

Circuite și Dispozitive Electronice

Электронные Цепи и Устройства

Тема 5 – Усилители. Классификация. Типы. Реакции в усилителях.

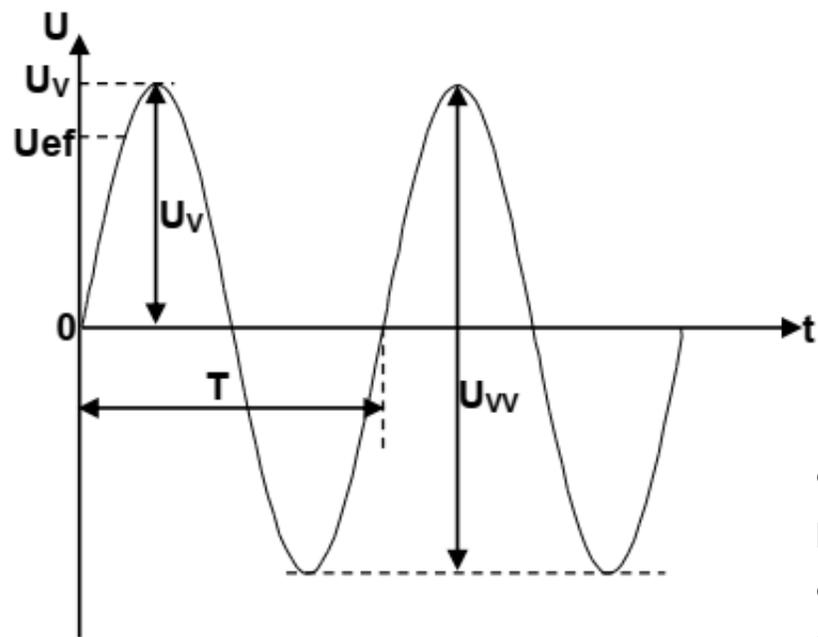
Цель: познакомиться с электрическими усилителями. Основные характеристики и параметры усилителя. Назначение, классификация и устройство электронных усилителей. Основные характеристики и параметры усилителей.

УСИЛИТЕЛИ МАЛОГО СИГНАЛА

Электронный усилитель— представляет собой квадруполь (электронная схема, снабженная входным затвором и выходным затвором), роль которого заключается в выработке в выходной цепи более высокой мощности, чем у входной цепи, без искажения (модификации) формы усиленного сигнала..

Усилитель слабого сигнала имеет слабый усиленный сигнал по отношению к значению постоянного напряжения поляризация транзистора(ов) в цепи.

В большинстве случаев электрический сигнал, подаваемый на вход усилителя, представляет собой переменный синусоидальный сигнал.



U_v — пиковое напряжение (максимальное напряжение - U_{max}). Значение этого напряжения отображается на **осциллографе**.

U_{ef} — эффективное напряжение. Значение этого напряжения показывает **вольтметр переменного тока**.

U_{vv} — напряжения от пика до пика .

$$U_{max} = U_v = \frac{U_{vv}}{2} = \sqrt{2} \cdot U_{ef}$$

- **АМПЛИТУДА (U_v)** — который представляет собой значение максимального напряжения сигнала;
- **ПЕРИОД (T)** — интервал времени между началом двух однотипных полупериодов (полное чередование);
- **ЧАСТОТА**— представляет количество чередований в единицу времени.

Усилители классифицируются по нескольким критериям :

- **По характеру усиленного сигнала:**

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

- **По типу используемых активных элементов:**

- с транзисторами;
- с интегральными схемами (операционные);
- магнитные.

- **По полосе частот усиленного сигнала:**

- Усилители постоянного тока - усиление частот от 0 Гц;
- звуковая частота (низкая частота) $f = 20 \text{ Гц} \dots 20 \text{ кГц}$;
- радиочастота (высокая частота) $f = 20 \text{ кГц} \dots 30 \text{ МГц}$;
- очень высокая частота $f = 30 \text{ МГц} \dots 300 \text{ МГц}$.

- **По ширине полосы частот:**

- узкополосный $f = 9 \text{ кГц} \dots 30 \text{ кГц}$;
- широкополосный (частота видеосигнала) $f = 5 \text{ Гц} \dots 5 \text{ МГц}$.

- **По типу соединения этажей:**

- с RC-соединением;
- с настроенными схемами;
- с трансформаторной муфтой;
- с резистивной связью (усилители постоянного тока).

Усилитель малых сигналов на транзисторах может иметь один или несколько каскадов.

Каждый этаж состоит из следующих схемных элементов:

- **Транзистор** - основной элемент каскада усиления и представляет собой элемент усиления; В зависимости от того, как подключен транзистор, различают 3 типа усилителей сигнала:

- усилители с общим эмиттером;
- усилители с общим коллектором;
- усилители с общей базой.

- **Сеть резисторов** - которая поляризует транзистор по постоянному току;

- **Элементы гальванической связи и разделения** - расположены на входе и выходе каскада усиления и служат для отделения усиливаемого сигнала переменного тока от составляющей постоянного тока, которая поляризует транзистор усилителя. Эти элементы позволяют передавать сигнал переменного тока с одного этажа на другой, позволяют соединять каскады усиления между собой. Наиболее часто используемые элементы связи и разделения - это **конденсаторы**, но в некоторых случаях также используется трансформаторная связь, которая также может обеспечить адаптацию мощности.

ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЯ

а. Коэффициент усиления (усиление) - представляет собой соотношение между выходной электрической величиной и входной электрической величиной. Их можно определить :

• усиление напряжения $A_u = \frac{U_s}{U_i}$;

• усиление тока $A_i = \frac{I_s}{I_i}$;

• усиление мощности $A_p = \frac{P_s}{P_i}$.

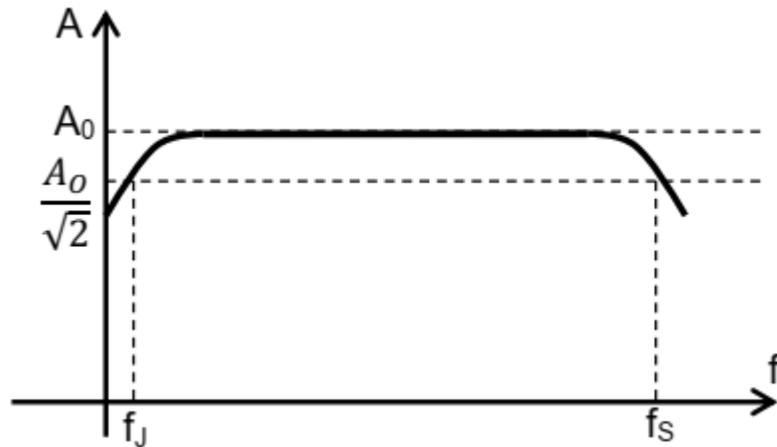
Для выражения значения усиления в качестве единицы измерения используется **децибел (дБ)**.

$$A_u[dB] = 20 \cdot \log A_u ;$$

$$A_i[dB] = 20 \cdot \log A_i ;$$

$$A_p[dB] = 10 \cdot \log A_p .$$

в. Частотно-амплитудная характеристика - относится к зависимости усиления от частоты входного сигнала. Усиление не зависит от частоты в области средних частот и уменьшается к концам полосы как на низких, так и на высоких частотах.



Предельные частоты f_J и f_S - это частоты, на которых модуль усиления падает ниже значения:

$$\frac{A_0}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot A_0$$

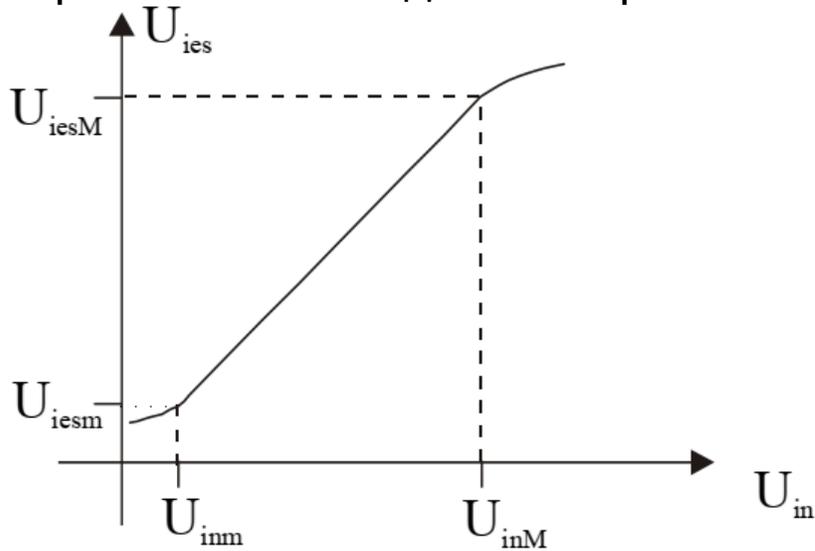
Полоса частот - представляет интервал, в котором усиление остается постоянным $B = f_S - f_J$.

Продукт усиления - полоса (ПУП) - это произведение между модулем усиления и полосой частот $ПУП = A \cdot B$

На высоких частотах полоса пропускания ограничена внутренними емкостями активного элемента, а также паразитными емкостями самой сборки (обычно их совокупный эффект составляет порядка десятков пФ). Они имеют эффект шунтирования входа и выхода усилителя на высоких частотах.

На низких частотах его ограничивают конденсаторы конденсаторов, чтобы отделить переменный сигнал от непрерывного, который «съедает» часть полезного сигнала. Представления о высоких или низких частотах носят относительный характер. Они относятся к диапазону частот, в котором усиление является максимальным.

Однако величина коэффициента усиления также зависит от размера (амплитуды) входного сигнала. На первый взгляд, у нас может возникнуть соблазн поверить, что усилитель с $A_u = 100$ на частоте 1 кГц будет иметь сигнал 100 мкВ на выходе, если входной сигнал имеет 1 мкВ, 100 мВ, если входной сигнал равен 1 мВ, и 100 В, если входной сигнал 1В. По сути, мы обнаружим, что верно только второе утверждение. Для малых и больших уровней входного сигнала коэффициент усиления будет меньше 100, и между выходным напряжением и входным напряжением больше не будет прямой пропорциональной зависимости.



Объяснение этому явлению простое. Для очень низких уровней входного сигнала коэффициент усиления уменьшается из-за влияния схемных шумов, которые становятся сопоставимыми по уровню с уровнем входного сигнала. В какой-то момент полезный сигнал может даже «утонуть» в шуме. При высоких уровнях входного сигнала коэффициент усиления уменьшается из-за нелинейности передаточной характеристики активного элемента. Он может быть ограничен как верхним, так и нижним из-за того, что вход активного элемента находится в состоянии блокировки или насыщения. Таким образом, форма выходного сигнала выглядит искаженной по сравнению с формой входного сигнала. Невозможно, чтобы амплитуда выходного сигнала была больше напряжения питания усилителя, независимо от того, насколько велика амплитуда входного сигнала.

динамический диапазон усилителя, выраженный в децибелах:

$$D_{dB} = 20 \log \frac{U_{iesM}}{U_{iesm}} = 20 \log \frac{U_{inM}}{U_{inm}}$$

где минимальное и максимальное значения выходного и входного напряжений ограничивают линейную часть графического представления. В пределах динамического диапазона существует прямая пропорциональная зависимость между выходным и входным напряжением, а форма выходного сигнала аналогична форме входного сигнала. Другими словами, в пределах динамического диапазона, если входной сигнал чисто синусоидальный, а выходной сигнал будет чисто синусоидальным.

с. Искажения - представляют собой неточное воспроизведение выходного сигнала по сравнению с входным. Искажения могут быть :

- амплитуды как функции частоты (линейная);
- фазы по частоте (линейная) (важны в видеочастоте);
- гармонический (нелинейный) (важен в усилителях мощности);
- интермодуляция (нелинейная).

d. Отношение сигнал/шум - представляет собой соотношение между выходным напряжением, создаваемым усиленным сигналом, и собственным шумовым напряжением. Собственное шумовое напряжение создается компонентами усилителя. Это можно измерить на выходе усилителя путем короткого замыкания входных клемм.

е. Чувствительность - представляет собой напряжение, необходимое на входе усилителя для получения напряжения или номинальной мощности на выходе. Он характеризует усилители мощности и выражается в единицах напряжения.

Уровень усиленного сигнала ограничен выше мощности конечного каскада и ниже ограничен отношением сигнал/шум усилителя.

Основные параметры усилителей

2. Входное сопротивление - отношение приращения входного напряжения к приращению входного тока:

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}}.$$

Для усилителей обычно можно применять соотношение:

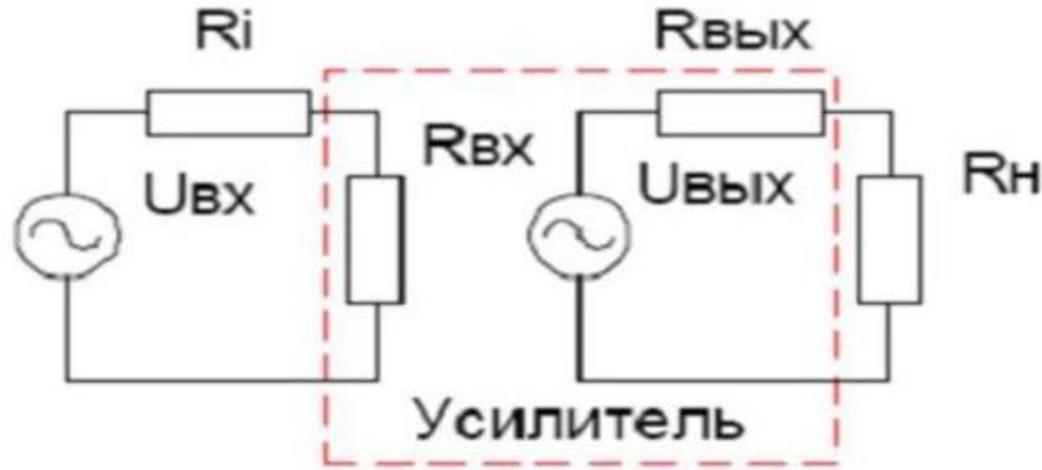
$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}.$$

3. Выходное сопротивление. отношение приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению входного тока

$$R_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / I_{\text{вых}}.$$

Для усилителей обычно можно применять соотношение, полученное из системы двух уравнений, описывающих по эквивалентной схеме усилителя выходные напряжения для двух различных сопротивлений нагрузки.

