим два режима  $A$  и  $B$ , как наиболее частоприменяемые на практике.

### **2.2.1. Режим $A$**

Режим  $A$  – это такой режим работы усилительного элемента, при котором ток в выходной цепи имеет место в течение всего периода действия сигнала и крайние положения точки  $A$  не выходят за пределы прямолинейной части (за точки  $B$  и  $C$ ) динамической характеристики (рис. 10)

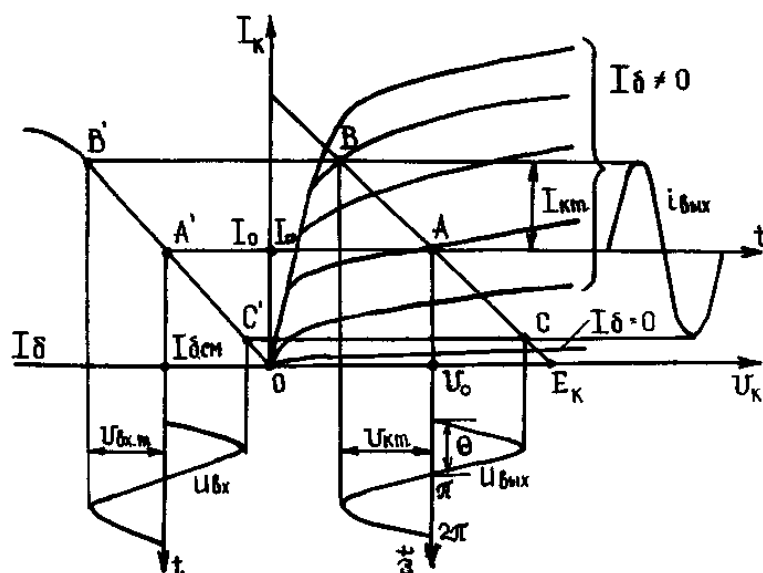


Рисунок 10. Графики, поясняющие работу усилительного элемента в режиме  $A$

Для обеспечения этого режима необходимо иметь такой ток смещения базы  $I_{б.см}$ , чтобы рабочая точка  $A'$  на переходной характеристике транзистора находилась на середине линейного участка  $B'C'$ . При этом амплитуда входного напряжения  $U_{вх.м}$  должна быть такой, чтобы работа усилительного элемента происходила на линейном участке  $B'C'$  переходной характеристики.

Выходные сигналы смещены, как и входные, на соответствующие уровни. В результате в выходной цепи (в нагрузке) может произойти отсечка части сигнала по уровню. Глубина отсечки оценивается углом отсечки сигнала. Половина длительности импульса выходного напряжения, выраженная в угловой (радианной) мере, называется углом отсечки  $\theta$ .

В режиме  $A$  угол отсечки  $\theta = \pi$  (рис. 10). В этом режиме при подаче на вход усилителя гармонического напряжения  $u_{\text{вх}}$  форма выходного напряжения также практически синусоидальна, т.е. нелинейные искажения усиленного сигнала будут минимальными, что является достоинством режима  $A$ .

Среднее значение тока  $I_{\text{ср}}$ , потребляемого от коллекторного источника питания, в режиме  $A$  почти не меняется и равно току покоя  $I_0$  (рис. 10) как при сигнале, так и без него ввиду почти одинаковой площади положительной и отрицательной полуволн переменной составляющей выходного тока  $i_{\text{вых}}$ .

Одним из важнейших показателей усилительного элемента является КПД его выходной цепи, определяемый как отношение отдаваемой усилителем мощности сигнала  $P_{\text{вых}}$  к мощности  $P_0$ , потребляемой им от коллекторного источника питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} . \quad (1)$$

Выходная мощность усилителя на транзисторе в режиме  $A$

$$P_{\text{вых}} = 0,5 U_{\text{км}} \cdot I_{\text{км}} , \quad (2)$$

где  $U_{\text{км}}$ ,  $I_{\text{км}}$  – соответственно амплитуды коллекторных напряжения и тока (рис. 10).

