

ІІТМО

Электронные усилители

Николаев Николай Анатольевич

2023

Структура лекции:

- Классификация электронных усилителей
- Основные параметры и характеристики операционных усилителей



Электронные усилители. Определение.

Электронным усилителем называют устройство, в котором при изменении усиливаемого маломощного усиливаемого сигнала происходит усиление мощности в цепи нагрузки.

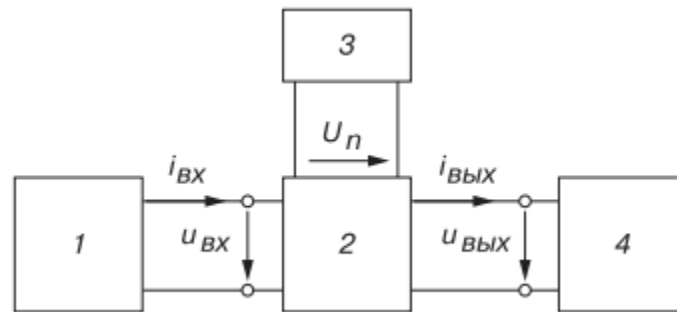


Усилитель можно представить в виде четырехполюсника 2 со своим источником питания 3, к входным зажимам которого подключен источник сигнала 1, а к выходным – нагрузка 4.

Усиление входного сигнала по мощности (по напряжению, по току) происходит за счет преобразования электрической энергии источника питания в энергию выходного сигнала вследствие изменения сопротивления усилительных элементов.

Если один усилительный элемент усилителя не обеспечивает необходимого усиления сигнала, используют несколько усилительных элементов (многоступенчатые усилители).

Один усилительный элемент и отнесенные к нему элементы называют усилительным каскадом.



По усиливаемой величине:

- ✓ усилители напряжения
- ✓ усилители тока
- ✓ усилители мощности

По характеру усиливаемых сигналов:

- ✓ усилители гармонических сигналов
- ✓ усилители импульсных сигналов
- ✓ Усилители сигналов другой формы

По частотному диапазону:

- ✓ усилители постоянного тока
- ✓ усилители низкой частоты (усилители звуковой частоты $f < 30$ кГц)
- ✓ усилители высокой частоты $f < 300$ МГц
- ✓ усилители сверхвысокой частоты $f < 300$ ГГц

По ширине частотного спектра выходного сигнала:

- ✓ усилители широкополосные
- ✓ усилители узкополосные (резонансные)



По схеме включения транзисторов:

- ✓ с общим эмиттером (ОЭ);
- ✓ с общей базой (ОБ);
- ✓ с общим коллектором (ОК);
- ✓ с общим истоком (ОИ);
- ✓ с общим стоком (ОС);
- ✓ с общим затвором (ОЗ)

По количеству каскадов усиления:

- ✓ однокаскадные;
- ✓ многокаскадные (каскад предварительного усиления, промежуточные и выходной каскады);

По типу связи между каскадами:

- ✓ Резистивная (гальваническая),
- ✓ ёмкостная,
- ✓ трансформаторная.



- ✓ Входные параметры усилителя: входное напряжение $U_{вх}$, входной ток $I_{вх}$, мощность сигнала $P_{вх}$ и входное сопротивление усилителя $R_{вх}$.
- ✓ Выходные параметры усилителя: выходная мощность $P_{вых}$, выдаваемая в нагрузке, выходное напряжение $U_{вых}$ (U_n), выходной ток $I_{вых}$ (I_n), определяемые при работе усилителя на расчетное сопротивление нагрузки R_n .
- ✓ Коэффициент усиления усилителя по напряжению $K_u = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}$
- ✓ Коэффициент усиления по току $K_i = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}$
- ✓ Коэффициент усиления по мощности $K_p = \frac{\Delta P_{вых}}{\Delta P_{вх}}$
- ✓ Коэффициент полезного действия (КПД) $\eta = P_n / P_{п}$, где P_n - мощность в нагрузке, $P_{п}$ - мощность от источника питания.



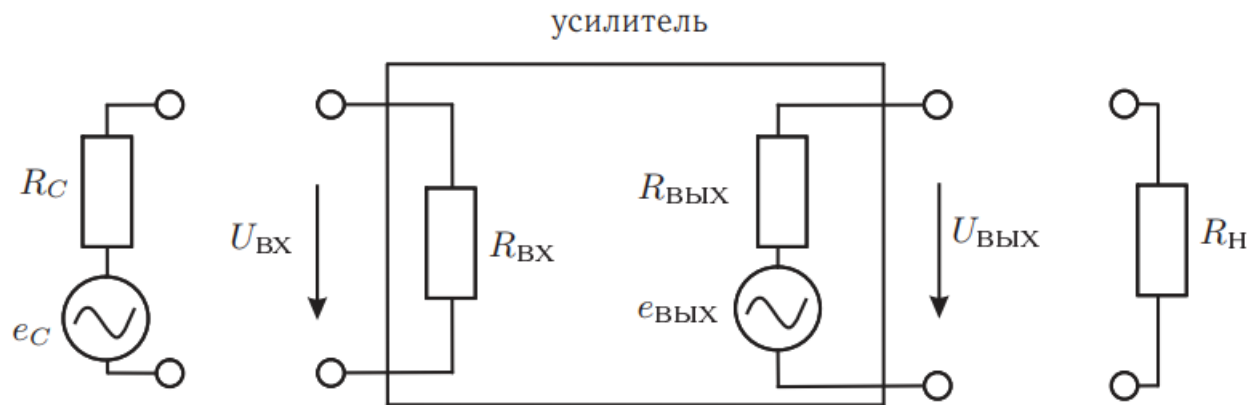
Эффективная работа усилителя



Для эффективной работы усилителя важно согласовать сопротивление источника сигнала с входным сопротивлением усилителя, а также сопротивление нагрузки с выходным сопротивлением усилителя.

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ.m}}{I_{ВХ.m}}$$

$$R_{ВЫХ} = - \left. \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta i_{ВЫХ}} \right|_{U_{ВХ} = \text{const.}}$$

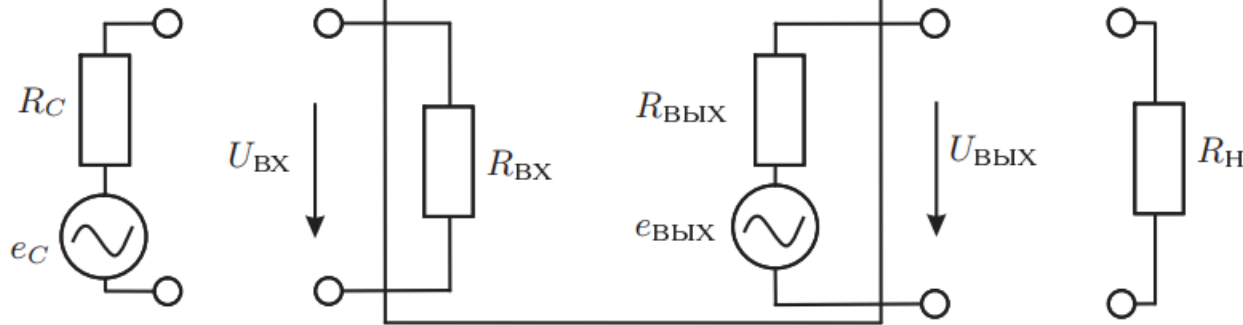


Эффективная работа усилителя

1. Если нужно передать напряжение e_c на вход усилителя без потерь, нужно выполнить условие: $R_{ВХ} \gg R_C$
2. Если требуется передать максимальную мощность от источника сигнала на вход усилителя, то входное сопротивление усилителя должно быть равно сопротивлению источника сигнала: $R_{ВХ} = R_C$