Основные параметры усилителей



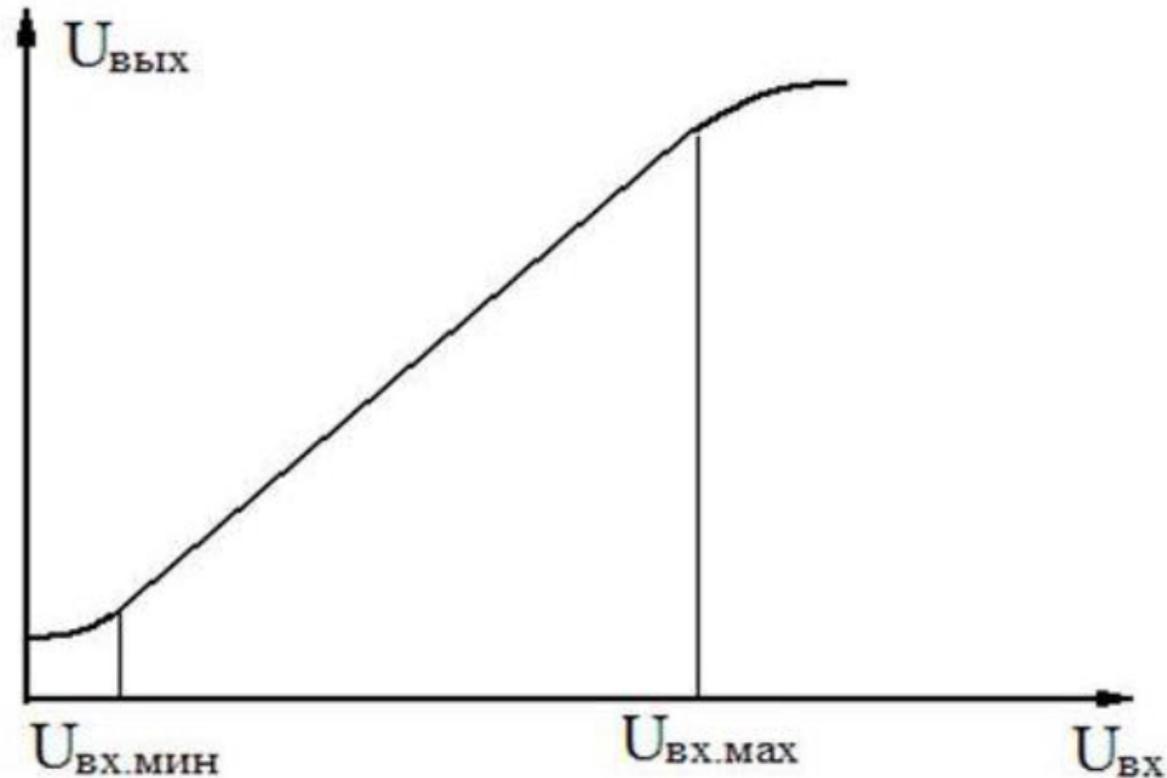
В частном случае выходное сопротивление можно определить по формуле:

$$R_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.ХХ}} / I_{\text{ВЫХ.КЗ.}}$$

где $U_{\text{ВЫХ.ХХ}}$ - выходное напряжение при холостом ходе на выходе;
 $I_{\text{ВЫХ.КЗ.}}$ - ток при коротком замыкании на выходе.

Основные параметры усилителей

4 Амплитудная характеристика – зависимость амплитудного значения напряжения первой гармоники выходного сигнала от амплитуды синусоидального входного напряжения.



Основные параметры усилителей

5. Динамический диапазон - отношение наибольшего допустимого значения входного напряжения к его наименьшему допустимому значению:

$$D = U_{\text{вх max}} / U_{\text{вх min}}.$$

Часто динамический диапазон выражают в децибелах:

$$D \text{ (дб)} = 20 * \lg (U_{\text{вх max}} / U_{\text{вх min}}).$$

6. Номинальная выходная мощность - это наибольшая выходная мощность, при которой искажения сигнала не превышает допустимого значения.

7. КПД усилителя, который определяют как отношение полезной мощности к затраченной.

8. Амплитудно-частотная характеристика усилителя – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты входного сигнала.

Основные параметры усилителей

9. Коэффициент частотных искажений для низких и высоких частот:

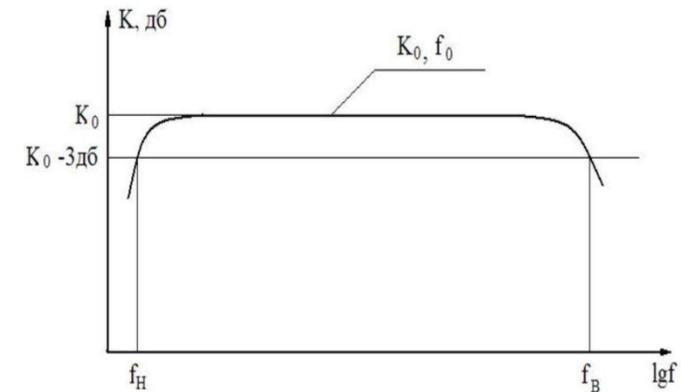
$$M_H = K_0 / K_H ; M_B = K_0 / K_B ;$$

где K_0 , K_H , K_B – коэффициенты усиления на средней, низкой и высокой частотах соответственно.

Для определенности K_0 обычно определяют на частоте

$$f_0 = (f_H * f_B)^{1/2}.$$

10. Рабочий диапазон частот (полоса пропускания) – полоса частот от низшей рабочей частоты f_H до высшей рабочей частоты f_B , в пределах которой коэффициент преобразования или коэффициент усиления не выходит за пределы заданных допусков.



Основные параметры усилителей

11. Фазо-частотная характеристика – зависимость угла сдвига фазы между входным и выходным напряжениями от частоты.

12. Переходная характеристика – зависимость от времени выходного напряжения усилителя, на вход которого подан мгновенный скачок напряжения.

13. Фазовые искажения появляются вследствие отклонения фазо-частотной характеристики реального усилителя от идеальной. Они вызваны неодинаковым сдвигом по фазе отдельных гармонических составляющих спектра сигнала сложной формы, что обусловлено наличием в цепях усилителя реактивных компонентов и инерционными свойствами активных приборов.

Доказано, что идеальной фазовой характеристикой является прямая, проходящая под любым углом к оси частот.

Основные параметры усилителей

14. Нелинейные искажения обусловлены нелинейностями амплитудной характеристики усилителя.

Количественно их оценивают коэффициентом нелинейных искажений $K_{НИ}$ или коэффициентом гармоник $K_{Г}$.

$$K_{НИ} = [(P_2 + P_3 + P_4 + \dots P_n)/(P_1 + P_2 + P_3 + \dots P_n)]^{1/2} ;$$
$$K_{Г} = [(P_2 + P_3 + P_4 + \dots P_n)/P_1]^{1/2} ;$$

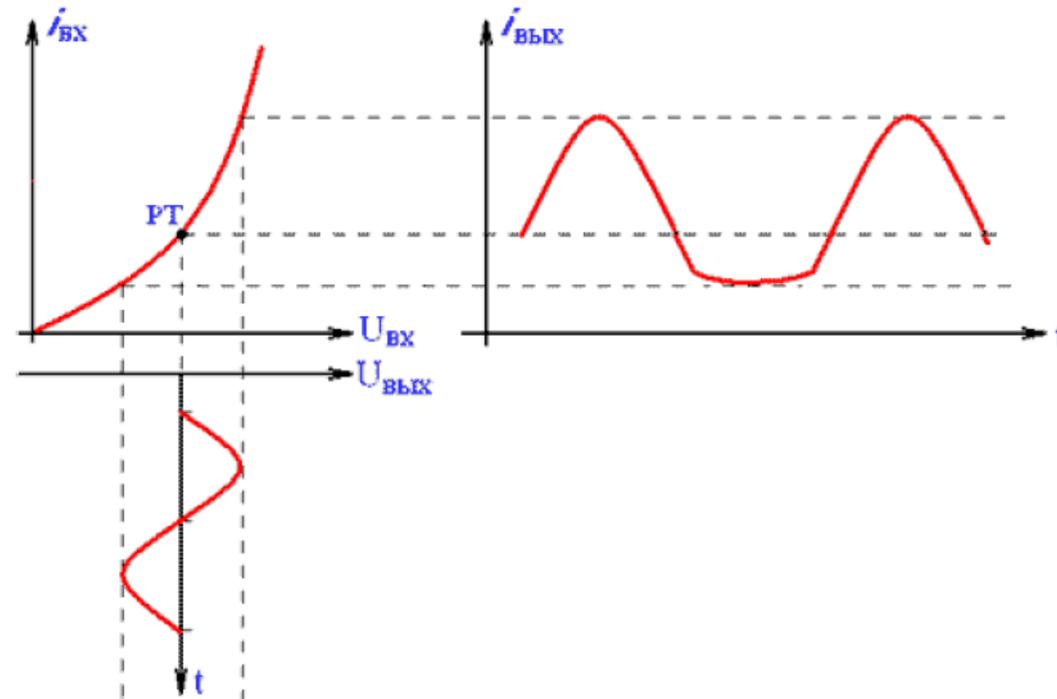
где P_n – мощность n-й гармонической составляющей выходного сигнала.

На практике коэффициент нелинейных искажений применяется чаще из-за простоты реализации его измерителя.

Нелинейные искажения

Элементы схемы усилителя в определённой степени зависят от воздействующего на них напряжения (тока) и, следовательно, обладают некоторой нелинейностью. Наиболее значительной нелинейностью обладают усилительные элементы индуктивности с ферромагнитными сердечниками, трансформаторы.

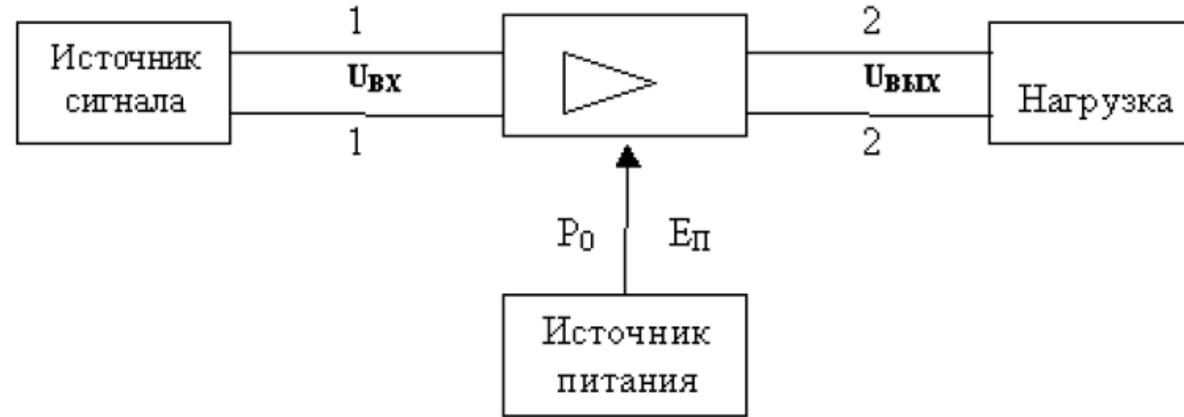
Нелинейность элементов схемы приводит к тому, что зависимость выходного напряжения усилителя от входного также становится нелинейной



В результате на выходе усилителя появляются спектральные составляющие, которые отсутствовали в исходном сигнале.

Принцип усиления электрического сигнала

Рассмотрим схему усилителя электрических сигналов.



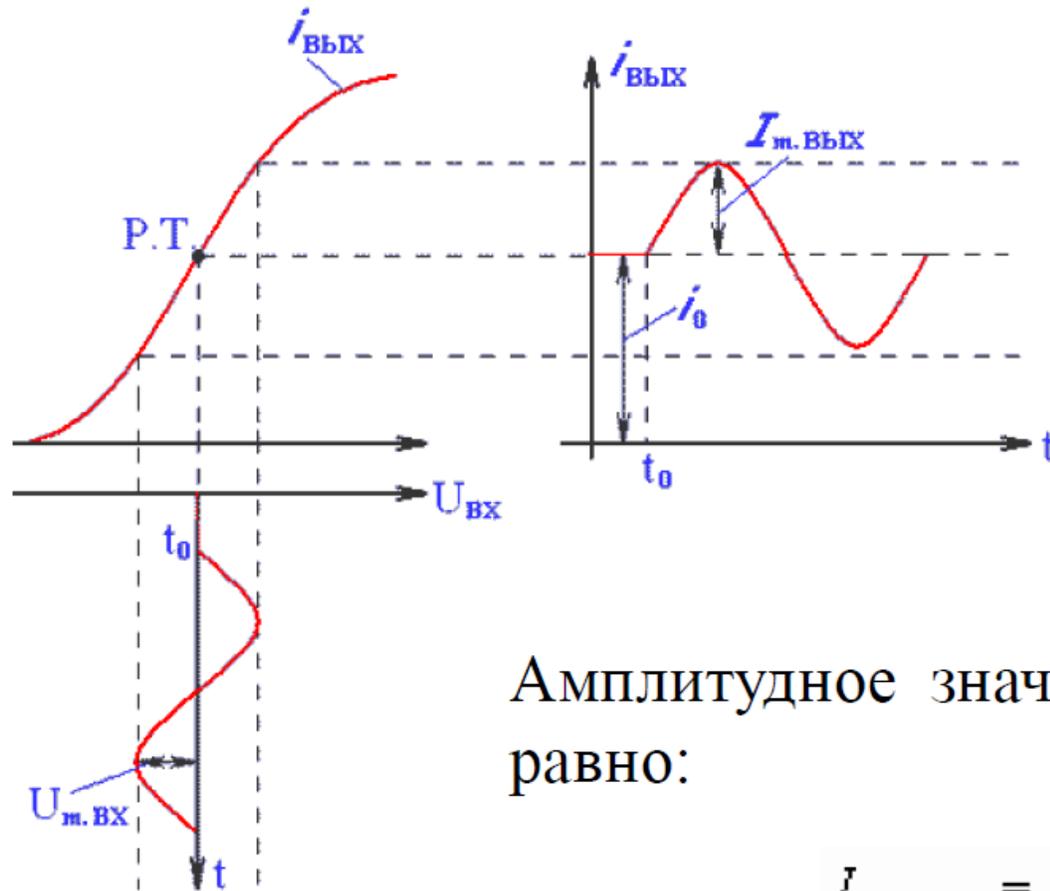
Структурная схема усилителя

Усилитель имеет два входных зажима 1–1, к которым подключается источник усиливаемых колебаний с определённым значением ЭДС и внутренним сопротивлением. К выходным зажимам 2–2 подключается нагрузка с сопротивлением $R_{Н}$. Для питания цепей усилительного элемента (УЭ) используется источник питания с ЭДС $E_{П}$. усилитель потребляет мощность P_0 .