Потребляемая усилителем мощность, которая частично преобразуется в выходную мощность и частично переходит в тепло, выделяемое в транзисторе, равна произведению постоянных составляющих коллекторных напряжения и тока транзистора:

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 . \quad (3)$$

Подставляя выражения (1) и (2) в (3), имеем:

$$\eta = 0,5 \frac{U_{\text{км}}}{U_0} \frac{I_{\text{км}}}{I_0} . \quad (4)$$

Как видно из рис. 10, амплитуда коллекторных напряжений и тока в режиме  $A$  меньше соответствующих постоянных составляющих, т.е.  $U_{\text{км}} < U_0$  и  $I_{\text{км}} < I_0$ , следовательно, КПД усилителя в режиме  $A$  всегда меньше 0,5.

В действительности ввиду больших потреблений тока и расхода мощности питания как при наличии сигнала, так и без него КПД режима  $A$  редко превышает 0,35.

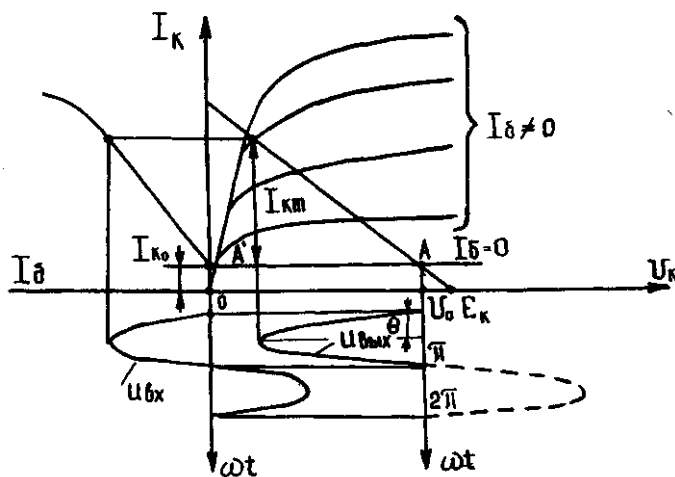
Поэтому применение режима  $A$  невыгодно в условиях большой мощности из-за низкого КПД.

Режим  $A$  широко используют в каскадах предварительного усиления и усилителях с выходной мощностью до нескольких ватт.

### 2.2.2. Режим B

Режим  $B$  характеризуется тем, что ток в выходной цепи усилительного элемента имеет место в течение положительной половины периода ( $\omega t = \pi$ ) входного сигнала  $u_{вх}$ . Рабочую точку  $A$  выбирают в начале динамической характеристики (точка  $A'$ ) транзистора, когда ток покоя (его коллекторный ток) равен току холостого хода  $I_{к0}$  (рис. 11), который практически имеет нулевое значение.

Выходное напряжение усилителя при синусоидальном входном напряжении имеет форму половины синусоиды. Режим  $B$  характеризуется углом отсечки  $\theta = \pi/2$  (рис. 11). Следовательно, нелинейные искажения в режиме  $B$  будут большими.



### Рисунок 11. Графики, поясняющие работу усилительного элемента в режиме $B$

Ввиду незначительного тока покоя и малого среднего значения выходного тока по сравнению с его амплитудой  $I_{\text{км}}$  КПД режима  $B$  значительно выше, чем режима  $A$  (может достигать 80%).

Режим  $B$  из-за высокого КПД широко применяется в двухтактных каскадах мощных усилителей.

### **2.3. Показатели и характеристики усилителя** **с общим эмиттером**

К показателям работы усилителя относятся его параметры, характеризующие эксплуатационные свойства, входные и выходные номинальные данные, коэффициент усиления, коэффициент искажений, диапазон частот, КПД и др.

К входным номинальным данным относятся напряжение  $U_1$ , ток  $I_1$  и мощность  $P_1$  входного сигнала, входное сопротивление, входная емкость.

Входное сопротивление усилителя с ОЭ равно входному сопротивлению самого транзистора  $r_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}$  и для биполярных транзисторов с ОЭ сравнительно невелико (1-3 кОм), что является их существенным недостатком. Входное сопротивление усилителей на полевых транзисторах значительно выше (до 1000 мОм), чем входное сопротивление усилителей на биполярных транзисторах.