$$U_{ВХ} = e_c \cdot \frac{R_{ВХ}}{R_C + R_{ВХ}}$$

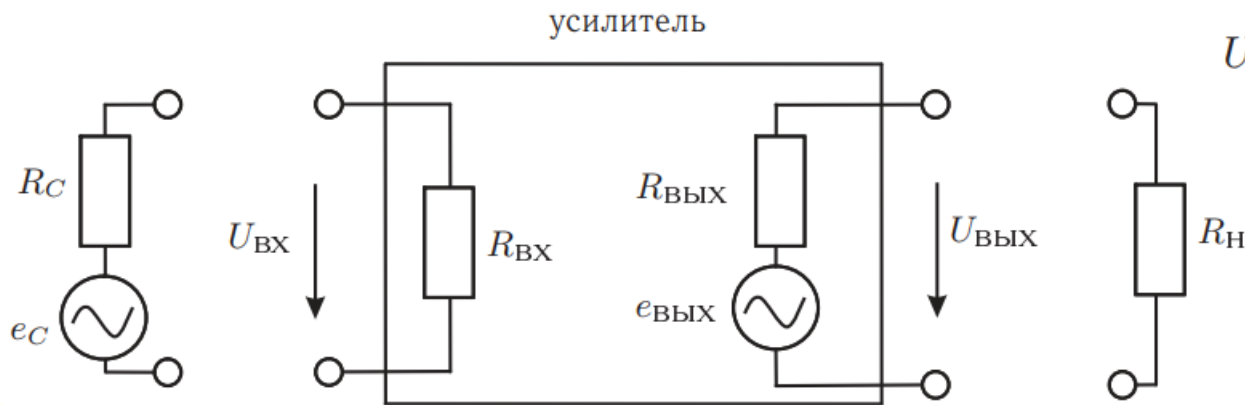
$$P_{ВХ} = \frac{e_c^2 \cdot R_{ВХ}}{(R_C + R_{ВХ})^2}$$



Эффективная работа усилителя

1. Для наиболее полной передачи напряжения с выхода усилителя в нагрузку сопротивление нагрузки должно быть много больше выходного сопротивления усилителя: $R_H \gg R_{ВЫХ}$
2. Для передачи максимальной мощности от усилителя к нагрузке должно выполняться условие согласования сопротивлений: $R_H = R_{ВЫХ}$

В электронике обычно требуется в максимальной степени передать напряжение, поэтому входное сопротивление усилителя желательно сделать большим, а выходное сопротивление — маленьким.



$$U_{ВЫХ} = e_{ВЫХ} \cdot \frac{R_H}{R_{ВЫХ} + R_H}$$

- Собственные шумы (помехи) усилителя – это сигналы на выходе усилителя, существующие при отсутствии усиливаемых сигналов на его входе.

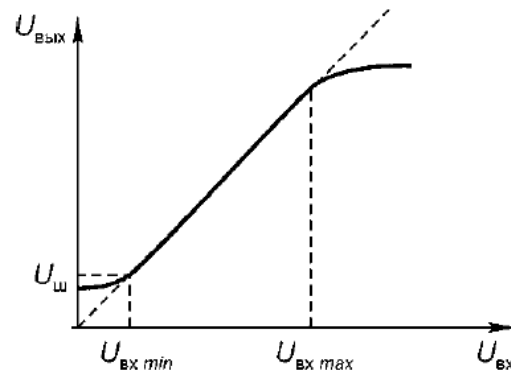
$$K_{ш} = 20 \lg(U_{ш} / U_{вых.max}).$$

- Динамический диапазон усилителя характеризует диапазон напряжений сигнала, который данный усилитель может усиливать без внесения помех и искажений.

$$D_{yc} = \frac{U_{BX.max}}{U_{BX.min}}$$

Динамический диапазон определяется по амплитудной характеристике усилителя

$$D = 20 \lg \frac{U_{ex.max}}{U_{ex.min}}$$



Электронные усилители. Основные параметры.

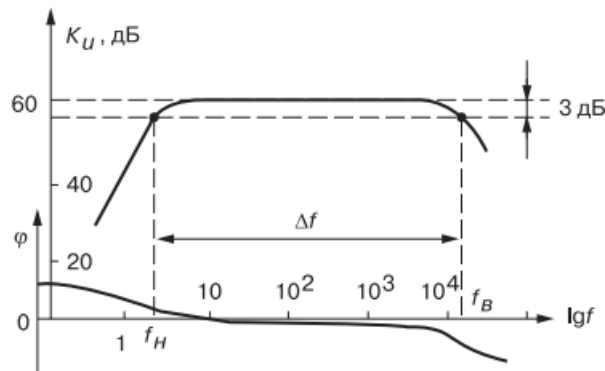


Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — это зависимость коэффициента усиления, например, по напряжению K_U от частоты f входного сигнала.



Полоса пропускания усилителя определяет диапазон частот Δf (или $\Delta \omega$), в пределах которой коэффициент усиления на средней частоте не снижается ниже $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ (3 дБ) своего уровня.

Фазочастотная характеристика $\varphi(f)$ — зависимость угла сдвига фаз между φ выходным и входным напряжениями усилителя от частоты f .



Линейные искажения — неодинаковое усиление и неодинаковое время запаздывания различных спектральных составляющих усиливаемого сигнала. Соответственно искажения называют частотными и фазовыми. Линейные искажения обусловлены наличием в схеме усилителя реактивных элементов

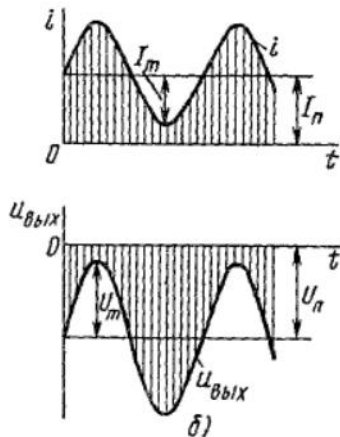
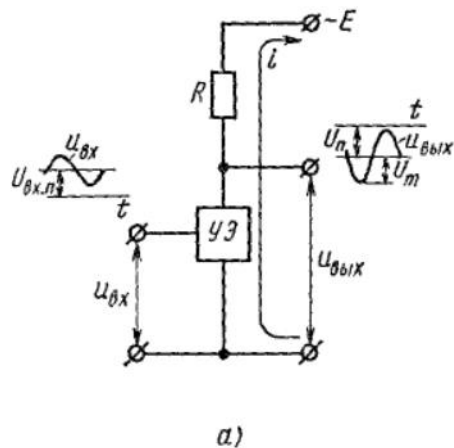
Нелинейные искажения – это искажения формы усиливаемого сигнала на выходе вследствие нелинейности ВАХ отдельных элементов схемы усилителя (усилительных элементов, катушек индуктивности с ферромагнитными сердечниками, трансформаторами и т.д.).

Причиной появления значительных нелинейных искажений могут быть и неправильный выбор начального положения рабочей точки транзистора, чрезмерно большая амплитуда входного сигнала. Нелинейные искажения при подаче на вход усилителя чисто синусоидального сигнала вызывают появления на его выходе высших гармонических составляющих, которые искажают форму входного сигнала.