Процесс усиления заключается в пропорциональном изменении выходного напряжения или тока путём изменения управляемого состояния УЭ под действием входного тока или напряжения.

Принцип усиления электрического сигнала

На рисунке представлены диаграммы изменения выходного тока и напряжения при усилении гармонического сигнала.



Усиление зависит от крутизны УЭ:

$$S = \frac{di_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}}$$

Амплитудное значение выходного тока УЭ равно:

$$I_{m.ВЫХ} = S \cdot U_{m.ВХ}$$

Принцип усиления электрического сигнала

При усилении непрерывных сигналов требование к пропорциональности (линейности) изменения выходного тока $i_{\text{ВЫХ}}$ (или напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$) является чрезвычайно важным, т.к. определяет точность воспроизведения усиливаемых сигналов. Если ток $I_{\text{ВЫХ}}$ будет изменяться непропорционально входному воздействию ($U_{\text{ВХ}}$ или $I_{\text{ВХ}}$), то при синусоидальном входном сигнале форма выходного тока $I_{\text{ВЫХ}}$ (или напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$) будет отличаться от синусоидальной, т.е. возникнут искажения усиленного сигнала. Такие искажения называются нелинейными.

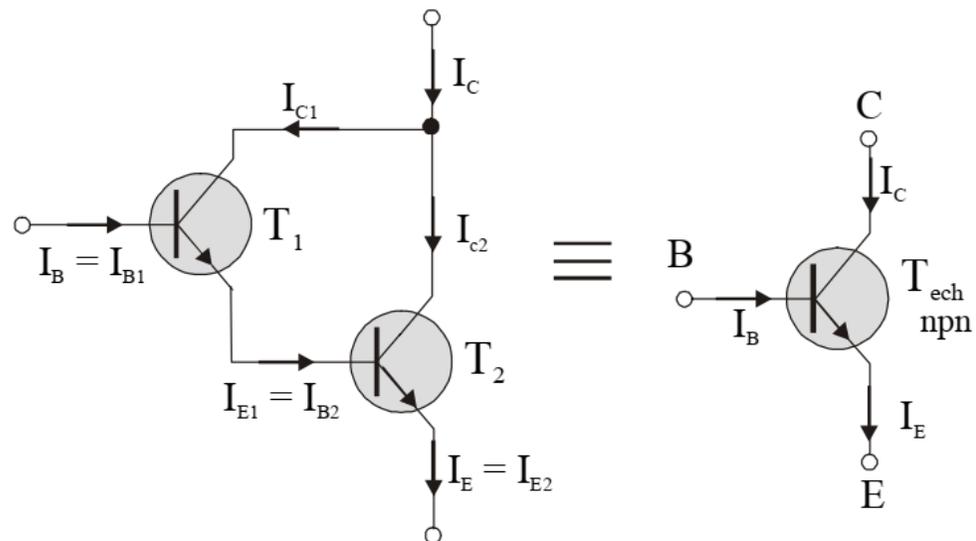
Усиление постоянного тока

Как мы показали в главе о структуре и характеристиках биполярного транзистора, существует связь между статическим током коллектора и током базы: $I_C \cong \beta I_B$. Потому что для большинства транзисторов β имеет порядок 10^2 , происходит значительное усиление тока, который проходит через структуру транзистора между эмиттером и коллектором.

Как при переменном, так и при постоянном токе, чтобы получить более высокое усиление, два или более каскада усиления соединяются каскадом. В переменном токе связь между каскадами чаще всего емкостная или индуктивная, а в постоянном - **прямая**.

В постоянном токе сложные транзисторы успешно используются для получения более высокого коэффициента усиления. В дополнение к высокому коэффициенту усиления **компози́тные транзисторы** также имеют более высокое входное сопротивление, чем одиночный транзистор. Наиболее часто используемые комбинации транзисторов для получения высокого коэффициента усиления постоянного тока - это комбинация Дарлингтона и комбинация super-G.

Составной транзистор Дарлингтона



Он состоит из двух npn-транзисторов, коэффициент усиления составного транзистора равен:

$$\beta_{ech} = \frac{I_C}{I_B}$$

Исходя из схемы подключения двух транзисторов, можно записать следующие соотношения токов :

$$\begin{aligned} I_B &= I_{B1} \\ I_C &= I_{C1} + I_{C2} \\ I_{C1} &= \beta_1 I_{B1} \end{aligned}$$

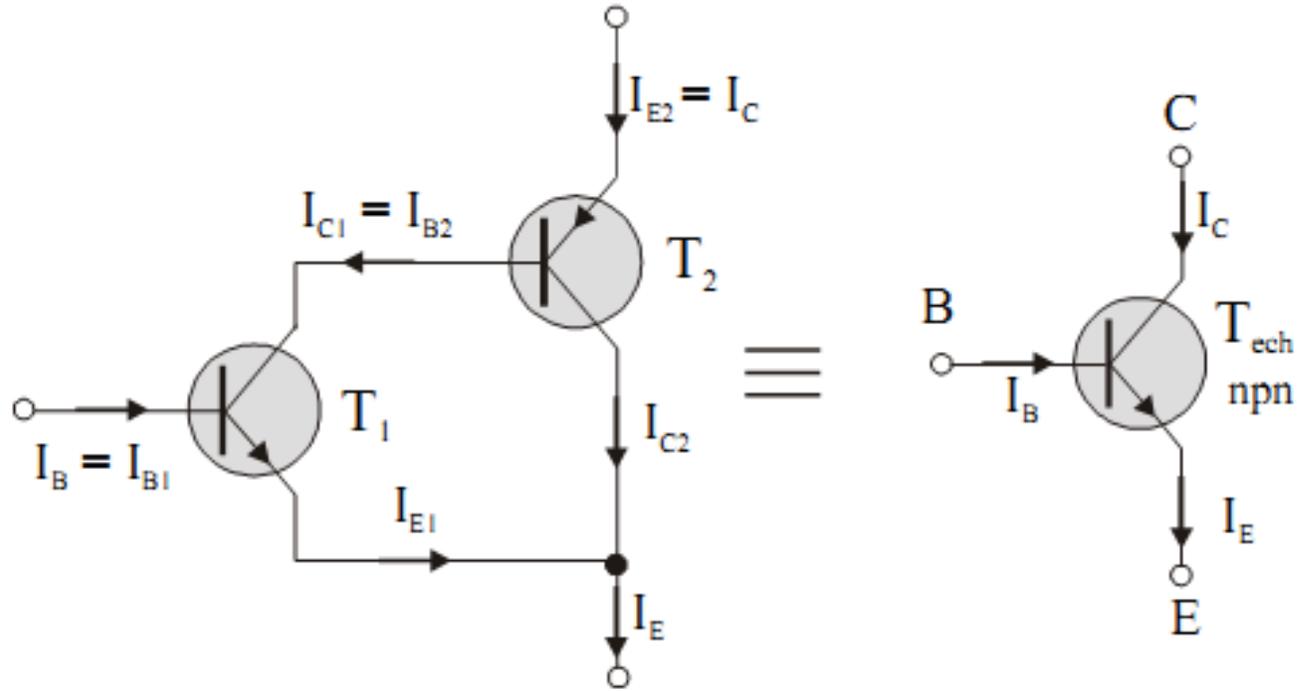
$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 I_{E1} = \beta_2 (I_{B1} + I_{C1}) = \beta_2 (I_{B1} + \beta_1 I_{B1})$$

получено выражение коэффициента усиления постоянного тока композитного транзистора Дарлингтона :

$$\beta_{ech} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2$$

который по крайней мере равен произведению коэффициентов усиления постоянного тока двух компонентных транзисторов. Составной транзистор ведет себя в схеме как транзистор типа npn с коэффициентом усиления постоянного тока, равным β_{ech} .

Составной транзистор **super-G** представляет собой комбинацию двух дополнительных транзисторов, ррр и прп. Эта комбинация ведет себя как прп-транзистор со статическим коэффициентом усиления, имеющим выражение



$$I_C = I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{C1}(1 + \beta_2)$$

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$$

$$I_B = I_{B1}$$

$$\beta_{ech} = \beta_1 + \beta_1 \beta_2$$

Усиление переменных сигналов

Усиление переменного сигнала также означает увеличение энергии, которую он «переносит». Это увеличение связано с потребляемой мощностью постоянного тока, обеспечиваемой источником питания схемы усилителя. Или, другими словами, активный элемент преобразует энергию постоянного тока в энергию переменного тока.

Рабочий класс

Одним из наиболее часто используемых соединений для усиления переменных сигналов (особенно гармонических) является соединение с общим эмиттером. Сигнал, который мы хотим усилить, подается между базой транзистора и клеммой заземления. В зависимости от соотношения между амплитудой переменного сигнала и положением статической рабочей точки транзистора может быть несколько классов работы усилителей переменного сигнала. Чтобы объяснить их, мы будем использовать передаточную характеристику напряжения. Передаточная характеристика была линеаризована на трех участках, чтобы легче понять влияние положения статической рабочей точки на форму выходного сигнала. Мы предполагаем, что на основе транзистора мы подаем малый синусоидальный сигнал u_{be} . Его изменение в Δu_{be} будет определять Δu_{ce} изменение напряжения между коллектором и эмиттером, которое будет перекрывать статическое (постоянное) напряжение смещения. Как это изменяется, зависит от положения статической рабочей точки М на передаточной характеристике. Представлены четыре возможных ситуации, на основе которых определяются рабочие классы.

Классификация режимов

В зависимости от положения рабочей точки и времени протекания тока через активный элемент различают следующие режимы:

1 - А;

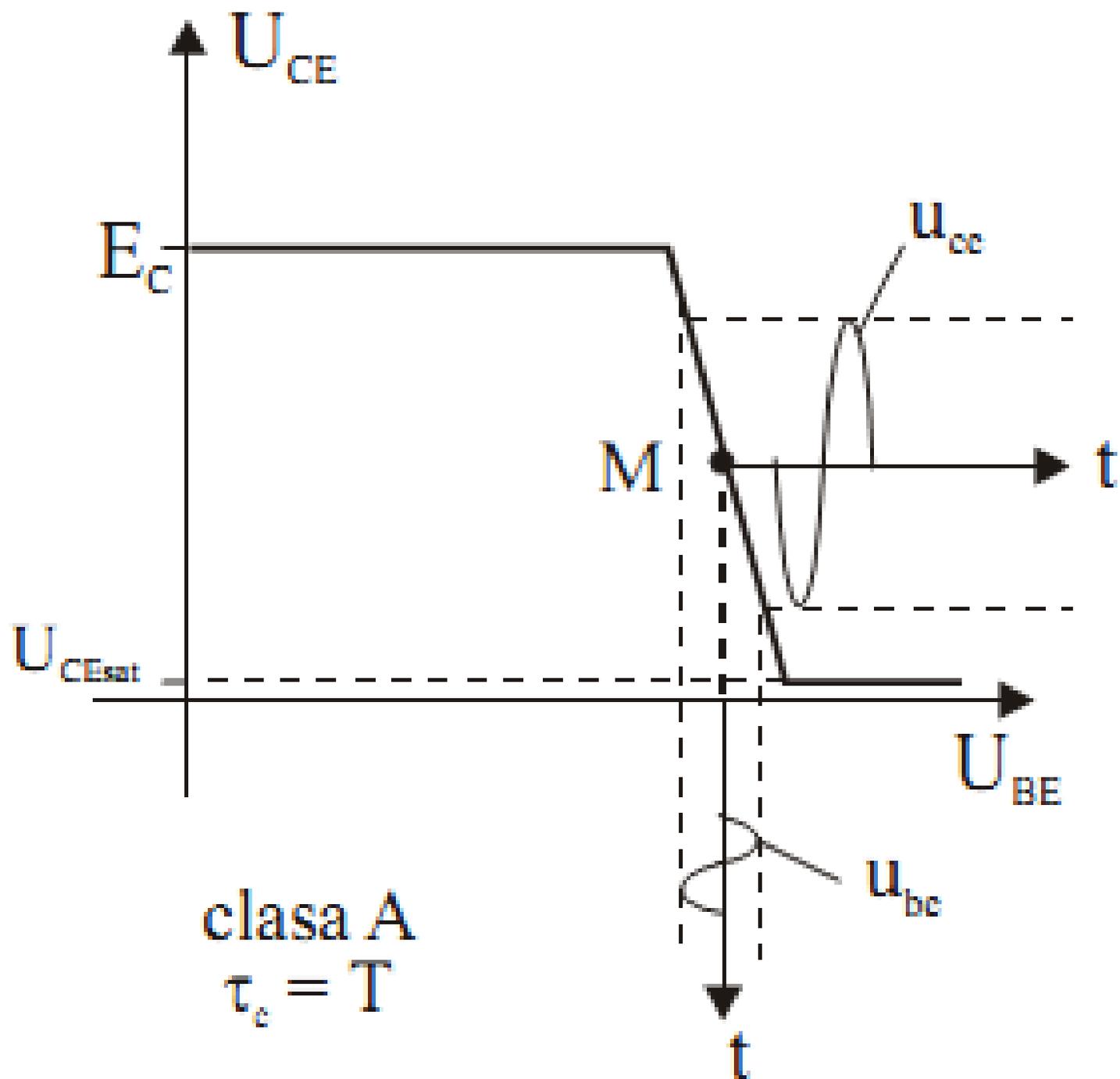
2 - В;