В зависимости от соотношения входного сопротивления  $r_{\text{вх}}$  и сопротивления источника сигнала  $r_{\text{п}}$  различают усилители напряжения ( $r_{\text{вх}} \gg r_{\text{п}}$ ), усилители тока ( $r_{\text{вх}} \ll r_{\text{п}}$ ) и усилители мощности ( $r_{\text{вх}} = r_{\text{п}}$ ).

Входная емкость  $C_{\text{вх}}$  оказывает существенное влияние на ширину рабочего диапазона частот.

К выходным данным относятся номинальные значения выходного напряжения  $U_2$ , тока  $I_2$ , выходной мощности  $P_2$  и выходного сопротивления  $r_{\text{вых}}$ .

Выходное сопротивление усилителя с ОЭ определяется со стороны его выходных выводов при отключенном сопротивлении нагрузки ( $r_{\text{вых}} = r_{\text{к}}$ ). Типовое значение выходного сопротивления усилителей с ОЭ составляет 10 - 100 кОм.

Коэффициент усиления  $\kappa$  – это отношение выходного параметра к входному.

Различают коэффициенты усиления по току  $\kappa_i = I_2 / I_1$ , по напряжению  $\kappa_u = U_2 / U_1$  и мощности  $\kappa_p = P_2 / P_1$ . Типовые значения коэффициентов усиления для транзисторных усилителей с ОЭ соответственно равны:  $\kappa_i = 15 - 80$ ,  $\kappa_u = 10 - 60$ ,  $\kappa_p = \kappa_i \kappa_u$ .

В усилительной технике наряду с коэффициентом усиления  $\kappa$ , измеряемым в относительных единицах, широкое применение находит выражение  $\kappa$  в логарифмических единицах – д е ц и б е л а х :

$$\kappa_{i(\text{дб})} = 20 \lg(I_2 / I_1).$$

Например, если  $\kappa_i = 10$ , то  $\kappa_{i(\text{дб})} = 20 \lg 10 = 20 \cdot 1 = 20$ .

Использование логарифмических единиц измерения особенно удобно при определении общего коэффициента усиления многокаскадного усилителя, когда умножение коэффициентов усиления каскадов заменяется простым действием – сложением их логарифмов.

Характеристики усилителя отображают его способность усиливать с определенной степенью точности сигналы различной частоты и уровня. К основным характеристикам относятся амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная.



Амплитудная характеристика — это зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды подаваемого на вход гармонического колебания при постоянной частоте усиливаемого сигнала (рис. 12,а).

