

Лекция № 6.

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

План

1. Введение.
2. Классификация усилителей.
3. Технические характеристики и параметры усилительного каскада.
4. Режимы усиления.
5. Усилители напряжения звуковых и средних частот.
6. Теоретическое обобщение по теме.

1. *Введение.*

Усилителем называется устройство, предназначенное для усиления входного электрического сигнала по напряжению, по току или по мощности за счёт преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

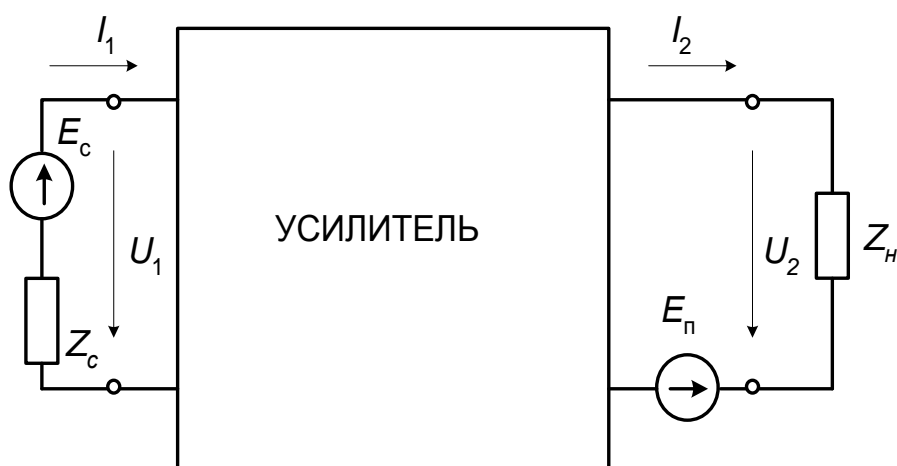


Рис.6.1.

На рис.6.1 дана обобщённая функциональная схема электронного усилителя

Усилитель имеет две основные цепи — входную, куда включается источник усиливаемого сигнала E_c , и выходную, куда включается нагрузка Z_n . Последовательно с усилителем включен источник питания E_n . Схема любого усилителя модулирует энергию этого источника входным управляющим сигналом. Чтобы этот процесс выполнить, схема усилителя должна содержать нелинейный элемент, управляемый входным сигналом U_1 . В качестве нелинейных управляемых элементов в современных усилителях используют, как правило, биполярные и полевые транзисторы (потому их обычно и называют *транзисторными усилителями*).

В разделе «Элементная база электроники» мы рассматривали биполярный транзистор в статическом режиме — в режиме без нагрузки. Это было необходимо для того, чтобы выявить собственные возможности транзистора: его основные параметры, характеристики. После статического режима рассмотрим работу транзистора под нагрузкой — в режиме усиления.

2. Классификация усилителей

Классификация усилителей идёт по нескольким признакам:

По роду усиливаемого сигнала:

- усилители гармонических сигналов (непрерывных колебаний);
- усилители импульсных сигналов.
- усилители постоянного тока (УПТ);

По функциональному назначению:

- усилители напряжения;
- усилители тока;
- усилители мощности.

По диапазону усиливаемых частот:

- усилители напряжения звуковой частоты — **УЗЧ** (прежнее название — усилители напряжения низкой частоты (УНЧ)). Диапазон частот таких усилителей — от десятков Гц до десятков или сотен кГц;

- усилители напряжения радиочастот **УРЧ** (прежнее название — усилители напряжения высокой частоты (УВЧ));

- избирательные (резонансные) усилители (узкополосные);
- широкополосные усилители (от сотен кГц до сотен МГц).

По виду соединительных цепей усилительных каскадов:

- усилительные каскады с гальваническими междукаскадными связями (непосредственные связи);
- усилительные каскады с емкостными связями;
- усилительные каскады с индуктивными (трансформаторными) связями (в настоящее время индуктивная связь применяется крайне редко).

По характеру нагрузки:

- усилители с активной нагрузкой;
- усилители с ёмкостной нагрузкой;
- усилители с индуктивной нагрузкой.

3. Технические характеристики и параметры электронного усилителя.

3.1. АЧХ — амплитудночастотная характеристика усилителя — зависимость коэффициента усиления от частоты (рис.6.2.а);

3.2. ФЧХ — фазочастотная характеристика — зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. Фазовые искажения оцениваются по тем же причинам, что и частотные (рис.6.2.б).

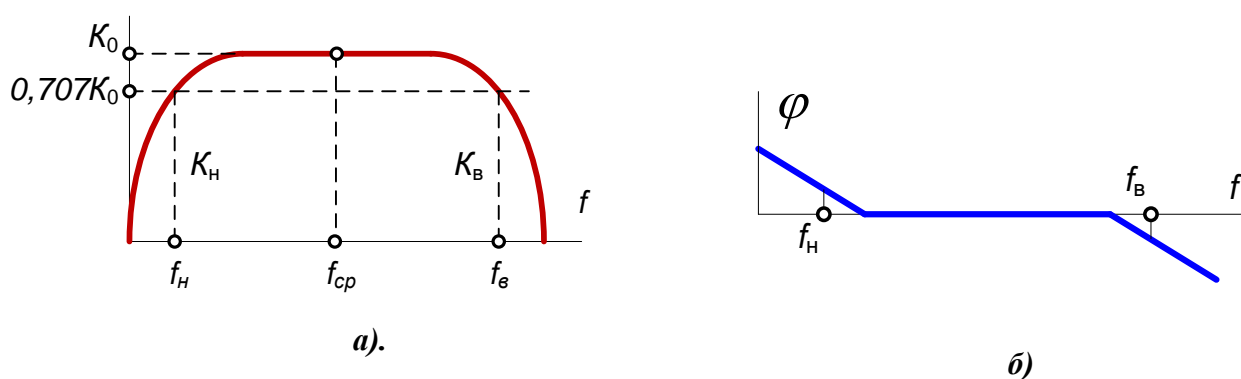


Рис. 6.2..Характеристики усилителя: **а** — типовая АЧХ; **б**— типовая ФЧХ

Если усиливается сигнал небольшой амплитуды, то заметного искажения выходного полезного сигнала не происходит. Но если сигнал достаточно сложной формы, с «большим набором» гармоник, то на выходе будем наблюдать большие искажения: в схеме усилителя всегда имеют место реактивные элементы, которые реагируют неодинаково на частоту. *Такие искажения* в выходном сигнале получили название частотных и *оцениваются* они *коэффициентом частотных искажений*:

$$M_n = \frac{K_0}{K_n}; \quad M_v = \frac{K_0}{K_v},$$

где M_n и M_v — коэффициенты частотных искажений на нижних и верхних граничных частотах соответственно; K_n и K_v — коэффициенты усиления на нижних и верхних частотах соответственно; K_0 — коэффициент усиления на средних частотах.