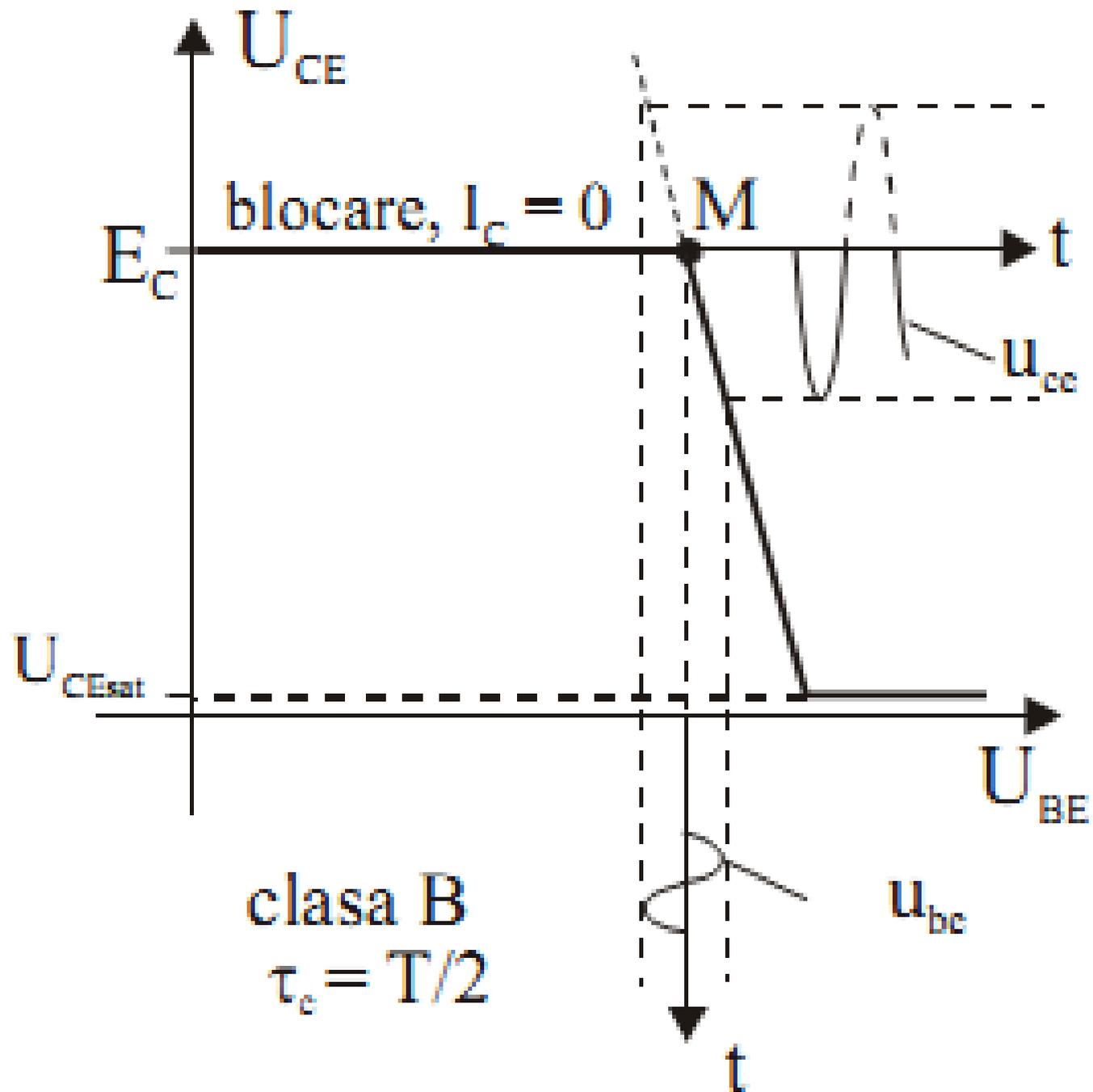
3 - С;

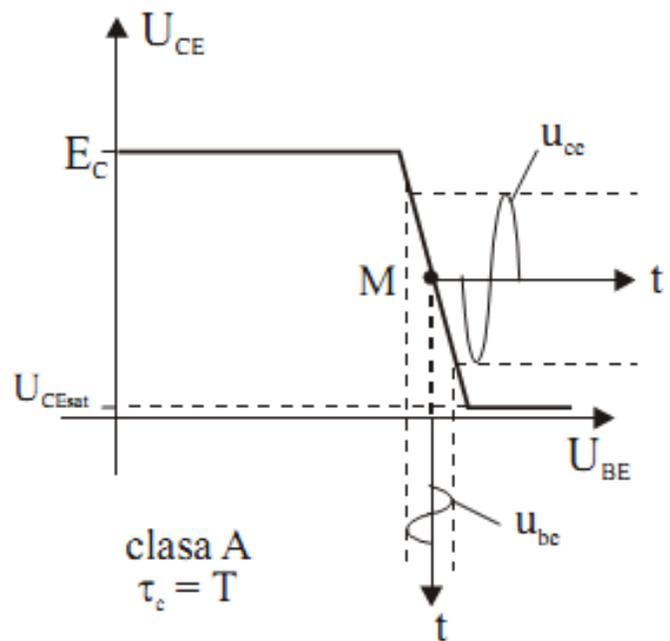
4 - D.

Иногда применяют промежуточный режим АВ.

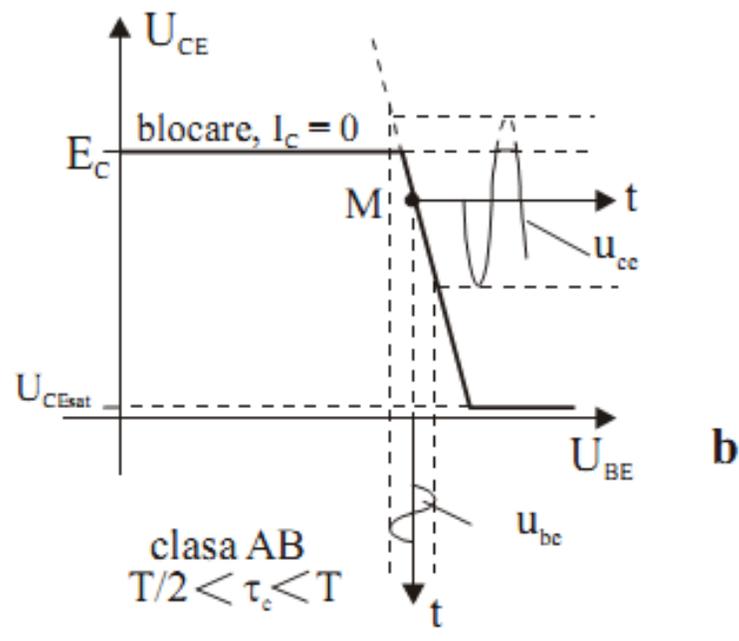
Количественно режим работы усилителя характеризуется углом отсечки θ – половиной той части периода, в течение которого в выходной цепи транзистора протекает ток нагрузки. Угол отсечки выражают в градусах или радианах.



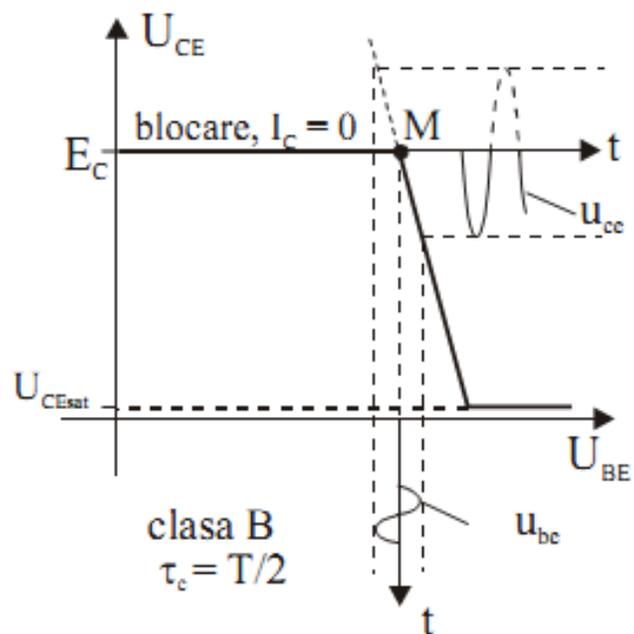




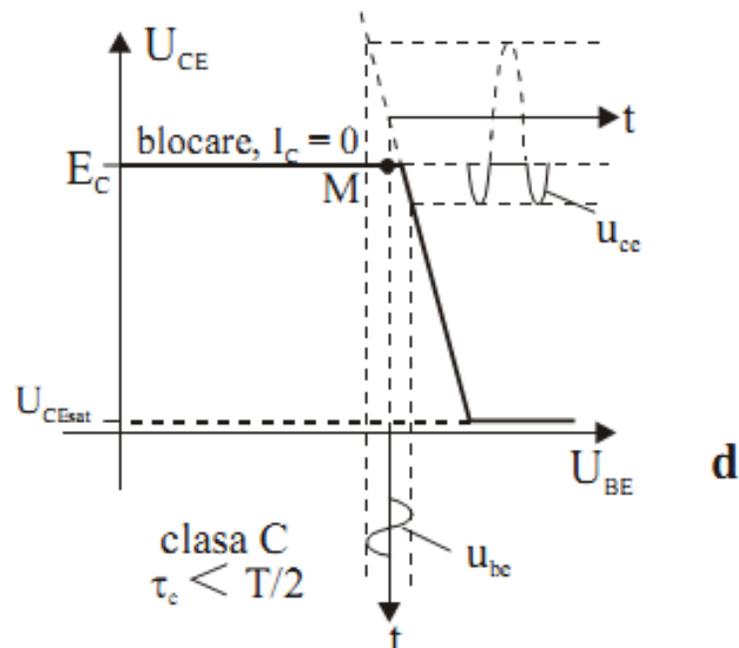
a



b



c



d

Рабочий класс определяется в зависимости от временного интервала, τ_c , от периода T сигнала, который усиливается, когда активный элемент (транзистор) находится в состоянии проводимости.

Таким образом, определены четыре рабочих класса. :

- класс А, $\tau_c = T$, транзистор всегда находится в состоянии проводимости в активной области (рис. а).
- класс АВ, $T/2 < \tau_c < T$, через промежуток времени меньше половины периода транзистор блокируется и $I_c = 0$. Выходной сигнал больше не будет синусоидальным (рис. b).
- класс В, $\tau_c = T/2$, половину периода транзистор работает в активной области, а половину периода блокируется. Выходной сигнал выглядит как моноальтернированный выпрямленный сигнал, но с усилением (рис. с).
- класс С, $\tau_c < T/2$, транзистор работает в активной области менее половины периода сигнала, подаваемого на вход. На выходе имеет вид синусоидальных пиков (рис. d). Этот рабочий класс используется в усилителях мощности, в которых работает резонансный LC-контур, или в радиочастотных генераторах.

На рисунке сохранена одинаковая амплитуда входного сигнала, чтобы проиллюстрировать все классы работы. Из анализа форм выходных сигналов можно увидеть, что только в классе А форма выходного сигнала такая же, как у входного сигнала. В других рабочих классах в интервале времени, в котором транзистор заблокирован, ток коллектора равен нулю, а выходное напряжение ограничено значением E_c . Что произойдет, если усилитель работает в классе А, но мы увеличиваем амплитуду входного сигнала?

Режим А

Рабочую точку выбирают в середине линейного участка входной характеристики. Ток в выходной цепи протекает в течение всего периода, а угол отсечки равен 180. Транзистор работает в активном режиме на близких к линейным участкам характеристик, поэтому искажения усиленного сигнала здесь минимальны. КПД такого усилителя низок (теоретически $< 25\%$) поэтому такой режим применяют в маломощных каскадах предварительного усиления.

Режим В

Рабочая точка находится в нулевой точке входной характеристики. Ток нагрузки протекает в коллекторной цепи транзистора только в течение одного полупериода входного сигнала, КПД может достигать 70%. Угол отсечки θ равен 90.

Используют в двухтактных усилителях мощности.

Недостаток - большой уровень нелинейных искажений.

Режим АВ

Ток в выходной цепи протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала.

Этот режим используется для уменьшения нелинейных искажений усиливаемого сигнала, которые возникают из-за нелинейности начальных участков входных вольт-амперных характеристик транзисторов.

При отсутствии входного сигнала в режиме покоя транзистор немного приоткрыт и через него протекает ток, составляющий (10...15)% от максимального тока при заданном входном сигнале. Угол отсечки в этом случае составляет (120...130).

Используют в двухтактных усилителях мощности с улучшенными характеристиками.

Особенности:

- высокий КПД;
- - низкие нелинейные искажения.

Режим С

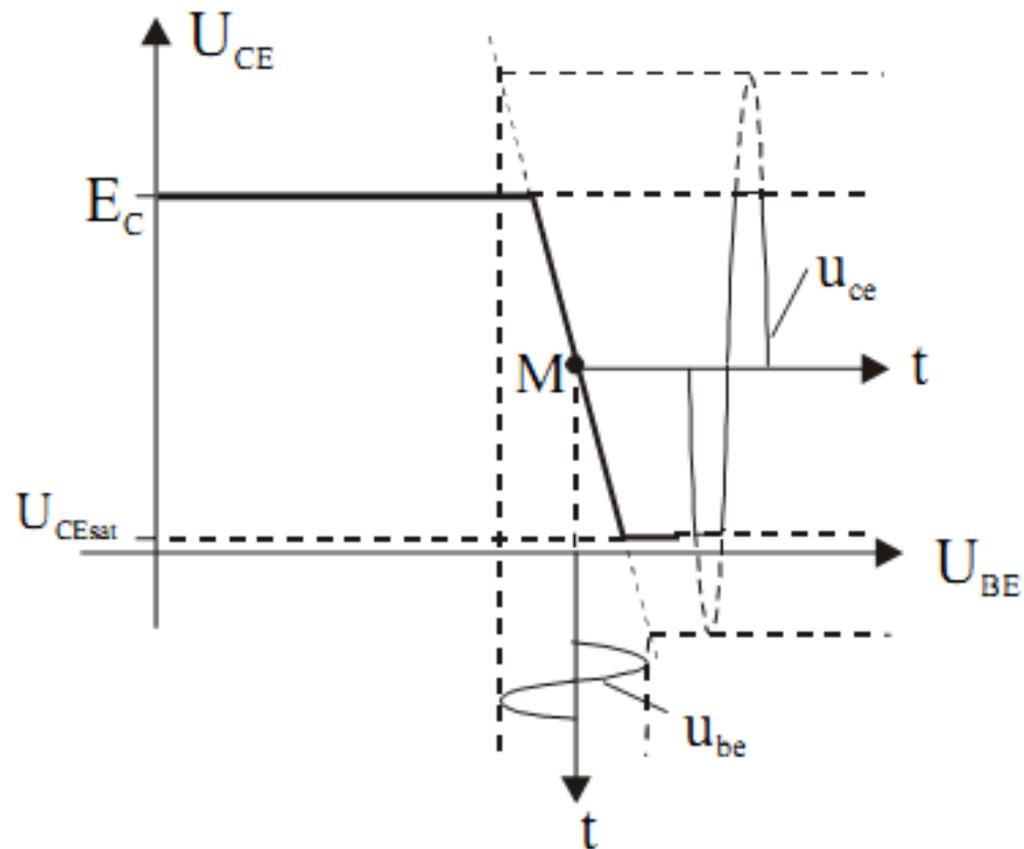
Рабочая точка А располагается выше начальной точки входной характеристики.