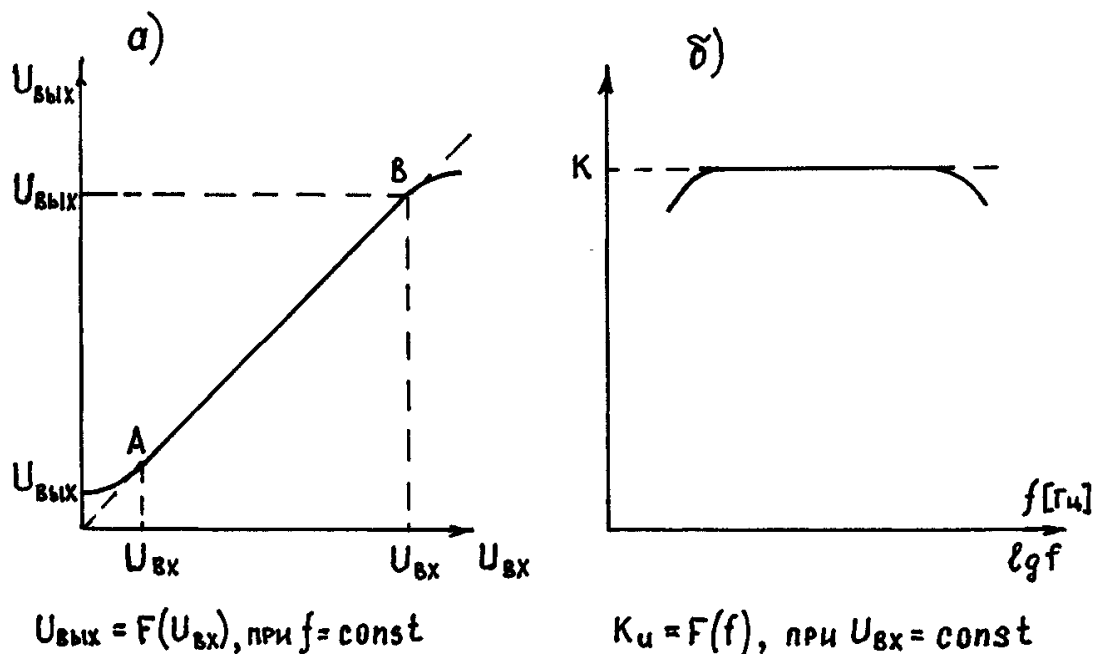


Рисунок 12. Основные характеристики усилителя:  
а — амплитудная; б — амплитудно-частотная

В идеальном усилителе (без помех) амплитуда выходного сигнала пропорциональна амплитуде входного  $U_{\text{вых}} = \kappa U_{\text{вх}}$  и амплитудная характеристика представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (пунктирная линия на рис. 12,а).

В реальном усилителе амплитудная характеристика вследствие наличия помех отличается от прямой.

Амплитудно-частотная характеристика представляет собой зависимость коэффициента усиления (или  $\kappa/\kappa_{\text{макс}}$ ) от частоты (или  $\lg f$ ) усиливаемого сигнала при постоянной амплитуде напряжения входного сигнала (рис. 12,б). Из-за присутствия в усилителе реактивных элементов сигналы различных частот усиливаются неодинаково. На низких и высоких ча-

стотах имеет место спад характеристики. Рабочим диапазоном частот усилителя называют интервал частот, в пределах которого модуль коэффициента усиления  $k$  остается постоянным.

Для усиления сигналов речи необходим усилитель с рабочим диапазоном частот от 50 Гц до 7 кГц. Для качественного воспроизведения музыки требуется усилитель с диапазоном от 20 Гц до 20 кГц. В ЭВМ используются усилители с верхним пределом частоты 100 мГц.

Частотные искажения вызывают изменение формы сигнала. Мерой частотных искажений является коэффициент частотных искажений  $M$ , который равен отношению модуля коэффициента усиления на средней (резонансной) частоте  $k_0$  к модулю коэффициента усиления на нижней  $k_n$  или верхней  $k_v$  частотах

$$M_n = k_0 / k_n, \quad M_v = k_0 / k_v.$$

Допустимым является  $M_n = M_v \leq \sqrt{2}$ .

## **5. Транзисторные инверторы: основные электрические схемы, область применения**

Полупроводниковый инвертор является устройством для преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока заданной частоты и напряжения.

По типу применяемых полупроводниковых приборов инверторы выполняются на транзисторах и тиристорах.

### **3.1. Транзисторный инвертор**

В общем случае транзисторный инвертор состоит из следующих элементов (рис. 13): задающего генератора (ЗГ), осуществляющего непосредственное преобразование постоянного тока в переменный; делителя частоты (ДЧ), обеспечивающего требуемую частоту электрических колебаний (делителя частоты может и не быть); усилителя мощности (УМ), усиливающего электрические колебания ЗГ по мощности; фильтра (Ф), служащего для улучшения формы кривой выходного напряжения инвертора (фильтр у некоторых инверторов может отсутствовать); стабилизаторов частоты и напряжения (могут отсутствовать).



Рисунок 13. Структурная схема однофазного транзисторного инвертора

По числу фаз транзисторные инверторы делятся на однофазные, трехфазные, шестифазные и двенадцатифазные.

Рассмотрим однофазный транзисторный инвертор, нестабилизированный по частоте и напряжению (рис. 13). В качестве задающих генераторов применяются генераторы с самовозбуждением (автогенераторы), которые осуществляют непосредственное преобразование электрической энергии постоянного тока в электрические колебания синусоидальной формы требуемой частоты.

Схема  $LC$ -генератора синусоидальных колебаний для частот от нескольких десятков килогерц и выше показана на рис. 14.

