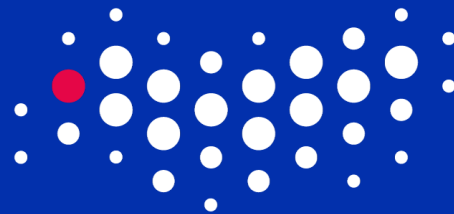


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург, 2021



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Электронные усилители.  
Обратные связи  
в усилителях.



## Темы, освещенные в презентации

- ✓ Определение обратной связи
- ✓ Классификация обратных связей

## Определение обратной связи

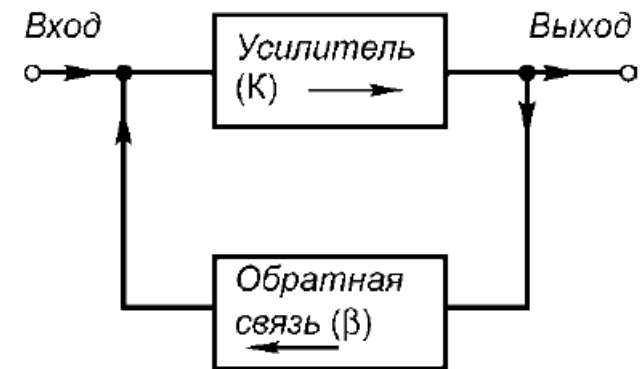
**Обратной связью (ОС)** называют передачу усиливаемого сигнала из выходной цепи усилителя во входную цепь.

На рисунке показана структурная схема усилителя с обратной связью. Цепь обратной связи характеризуется **коэффициентом передачи**, или **коэффициентом обратной связи**, показывающим, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя.

Обратная связь может быть внутренней, паразитной и искусственной. Внутренняя и паразитная обратные связи являются нежелательными, и их пытаются устранить.

Искусственную ОС применяют с целью:

- 1) увеличить стабильность коэффициента усиления;
- 2) расширить диапазон усиливаемых частот;
- 3) уменьшить искажение, создаваемое усилителем;
- 4) управлять входным и выходным сопротивлением в нужном направлении.





# Уравнение обратной связи

$$V_0 = A \cdot V_e$$

$$V_e = V_S - V_f \text{ (где “-” для ООС и “+” для ПОС)}$$

$$V_f = B \cdot V_0$$

Для сигнала ООС имеем  $V_e = V_S - B \cdot V_0$

Для выходного сигнала имеем  $V_0 = A(V_S - B \cdot V_0)$

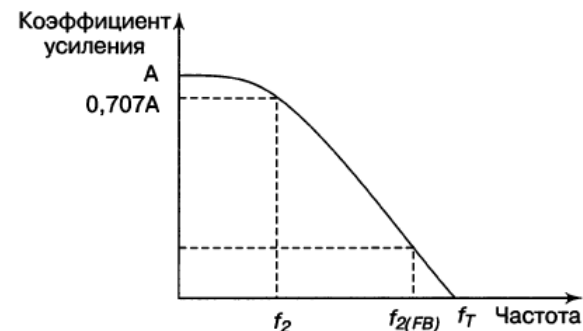
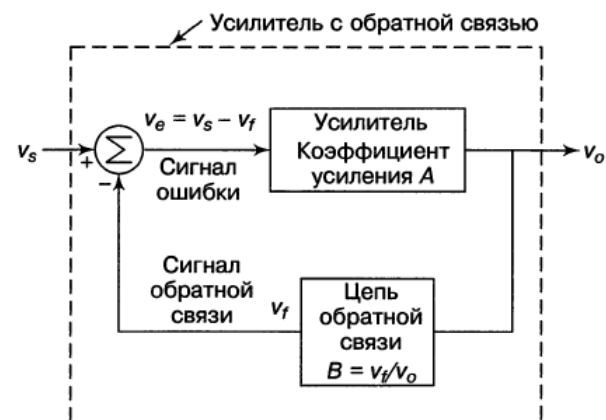
Таким образом коэффициент передачи усилителя с ООС

$$A_{FB} = \frac{V_0}{V_S} = \frac{A}{1 + A \cdot B}$$

Коэффициент усиления усилителя с обратной связью можно сделать нечувствительным к изменению коэффициента усиления усилителя без ОС.

$$\text{Если } A \cdot B \gg 1, \text{ тогда } A_{FB} = \frac{V_0}{V_S} = \frac{A}{1 + A \cdot B} \approx \frac{A}{A \cdot B} \approx \frac{1}{B}$$

$f_T$ - частота, при которой коэффициент усиления снижается до единицы.





# Снижение нелинейных искажений

Транзистор имеет нелинейные характеристики, что может вызвать нелинейные искажения формы сигнала.

Влияние нелинейностей в усилителе с ООС менее сильное по сравнению с усилителем без обратной связи.

Искажения  $D$  в усилителе без ОС определяются как

$$D = \frac{\Delta A}{A},$$

Где  $\Delta A$  – изменение коэффициента усиления;  $A$  – коэффициент усиления.

Примем  $\frac{\Delta A}{A} = \frac{dA}{A}$ , тогда  $D = \frac{dA}{A}$ .