3.3. Передаточная характеристика — это зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного.

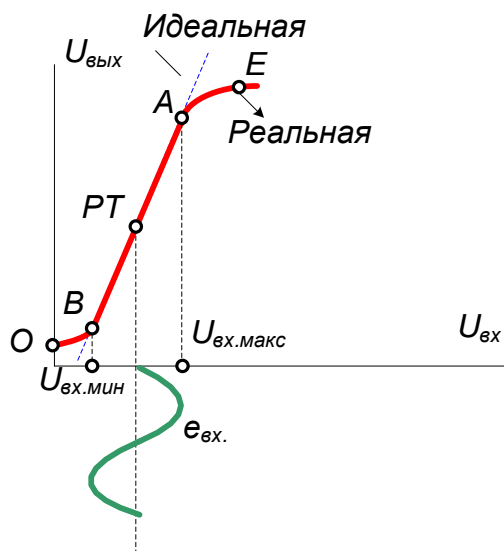


Рис.6.3. Передаточная характеристика неинвертирующего усилителя

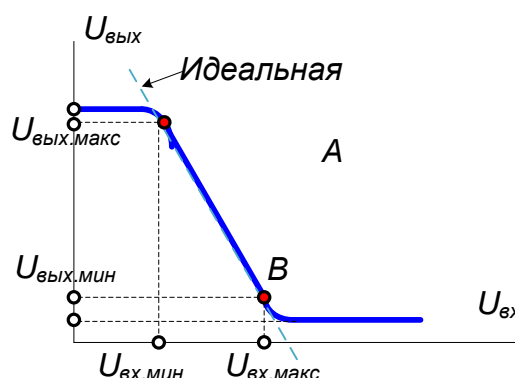


Рис.6.4. Передаточная характеристика инвертирующего усилителя

На рис.6.3 показана передаточная характеристика усилителя, который фазу входного сигнала на выходе не изменяет, а на рис.6.4 усилитель фазу входного сигнала на выходе изменяет на противоположную. Но для обоих вариантов усилителей рабочим участком является участок «АВ». Линия идеальной передаточной характеристики (пунктиром) практически совпадает с рабочим участком характеристики.

Точка «О» на рис.6.3. — это точка уровня напряжения шумов. Различить полезный сигнал на фоне шумов можно только после точки «В».

После точки «А» — явно выраженные нелинейные искажения входного сигнала. *Уровень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений*

$$K_{НИ} = \frac{\sqrt{U_{2\max}^2 + U_{3\max}^2 + \dots + U_{n\max}^2}}{U_{1\max}}$$

где $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{3\max}$, ..., $U_{n\max}$ — амплитуды гармоник, из которых основной является первая гармоника ($U_{1\max}$).

Входная характеристика у транзистора имеет нелинейный характер, поэтому поданный на вход усилителя сигнал синусоидальной формы претерпевает изменения и на выходе он уже отличается от синусоидального. Таким образом, сам транзистор является источником нелинейных искажений. Если амплитуда входного сигнала остаётся в пределах прямолинейного участка «АВ», то искажения полезного выходного сигнала будут минимальными, поэтому многокаскадные усилители строят таким образом, чтобы первые каскады усиления работали при низких уровнях входного сигнала. Нелинейные искажения, в этом случае, появятся только в выходном каскаде, который работает в режиме большого сигнала, и нелинейные искажения не получат дальнейшего усиления.

3.4. *Параметры усилителя:*

- *коэффициент усиления по напряжению* $K_U = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$;
- *коэффициент усиления по току* $K_I = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$;

- коэффициент усиления по мощности $K_p = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$;
- коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_n}{P_{затр.}}$;
- входное и выходное сопротивления усилителя по переменной составляющей сигнала.

Коэффициенты усиления могут быть выражены как в относительных единицах, так и в логарифмических — **децибелах**.

Для получения достаточно большого коэффициента усиления используют включение нескольких каскадов, так как в этом случае общий коэффициент усиления (если он будет выражен в относительных единицах) будет равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Если же коэффициент усиления выражен в децибелах, то в многокаскадном усилителе общий коэффициент усиления будет равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов.

4. Режимы усиления

Режимы усиления выделены в несколько классов. Для усилителей наиболее распространенными являются классы *A*, *B*, *C*, *D* или их комбинированные варианты (*AB*, *AB₁* и т.д.). На рис.6.5 даны временные диаграммы коллекторного тока в режимах усиления класса «A» и «B». Форма коллекторного тока дает представление об уровне нелинейных искажений в выходном сигнале усилителя в зависимости от класса усиления.

4.1. В режиме класса «A» форма коллекторного тока почти идеальная, то есть уровень нелинейных искажений в выходном сигнале усилителя будет практически незаметен. Такая совершенная форма выходного коллекторного тока возможна лишь в том случае, если рабочая точка задана на квазилинейном участке *ВАХ* (в данном случае на рис.6.5а это точка ***PT₁***): положение *РТ* выбирают так, чтобы амплитуда переменной составляющей выходного тока была меньше тока покоя. В режиме класса «A» ток через транзистор течет непрерывно в течение всего периода изменения входного сигнала.

Для оценки времени протекания тока через транзистор вводится понятие угла отсечки коллекторного тока « θ » – это половина интервала времени, в течение которого через транзистор течет ток. Угол отсечки коллекторного тока выражен обычно в градусах или радианах. В режиме класса «А» угол отсечки коллекторного тока $\theta_A = 180^\circ$.