Электронные усилители. Принцип построения.

Структурная схема усилительного каскада приведена на рисунке [2].



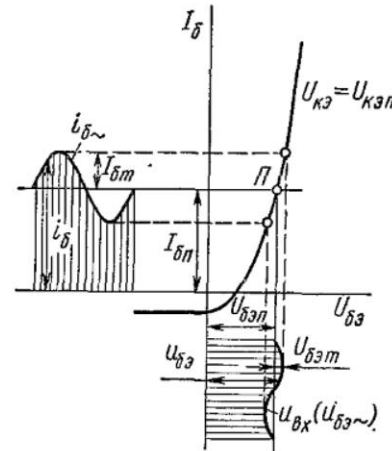
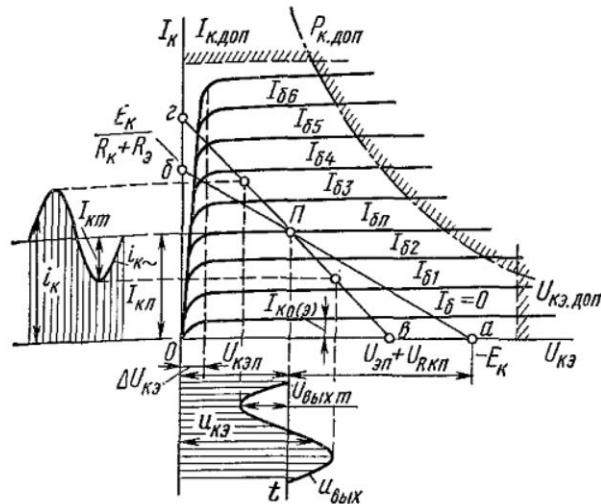
Главный элемент усилительного каскада – управляемый элемент.

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления усилительного элемента по закону, задаваемому входным сигналом.

Электронные усилители. Принцип построения.

Ввиду того, что для питания усилителя используется источник постоянного напряжения, ток в выходной цепи является однонаправленным.

Для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные значения тока и напряжения, которые определяют точку (режим) покоя.



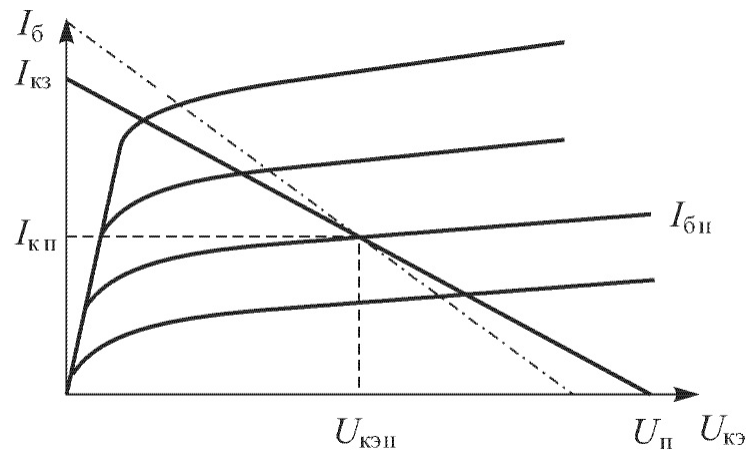
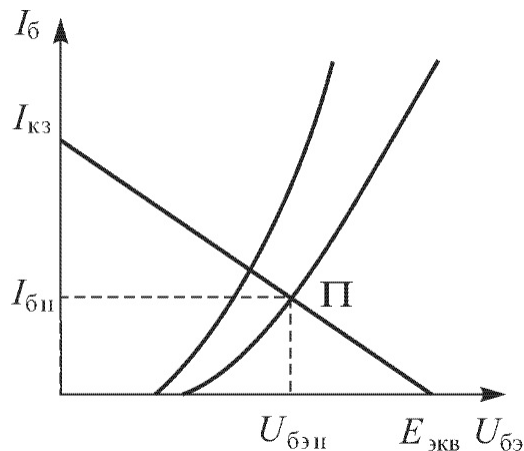
Электронные усилители. Усилители на БТ.

Работа БТ при любой схеме включения характеризуются: входным током $I_{ВХ}$, входным напряжением $U_{ВХ}$, выходным током $I_{ВЫХ}$, выходным напряжением $U_{ВЫХ}$



В активном режиме связь между ними устанавливают статические характеристики.

Для расчета схемы ОЭ используются следующие входные и выходные характеристики



Электронные усилители. Усилители на БТ.

Для расчета можно использовать систему h-параметров

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = h_{11} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{12} \Delta U_{\text{ВЫХ}},$$

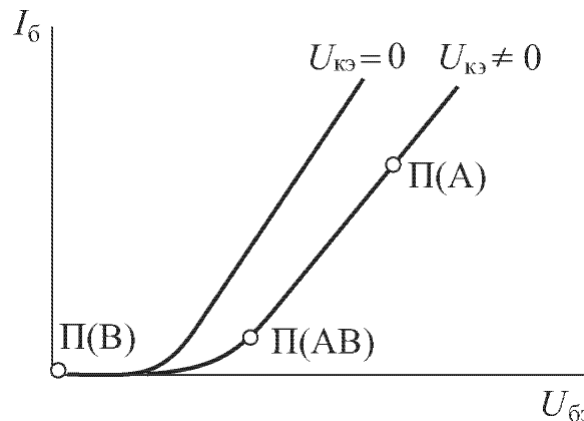
$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = h_{21} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{22} \Delta U_{\text{ВЫХ}}.$$

В режиме малого сигнала связь между четырьмя параметрами линейная.

Значения h-параметров зависят от схемы включения транзистора и от положения точки покоя на статических характеристиках транзистора. Точка покоя определяется значениями параметров $I_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВХ}}$, $I_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ в отсутствии входного сигнала.

Режим работы усилителя определяется положением точки покоя П на статических характеристиках транзистора и величиной амплитуды входного сигнала.

При работе усилителя в **режиме класса А** точка покоя находится на линейном участке входной характеристики, а амплитуда входного сигнала.



Рассматривается входной гармонический сигнал вида:

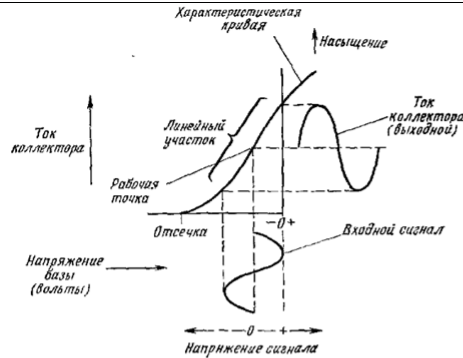
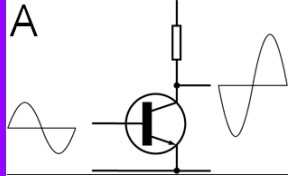
$$U_{\text{BX}} = U_{\text{BX. m}} \sin \omega t$$

При работе транзистора в **режиме класса В** точка покоя лежит в области отсечки, а амплитуда входного сигнала такова, что транзистор не входит в насыщения, при этом транзистором усиливается только одна полуволна входного сигнала.