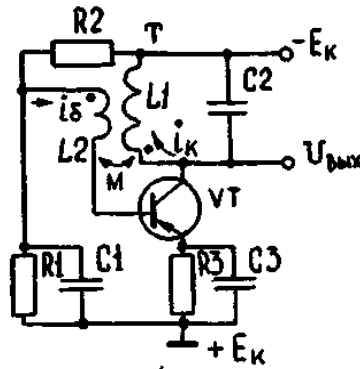


Рисунок 14. Схема генератора синусоидальных колебаний

Автогенератор с трансформаторной связью (рис. 14) содержит: колебательный контур, состоящий из индуктивной катушки  $L1$ , первичной обмотки трансформатора  $T$  и конденсатора  $C2$ ; усилительный элемент (транзистор  $VT$ ); элементы  $R1$ ,  $R2$ ,  $C1$ ,  $R3$  и  $C3$  для обеспечения необходимого режима работы; вторичную обмотку трансформатора  $L2$ , обеспечивающую индуктивную положительную обратную связь между выходом и входом усилительного элемента.

Работа автогенератора (преобразование постоянного тока в переменный) происходит при включении источника питания  $E_k$ . Начальный импульс тока возбуждает в параллельном контуре колебания с частотой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2}},$$

которые не затухают благодаря индуктивной связи между катушками  $L1$  и  $L2$ .

В базовой цепи возникает переменный ток  $i_b$ , совпадающий по фазе с током коллекторной цепи  $i_k$ . Выполнение условия баланса фаз обеспечивается правильным включением концов обмотки  $L2$  (для транзистора  $p-n-p$  типа конец обмотки  $L2$  подключается к его базе). Усиленные колебания передаются снова из контура в базовую цепь, размах колебаний постепенно нарастает, достигая заданного значения. На выходе генератора возникают незатухающие колебания синусоидальной формы с определенной амплитудой  $U_{\text{вых}}$  вследствие установившегося динамического равновесия меж-

ду притоком энергии от источника и ее потерями. Условие баланса амплитуд выполняется тем, что потери в контуре и нагрузке непрерывно пополняются за счет источника питания.

Регулирование частоты генерируемого напряжения производится изменением индуктивности  $L1$  или емкости  $C2$ .

В рассмотренной схеме (рис. 14) транзистор работает в непрерывном режиме, поэтому эту схему целесообразно использовать в маломощных задающих генераторах на сравнительно высоких частотах. Для получения более низких частот используются делители частоты. В транзисторных инверторах в качестве задающих генераторов чаще всего используются двухтактные схемы автогенераторов, генерирующие напряжение прямоугольной формы, в которых транзисторы работают в ключевом режиме.

Наиболее распространенным является двухтактный симметричный автогенератор с индуктивной обратной связью (рис. 15). Он состоит из двух транзисторов VT1 и VT2, двух обмоток обратной связи  $w_{oc1}$ ,  $w_{oc2}$  (рис.15,а) и трансформатора, у которого магнитопровод выполнен из материала, имеющего прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 15,б). Напряжение питания постоянного тока  $U_1$  преобразуется в переменное напряжение прямоугольной формы  $u_2$ , которое снимается со вторичной обмотки трансформатора. Графики (рис. 15,в) поясняют работу автогенератора.

В исходном состоянии магнитопровод трансформатора имеет остаточную магнитную индукцию, например  $B_r$ . Вследствие неидентичности какой-то из транзисторов, например VT1, будет больше открыт, чем транзистор VT2. При включении питания начнет нарастать ток  $I_1$  через транзистор VT1. В результате в обмотках обратной связи  $w_{oc1}$  и  $w_{oc2}$  наведутся ЭДС.

Обмотки обратной связи включены таким образом, что отрицательный потенциал прикладывается к базе транзистора VT1, а положительный – к базе VT2 (рис. 15,а). Это приведет к открытию транзистора VT1 и закрытию транзистора VT2. Вследствие увеличения тока  $I_1$  через транзистор VT1 и обмотку  $w_1$  произойдет перемагничивание магнитопровода.