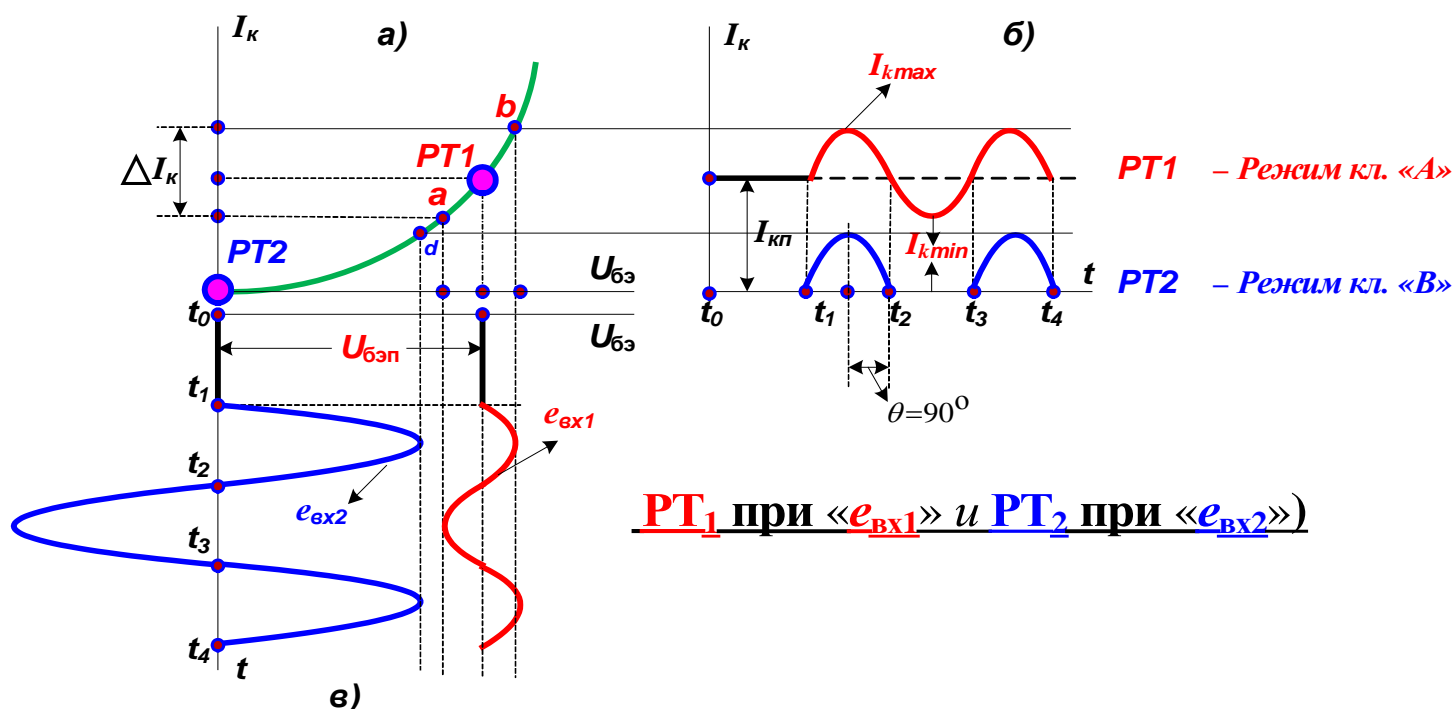


Рис.6.5. Режимы усиления класса «А» и «В»: а – передаточная ВАХ; б – временные диаграммы коллекторного тока для режимов кл. «А» и кл. «В»; в – временные диаграммы входного напряжения при разных положениях РТ

К недостатку рассмотренного режима следует отнести низкий коэффициент полезного действия ($KПД < 0,5$) за счёт большого коллекторного тока покоя. Из-за низкого КПД режим класса «А» рекомендуется использовать в каскадах предварительного усиления, а также в маломощных выходных каскадах.

4.2. В режиме класса «В» рабочая точка задаётся при токе покоя $I_{кп} = 0$ (на рис. 5.5а это PT_2). Из временной диаграммы коллекторного тока (рис.5.5б) видно, что форма его далека от идеальной, то есть уровень нелинейных искажений по сравнению с режимом класса «А» резко возрос. Но $KПД$ усилителя достаточно высокий за счёт малого тока покоя, поэтому режим класса «В» рекомендуется использовать в двухтактных выходных уси-

лителях средней и большой мощности, но надо отметить, что в чистом виде этот режим используется редко. Чаще в качестве рабочего режима используется промежуточный режим – режим класса «АВ» в котором меньше нелинейные искажения. Угол отсечки коллекторного тока в режиме класса «В» в идеальном случае $\theta_B = 90^\circ$, а в режиме класса «АВ» – $\theta_{AB} > 90^\circ$.

4.3. В режиме класса «С» ток покоя равен нулю, угол отсечки меньше, чем в режиме класса «В». Режим класса «С» рекомендуется использовать в мощных резонансных усилителях, где нагрузкой является резонансный контур.

4.4. В режиме класса «Д» транзистор находится в двух устойчивых состояниях – «открыт-закрыт», то есть режим класса «Д» – это ключевой режим.

5. Усилители напряжения звуковых и средних частот

В зависимости от частотного диапазона характер нагрузки меняется; в диапазоне звуковых частот в качестве такой нагрузки в коллекторной цепи используется обычный резистор (рис. 6.6а), а в высокочастотном диапазоне – избирательная система, например, параллельный колебательный контур (рис. 6.6б).

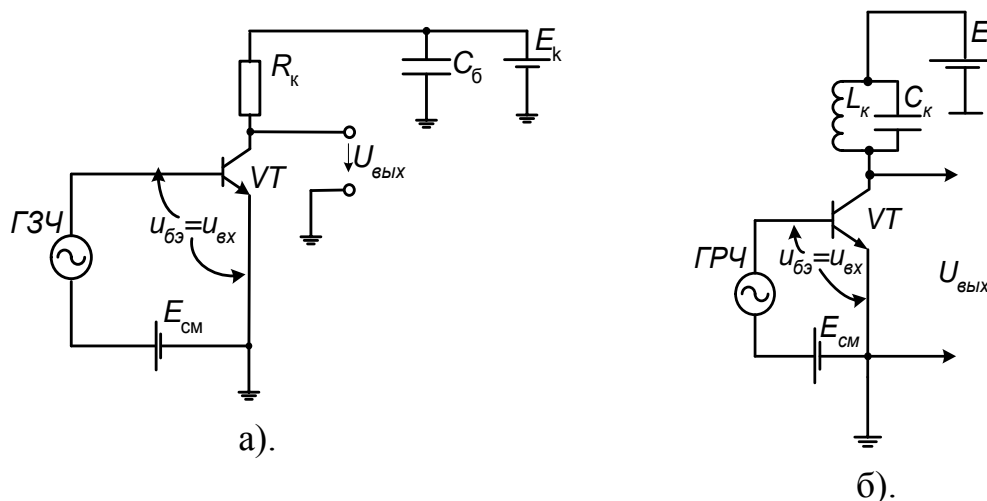


Рис. 6.6. Схемы усилителей: а – усилитель напряжения звуковой частоты; б – усилитель радиочастот

На рис.6.6:

ГЗЧ – генератор напряжения низких частот (звуковых).

ГРЧ – генератор напряжения высоких частот (радиочастот).

Особенности каждой из схем усилителей на биполярном транзисторе при разных схемах включения.

В качестве усилителей мощности на биполярных транзисторах наибольшее распространение получили схемы с ОЭ, так как при таком включении схема обеспечивает усиление и по току, и по напряжению.

Хорошим усилением по напряжению обладает схема усилителя на транзисторе с ОБ, но она не усиливает по току и имеет плохие согласующие свойства, что важно в случае многоступенных усилителей. Но не надо забывать о том, что транзистор в схеме с ОБ показывает лучшие (среди трёх схем включения) температурные и частотные свойства, и, кроме того, эта схема хорошо усиливает по напряжению, поэтому она может быть использована в качестве усилителя мощности.

Схема усилителя на транзисторе с ОК имеет лучшие согласующие свойства, она лучше других усиливает по току, но усиления напряжения в ней нет.