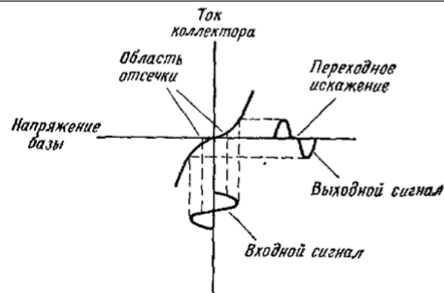
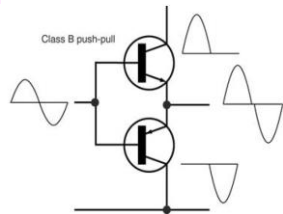
Чтобы усилить вторую полуволну, для усилителей в режиме класса В используется двухтактная схема с двумя транзисторами, работающими в противофазе. Наличие «зоны умолчания» и нелинейного участка на входных характеристиках приводит к значительным искажениям формы сигналов в таких усилителях.



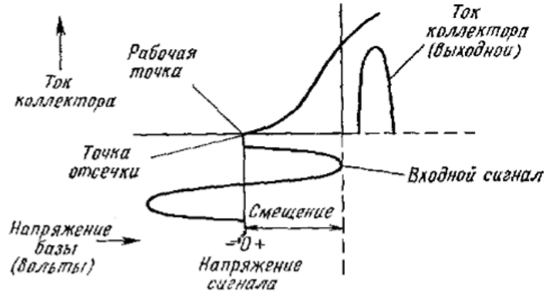
Электронные усилители. Усилители на БТ.



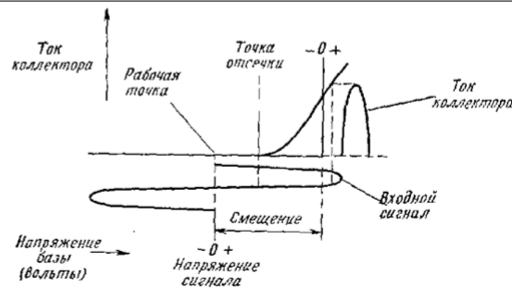
Режим класса А



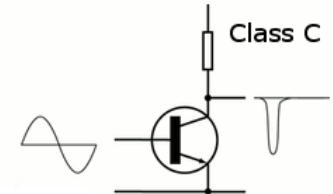
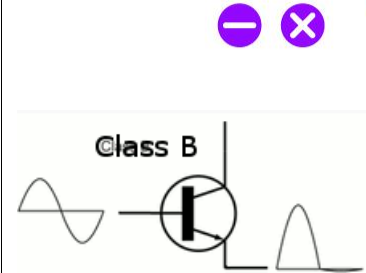
Режим класса АВ



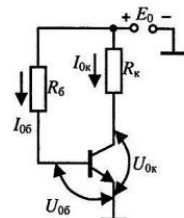
Режим класса В



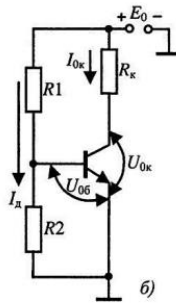
Режим класса С



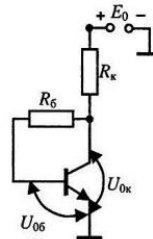
Типовые схемы задания рабочей точки биполярного транзистора



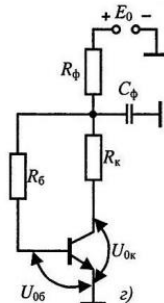
а)



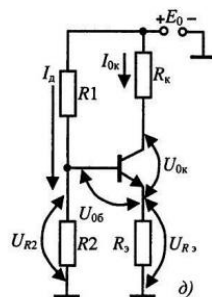
б)



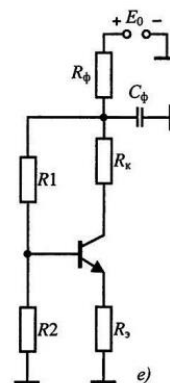
в)



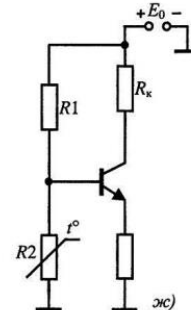
г)



д)



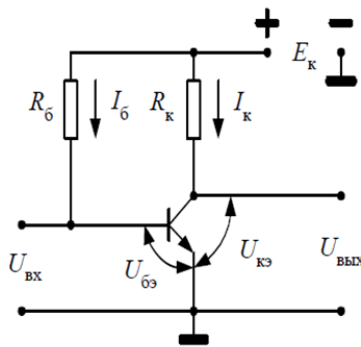
е)



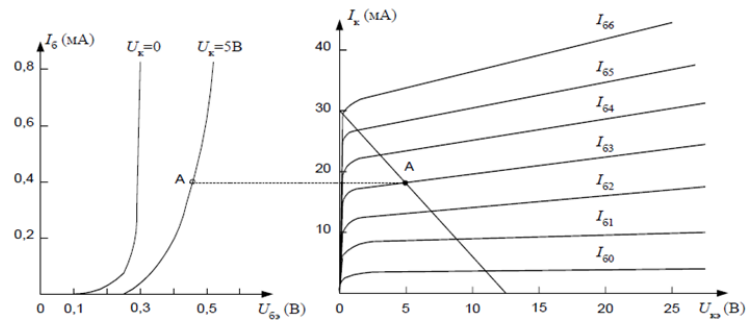
ж)

Электронные усилители. Усилители на БТ.

Задание рабочей точки режима класса А фиксацией тока базы



E_k – задано в исходных данных, ток базы в точке "А" $I_{бА}$ и напряжение база-эмиттер в точке "А" $U_{бэА}$ мы выбираем сами на входной характеристике, ориентируясь на выходную ВХ



Электронные усилители. Усилители на БТ.

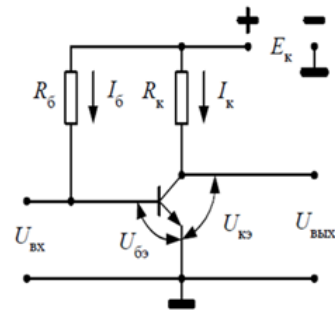
$$E_K = I_{\text{бА}} \cdot R_{\text{б}} + U_{\text{бэА}} \quad R_{\text{б}} = \frac{E_K - U_{\text{бэА}}}{I_{\text{бА}}}$$

R_K – задает нагрузочный режим, т.е. нагрузочную прямую, на которой выбирается рабочая точка «А»

Учитывая, что $E_K \gg U_{\text{бэА}}$, то ток базы в точке "А" получается фиксированным при заданном напряжении питания, не зависым от влияния температуры и равным:

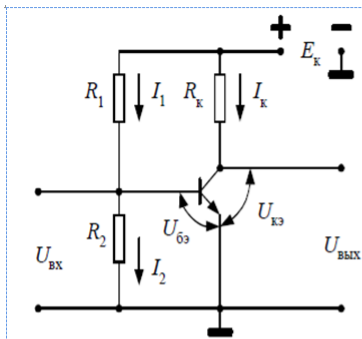
$$I_{\text{бА}} \approx \frac{E_K}{R_{\text{б}}}$$

Недостаток схемы заключается в том, что транзисторы имеют разброс параметров и при замене транзистора надо заново рассчитывать величину базового резистора $R_{\text{б}}$. Заметим также, что причинами температурной нестабильности коллекторного тока являются увеличение обратного коллекторного тока и уменьшение $U_{\text{бэ}}$ с увеличением температуры. Данная схема не стабилизирует ни один из этих параметров.



Электронные усилители. Усилители на БТ.