Ток протекает в течение времени, которое меньше половины периода входного сигнала, поэтому угол $\theta < 90^\circ$. Больше половины рабочего времени транзистор закрыт, мощность, потребляемая от источника питания снижается. КПД близок к 100%.

Из-за больших нелинейных искажений применяют в основном в мощных резонансных усилителях (например в радиопередатчиках).

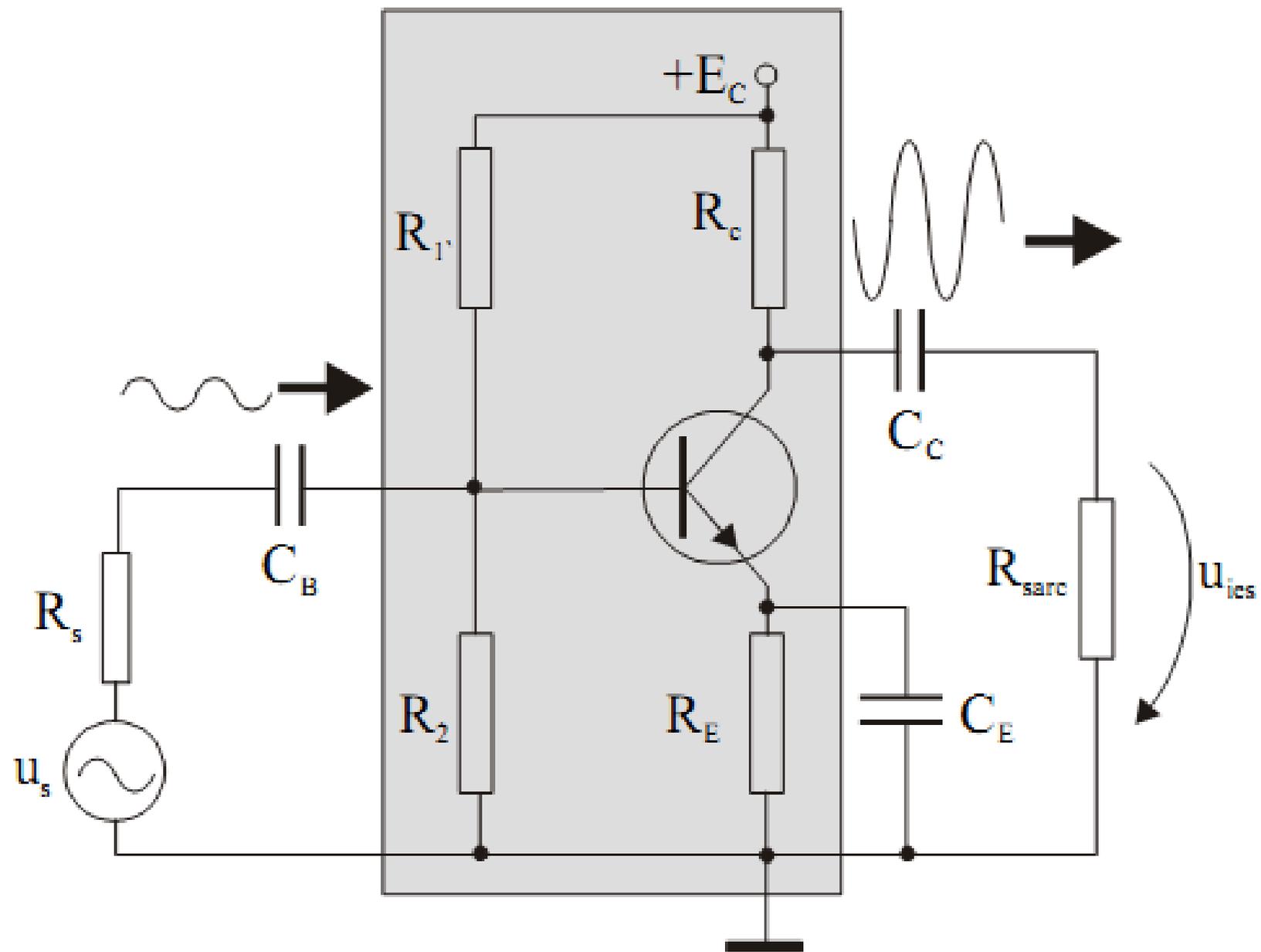
Режим D

Рабочая точка может находиться в зоне отсечки или в зоне насыщения. В активной зоне рабочая точка находится только в течение короткого промежутка времени, необходимого для перехода её из одной зоны в другую. Используется в специальных видах усилителей.



При больших амплитудах входного сигнала транзистор может выйти из активной рабочей области. При положительном чередовании он переключается в режим насыщения, а при отрицательном чередовании - в режим блокировки, так что выходной сигнал имеет синусоидальный вид с обрезанными кончиками. Как правило, искажение выходного сигнала зависит как от амплитуды входного сигнала, так и от положения статической рабочей точки на передаточной характеристике. Это связано с нелинейностью передаточной характеристики. Только для малых уровней входного сигнала между амплитудой выходного сигнала и амплитудой входного сигнала может быть установлена линейная, прямо пропорциональная зависимость. Поэтому линейная модель с гибридными параметрами (см. Предыдущую главу) является моделью малого сигнала.

Усилитель подключения с общим эмиттером



Усилитель с биполярным транзистором с общим эмиттерным соединением очень легко построить по схеме смещения постоянного тока с базовым делителем напряжения. Номиналы резисторов смещения рассчитываются в соответствии с параметрами используемого транзистора и желаемым классом работы. Если мы хотим усилить небольшие синусоидальные сигналы, которые также являются синусоидальными на выходе, статическая рабочая точка будет выбрана так, чтобы усилитель работал в классе А. Схема смещения постоянного тока дополнена несколькими конденсаторами связи.

На транзистор одновременно воздействуют два сигнала: непрерывный сигнал (статический), определяющий статическую рабочую точку, и сигнал переменного времени (динамический), который будет усиливаться. Поэтому мы можем говорить о двух режимах работы: статическом и динамическом, с которыми мы поговорим далее.

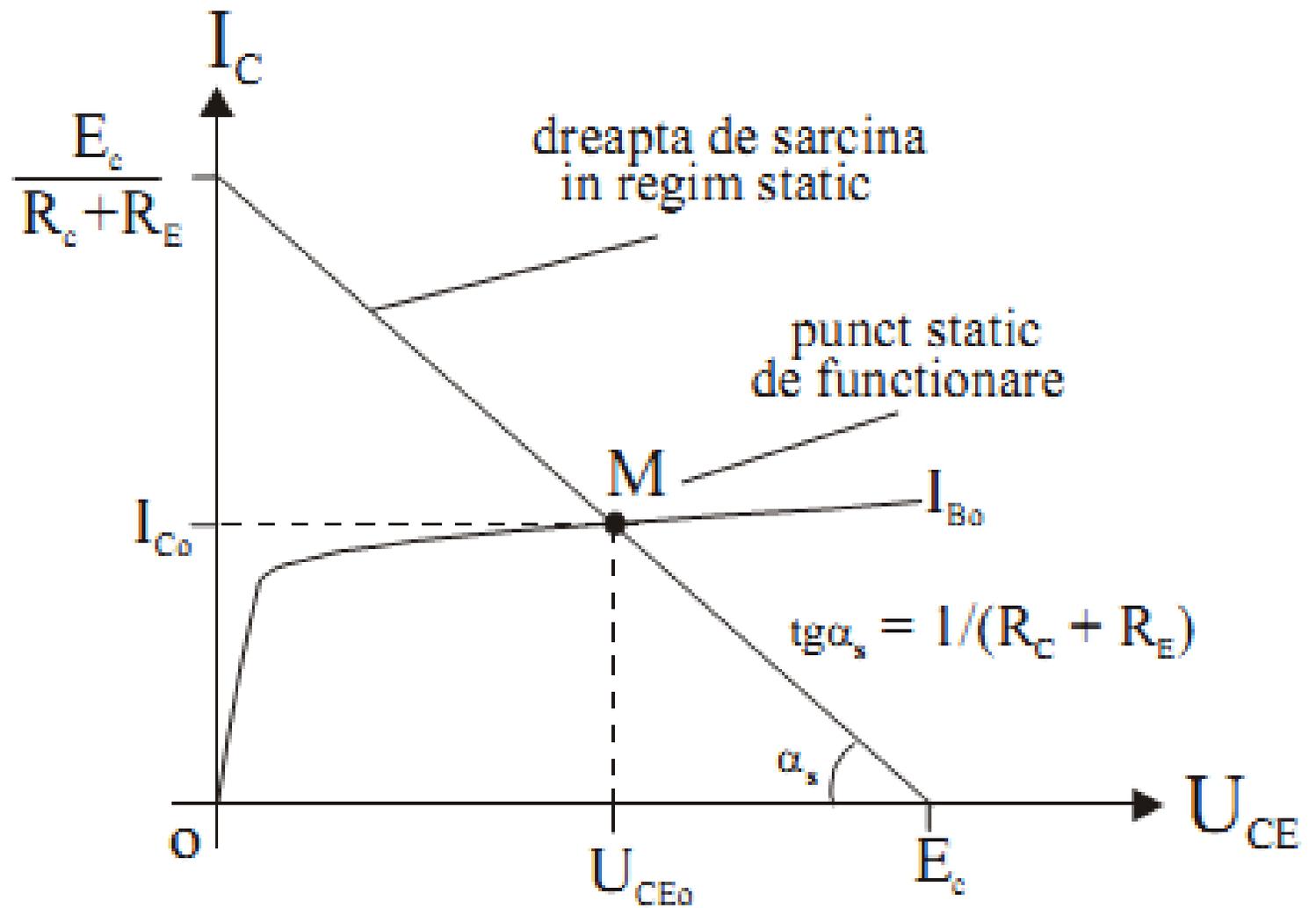
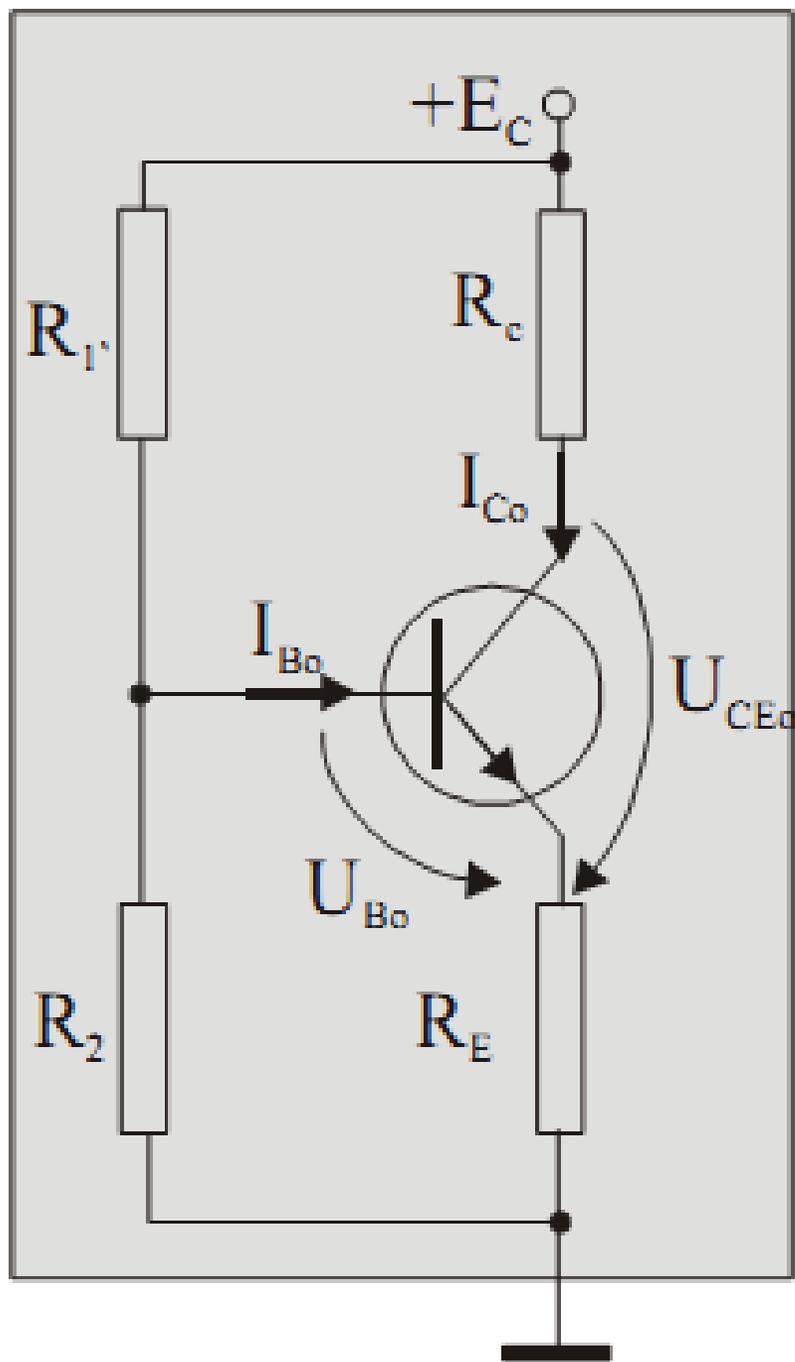
Сигнал, который мы хотим усилить (подаваемый источником напряжения u_s с внутренним сопротивлением R_s), подается через конденсатор C_b на основе транзистора. Конденсатор должен позволять сигналу проходить к транзистору практически без присмотра и в то же время блокировать постоянный статический ток смещения, который «протекает» через R_1 , чтобы он не шел к источнику сигнала. Его емкость выбирается так, чтобы на частоте усиленного сигнала он имел пренебрежимо малое реактивное сопротивление к другим элементам схемы и практически мог рассматриваться как короткое замыкание на этой частоте.