Рабочий режим транзистора в схемах с ОЭ и ОБ характеризуется включением нагрузки в цепь коллектора, а в схеме с ОК — в цепь эмиттера.

5.1. Способы подачи напряжения смещения в усилителях.

Недостатком схем с автономным смещением (рис.5.6) является наличие двух источников напряжения ($E_{см}$ и $E_{к}$).

Вопрос задания рабочей точки (**РТ**) решается двумя способами — она задается либо *автономным* независимым источником (рис.6.6), но этот метод неэкономичен особенно в многоступенных усилителях, либо применяется *автоматическая подача напряжения смещения в цепь базы*. В современных усилительных каскадах предпочтение отдаётся второму способу: схема «сама» вырабатывает напряжение автосмещения для того, чтобы задать РТ. Рабочая точка задается постоянными составляющими токов и напряжений

в режиме покоя. На рис. 6.7 и 6.8 даны две схемы усилителей на транзисторах с ОЭ с автоматической подачей напряжения смещения в цепь базы.

Существует два метода автоматической подачи напряжения в цепь базы:

1. Подача напряжения смещения от источника коллекторного напряжения E_k через гасящий резистор (на рис.6.7 — через резистор $R_{б1}$) — *метод фиксированного тока*.

2. Подача напряжения смещения от источника коллекторного напряжения E_k через делитель напряжения (на рис.6.8 — делитель напряжения из резисторов $R_{б1}$ и $R_{б2}$) — *метод фиксированного напряжения*.

5.2. О назначении элементов в схемах усилителей на рис. 6.7; рис.6.8.

Внимание. Пункт 5.2. проработать надо особенно внимательно и не торопясь: чтобы в дальнейшем уметь проектировать электронные усилители, необходимо чётко представлять назначение каждого элемента, его роль при настройке усилителя в определённом режиме.

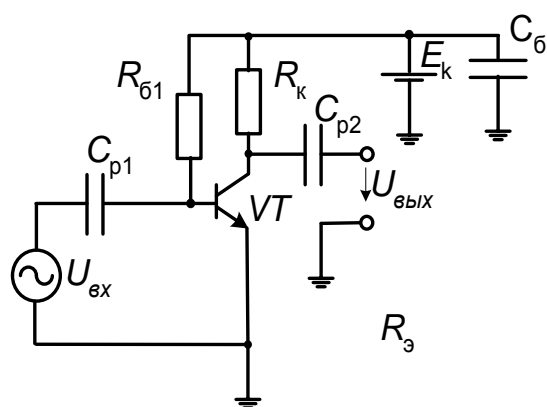


Рис. 6.7. Схема УЗЧ с ОЭ с автосмещением через гасящий резистор

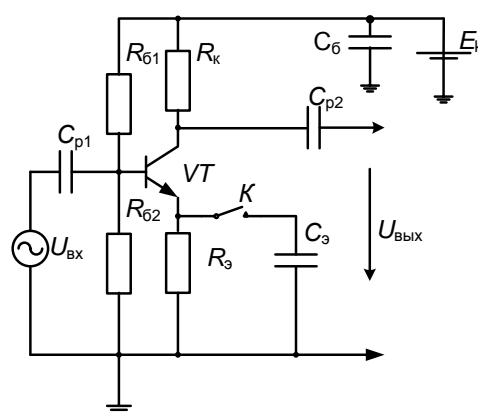


Рис.6.8. Схема УЗЧ с ОЭ с автосмещением через делитель напряжения

- E_k — напряжение источника питания в коллекторных цепях усилителей. Энергию этого источника схема преобразует в переменную и подчиняет форме входного сигнала.

- *Генератор переменной ЭДС ($U_{вх}$)* на входе усилителей – напряжение этого генератора надо будет усиливать.

- *Разделительные конденсаторы C_{p1} (и C_{p2})* не допускают поступления на вход усилителя постоянной составляющей, которая может быть в генераторе переменной ЭДС (от генератора входного сигнала $U_{вх}$). Сопротивления этих конденсаторов на самой низкой частоте должны быть минимальными, чтобы не произошло «завала» частотной характеристики. На рис.5.9 приведена схема замещения входной цепи усилителя с акцентом на потери (U_c) полезного входного сигнала на сопротивлении разделительного конденсатора. Ранее, на рис 5.2, была показана АЧХ усилителя, на которой виден срез («завал») на низкой частоте, одной из причин которого может оказаться неправильно подобранная ёмкость разделительного конденсатора.

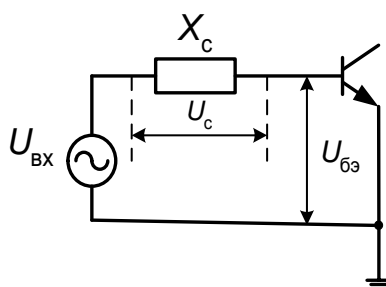


Рис.6.9.. *Влияние сопротивления конденсатора C_p на коэффициент усиления по напряжению ($U_{бэ} = U_{вх} - I_б X_c$, где $I_б X_c$ – падение напряжения полезного переменного сигнала на сопротивлении конденсатора).*

- $C_б$ – блокировочный конденсатор. $C_б$ устраняет потери полезного переменного напряжения на внутреннем сопротивлении источника E_k .

- *Резисторы $R_{б1}$, $R_{б2}$, $R_э$* – элементы автосмещения и температурной стабилизации положения РТ на ВАХ – *режимные элементы*.

- *Резистор R_k* – нагрузка в коллекторной цепи.

- *Ключ «К»* в схеме на рис.6.8 в цепи эмиттера – коммутирует цепь конденсатора $C_э$ (ключ отключает или включает в схему конденсатор $C_э$). Сопротивление конденсатора $C_э$ по переменной составляющей тока в 5 ...10 раз меньше сопротивления $R_э$. При положении ключа «К» в позиции «замк-

нут» конденсатор C , шунтирует резистор R , ($\varphi_{\sim} \approx 0$) и, таким образом, в схеме усилителя устраняется ООС по переменной составляющей тока. При разомкнутом ключе «К» в схеме будет действовать ООС по переменной составляющей тока, которая значительно повлияет на усилительные свойства усилителя по напряжению (ООС уменьшает коэффициент усиления усилителя по напряжению).

Примечание. По ООС материал дан в лекции 7.

5.3. Проектирование и расчёт усилительных каскадов.

Для нормальной работы усилительного каскада (отсутствие нелинейных, частотных искажений, влияние температурного фактора и пр.) необходимо обеспечить требуемый режим при отсутствии входного сигнала, то есть установить определенные токи и напряжения, значения которых зависят от схемного решения усилительного каскада и от выбора рабочей точки на семействе его входных и выходных характеристик.

Расчёт схемы усилителя можно вести аналитическим, или графоаналитическим способами.

Аналитический способ расчёта усилителя ведётся на основании законов и формул, с которыми Вы ознакомились в курсе Электротехники.