Задание рабочей точки режима класса А фиксацией напряжения базы



Напряжение источника питания E_k задано в исходных данных. Считаем также известными ток базы транзистора в точке "А" – $I_{бА}$ и падение напряжения на транзисторе в точке "А" – $U_{бэА}$, поскольку рабочую точку "А" выбираем сами на нагрузочной прямой.

Запишем уравнение равновесия напряжений для входной цепи

$$E_k = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2$$

$$E_k = I_1 \cdot R_1 + U_{бэА}$$

$$I_1 = I_2 + I_{бА}$$

Если известен параметр $h_{11э}$ – входное сопротивление транзистора, то сопротивление R_2 , которое включено ему параллельно, выбирают в 2÷5 раз больше входного сопротивления транзистора $h_{11э}$. Зная $h_{11э}$, находим

Электронные усилители. Усилители на БТ.

$$R_2 = 5 \cdot h_{113}$$

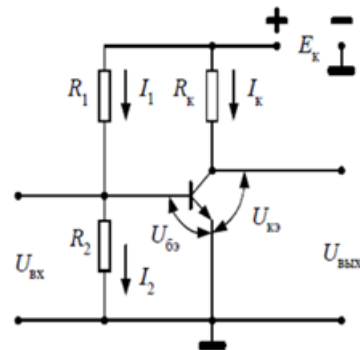
затем находим ток через резистор R_2

$$I_2 = \frac{U_{\text{бэА}}}{R_2} \rightarrow R_1 = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{бэА}}}{I_2 + I_{\text{бА}}}$$

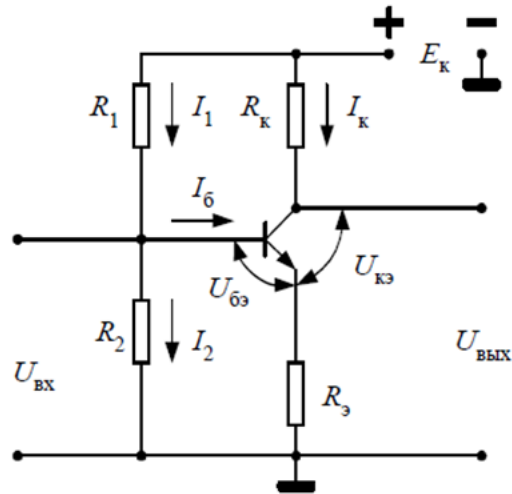
Однако входное сопротивление транзистора известно не всегда и чтобы не определять его графическим методом по входной ВАХ, обычно поступают следующим образом. Выбирают ток делителя I_1 для маломощных транзисторов в $5 \div 10$ раз больше тока базы $I_{\text{бА}}$: $I_1 = (5 \div 10) I_{\text{бА}}$.

$$I_2 = I_1 - I_{\text{бА}} \rightarrow R_2 = \frac{U_{\text{бэА}}}{I_2} \rightarrow R_1 = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{бэА}}}{I_1}$$

Преимущество схемы: в случае замены транзистора не требуется менять сопротивления в схеме, т.к. напряжение на базе не изменится, поскольку оно фиксировано делителем R_1, R_2 (однако коэффициент температурной нестабильности S по-прежнему очень велик).

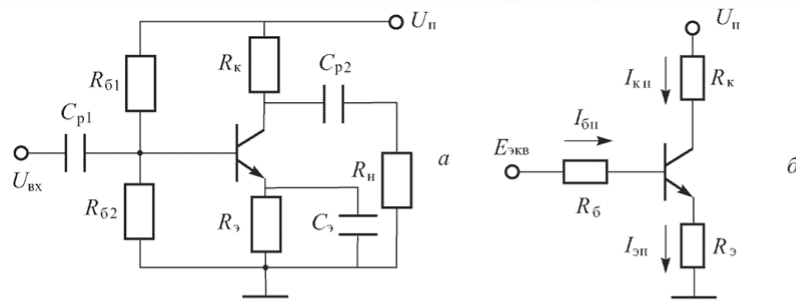


Задание рабочей точки с помощью отрицательной обратной связи по току



В данном случае мы должны найти величины сопротивлений R_K , R_1 , R_2 , R_3 .





Для усилителя переменного ток, работающего в режиме класса А, точку покоя удобно определять заменив исходную схему эквивалентной

$$E_{\text{экв}} = \frac{U_{\text{п}} R_{\text{б}2}}{R_{\text{б}1} + R_{\text{б}2}}, \quad R_{\text{б}} = \frac{R_{\text{б}1} R_{\text{б}2}}{R_{\text{б}1} + R_{\text{б}2}}$$

Ток базы покоя определяется исходя из 2-го закона Кирхгофа

$$E_{\text{экв}} = I_{\text{бп}} R_{\text{б}} + U_{\text{бэп}} + I_{\text{эп}} R_{\text{э}}$$

Или, учитывая связь между токами базы и эмиттера

$$E_{\text{экв}} = I_{\text{бп}} R_{\text{б}} + U_{\text{бэп}} + (1 + h_{21э}) I_{\text{бп}} R_{\text{э}}$$

Статический коэффициент передачи тока считается известным

Электронные усилители. Усилители на БТ.

Т.о. мы получили уравнение нагрузочной прямой, которую можно построить в плоскости входных характеристик

$$U_{xx} = E_{\text{экв}} \quad I_{\text{кз}} = \frac{E_{\text{экв}}}{R_0 + (1 + h_{21\text{э}}) R_3}$$

Для определения выходных параметров $I_{\text{кп}}$ и $U_{\text{кэп}}$ запишем 2-й закон Кирхгофа

$$U_{\text{п}} = I_{\text{кп}} R_{\text{к}} + U_{\text{кэп}} + I_{\text{эп}} R_3.$$

Величины параметров $I_{\text{кп}}$ и $U_{\text{кэп}}$ можно найти аналитически, используя соотношения

$$I_{\text{кп}} = h_{21\text{э}} I_{\text{бп}}$$

Откуда

$$U_{\text{кэп}} = U_{\text{п}} - I_{\text{кп}} R_{\text{к}} - (I_{\text{кп}} + I_{\text{бп}}) R_3$$

Однако часто точное значение $h_{21\text{э}}$ неизвестно, поэтому значения параметров $I_{\text{кп}}$ и $U_{\text{кэп}}$ определяется графическим путем (построив нагрузочную прямую).

Точки пересечения этой прямой с осями координат определяются выражениями

$$U_{xx} = U_{\text{п}}, \quad I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{к}} + \left(1 + \frac{1}{h_{21\text{э}}}\right) R_3}$$

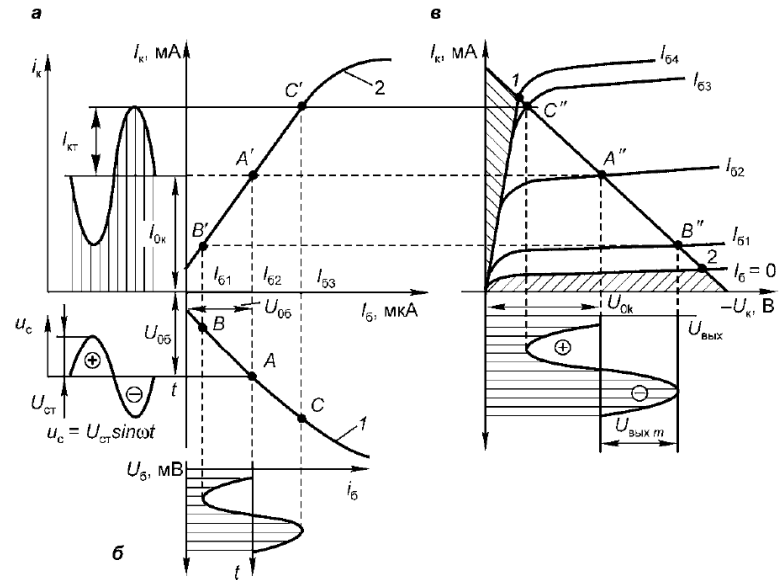
Учитывая, что $h_{21\text{э}} \gg 1$, то можно записать $I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{к}} + R_3}$