Аналогично для усилителя с ООС запишем

$$D_{(FB)} = \frac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}}.$$

Продифференцируем коэффициент передачи  $A_{FB} = \frac{V_0}{V_S} = \frac{A}{1+A \cdot B}$  по  $A$

$$dA_{FB} = \frac{[(1 + BA)dA - BA dA]}{(1 + BA)^2},$$

$$dA_{FB} = \frac{dA}{(1 + BA)^2}$$

# Снижение нелинейных искажений

Перейдем к обычной форме записи  $D_{(FB)} = \frac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}}$

$$D_{(FB)} = \frac{dA_{(FB)}}{A_{(FB)}} = \left[ \frac{dA}{(1 + BA)^2} \right] \left[ \frac{1 + A \cdot B}{A} \right] = \frac{dA}{A} \left( \frac{1}{1 + BA} \right)$$

Откуда

$$D_{(FB)} = \frac{D}{1 + BA}.$$

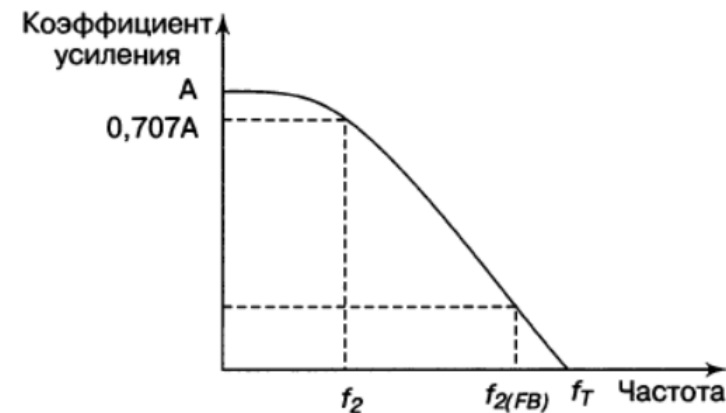
Последнее уравнение показывает, что искажения в усилителе с ООС снижаются в  $(1 + BA)$  раз по сравнению с усилителем без ОС.

# Расширение полосы пропускания

ООС препятствует всяким изменениям, в том числе и уменьшению коэффициента усиления вблизи граничной частоты (частоты среза). В результате ООС расширяет полосу пропускания.

Нижняя граничная частота  $f_{1(FB)} = \frac{f_1}{(1+B \cdot A)}$ ,  
 верхняя граничная частота  $f_{2(FB)} = (1 + B \cdot A)f_2$ .

У большинства усилителей  $f_{2(FB)} \gg f_{1(FB)}$ ,  
 следовательно полоса пропускания  $FB \approx f_{2(FB)}$ .

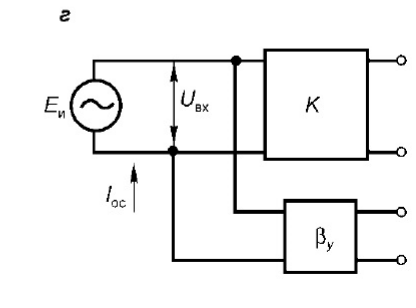
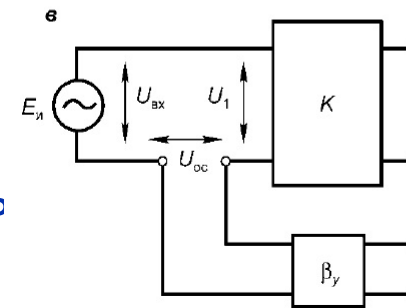
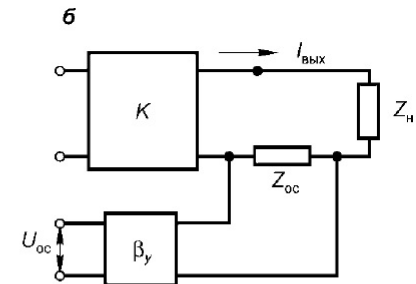
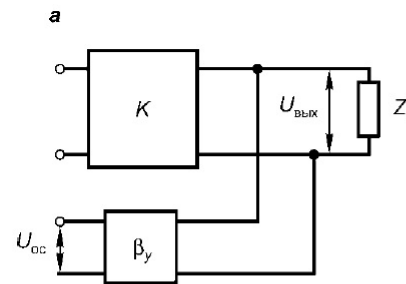


Изменение граничных частот усилителя с ООС означает увеличение полосы пропускания.



# Классификация обратных связей

В зависимости от того, каким образом цепь ОС присоединена к выходу и входу усилителя, различают следующие виды ОС: **ОС по напряжению** – где цепь ОС соединяют с выходом схемы параллельно нагрузке так, что напряжение ОС пропорционально напряжению на нагрузке усилителя (рисунок а); **ОС по току** – цепь ОС соединяют с выходом схемы последовательно с нагрузкой так, что напряжение ОС пропорционально току в нагрузке (рисунок б); **обратную связь последовательную** – цепь ОС подключают со стороны входа, где она соединена последовательно с источником сигнала (рисунок в), **обратную связь параллельную** – цепь ОС со стороны входа соединена параллельно с источником сигнала (рисунок г).