Графоаналитический способ расчёта усилительного каскада ведётся с использованием вольтамперных характеристик транзистора, на котором проектируется усилитель

Мы объединим эти два способа.

Расчёт усилительного каскада будем вести в два этапа:

В 1-ом этапе проектирования мы подготовим усилитель к основной его функции — усилению входного переменного сигнала. В 1-ом этапе расчёта определим положение рабочей точки (РТ) на ВАХ, рассчитаем режимные элементы под эту РТ, рассчитаем элементы температурной стабилизации РТ на ВАХ. Все эти расчёты проводятся в *режиме покоя* — это режим, когда генератор входного переменного сигнала отключен, и во входных, и выходных цепях усилителя действуют только постоянные источники напряжения. Токи, протекающие в цепях эмиттера, базы, коллектора, называются *токами покоя*.

Во 2-ом этапе проектирования по результатам работы первого этапа рассчитаем основные параметры усиления — коэффициенты усиления по току, по напряжению, по мощности, коэффициент полезного действия.

5.3.1. Графоаналитический расчёт усилителей.

1-й этап проектирования усилителя.

5.3.1.1. Расчёт схемы усилителя в активном режиме по схеме рис.6.7.

Выполним расчёт схемы простейшего усилителя в активном режиме на транзисторе с ОЭ с автоматической подачей напряжения смещения в цепь базы через гасящий резистор $R_{б1}$ (метод «фиксированного тока»).

Усилитель будем проектировать на транзисторе КТ312А. Предельные электрические параметры КТ312А и условие на задание приведены ниже на рис.6.12.

Поскольку в первом этапе расчёта будем работать только с постоянными составляющими токов и напряжений, то схему усилителя (рис.6.7) для удобства расчётов дадим в режиме покоя (рис.6.11). Пусть Вас не смущает некоторый повтор: схема рис.6.7. представлена в этой работе второй раз (здесь она у нас пойдёт под № 6.10). Но схема на рис.6.11. — это фрагмент схемы усилителя, выделенный для того, чтобы чётко отделить режим покоя от режима усиления. Эти две схемы лучше видеть рядом.

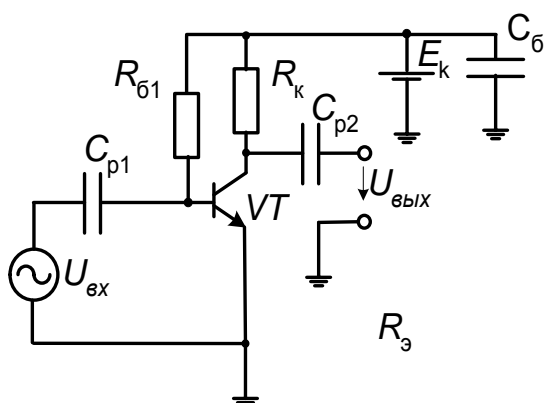


Рис. 6.10. Схема УЗЧ на транзисторе с ОЭ с автосмещением через гасящий резистор

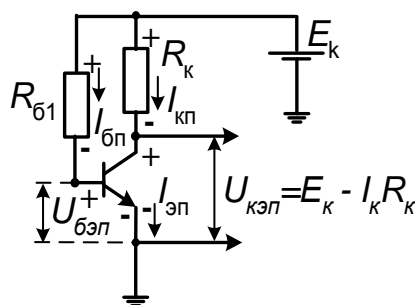


Рис.6.11.Схема усилителя в режиме покоя (с ОЭ)

Последовательность действий при расчётах усилителя.

1. В первую очередь определяется рабочая область на ВАХ. Для этого на семействе коллекторных ВАХ строится характеристика мощности рассеяния на коллекторном переходе ($P_{к,доп}$), допустимой для данного КТ312А (результаты расчёта $P_{адоп}$ приведён в табл.1).

Таблица 1

$P_{к,доп}$, мВт	450	450	450	450	450	450
$U_{кэ}$, В	10	12	15	16	18	20
$I_{к}$, мА	45	37,5	30	28	25	22,5

2. Построим на выходных ВАХ транзистора(рис.6.12) нагрузочную характеристику.

В основе построения нагрузочной характеристики усилителя лежит уравнение транзистора в рабочем режиме

$$U_{кэ} = E_{к} - I_{к} R_{к} \quad (6.1)$$

Уравнение транзистора в рабочем режиме (6.1) — *это уравнение прямой линии*. Следовательно, нагрузочная характеристика также будет в виде прямой линии, и построить её можно по двум точкам. Для построения нагрузочной характеристики возьмём во внимание два крайних состояния транзистора — «закрыт-открыт». Когда транзистор закрыт, то в его цепи течёт лишь ток неосновных носителей ($I_{кэ0}$), а им, при нормальной температуре, можем пренебречь. Следовательно, напряжение на коллекторе закрытого транзистора равно напряжению питания $E_{к}$ — *тчка. «С»* на оси напряжения. Если транзистор открыт до насыщения, то его сопротивление близко к нулю, и ток через него ограничивается лишь сопротивлением $R_{к}$

$$I_{к.нас} = \frac{E_{к} - U_{кэ.нас}}{R_{к}} \approx \frac{E_{к}}{R_{к}}, \quad (6.2)$$

В режиме насыщения напряжение на коллекторе не превышает 0,05 ... 0,1В, поэтому мы пренебрегли этой величиной и, таким образом, получим вторую точку нагрузочной характеристики — *тчка. «А»*.

Соединяем точки «А» и «С». Полученная прямая «АС» — это нагрузочная характеристика.

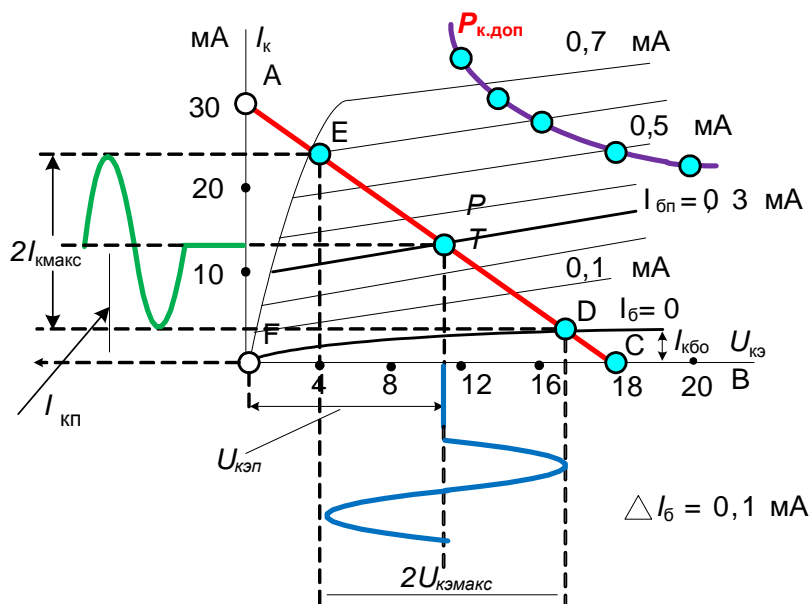


Рис.6.12.