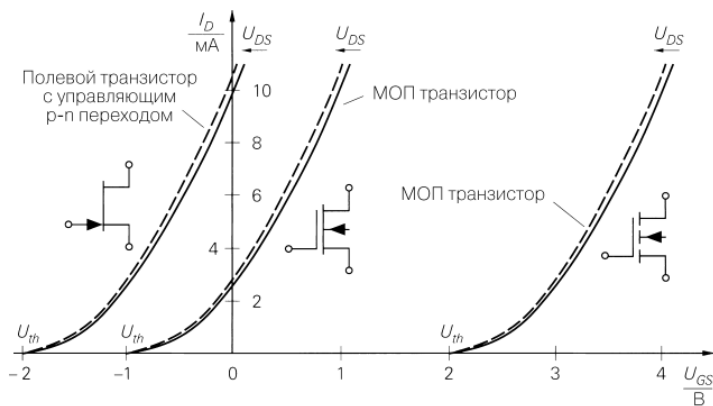
Электронные усилители. Динамические характеристики. ИТМО

Динамическими называют характеристики усилителя, работающего на нагрузку, состоящую из смещенной (активно-индуктивной и др.) нагрузки. С помощью динамических выходных характеристик можно установить зависимость выходного тока от напряжения на выходе усилителя для различных значений входного напряжения. На рисунке представлены динамические характеристики усилителя:

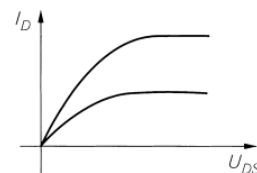
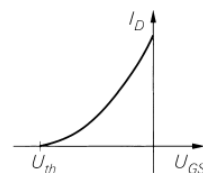
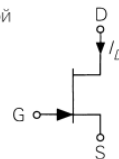
- а) входной сигнал,
- б) преобразование сигнала,
- в) выходной сигнал



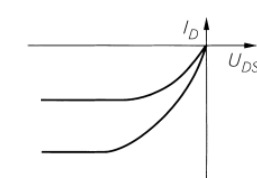
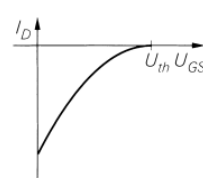
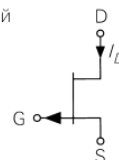
Передаточные характеристики ПТ [4]



п-канальный полевой транзистор с управляющим р-п переходом

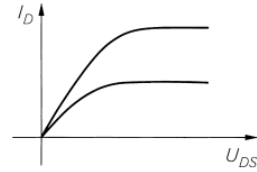
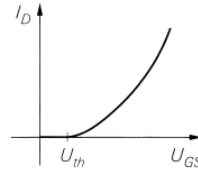
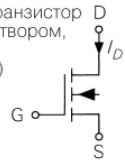


р-канальный полевой транзистор с управляющим р-п переходом

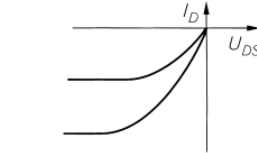
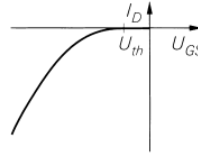
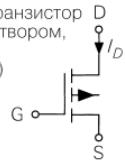


Электронные усилители. Усилители на ПТ.

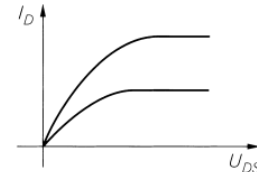
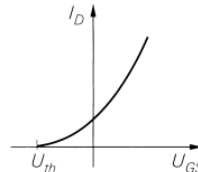
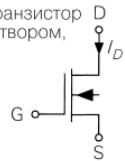
п-канальный МОП транзистор с изолированным затвором, самозапирающийся (режим обогащения)



р-канальный МОП транзистор с изолированным затвором, самозапирающийся (режим обогащения)



п-канальный МОП транзистор с изолированным затвором, самопроводящий (режим обеднения)



р-канальный МОП транзистор с изолированным затвором, самопроводящий (режим обеднения)

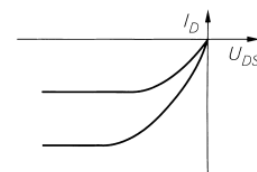
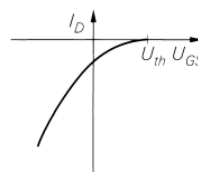
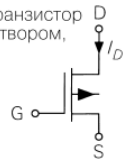
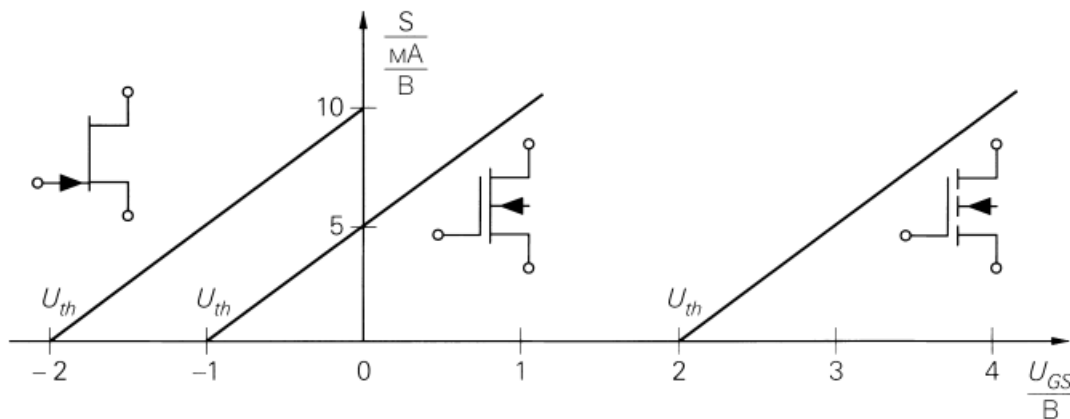


График зависимости крутизны S от напряжения $U_{ЗИ}$



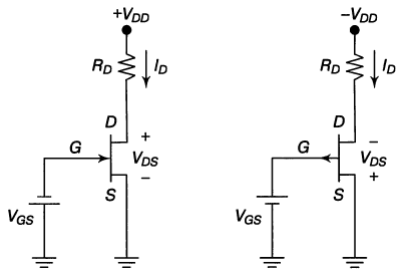
Крутизна S описывает зависимость тока стока от напряжения $U_{ЗИ}$ в рабочей точке, является параметром, определяемым в режиме малых сигналов в области насыщения.

Смещение полевых транзисторов.

Параметры полевых транзисторов такие как: ток насыщения, напряжение отсечки, крутизна характеристики прямой передачи могут меняться в широких пределах.

В схемах с фиксированным смещением изменения параметров могут сместить рабочую точку так, что схема станет неработоспособна.

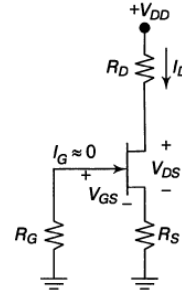
Для полевых транзисторов схемы с фиксированным смещением почти не применяются.