# Последовательная ОС по напряжению

Напряжение обратной связи связано с выходным соотношением

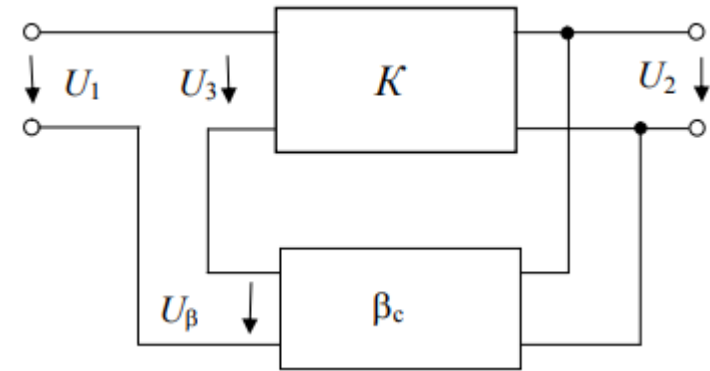
$$U_{\beta} = \beta_c U_2$$

Выходное напряжение связано с входным напряжением блока К соотношением

$$U_2 = K U_3 = K(U_1 + U_{\beta}) = K(U_1 + \beta_c U_2)$$

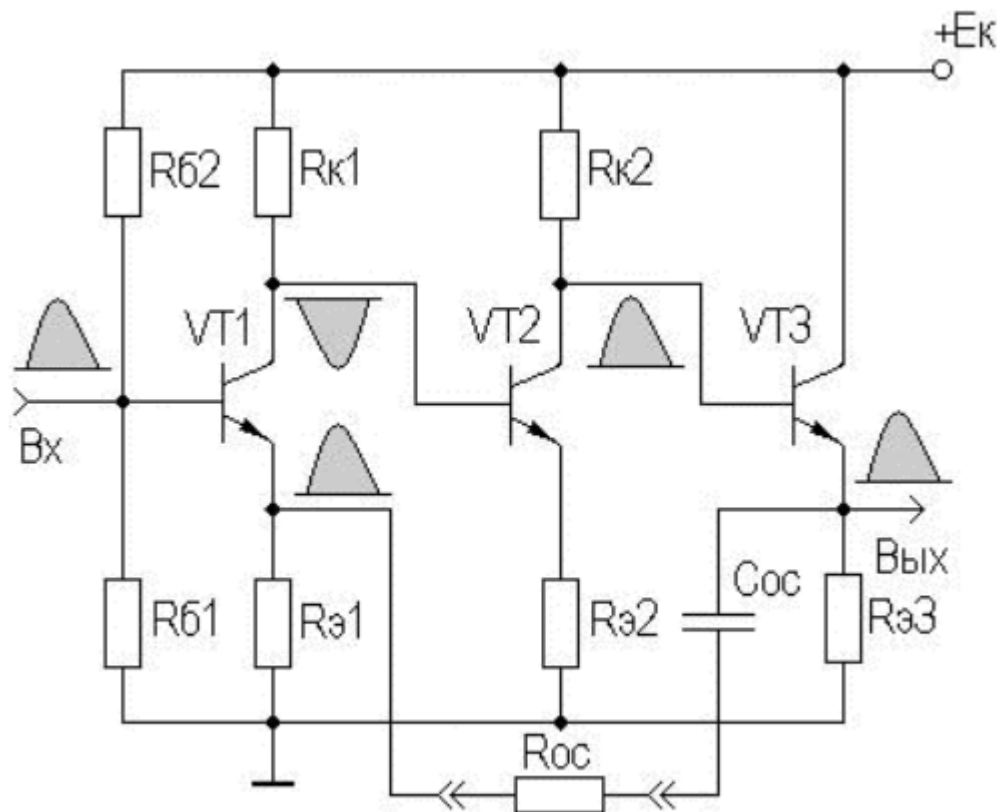
Т.о. коэффициент усиления усилителя с ОС равен

$$K_{\beta} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K}{1 - \beta_c K}$$



В зависимости от значения коэффициента обратной связи, ОС может быть положительная и отрицательная. Для вещественной положительной ОС для расчета коэффициента усиления применяется выражение со знаком «-» в знаменателе. Если вещественная ОС отрицательная и блок ОС подает сигнал  $U_3$  на вход усилителя в противофазе со входным напряжением  $U_1$  знак в знаменателе меняется на «+». Из выражения видно, что при отрицательной ОС коэффициент усиления усилителя уменьшается, а при положительной – увеличивается.

# Последовательная ООС по напряжению

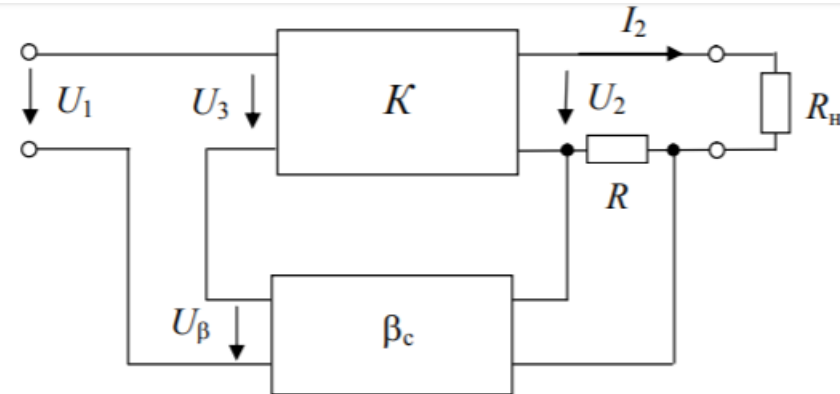


## Последовательная ОС по току

В данной схеме сигнал ОС снимается с сопротивления  $R$  и пропорционален току, протекающему через нагрузку  $I_2 = U_2 / (R + R_H)$