Выходной сигнал снимается с коллектора транзистора (горячий вывод) через конденсатор C_c , который должен позволять усиленному сигналу беспрепятственно проходить на нагрузку усилителя (здесь R_{sarc}) и не пропускать через него прямую составляющую тока коллектора. Его значение выбрано так, чтобы
$$\frac{1}{\omega C_c} \ll R_{sarc}$$

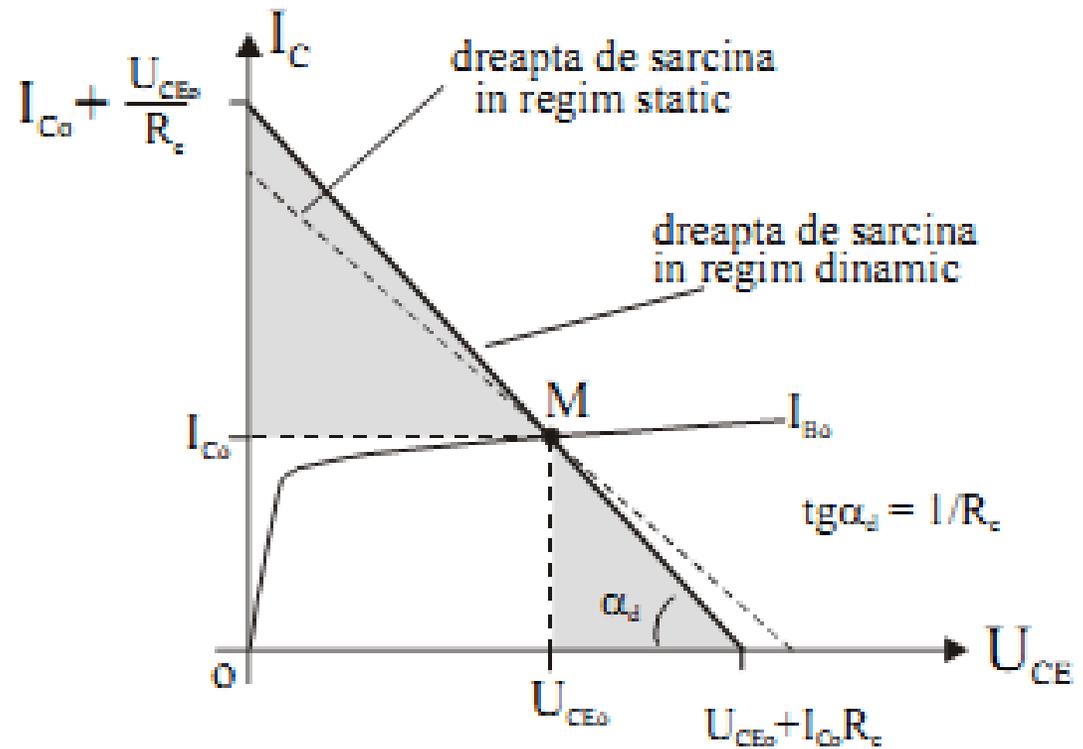
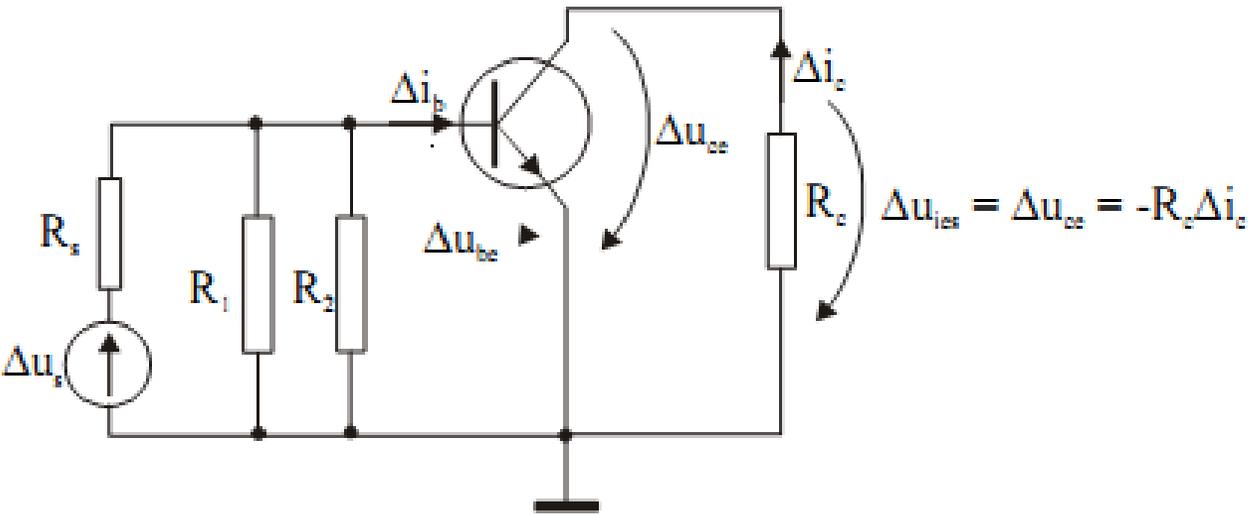
Если бы постоянный ток проходил через нагрузочный резистор, он переводил бы выходное напряжение в положительные значения с напряжением, равным падению постоянного напряжения на нагрузочном резисторе, вызывая дополнительное потребление энергии от источника питания. Мы видели, что сопротивление эмиттера транзистора R_E играет, прежде всего, роль стабилизации статической рабочей точки при изменении температуры. Так что ее присутствие почти обязательно. С другой стороны, если переменная составляющая тока, проходящего через транзистор также проходит через R_E , то часть его энергии расходуется на этом резисторе, и уровень выходного сигнала будет ниже. Чтобы избежать этого недостатка, параллельно с R_E подключается разделительный конденсатор C_E такой емкости, что

$$\frac{1}{\omega C_E} \ll R_E.$$

Если это условие выполнено, конденсатор C_E будет коротким замыканием на клемму заземления для переменной составляющей тока эмиттера. Таким образом, с точки зрения переменного во времени сигнала, эмиттер транзистора имеет потенциал земли. Именно поэтому про этот тип усилителя говорят, что он работает с настольным передатчиком. Очевидно, что для непрерывной составляющей тока эмиттера конденсатор C_E будет эквивалентен прерыванию, так что он будет проходить на клемму заземления только через R_E . Учитывая эти характеристики, ясно, что усилитель ведет себя иначе, чем два типа сигналов: непрерывный статический сигнал и изменяющийся во времени сигнал, который необходимо усиливать. В статическом режиме постоянного тока все конденсаторы могут быть заменены прерыванием ветви, в которой они находятся ($\omega = 0, 1/\omega C \rightarrow \infty$), так что схема усилителя уменьшена. Это не что иное, как схема смещения постоянного тока биполярного транзистора, с помощью которой устанавливается положение статической рабочей точки M . Он расположен на пересечении линии статической нагрузки и выходной вольт-амперной характеристики, соответствующей базовому току I_{B0} .



В динамическом режиме, на частоте, для которой усилитель рассчитан на максимальное усиление, каждый конденсатор может быть заменен коротким замыканием. Также потому, что $E_c = \text{const.}$, $\Delta E_c = 0$ а в режиме изменения источник питания постоянного тока может быть заменен коротким замыканием. Для простоты мы посчитали, что сопротивление нагрузки намного выше R_c . Если это приближение невозможно, вместо R_c появится эквивалентное сопротивление, подключенное параллельно R_{sarc} .



Видно, что между изменением тока коллектора и изменением напряжения между коллектором и эмиттером можно установить зависимость.

$$\Delta i_c = -\frac{\Delta u_{ce}}{R_c},$$
 Это наклонная линия

$$\operatorname{tg} \alpha_d = -\frac{1}{R_c}$$

Это *линия нагрузки в динамическом режиме*, и она проходит через статическую рабочую точку М. В динамическом режиме рабочая точка транзистора будет «ходить» по этой линии нагрузки по обе стороны от статической рабочей точки. Точки пересечения с двумя осями координат могут быть очень легко определены по двум заштрихованным треугольникам, зная один участок и угол α_d .

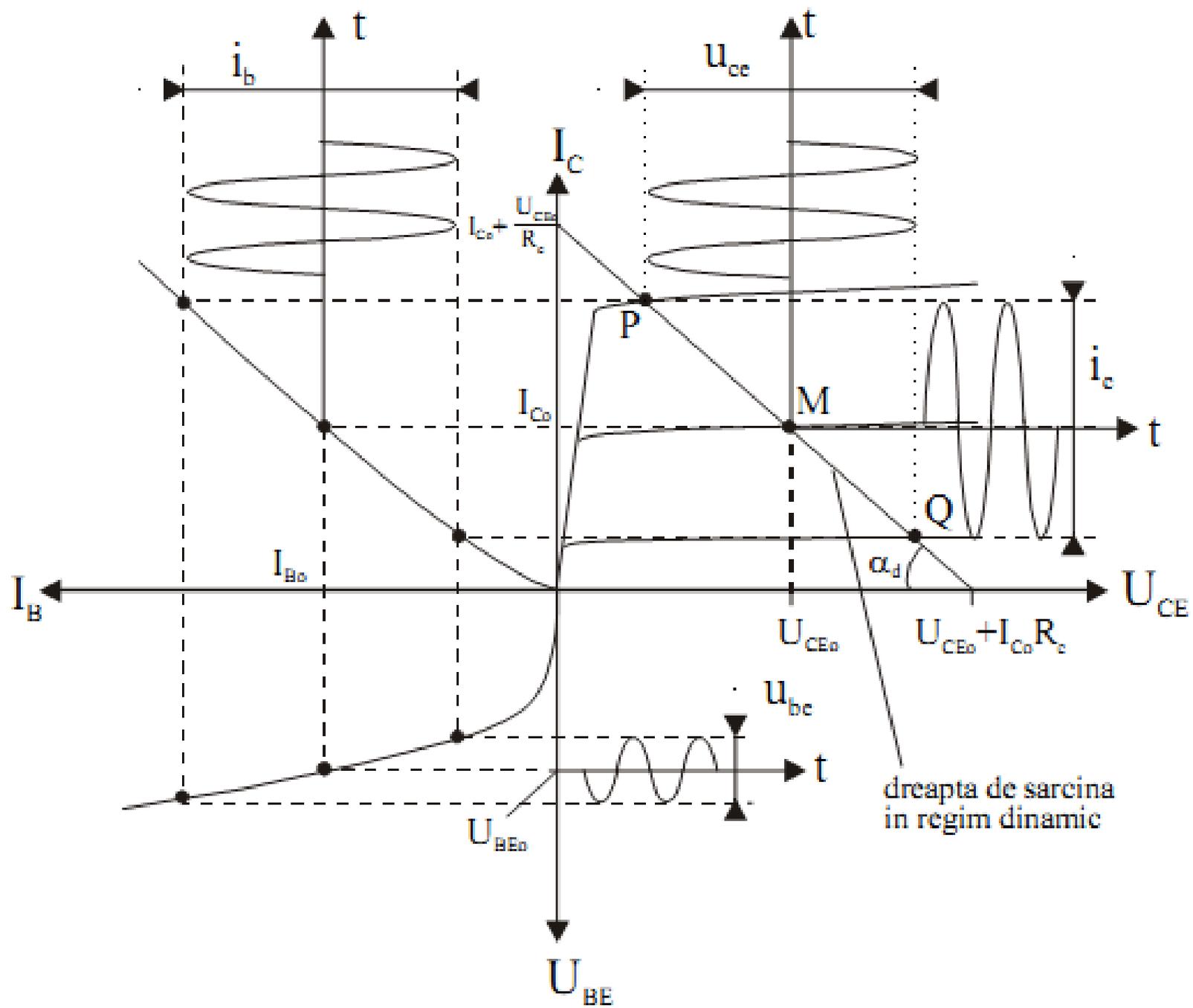
Механизм, с помощью которого активный элемент (транзистор) усиливает сигнал, можно понять на основе графического анализа. Допустим, что статическая рабочая точка была установлена в М и что в зависимости от транзистора мы подаем небольшой синусоидальный сигнал, который мы отметили с помощью u_{be} . Изменение в Δu_{be} напряжения между базой и коллектором транзистора вызовет изменение Δi_b тока базы, который согласно соотношениям определения параметров гибрида будет:

$$\Delta i_b = \frac{\Delta u_{be}}{h_{11}}$$

Изменение основного тока будет усилено, определяя изменение тока коллектора, которое, зная, что выходная проводимость очень мала, можно аппроксимировать с помощью:

$$\Delta i_c \cong h_{21} \frac{\Delta u_{be}}{h_{11}}$$

Это изменение тока коллектора будет определять «ход» статической рабочей точки на линии нагрузки в динамическом режиме между точками Р и Q с частотой, равной частоте входного сигнала.



Как видно из этого графического анализа и из поведения усилителя в динамическом режиме, напряжение между коллектором и эмиттером (которое также является выходным напряжением) находится в фазе с входным напряжением в транзисторе u_{be} . Таким образом, изменение выходного напряжения можно выразить соотношением:

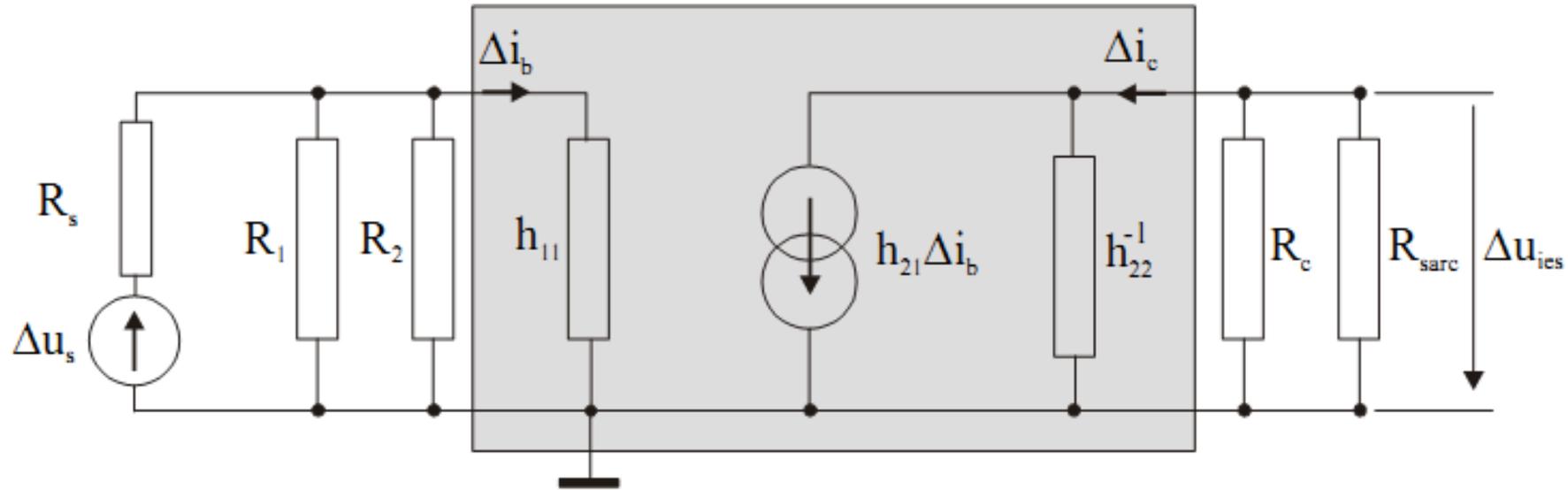
$$\Delta u_{ies} \cong -R_c \frac{h_{21}}{h_{11}} \Delta u_{be}$$

Из предыдущего соотношения можно выразить усиление за счет транзистора;

$$A_{uT} \cong -\frac{h_{21}}{h_{11}} R_c$$

Более детальный анализ работы усилителя можно провести, построив вариационную схему, эквивалентную усилителю. Для этого сделаем следующие уточнения:

- транзистор заменен схемой, эквивалентной гибридным параметрам, в которых эффектом источника можно пренебречь $h_{12}\Delta u_{ce}$ потому что напряжение, обеспечиваемое им, очень низкое
- в вариациях клемма источника постоянного напряжения соединена с массой
- в диапазоне частот, в котором усиление максимально, влиянием всех мощностей можно пренебречь, и получается эквивалентная схема.