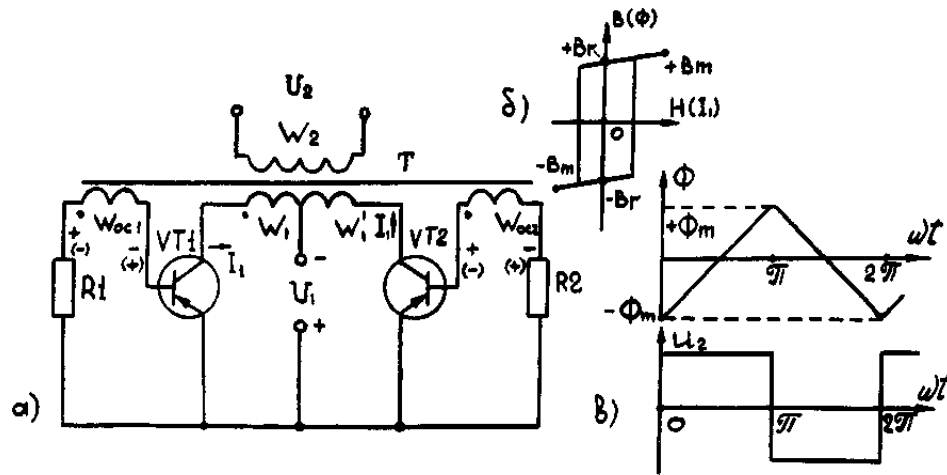


Рисунок 15. Двухтактный автогенератор с индуктивной обратной связью: а – схема; б – петля гистерезиса магнитопровода трансформатора; в – графики, поясняющие работу генератора

Изменение магнитного потока происходит практически с постоянной скоростью:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_1}{w_1}.$$

В это время в выходной обмотке  $w_2$  будет индуцироваться ЭДС взаимной индукции и возникает напряжение

$$u_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{w_2}{w_1} U_1.$$

Пока происходит перемагничивание магнитопровода с постоянной скоростью напряжение  $u_2$  остается постоянным (рис. 15,в).

В области насыщения магнитопровода скорость изменения магнитного потока  $\frac{d\Phi}{dt}$  станет равной нулю. В обмотках обратной связи ЭДС наводиться

не будет, и транзистор VT1 начнет закрываться, а ток  $I_1$  и напряжение  $u_2$  – уменьшиться до нуля. Изменение магнитной индукции от  $+B_m$  до  $+B_r$  (рис.3.3,б) и уменьшение тока  $I_1$  вызовут в обмотках обратной связи ЭДС противоположной полярности. В результате на базах транзисторов VT1 и VT2 изменятся знаки потенциалов (на базе VT1 будет положительный (+), а на базе VT2 отрицательный (-) потенциалы), что приведет к закрытию транзистора VT1 и открытию транзистора VT2. Произойдет снова перемагничивание магнитопровода с изменением магнитного потока от  $+\Phi_m$  до  $-\Phi_m$ . Теперь ток будет протекать через полуобмотку  $w_1'$  и открытый транзистор VT2 в обратном направлении. Выходное напряжение  $u_2$  также изменит знак.

Таким образом, транзисторы генератора работают в ключевом режиме, форма выходного напряжения близка к прямоугольной. Графики (рис. 15 3,в) показаны для случая, когда петля гистерезиса материала магнитопровода трансформатора близка к идеально прямоугольной форме, активное сопротивление всех обмоток трансформатора равно нулю, транзисторы имеют идентичные параметры, режим работы генераторы, близкий к режиму холостого хода.

С учетом указанных допущений для рассмотренной схемы частота  $f$  выходного напряжения

$$f = \frac{U_1 - U_{\text{эк}}}{4\kappa_3 w_1 S B_m},$$

где  $U_{\text{эк}}$  – падение напряжения на эмиттер-коллекторном переходе открытого транзистора;

$S$  – площадь сечения магнитопровода;

$\kappa_3$  – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

Из полученного выражения видно, что частота выходного напряжения существенно зависит от напряжения  $U_1$  и величины индукции насыщения  $B_m$  магнитопровода трансформатора Т.

Используются другие схемы инверторов, которые в лекции не рассматриваются.