Напряжение обратной связи определяется как

$$U_\beta = \beta_c \frac{U_2 R}{R + R_H}$$



Поэтому выходное напряжение может быть определено как

$$U_2 = \left( U_1 + \beta_c \frac{U_2 R}{R + R_H} \right) K$$

из последнего выражения можно выразить коэффициент усиления усилителя

$$K_\beta = \frac{K}{1 - \beta_c K \frac{R}{R + R_H}}$$

В данном случае полезный сигнал распределяется между сопротивлениями  $R$  и  $R_H$ , причем на  $R_H$  выделяется полезный сигнал, а на  $R$  сигнал, пропорциональный выходному току, дающий напряжение для цепи обратной связи.

## Параллельная обратная связь по напряжению

В этой схеме будем выяснять влияние цепи обратной связи на коэффициент усиления по току, поскольку на входе УУ происходит суммирование входного тока  $I_1$  и тока  $I_\beta$  с выхода цепи обратной и связи.

Выходное напряжение можно найти как

$$U_2 = I_2 R_H$$

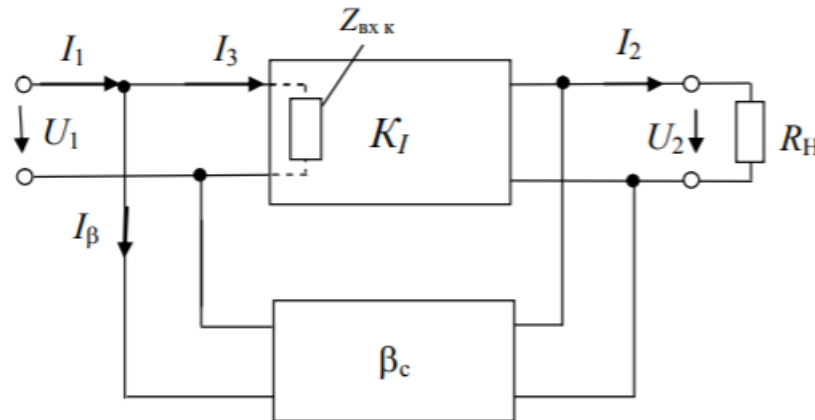
Выходной ток связан с токами на входе усилителя выражением  $I_2 = (I_1 + I_\beta) K_I$ .

С учетом последнего уравнения и допущения равенства нулю проводимости цепи обратной связи, можно записать

$$\frac{U_2}{R_H} = \left( \frac{U_1}{Z_{BX.K}} + \frac{\beta_c U_2}{Z_{BX.K}} \right) K_I$$

После математических преобразований получаем выражение для коэффициента усиления по току усилителя с ОС

$$K_{I\beta} = \frac{K_I}{1 - \beta_c K_I \frac{R_H}{Z_{BX.K}}}$$



## Параллельная ОС по току

Удобно рассматривать влияние цепи ОС на коэффициент усиления по току  $K_I$ .

Напряжение ОС, снимаемое с некоторого добавочного сопротивления  $R$ , равно

$$RI_2 = RU_2 / (R + R_H)$$

оно пропорционально выходному току

$$I_2 = U_2 / (R + R_H)$$

С учетом того, что

$$I_2 = (I_1 + I_\beta)K_I$$

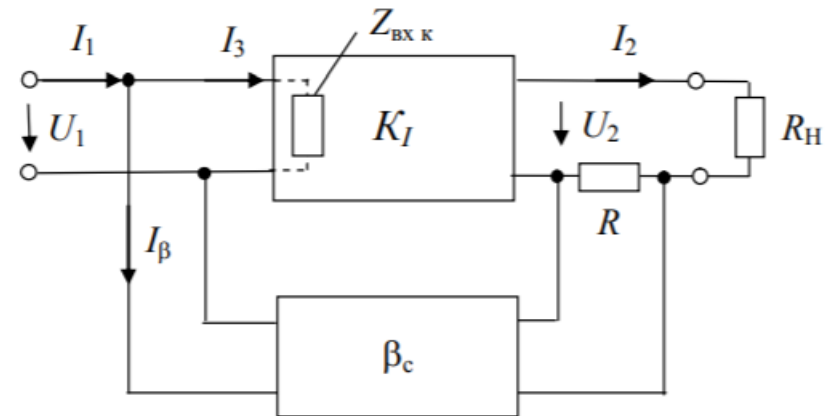
и допущения равенства нулю проводимости цепи обратной связи, можно записать

$$\frac{U_2}{R + R_H} = \left( \frac{U_1}{Z_{BX.K}} + \frac{R}{R + R_H} \frac{\beta_c U_2}{Z_{BX.K}} \right) K_I$$