Предельные электрические параметры КТ312 А

$$U_{кб} = 30 \text{ В};$$

$$U_{эб} = 4 \text{ В};$$

$$I_k = 30 \text{ мА};$$

$$h_{21} = 12 \dots 100;$$

$$P_{кдоп} = 450 \text{ мВт}.$$

Задание для расчёта:

$U_{кб} = 18 \text{ В}$ — напряжение на коллекторе закрытого транзистора;

$$R_k = 0,6 \text{ кОм}.$$

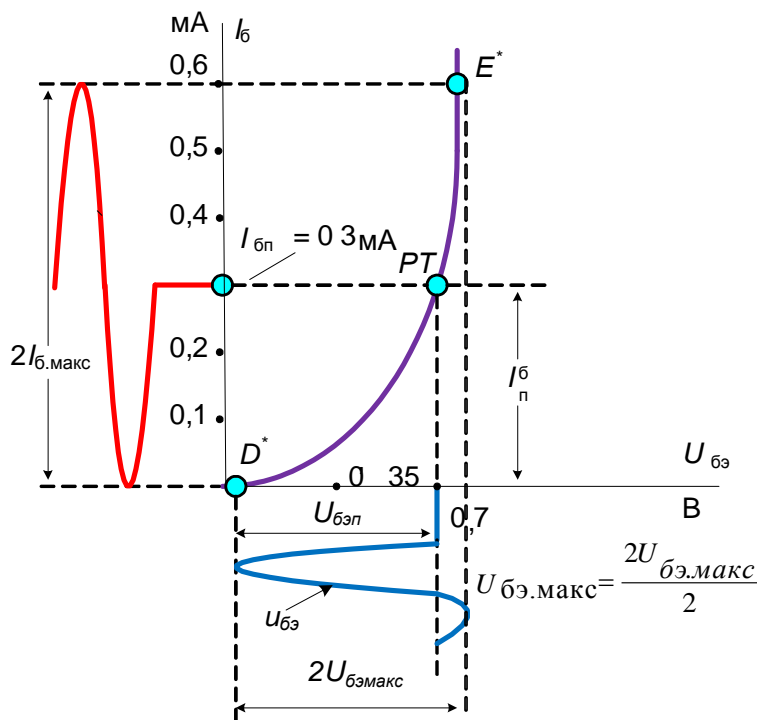


Рис.6.13.

Если использовать всю протяжённость нагрузочной характеристики «АС», то произведение коллекторного напряжения на коллекторный ток —

эта самая максимальная мощность, которую можно «выжать» из усилителя. Но при проектировании усилителей требование к такому параметру, как мощность — не единственное. Есть ещё довольно жёсткие требования к таким характеристикам, как уровень нелинейных искажений, которые искажают форму полезного выходного сигнала, частотные искажения и т.д. Рассмотрим нагрузочную характеристику подробнее. Участок « AE » — это участок повышенных нелинейных искажений, а участок « DC » — участок неуправляемых токов ($I_{кэ0}$). Использовать эти участки в процессе усиления сигнала не стоит. Поэтому ограничиваем протяжённость рабочего участка нагрузочной характеристики участком « ED ».

3. Перенесём рабочий участок нагрузочной характеристики на входную ВАХ транзистора (рис.6.13).

Зададим PT на построенной нагрузочной характеристике. Напряжение смещения составляет доли вольта (0,6...0,9) В. При этом важно, чтобы изменения базового тока относительно PT были симметричными. В нашем примере ток базы меняется от 0,6 мА до 0, следовательно, **ток базы покоя $I_{бп}$ будет равен 0,3 мА**. Допустимая амплитуда базового переменного тока, при подключении генератора входного переменного сигнала, будет равна 0,3 мА (рис.5.13).

4. Выпишем параметры PT :

$U_{бэп} = 0,6$ В; $I_{бп} = 0,3$ мА; $U_{кэп} = 11$ В; $I_{кп} = 13$ мА; $P_{к.} = U_{кэп} I_{кп} = 143$ мВт < 450 мВт.

5. Рассчитаем сопротивление гасящего резистора $R_{б1}$. Напряжение смещения ($U_{бэп}$) составляет доли вольта (0,6...0,9) В. Следовательно, большая часть напряжения от источника гасится на резисторе $R_{б1}$ и сопротивление этого резистора всегда будет достаточно большим.

$$R_{б1} = \frac{E_{к} - U_{бэп}}{I_{бп}} = \frac{18 - 0,6}{0,3} = 58 \text{ кОм.} \quad (6.3)$$

6. Убедимся в том, что транзистор поставлен в активный режим.

В рабочей точке ток $I_{кп} = 13$ мА, падение напряжения на резисторе $R_{к}$ будет равно $U_{кп} = I_{кп} R_{к} = 11,7 \times 0,6 = 7,02$ В, следовательно, напряжение на участке «коллектор-эмиттер» в режиме покоя $U_{кэп} = 18 - 7,02 = 10,98$ В ≈ 11 В — активный режим.

Примечание. Вообще, в активном режиме напряжение на участке «коллектор-эмиттер» примерно равно $U_{кэп} \approx \frac{E_k}{2}$.

2 этап проектирования

5.3.2. Расчёт основных параметров в режиме усиления.

Работаем по схеме рис.6.7. (или по схеме рис.6.10)

Определяем параметры усиления по полученным построениям:

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{U_{кэмакс}}{U_{бэмакс}} = \frac{6,3}{0,35} = 18;$$

Внимание. Стоит обратить внимание на форму переменного напряжения $U_{бэ}$ на входе усилителя (Рис.6.13): форма сильно искажена, несмотря на то, что на вход был подан сигнал синусоидальной формы ($u_{вх} = U_{вх.макс} \sin \omega t$). Это ещё раз подтверждает тот факт, что входное сопротивление транзистора носит нелинейный характер (вспомним входную ВАХ транзистора).

Коэффициент усиления по току

$$K_i = \frac{I_{кмакс}}{I_{бмакс}} = \frac{10,5}{0,3} = 35;$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = K_u K_i = 18 \times 35 = 630;$$

Полезная мощность, выделенная на нагрузке

$$P_n = 0,5 U_{кэмакс} I_{кмакс} = 0,5 \times 6,3 \times 10,5 = 33,075 \text{ мВт}.$$

Внимание. Проверим правильность выполненных построений.

Полученные графики должны отражать:

- значение базового тока покоя на входной и выходной ВАХ должны соответствовать одному и тому же значению ($I_{бп} = 0,3 \text{ мА}$);

- амплитудное значение базового тока на входной ВАХ должно соответствовать заданному значению на выходной ВАХ ($I_{б.макс} = 0,3 \text{ мА}$);
- факт усиления напряжения и тока;
- факт инверсии входного сигнала на выходе (изменение фазы).