Наша цель - найти полезное выражение для коэффициента усиления, выражение, на основе которого мы сможем разработать реальный усилитель. Рассматривая значения резисторов R_1 и R_2 (мы видели их при поляризации по постоянному току) и входного импеданса h_{11} транзистора, можно понять, что

Таким образом, изменение базового тока будет : $\Delta i_b = \frac{\Delta u_s}{R_s + h_{11}}$ $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gg h_{11}$.

Переходя теперь к выходной цепи, мы заметим, что через эквивалентное сопротивление, параллельное $R_c \parallel h_{22}^{-1} \parallel R_{sarc}$ ток течет от клеммы заземления к «теплой» клемме $h_{21} \Delta i_b$, так что выходное напряжение будет:

$$\Delta u_{ies} = -h_{21} \Delta i_b (R_c \parallel h_{22}^{-1} \parallel R_{sarc})$$

Из двух последних соотношений следует выражение коэффициента усиления в середине полосы частот:

$$A_{u_o} = \frac{\Delta u_{ies}}{\Delta u_s} = -\frac{h_{21}}{h_{11} + R_s} (R_c || h_{22}^{-1} || R_{sarc})$$

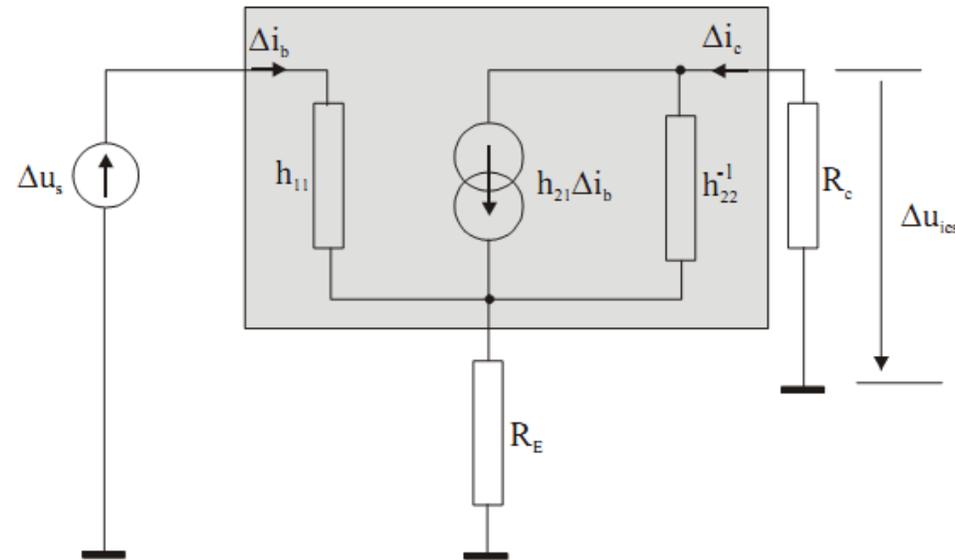
Если источником сигнала является источник напряжения с очень низким выходным сопротивлением, тогда $R_s \ll h_{11}$. Также, если сопротивление коллектора намного ниже, чем сопротивление нагрузки и выходное сопротивление транзистора ($R_c \ll R_{sarc}, h_{22}^{-1}$), то выражение коэффициента усиления может быть вычислено с хорошей аппроксимацией соотношения :

$$A_{u_o} \cong -\frac{h_{21}}{h_{11}} R_c$$

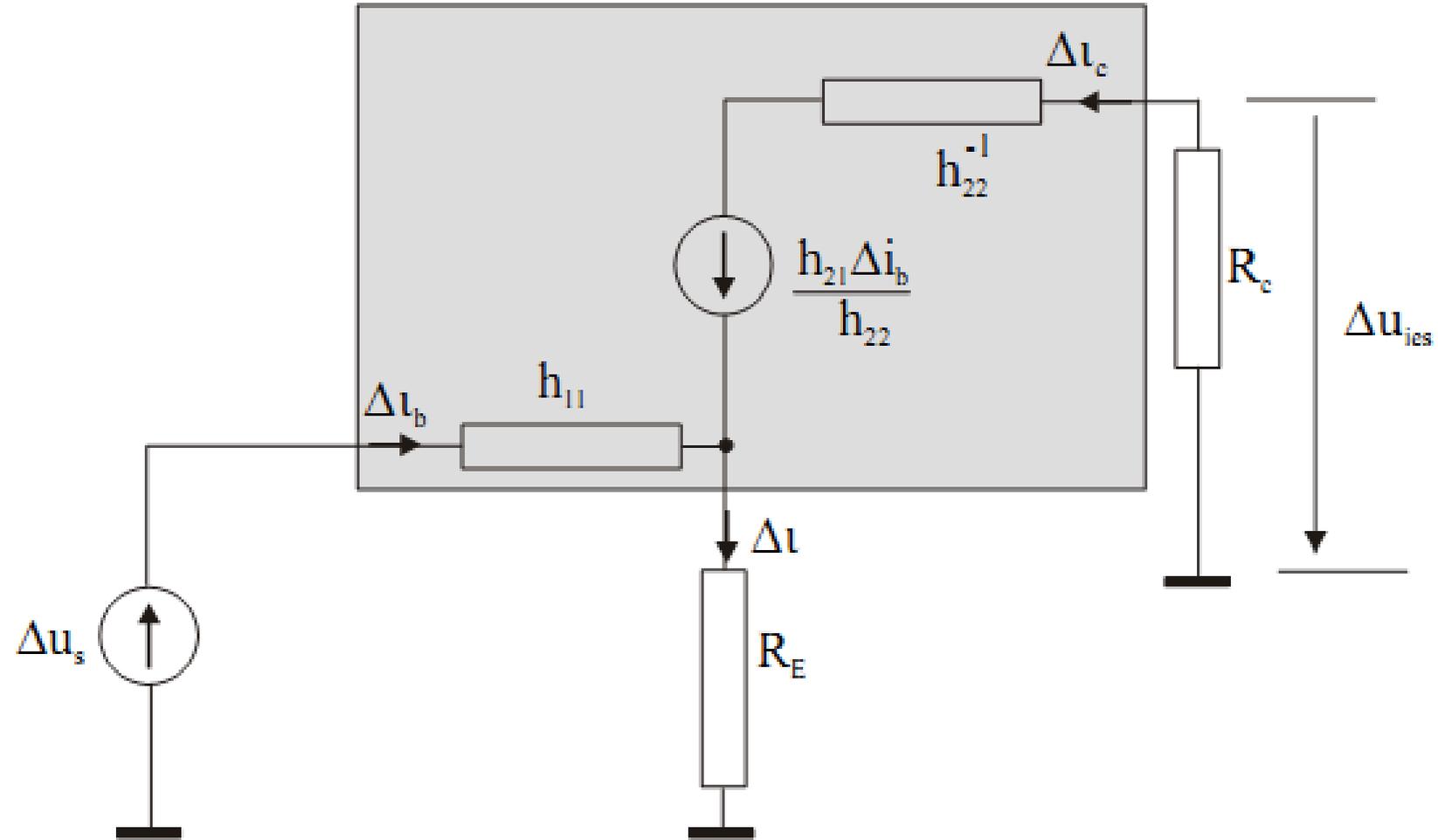
Важны два вывода :

- коэффициент усиления напряжения определяется прежде всего низкими сигнальными параметрами транзистора и сопротивлением коллектора.
- Знак «-» в выражении коэффициента усиления означает сдвиг фазы выходного сигнала на 180° после сигнала, подаваемого на вход усилителя.

Интересно посмотреть, что произойдет, если конденсатор C_E будет удален из схемы усилителя, то есть если эмиттер больше не будет подключен к земле с точки зрения изменений. Мы можем понять последствия этого «маневра», оценивая вещи качественно. В этой ситуации переменный ток эмиттера будет вынужден стекать на землю через резистор R_E . Таким образом, часть энергии выходного сигнала будет рассеиваться на этом резисторе, и выходной сигнал будет меньше, чем в присутствии конденсатора C_E . Это означает, что коэффициент усиления будет ниже. Мы можем продолжить нашу «философию», сказав: сопротивление R_E есть как во входной цепи, так и в выходной цепи (общий эмиттер). Учитывая направления напряжений в данный момент времени, мы заметим, что напряжение источника сигнала и напряжение на R_E находятся в фазе. Это означает, что входное напряжение на транзисторе будет уменьшаться, поэтому выходное напряжение также будет ниже. Таким образом, можно видеть, что часть выходного сигнала возвращается на вход синфазно с сигналом источника. Этот процесс называется **отрицательной реакцией**, и одним из его последствий для усилителя является **уменьшение его коэффициента усиления**. Эти логические рассуждения, основанные на явлениях, происходящих в цепи усиления, могут быть строго продемонстрированы на основе эквивалентной схемы.



Для упрощения вывода выражения коэффициента усиления эту схему можно изменить, преобразовав источник тока в эквивалентный источник напряжения.



И база, и ток коллектора вносят вклад в ток через резистор R_E , но, учитывая высокий коэффициент усиления транзистора, в первом приближении вкладом тока базы можно пренебречь. С этими пояснениями после решения системы уравнений :

$$\Delta u_s = h_{11} \Delta i_b + R_E \Delta i_c$$

$$\frac{h_{21}}{h_{22}} \Delta i_b = (h_{22}^{-1} + R_c + R_E) \Delta i_c$$

$$\Delta u_{ies} = -R_c \Delta i_c$$

$$A_{uRN} = \frac{\Delta u_{ies}}{\Delta u_s}$$

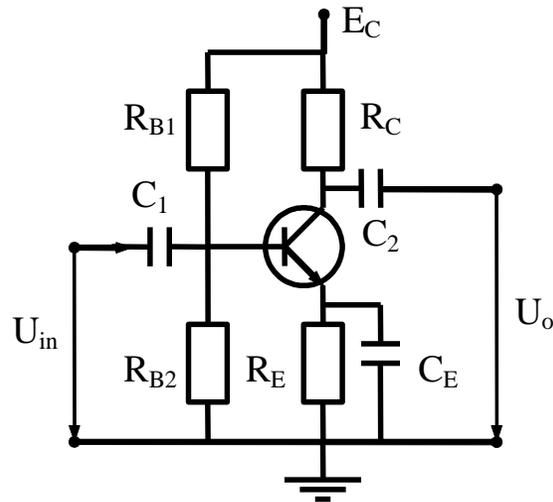
следующее выражение для результатов коэффициента усиления :

$$A_{uRN} = \frac{-\frac{h_{21}}{h_{11}} R_c}{1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} R_E + h_{22} (R_c + R_E)}$$

В соотношении, записанном в такой форме, сразу видно, что в его числителе стоит коэффициент усиления без отрицательной реакции, а в знаменателе - супраунитарный, поэтому $A_{uRN} < A_{uo}$.

Усилитель в соединении с общим эмиттером (ЕС).

Самая распространенная схема усилительного каскада с биполярным транзистором, расположенным в разьеме ЕС.



Элементы имеют следующие значения :

R_{B1}, R_{B2} – делитель напряжения для поляризации с ролью в создании потенциала, необходимого для работы транзистора в нормальной активной области;

R_E – сопротивление в эмиттере с ролью термостабилизации;

C_1, C_2 – конденсаторы связи, которые разделяют пол по постоянному току, блокируя компонент постоянного тока, но пропускают компонент переменного тока;

C_E – развязывающий конденсатор, который действует как заземление эмиттера переменного тока;

R_C – сопротивление нагрузки;

U_{in} – амплитуда входного сигнала напряжения;

U_o – амплитуда выходного сигнала напряжения.

$$U_B = E_C \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Если применить расчетные теоремы электрических цепей, то значение напряжения поляризации перехода БЕ получается для режима постоянного тока. :

$$A_U = -g_m \cdot R_C$$

Из предыдущего соотношения видно, что входное напряжение зависит от значений сопротивлений делителя напряжения.

Таким образом определяется усиление напряжения этого усилителя. :

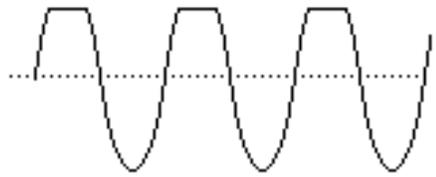
где g_m представляет собой наклон транзистора.

$$A_{uo} \cong -\frac{h_{21}}{h_{11}} R_C$$

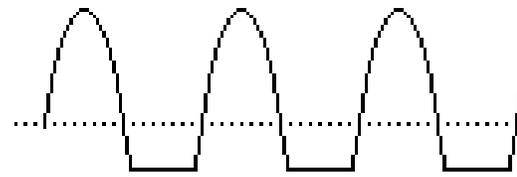
Усилитель ограничен работой в определенном диапазоне частот. Нижняя часть диапазона ограничена *развязывающими конденсаторами*, а верхняя часть ограничена поведением транзистора на высоких частотах. Так что можно сказать, что этот усилитель работает на средних частотах.

В переменном токе сопротивление в эмиттере, которое играет роль термостабилизации, играет отрицательную роль, а именно снижает усиление напряжения пола. Проблема решается подключением отключающего конденсатора параллельно. Название *развязывающего конденсатора* происходит от того факта, что конденсатор переменного тока имеет низкий импеданс, что приводит к низкому сопротивлению эмиттера..

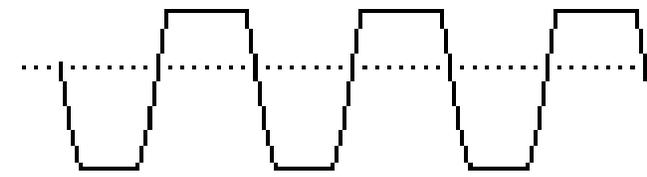
Усилитель также ограничен входными значениями. Если эти ограничения не соблюдаются, выходной сигнал может быть усечен, вверху входом насыщения транзистора и внизу входом в области блокировки транзистора..