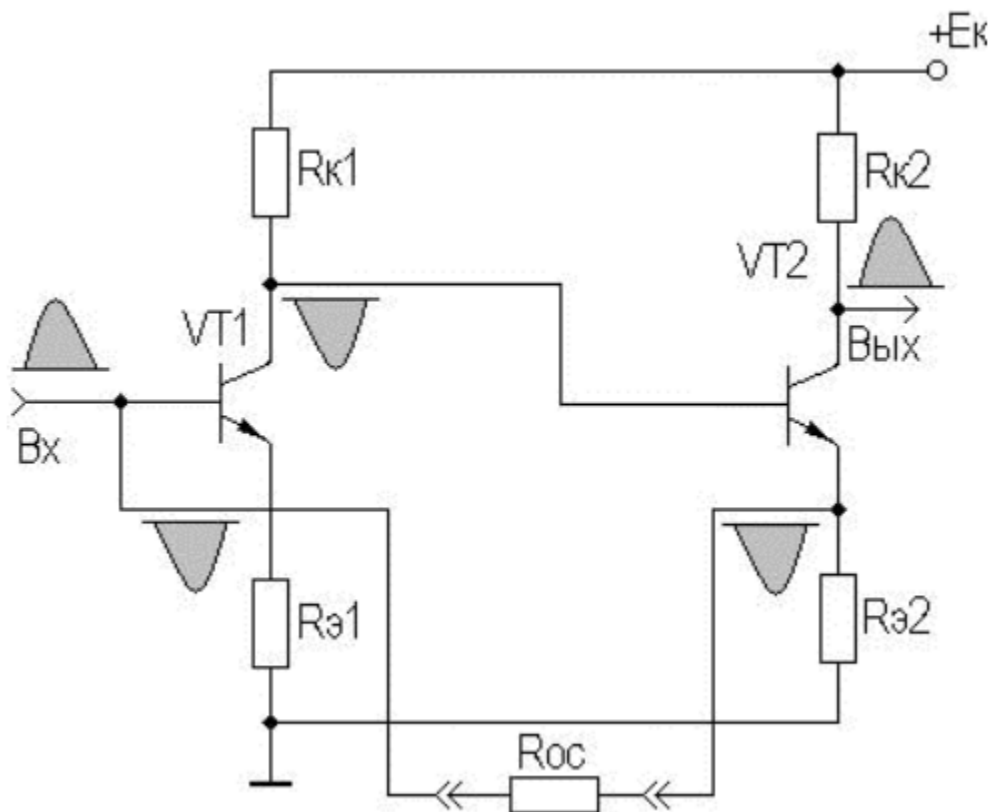
Или после преобразований

$$K_{I\beta} = \frac{K_I}{1 - \beta_c K_I \frac{R}{Z_{BX.K}}}$$

Следует помнить, что для отрицательной ОС необходимо изменить знак в знаменателе этих выражений с «−» на «+».



## Параллельная ООС по току

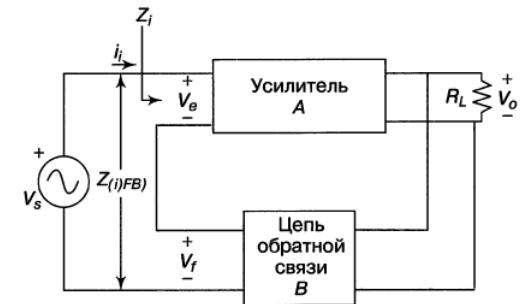


# Входной импеданс усилителя с ООС

Введение ООС в усилитель изменяет входной и выходной импедансы. В зависимости от того, какая применяется ОС, импедансы увеличиваются или уменьшаются в  $(1 + B \cdot A)$  раз.

Рассмотрим последовательную ОС напряжению.

$Z_i$  - входной импеданс без ОС,  $Z_{i(FB)}$  - входной импеданс с ООС.



$$Z_i = \frac{V_e}{i_i}; Z_{i(FB)} = \frac{V_S}{i_i}$$

$$V_e = V_S - B \cdot V_o \text{ или } V_S = V_e + B \cdot V_o = V_e + A \cdot B \cdot V_e, \text{ т.о. } V_S = (1 + A \cdot B) \cdot V_e$$

Поделив обе части последнего на  $i_i$  имеем

$$V_S / i_i = (1 + A \cdot B) \cdot V_e / i_i$$

Таким образом получаем соотношения для соответствия входных импедансов

$$Z_{i(FB)} = (1 + A \cdot B) Z_i$$

Т.о. входной импеданс усилителя с последовательной ОС по напряжению увеличился в  $(1 + A \cdot B)$  раз. Последовательная ОС всегда увеличивает соответствующий импеданс (входной или выходной) в  $(1 + A \cdot B)$  раз.





# Выходной импеданс усилителя с ООС

$Z_0$  - выходной импеданс без ОС,  $Z_{0(FB)}$  - выходной импеданс с ООС.

Пусть к выходу усилителя подключено тестовое напряжение  $V_X$ .

Тогда  $Z_{0(FB)} = \frac{V_X}{i_X}$ .

Для анализа предполагается, что отключена нагрузка от выхода усилителя и закорочен входной источник.

$$V_e = V_S - V_f = -V_f$$

Или  $V_e = -B \cdot V_X$ .

Схема усилителя может быть заменена на эквивалентную схему выходного порта для расчета  $Z_{0(FB)}$ .