5.3.3. Расчёт схемы усилителя по схеме рис.6.8 в активном режиме.

Расчёт схемы усилителя на рис.6.8 ведётся аналогично расчётам, проделанным для схемы на рис.5.7. Отметим лишь некоторые особенности этой схемы. Для этого представим схему усилителя в режиме покоя (рис.6.14).

В схеме усилителя используется другой метод подачи напряжения смещения — *метод фиксированного напряжения* (через делитель напряжения из резисторов $R_{б1}$ и $R_{б2}$). Кроме того, схема содержит элемент термостабилизации положения РТ на ВАХ ($R_э$). Дело в том, что при изменении температуры режим транзистора может измениться (о температурных свойствах транзистора подробно было сказано в лекции 3). Следовательно, важно не просто задать **РТ** на ВАХ, но надо еще и обеспечить ей температурную стабильность.

Уравнение транзистора в рабочем режиме для схемы на рис.6.14

$$U_{кэ} = E_k - (I_{кп} R_k + I_{эн} R_э). \quad (6.4)$$

Нагрузочная характеристика строится и обрабатывается по тем же правилам, что и для схемы рис.6.12, поэтому для схемы на рис.6.14 строить её не будем: за счёт резистора термостабилизации $R_э$ нагрузочная будет иметь несколько другой наклон.

Проведём чисто аналитически расчёт только режимных элементов для схемы на рис. 5.14.

Рассчитаем сопротивление резистора $R_{б1}$.

Токи, протекающие через $R_{б1}$, — это сумма токов делителя и базы покоя (I_d и $I_{бп}$). Эти токи должны быть взаимно независимыми, поэтому ток делителя берется значительно больше, чем ток базы покоя:

В мощных каскадах усиления ток делителя берется больше тока базы покоя в $3 \div 5$ раз, а в маломощных усилителях — в $5 \div 10$ раз.

Таким образом, при изменении температуры изменяется лишь напряжение $U_{эп}$. Это напряжение автоматически изменяет смещение на базе, возвращая РТ в заданное ранее положение на ВАХ.

Примечание. Если в процессе расчётов значение $U_{эп}$ не оговорено и нет возможности применить какой-то другой метод при его расчёте, например, $U_{эп} = E_K - I_{кп} R_K - U_{кэп}$, то допускается взять $U_{эп} \approx (0,2 \dots 0,3) E_K$.

$U_{кэп} \approx 0,5 E_K$. — в активном режиме.

Сущность процесса термостабилизации РТ на ВАХ

Вернёмся к рис.6.15. При изменении температуры с 20°C до 50°C входная ВАХ сместилась влево (объяснение этому есть в разделе «Полупроводниковые диоды», лекция 1), ток базы увеличился (РТ сместилась в точку «а»). Ток коллектора, связанный с током базы через $\langle h_{21} \rangle$, тоже увеличивается, и, таким образом, увеличение температуры изменило режим транзистора и выходные показатели усилителя. Чтобы ток базы, а, следовательно, и ток коллектора приняли прежнее значение, необходимо уменьшить напряжение смещения на базе (с 0,6 В до 0,5 В на рис.6.15).

Воспользуемся схемой усилителя на рис.6.14, когда генератор усиленного сигнала отключен. Назовём напряжение $U_{эп}$ напряжением отрицательной обратной связи (ООС), так как по отношению к напряжению на резисторе $R_{б2}$ оно включено последовательно и встречно (рис.6.16).

При увеличении токов базы, коллектора и сквозного тока $I_{кэо}$ увеличивается постоянная составляющая тока в цепи эмиттера $I_{эп}$, при этом увеличивается и падение напряжения $U_{эп}$ на резисторе $R_э$. Следовательно, напряжение на базе уменьшается, ток базы уменьшается до требуемого значения, и ток коллектора тоже уменьшается. РТ перемещается в заданное ранее положение на ВАХ (в точку «б»). Таким образом, напряжение на $R_э$ изменяется пропорционально току коллектора, следовательно, в схеме усилителя действует ООС по току, которая и обеспечивает температурную стабилизацию РТ. Такой способ стабилизации положения РТ на ВАХ получил название эмиттерной стабилизации.

Определяем сопротивление резистора в цепи эмиттера $R_э$

$$R_э = U_{эп} / I_{эп},$$

где $I_{эн} = I_{бн} + I_{кн} + I_{кэ0}$ – постоянная составляющая тока эмиттера.

Определяем сопротивление резистора R_k в цепи коллектора

$$R_k \approx R_{э} / 0,25 \approx 4 R_{э}.$$

Определяем параметры усиления:

Коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{ВЫХ. М} / I_{ВХ. М};$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{ВЫХ. М} / U_{ВХ. М} = I_{ВЫХ. М} R_k / U_{ВХ. М} = S R_k;$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = U_{ВЫХ. М} I_{ВЫХ. М} / U_{ВХ. М} I_{ВХ. М} = K_u K_i;$$

Полезная мощность, выделенная в нагрузке

$$P_{ВЫХ. М} = 0,5 U_{ВЫХ. М} I_{ВЫХ. М}.$$

5.3.4. Схема эмиттерного повторителя (рис.6 17).

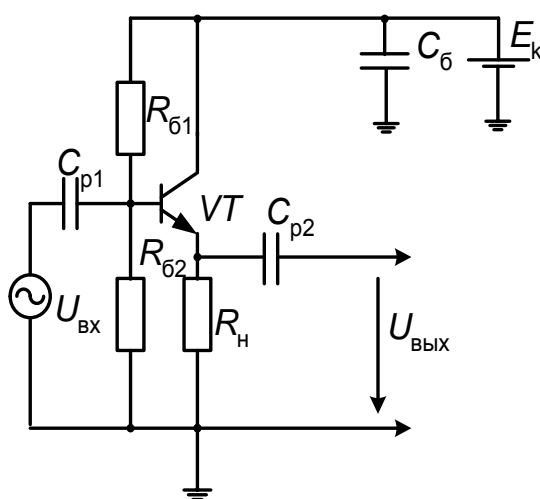


Рис.6.17

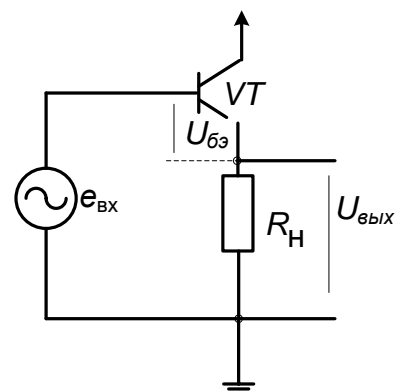


Рис.6.18

На рис.6.18. приведена часть схемы эмиттерного повторителя (ЭП), которая включает в себя входную и выходную цепи.