Схемы с фиксированным смещением слева

Схема автоматического смещения справа.

Схемы с фиксированным смещением требуют двух источников питания, схема с автосмещением требует одного источника питания.



В наиболее часто используемой схеме с общим истоком, ток стока I_D течет через резисторы R_D и R_S и вызывает напряжение сток-исток V_{DS} , используя закон Кирхгофа имеем

$$V_{DD} = V_{DS} + I_D(R_D + R_S)$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S)$$

Для цепи затвор-исток закон Кирхгофа дает: $V_{GS} + I_D R_S - I_G R_G = 0$
р-н переход полевого транзистора смещается обратно, следовательно ток затвора пренебрежимо мал I_G , тогда имеем $V_{GS} = -I_D R_S$.



Таким образом падение напряжения на резисторе в цепи истока R_S обеспечивает смещение затвор-исток V_{GS} .

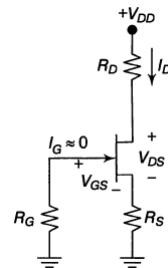
Автоматическое смещение также стабилизирует рабочую точку при изменении параметров полевого транзистора с управляющим р-н переходом.

Вывод затвора с нулевым током ($I_G = 0$) действует как датчик напряжения, поэтому сопротивление резистора в цепи затвора обычно выбирают высоким (50 кОм, 100 кОм).

Ток покоя стока I_{DQ} и входное напряжение покоя V_{GSQ} в рабочей точке Q можно оценить как

$$I_D = \frac{-V_{GS}}{R_S}$$

Это уравнение прямой линии – линия смещения с наклоном $1/R_S$. Точка пересечения линии смещения и Графиком прямой передачи дает рабочую точку Q .



Электронные усилители. Усилители на ПТ.

Напряжение сток-исток в рабочей точке V_{DSQ} можно найти, подставив полученные параметры рабочей точки в соответствующие формулы

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

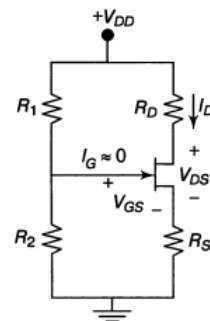
Для упрощения проектирования схем смещения рекомендуются следующие практические правила выбора значений I_{DQ} и V_{GSQ}

$$I_{DQ} = \frac{I_{DSS}}{2}$$

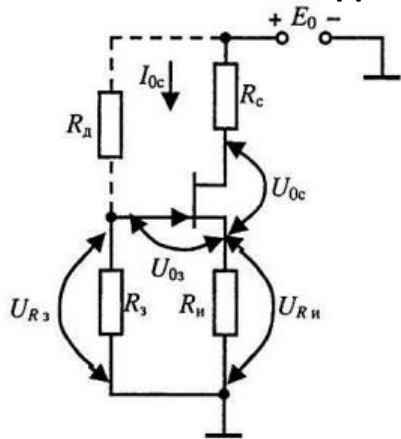
$$V_{DSQ} = \frac{V_{DD}}{3}$$



Наиболее широкое распространение на практике получила схема автоматического смещения с делителем напряжения. Она легко модифицируется чтобы получить положительное или отрицательное напряжение затвора путем соответствующего выбора сопротивлений делителя.



Задание рабочей точки полевого транзистора с р-п переходом



$$E_0 = I_{0c}R_c + U_{0c} + I_{0и}R_{и},$$

$$U_{0з} + U_{R3} + U_{Rи} = 0.$$

Поскольку $I_{0c} = I_{0и}$, то из уравнения следует

$$U_{0c} = E_0 - I_{0c}(R_c + R_{и}).$$

$U_{R3} = R_3 I_{0з}$, где $I_{0з}$ – обратный ток р-п перехода затвор-исток.

В современных полевых транзисторах порядка наноампер, поэтому можно принять U_{R3} равным нулю.

Тогда
$$U_{0з} = -U_{Rи} = -I_{0c}R_{и}.$$

Таким образом из предыдущих соотношений можно вычислить R_c и $R_{и}$.

Рекомендуемое значение R_3 обычно дано в ТУ на выбранный транзистор.

Для повышения стабильности потенциал затвора задают делителем R_d и R_3 .

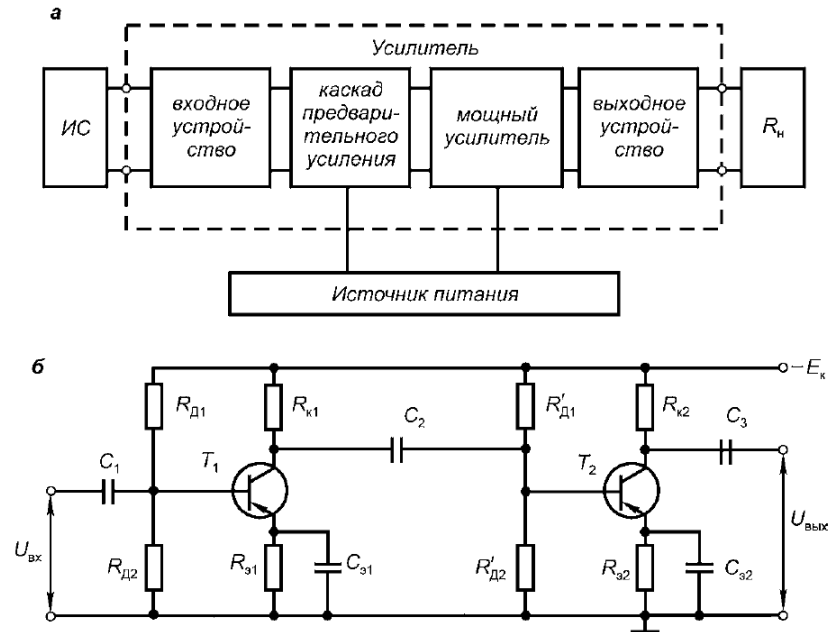
В этом случае $U_{R3} = \frac{E_0}{R_d + R_3} R_3$, для расчета схемы следует использовать уравнение

$$U_{0c} = E_0 - I_{0c}(R_c + R_{и}).$$

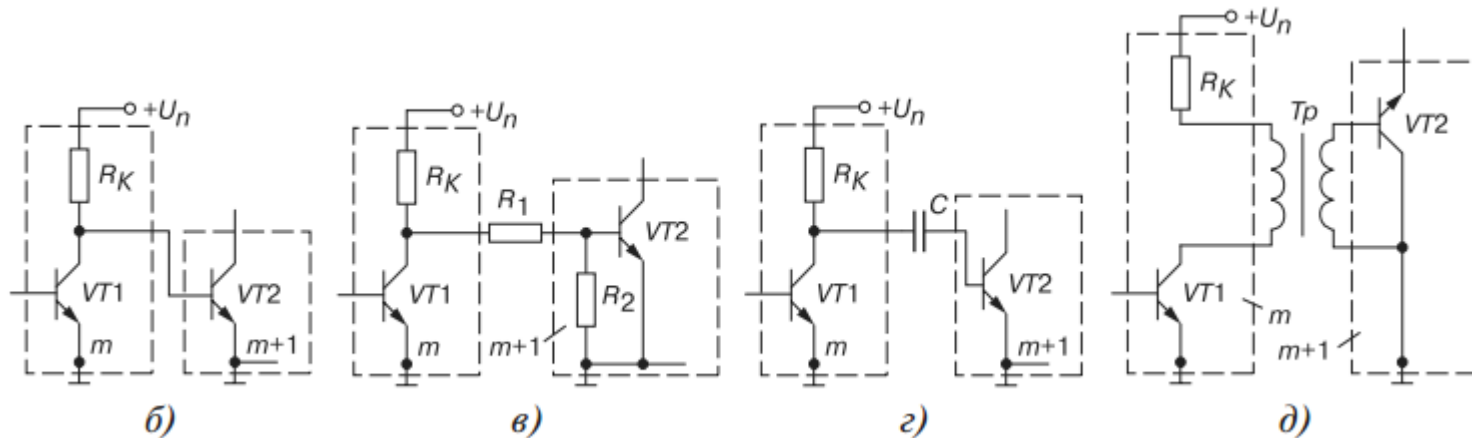


Усилители, применяемые на практике, состоят из нескольких каскадов, при этом каждый отдельный каскад в составе усилителя выполняет свои функции.