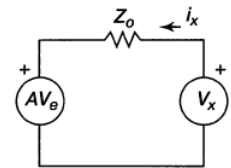
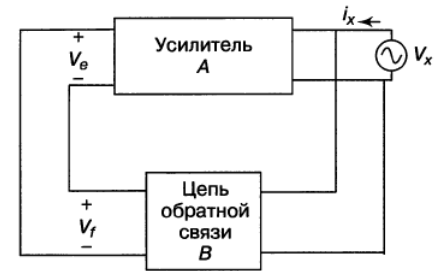
$$i_X = \frac{(V_X - A \cdot V_e)}{Z_0}$$

$$\text{или } i_X = \frac{(V_X - A \cdot (-B \cdot V_X))}{Z_0} = \frac{(1 + B \cdot A) V_X}{Z_0}.$$

Тогда для выходного импеданса имеем

$$Z_{0(FB)} = \frac{V_X}{i_X} = \frac{Z_0}{(1 + B \cdot A)}$$

Последовательная ООС увеличивает импеданс, параллельная – уменьшает импеданс.



## ООС и ПОС

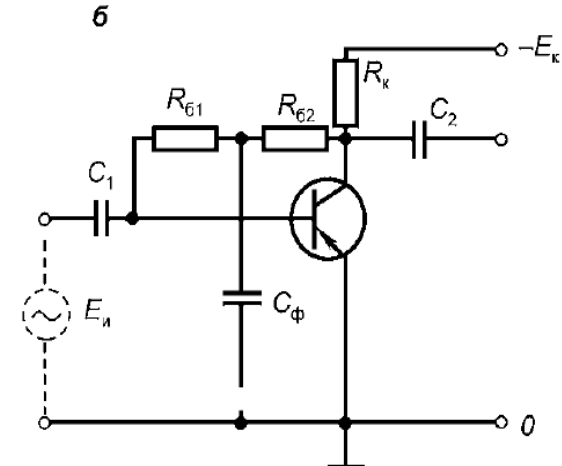
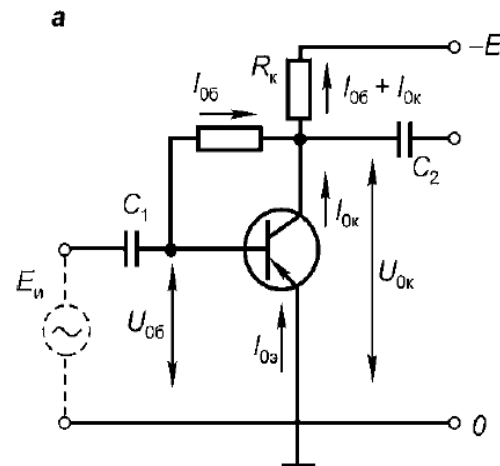
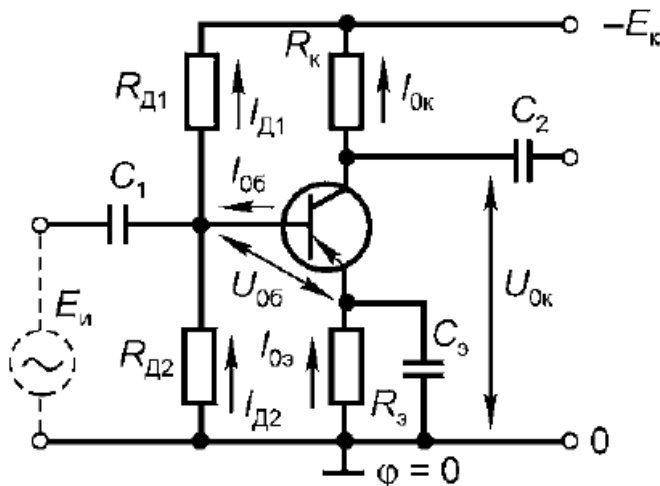
- Отрицательная ОС (ООС) снижает коэффициент усиления в  $1 + \beta_y K$  раз. Значение  $\beta_y K$  характеризует усиление цепи ОС, а значение  $1 + \beta_y K$  называют **глубиной ООС**. Введение ООС повышает стабильность коэффициента усиления усилителя при изменении режима усилительного элемента, частоты, амплитуды сигнала и т.д. ООС позволяет расширить полосу пропускания сигнала, снижает уровень нелинейных искажений, фон и шумы, возникающие внутри усилителя.
- Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления в  $1 - \beta_y K$  раз. Это значение называют **глубиной ПОС**.

# Стабилизация положения рабочей точки усилителя

Основные свойства усилительного каскада, определяющие КПД, нелинейные искажения, мощность сигнала на нагрузке определяются положением начальной рабочей точки. Поэтому изменение положения рабочей точки должно находиться в заданных пределах.

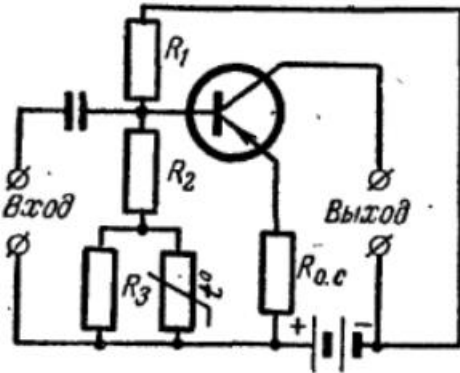
Начальный ток коллектора удваивается при повышении температуры на 8 градусов, т.е. при изменении температуры от 0 до 40 градусов начальный ток коллектора увеличивается в 32 раза.