из-за насыщения



из-за блокировки



из-за насыщения и блокировки

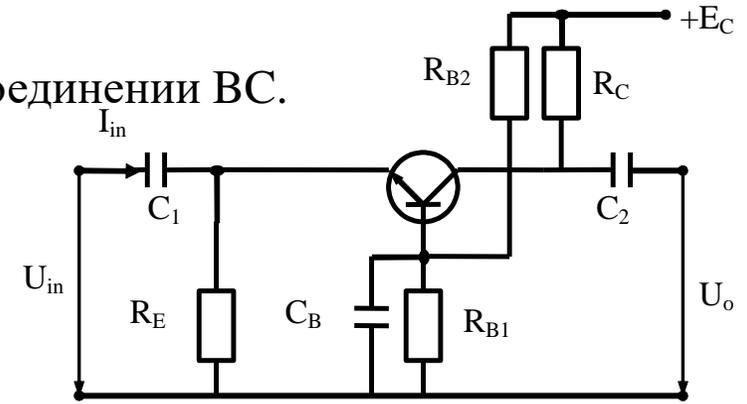
Замечания:

- усиление напряжения высокое (десятки или сотни);
- текущий прирост велик (десятки или сотни);
- усиление по мощности очень высокое;
- не совпадает по фазе с размером входа на 180° , поэтому его можно использовать в качестве фазоинвертора;
- входной импеданс средний, и усилитель нельзя использовать как идеальный усилитель;
- выходной импеданс имеет среднее значение (примерно равно R_C).

В заключение можно сказать, что этот тип усилителя может быть использован в качестве маломощного усилителя аудио и видеочастоты для бытовой техники..

Усилитель в соединении с общей базой (BC).

Схема каскада усиления с биполярным транзистором, расположенного в соединении BC.



Элементы имеют следующие значения :

R_{B1} , R_{B2} – делитель напряжения для поляризации с ролью в создании потенциала, необходимого для работы транзистора в нормальной активной области;

R_E – сопротивление в эмиттере с ролью термостабилизации;

C_1, C_2 – конденсаторы связи, которые разделяют пол по постоянному току, блокируя компонент постоянного тока, но пропускают компонент переменного тока;

C_B – отключающий конденсатор, который действует как основание для заземления переменного тока;

R_C – сопротивление нагрузки;

U_{in} – амплитуда входного сигнала напряжения;

U_o – амплитуда выходного сигнала напряжения.

Таким образом определяется усиление напряжения этого усилителя:

$$A_U = g_m \cdot R_C$$

где g_m представляет собой наклон транзистора.

Замечания :

- усиление напряжения высокое;
- каскад не уменьшает размер вывода по сравнению с размером ввода;
- входной импеданс имеет низкое значение (десятки Ом), поэтому его можно использовать как идеальный усилитель тока;
- выходной импеданс имеет среднее значение (примерно равно R_C).

В заключение, этот тип усилителя можно использовать как усилитель высокой частоты с заданной нагрузкой.

Усилитель в соединении общего коллектора (СС).

Схема каскада усиления с биполярным транзистором, расположенного в цепи СС.

Элементы имеют следующие значения :

R_{B1} , R_{B2} – делитель напряжения для поляризации с ролью в создании потенциала, необходимого для работы транзистора в нормальной активной области;

R_E – сопротивление нагрузки;

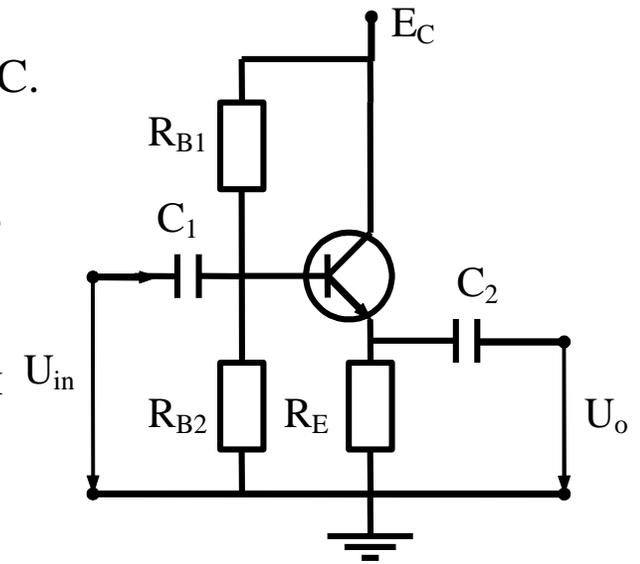
C_1, C_2 – конденсаторы связи, которые разделяют пол по постоянному току, блокируя компонент постоянного тока, но пропускают компонент переменного тока;

U_{in} – амплитуда входного сигнала напряжения;

U_o – амплитуда выходного сигнала напряжения.

Таким образом определяется усиление напряжения этого усилителя. :

$$A_U \cong 1$$



Замечания :

- усиление напряжения унитарное;
- усиление тока высокое;
- пол не уменьшает размер вывода по сравнению с размером ввода;
- входной импеданс имеет очень высокое значение (R_E умноженное на коэффициент усиления);
- выходной импеданс имеет значение (эквивалентное сопротивление в базе, деленное на коэффициент усиления).

В заключение, этот тип усилителя используется в качестве буферного каскада, адаптера импеданса (*репитер на эмиттере*).

➤ **Реакция** - метод, с помощью которого на поведение и свойства системы влияет и усиливается выходной сигнал системы.

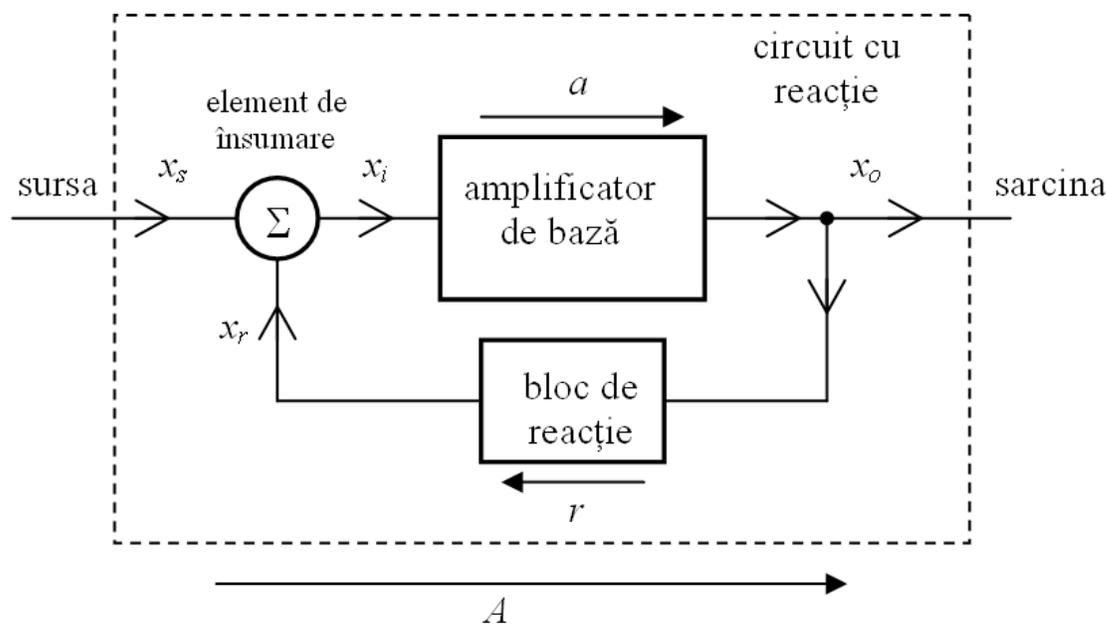
➤ следствие, вызванное причиной, влияет на последующее действие этой причины

➤ передача обратно к входу количества, пропорционального выходному количеству

Реакция бывает двух типов :

- отрицательная (дегенеративная) реакция ОР. Размер, возвращаемый из вывода, ослабляет влияние размера ввода; стабилизирующий эффект

- положительная (восстановительная) реакция ПР. Размер, возвращаемый из вывода, усиливает влияние размера ввода; дестабилизирующий эффект



x_s – исходный сигнал, подаваемый от внешнего источника сигнала;

x_o – выходной сигнал, обеспечиваемый цепью обратной связи;

x_r – сигнал реакции, обеспечиваемый реакционным блоком;

x_i – входной сигнал базового усилителя,

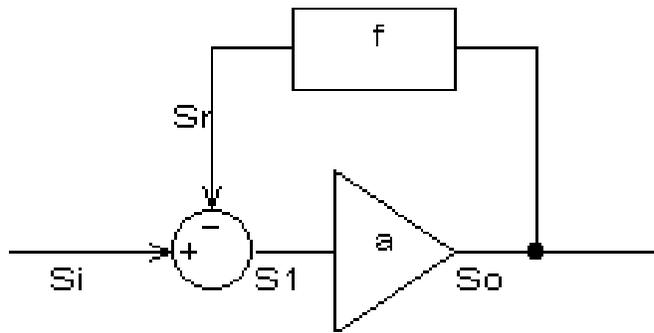
x_s – напряжение или ток;

x_o – напряжение или ток;

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ

Изученные до сих пор усилители работали приблизительно линейно только в условиях слабого сигнала. Их полоса пропускания также была ограничена несколькими сотнями кГц. Другими словами, он имеет **нелинейные** и **линейные** искажения.

Применяя реакцию с выхода на вход усилителя, так что часть выходного сигнала вычитается из входного сигнала, достигается **улучшение линейности передаточной характеристики** и **расширение полосы частот**, платой за это является **уменьшение усиления** схемы. Показана блок-схема усилителя обратной связи, где ***a*** - усиление непрореагировавшего усилителя, а ***f*** - затухание реакционной цепи.



Усилитель с реакцией

$$S_o = a \times S_1$$

$$S_1 = S_i - S_r$$

$$S_r = f \times S_o$$

так что:

$$S_o = a \times S_i - a \times f \times S_o$$

$$S_o(1 + af) = a S_i$$

если мы обратим внимание на усиление усилителя с реакцией с **A**, получим : $A = \frac{a}{1 + af}$

– Если $A > a$ реакция называется *положительной*

– Если $A < a$ реакция называется *отрицательной*

Определим петлевую передачу как: $T = af$ представляет собой коэффициент, на который s_1 усиливается до значения s_r

Коэффициент реакции определяется как : $F = 1 + T$

Если $T \gg 1$ мы находимся в случае **сильной негативной реакции** и из предыдущих отношений получаем :

$$A \cong \frac{1}{f}$$

Предыдущее соотношение предполагает, что **усиление усилителя с обратной связью больше не зависит практически от параметров электронных устройств, а только от затухания реакционной сети**, состоящей из резисторов, поведение которых линейно и значение которых может быть известно с большой точностью.

Однако до того, как описанная взаимосвязь станет действительной, петлевая передача должна быть в значительной степени сверхунитарной, а поскольку f является субунитарной, усиление без обратной связи фактически должно быть очень большим. Или размер зависит в первую очередь от параметров активных устройств в цепи и частоты. Таким образом, хотя это не является результатом описанного отношения, **A** остается зависимым от параметров электронных устройств и частоты, но в гораздо меньшей степени, чем **a**. Фактически, из предыдущих соотношений следует, что **A** в **F** раз меньше, чем **a**, и, следовательно, в **F** раз менее чувствительно к изменению параметров устройств, из которых построен усилитель. Вот почему **F** еще называют **фактором десенсбилизации**.

ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ..

Неискаженный входной сигнал s_1 поступает на вход базового усилителя. На его выходе сигнал s_0 будет подвержен искажениям нелинейности.

Часть s_r этого сигнала повторно передается через сеть обратной связи по входу, где она уменьшается от s_1 . Поэтому сигнал s_1 на входе базового усилителя будет предварительно искажен. Эти предискажения находятся в фазе с искажениями, вносимыми усилителем, поэтому в целом **нелинейные искажения уменьшаются за счет применения отрицательной реакции.**

Другой способ объяснить явление уменьшения нелинейных искажений заключается в следующем:

- *Нелинейные искажения связаны с тем, что усиление a зависит от амплитуды входного сигнала.*
- *Если a велико, эффект отрицательной реакции сильный и имеет тенденцию значительно снижать усиление.*
- *Если a мало, эффект реакции слабый, и усиление будет немного уменьшено реакцией.*
- *Таким образом, в результате реакции A имеет тенденцию оставаться постоянным, даже если он изменяется.*

Следовательно, A гораздо меньше зависит от амплитуды входного сигнала, чем a . Это можно показать, выведя соотношение $A = \frac{a}{1 + af}$ что: $\frac{dA}{A} = \frac{1}{F} \times \frac{da}{a}$

- *Следовательно, линейность цепи обратной связи лучше, чем у базового усилителя в F раз.*

ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ НА ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ..

Линейные искажения связаны с тем, что усиление базового усилителя зависит от частоты входного сигнала. Сигнал любой формы можно рассматривать как сумму синусоидальных сигналов разных амплитуд и частот. Поскольку сигналы с частотой вне полосы усилителя основной полосы частот будут менее усилены, чем сигналы внутри полосы, форма выходного сигнала будет отличаться от формы входного сигнала. Таким образом, эти нелинейные искажения можно уменьшить, расширив полосу пропускания усилителя..

Отрицательная реакция имеет такой эффект.

- В полосе базового усилителя a велико, и эффект реакции сильный.
- Вне полосы a уменьшается и эффект реакции слабее.

Следствием этого является то, что A в F раз меньше зависит от частоты, чем a .

С хорошим приближением можно считать, что произведение полосного усиления является постоянным :

$$a \times B_a = A \times B_A$$

следовательно :

$$B_A = F \times B_a$$

Поскольку линейные искажения зависят исключительно от диапазона, они будут в F раз меньше в случае усилителей с обратной связью..

Преимущества применения отрицательной реакции

- стабилизирует коэффициент усиления за счет изменения параметров активной и пассивной составляющих структуры базового усилителя АВ, источников питания, а также параметров окружающей среды;
- уменьшает искажения;
- расширяет рабочую полосу частот;
- удобно изменяет входное и выходное сопротивление в соответствии с топологией усилителя обратной связи;
- снижает уровень шума.

Недостатки

- Уменьшает общее усиление $1+T$ раз;
- Возможность автоколебания. Чтобы избежать этого, для любой частоты, для которой существует усиление сверхблока, сигнал, передаваемый с выхода на вход сетью RR, должен быть в фазе (уменьшаться) с сигналом от генератора..