На рисунке а) приведена структурная схема многокаскадного усилителя, а на рисунке б) – схема двухкаскадного усилителя с RC-связью, применяемая на практике (указаны только основные элементы).



Наиболее часто используемые виды связи в усилительных каскадах: непосредственная (б), резисторная (в), ёмкостная (г) и трансформаторная (д).



Коэффициент усиления по напряжению каскада

$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot \dots \cdot K_{un}.$$



Усилители мощности предназначены для отдачи

максимальной мощности в заданную нагрузку при допустимых нелинейных и частотных искажениях. Они содержат один или несколько каскадов усиления. Выходной (оконечный) каскад работает в режиме больших сигналов и, следовательно, потребляет большую мощность от источника питания. Он должен иметь достаточно высокий КПД.

Выходные каскады выполняют на специальных мощных транзисторах, включенных обычно по схеме с общим эмиттером. Согласование выходного сопротивления усилителя с сопротивлением нагрузки обеспечивают с помощью трансформатора, коэффициент трансформации которого рассчитывают по формуле

$$n = \frac{w_1}{w_2} \sqrt{\frac{R_n}{\eta_{тр} R_{вых}}}$$

Выходные каскады усилителя мощности выполняют по одноконтурной и двухконтурной схемам.

Маломощные *однотактные усилители мощности* обычно работают в режиме класса А. По постоянному току сопротивление в коллекторной цепи транзистора VT определяется только сопротивлением первичной обмотки трансформатора Tr . По переменному току транзистор VT нагружен на оптимальное сопротивление, что достигается соответствующим выбором коэффициента трансформации трансформатора Tr . Максимальная мощность отдается каскадом при эффективном использовании транзистора как по току, так и по напряжению.

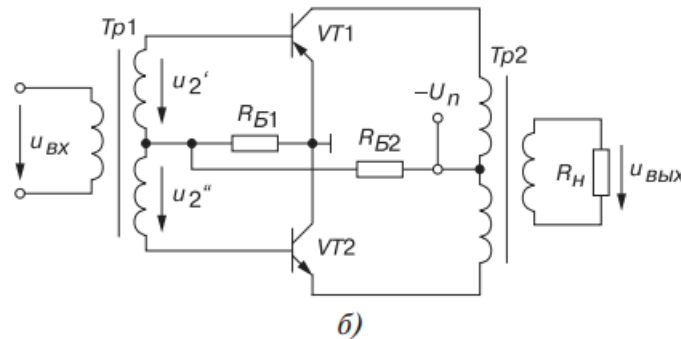
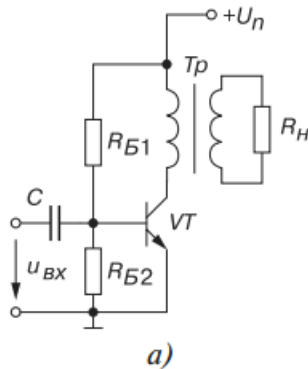




Схема *двухтактного усилителя мощности* работающего в режиме *B*, содержит два транзистора $VT1$ и $VT2$ разных типов проводимости, с близкими характеристиками, работающими по очереди (каждый в своём полупериоде), так как напряжения u_2' и u_2'' вторичной обмотки трансформатора $Tr1$ подаются в противофазе на транзисторы $VT1$ и $VT2$. Трансформатор $Tr2$ обеспечивает связь с нагрузкой R_n .

Режимы *B* работы транзисторов достигаются выбором небольшого напряжения смещения с помощью резисторов R_{B1} и R_{B2} для попадания в точку a' , где в режиме покоя отсутствует входной ток базы. Транзисторы в режиме *B* эффективно используются по току и напряжению. При этом КПД двухтактного усилителя может достигать 78%.

При большой мощности, выделяемой в виде тепла на коллекторах транзисторов, используют радиаторы для отвода избыточного тепла, которое не могут рассеивать транзисторы непосредственно.

Контрольные вопросы



1. По каким признакам классифицируют усилительные устройства?
2. Приведите основные параметры и характеристики полупроводникового усилителя.
3. От каких параметров зависит коэффициент усиления по напряжению каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером?
4. Как определяют полосу пропускания усилителя?
5. Объясните, как определяют рабочую точку на семействе выходных характеристик транзистора при работе в классе А усилителя на транзисторе с ОЭ?
6. Как изменится коэффициент усиления по напряжению транзисторного каскада с ОЭ, если изменить: а) сопротивление R_k ; б) напряжение питания E ; в) сопротивление $R_э$?
7. Как определить коэффициент усиления по напряжению усилительного устройства в децибелах, если коэффициенты усиления отдельных каскадов равны 20, 40 и 60?

Контрольные вопросы



8. Какие методы стабилизации режима покоя вам известны?

9. Постройте схему эмиттерного повторителя и определите его усилительные параметры. Докажите, что коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя всегда меньше единицы.

10. Назовите режимы работы усилительных каскадов и схем связи между каскадами.

11. Изложите важнейшие особенности и свойства усилителей мощности. Объясните, почему выходные транзисторы усилителей мощности обычно включают по схеме с ОЭ?

12. Что называется электронным усилителем? Объяснить принцип действия усилителя.

13. Перечислите основные параметры и характеристики усилителя.

14. Объясните назначение элементов, входящих в схему усилительного каскада на транзисторе.

15. Назовите основные показатели усилительного устройства.

16. Классификация усилителей по диапазону рабочих частот.



17. Проиллюстрируйте графически работу усилительного каскада.
18. В каком случае форма выходного сигнала соответствует форме входного сигнала?
19. Начертите амплитудную характеристику усилительного каскада и укажите линейный диапазон работы.
20. Начертите АЧХ усилительного каскада.
21. Как определяется полоса пропускания усилителя?
22. В чем причина частотных искажений усилителя в области нижних частот?
23. Почему имеются частотные искажения усилителя в области верхних частот?

Список использованных источников

1. Б у р б а е в а Н. В., Д н е п р о в с к а я Т. С. Основы полупроводниковой электроники. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 312 с. — ISBN 978-5-9221-1379-3
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. — М.: Высш. Школа, 1982. — 496 с.
3. Дьюб Динеш С. Электроника: схемы и анализ. — Москва.: Техносфера, 2008. — 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12е изд. Том I: Пер. с нем. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 832 с.: ил.



**Спасибо
за внимание!**

it's **MO** *re than a*
UNIVERSITY

Nikolay.A.Nikolaev@gmail.com