Различают эмиттерную и коллекторную стабилизации. Эмиттерную стабилизацию осуществляют введением в схему последовательной ООС по постоянному току (левый рисунок). Коллекторная стабилизация работы транзистора показана на рисунке: а) – резисторная ОС; б) – конденсаторная ОС.



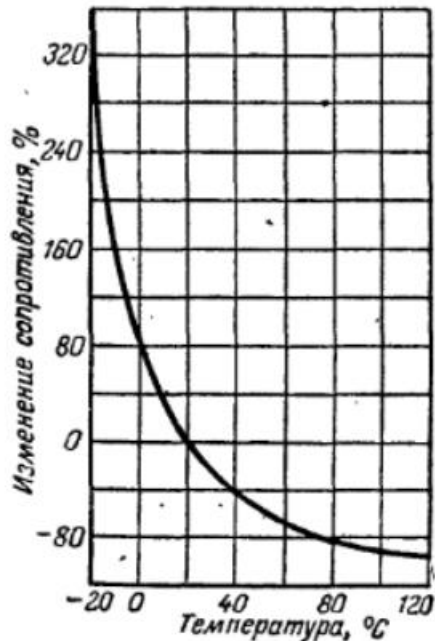


## Стабилизация с использование нелинейных свойств полупроводниковых материалов

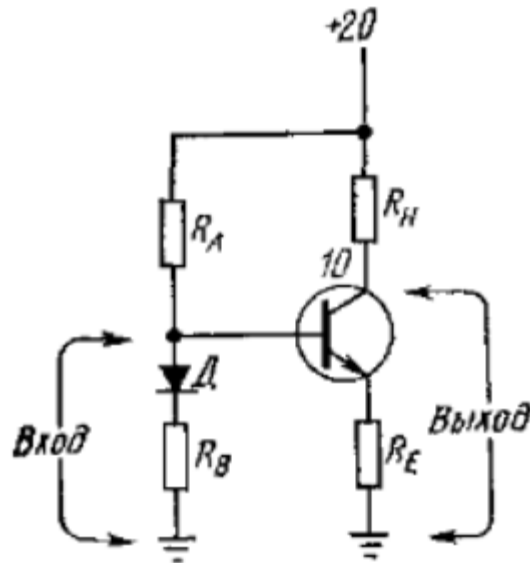


При повышении температуры сопротивление полупроводника уменьшается.

При увеличении температуры уменьшается сопротивление термистора, как следствие уменьшается потенциал базы и, следовательно, уменьшается ток базы и коллектора.



# Стабилизация с использование нелинейных свойств полупроводниковых материалов



Диод, устанавливается в прямом направлении, используется диод, изготовленный из того же материала, что и транзистор.

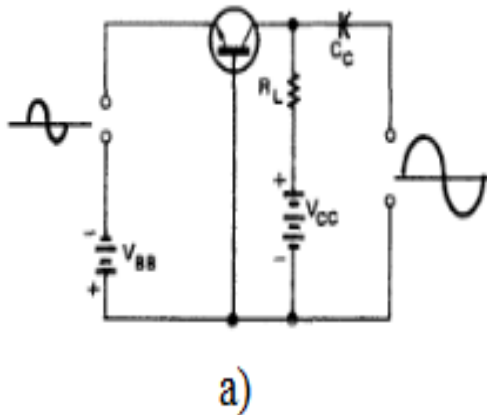
Таким образом падение напряжения на диоде и переходе база-эмиттер являются одинаковыми при вариациях температуры.

## Особенности схем включения транзисторов в усилительном каскаде

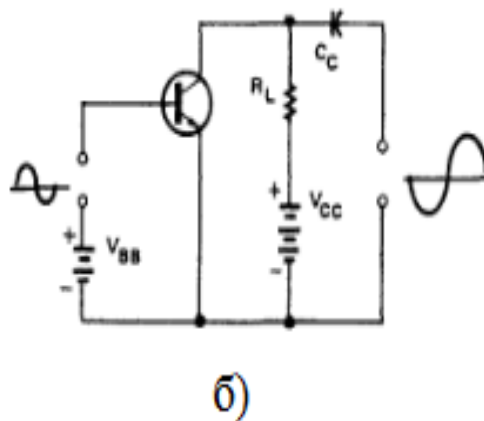
В схеме с общей базой (рисунок а) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной наблюдается в цепи коллектор-база. База является общим элементом для входа и выхода.

В схеме с общим эмиттером (рисунок б) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной сигнал снимается с нагрузки в цепи коллектор-эмиттер. Этот способ включения используется наиболее широко.