По этой схеме видно, что входное напряжение « $e_{вх}$ » распределяется между входным сопротивлением транзистора и сопротивлением нагрузки. Таким образом, усиления напряжения в схеме ЭП нет ($K_u \approx 0,95$). Выведем формулу для коэффициента передачи по напряжению в ЭП

$$K_u = \frac{U_{ВЫХ}}{e_{вх}} = \frac{i_{\varepsilon} R_H}{u_{\varepsilon\delta} + i_{\varepsilon} R_H} = \frac{SR_H}{1 + SR_H} < 1. \quad (\text{рис.6.8})$$

Выходным током является эмиттерный ток, а входным — ток базы. Следовательно, схему ЭП можно использовать в качестве усилителя мощности за счёт усиления по току. Но это не единственный случай использования схемы ЭП. Включение нагрузки в цепь эмиттера обеспечивает в схеме 100% ООС по переменному напряжению, за счёт которой схема ЭП имеет очень большое входное сопротивление. *Имея большое входное и малое выходное сопротивления, схема ЭП широко используется для согласования высокоомной нагрузки с низкоомной, например, во входных цепях измерительных вольтметров, осциллографов.* Также, для создания низкого выходного сопротивления в ЭСЛ-логике, на выходе включаются ЭП.

5.3.5. Схема усилителя на транзисторе с ОБ (рис.6.19)

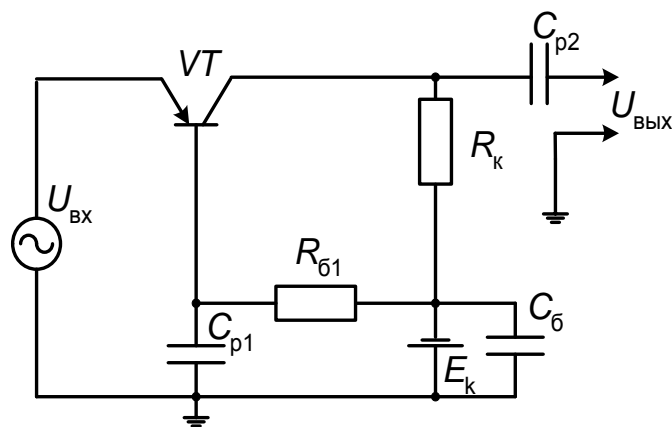


Рис. 6.19. Схема УЗЧ на транзисторе с ОБ с автосмещением через гасящий резистор

Смещение на базу подано методом *фиксированного тока* (через резистор R_{61}). Расчёт этого элемента ведём по формуле (6.3).

Особенности схемы усилителя:

- схема не усиливает по току

$$\bullet \quad \alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E}.$$

- схема хорошо усиливает по напряжению, поэтому её можно использовать в качестве усилителя мощности.
- схема имеет хорошие температурные и частотные свойства.
- у схемы усилителя плохие согласующие свойства, так как выходное сопротивление гораздо больше входного.

6. Теоретическое обобщение по теме.

Рекомендации по выбору транзисторов при использовании их в усилительном режиме

1. Выбор типа транзистора

При выборе типа транзистора в схему усилителя или ключа исходят из характера электронной схемы, а также требований к ее выходным электрическим параметрам и эксплуатационным режимам. Особое значение имеет диапазон рабочих температур конструируемого устройства в целом.

Необходимо иметь в виду, что кремниевые транзисторы по сравнению с германиевыми лучше работают при повышенной температуре (вплоть до 125 °С), но их коэффициент передачи по току сильно уменьшается при низких температурах.

Не рекомендуется применять мощные транзисторы в тех случаях, когда можно использовать маломощные, поскольку при работе мощных транзисторов, при малых токах, которые могут быть соизмеримы с обратным током коллектора, коэффициент передачи по току сильно зависит от тока, температуры окружающей среды, и, кроме того, мал по абсолютной величине.

Использование мощных транзисторов без теплоотводов приводит к температурной неустойчивости работы транзистора.

Частотный предел усиления и генерирования транзисторов должен строго соответствовать схемным требованиям. Не следует применять высокочастотные транзисторы в низкочастотных каскадах, поскольку *они склонны к самовозбуждению.*

2. Выбор схемы включения

При выборе схемы включения транзистора по переменному току следует учитывать особенности различных схем.

Схема включения с ОБ обладает сравнительно малым входным и большим выходным сопротивлением, однако, сравнительно небольшая зависимость параметров от температуры и более равномерная частотная характеристика выгодно отличает ее от других схем включения. В схеме с ОБ достигаются максимальные значения коллекторного напряжения, что важно для использования в ней мощных транзисторов.

Схема включения с ОЭ обладает наибольшим усилением по мощности, что уменьшает количество каскадов в схеме, но неравномерная частотная характеристика, большая зависимость параметров от температуры и меньшее максимально допустимое коллекторное напряжение снижают преимущества этой схемы включения. Входные и выходные сопротивления усилителя на транзисторах, включенных в схему с ОЭ, отличаются меньше, чем в схеме с ОБ, что облегчает построение многокаскадных усилителей.

Схема включения с ОК (эмиттерный повторитель) обладает большим входным и малым выходным сопротивлением. Это свойство находит широкое применение в согласующих каскадах. Частотная характеристика схемы сходна со схемой включения транзистора с ОЭ.

Порядок выбора схемы включения для транзисторов, работающих в режиме переключения, практически не отличается от случая работы их в усилительном режиме.

3. Выбор режима работы транзистора.

При выборе режима работы транзистора не допускается превышение максимально допустимых значений напряжений, токов, температуры, мощности рассеяния, указанных в предельно допустимых режимах. *Как правило,*

транзистор работает более устойчиво при неполном использовании его по напряжению и полном использовании его по току, чем наоборот. Не допускается работа транзистора при совмещенных максимально допустимых режимах, например, по напряжению и по току, и т.п.

Область рабочего тока коллектора I_K ограничена, с одной стороны, значением обратного тока коллектора I_{K60} (при максимальной рабочей температуре, и для устойчивой работы принимается $I_K = 10 I_{K60.max}$), с другой стороны I_K ограничен максимально допустимым значением $I_{K.max}$.

При выборе напряжения коллектора следует иметь в виду: максимальное напряжение коллектора ограничено его максимально допустимым значением в технических условиях (ТУ). Опыт показывает, что для повышения надежности и стабильности работы транзистора следует выбирать *рабочее напряжение на коллекторе примерно 0.7 от максимально допустимого значения для соответствующей схемы включения*, с учетом зависимости от температуры и тока коллектора.

При определении мощности, рассеиваемой транзистором, следует иметь в виду, что суммарная мощность по входу и выходу во всем рабочем диапазоне не должна быть выше максимально допустимого значения, указанного в технических условиях (ТУ).