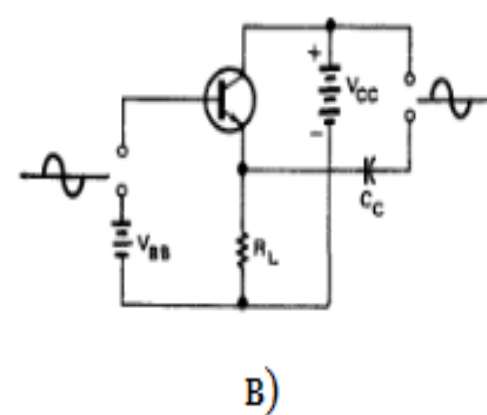
Третий тип соединения (рисунок в) – схема с общим коллектором. В этой схеме входной сигнал подается в цепь база-коллектор, а выходной снимается в цепи эмиттер-коллектор. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Эта схема используется для согласования импедансов.



а)



б)









в)

## Сравнительные характеристики усилителей

Тип цепи	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
Общая база	Низкое	Высокое	Высокое	Меньше 1	Среднее
Общий эмиттер	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
Общий коллектор	Высокое	Низкое	Меньше 1	Среднее	Среднее

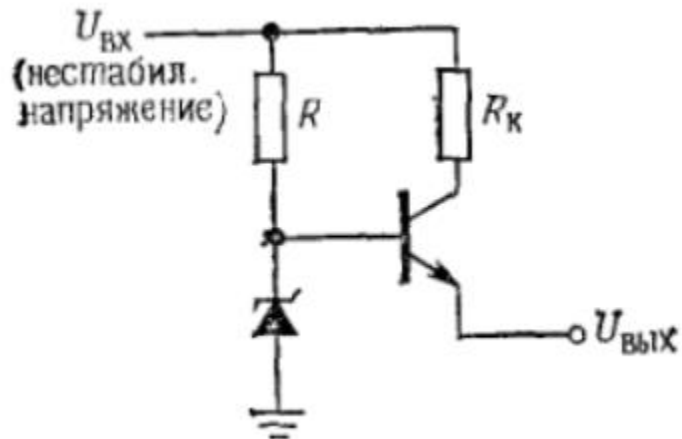
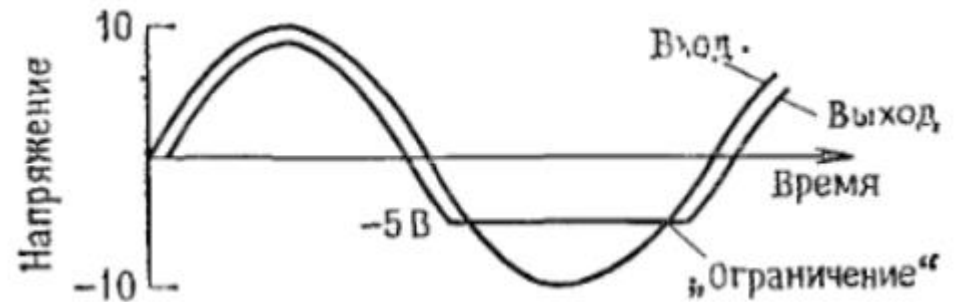
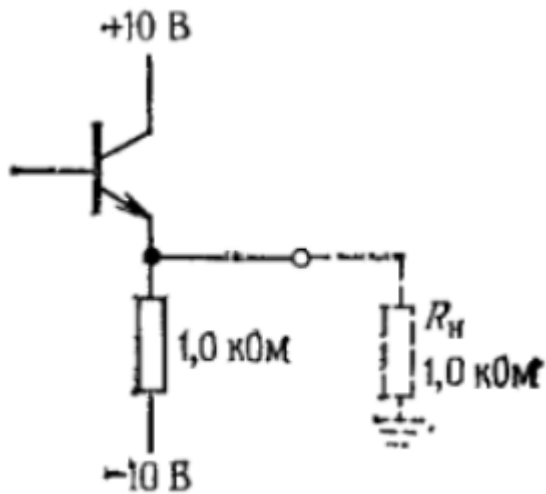
В данной таблице приведены входные и выходные сопротивления, а также величины усиления по току, напряжению и мощности для трех схем включения.

Тип усилителя	Форма входного сигнала	Форма выходного сигнала
Общая база		
Общий эмиттер		
Общий коллектор		

Фазовые соотношения входного и выходного сигналов для трех схем включения приведены в данной таблице.

Заметим, что схема с общим эмиттером обеспечивает изменение фазы выходного сигнала по отношению к входному на  $180^\circ$ .

## Простейшие примеры



Стабилизатор напряжения



## Контрольные вопросы

1. Что такое схема без обратной связи?
2. Что такое положительная обратная связь?
3. Как влияет положительная ОС на усилитель?
4. Что такое отрицательная обратная связь?
5. Отрицательная ОС стабилизирует коэффициент усиления усилителя. Что это значит?
6. Назовите вид ООС
7. Какие параметры усилителя меняет ООС? За счет чего?
8. Во сколько раз меняются параметры усилителя с отрицательной обратной связью?
9. При последовательной ОС по напряжению, входной импеданс выше или ниже, чем у усилителей без ОС?
10. При последовательной ОС по напряжению, выходной импеданс выше или ниже, чем у усилителей без ОС?
11. ООС расширяет полосу пропускания усилителя. Объясните, почему?

## Список использованных источников

1. Дьюб Динеш С. Электроника: схемы и анализ. М.: Техносфера, 2008. – 432 с.
2. Красько А.С. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2005. 178 с.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**