

Слайд-лекция на тему:  
***«Усилители»***

## *План лекции:*

- 1. Общие сведения;*
- 2. Классификация усилителей;*
- 3. Основные характеристики и параметры усилителей;*
- 4. Обратная связь в усилителях;*
- 5. Усилители постоянного тока;*
- 6. Усилители переменного тока.*

## Общие сведения

Одним из основных узлов АЭП являются усилители, которые во многом определяют погрешность, быстродействие, помехозащищенность, надежность и другие характеристики прибора.

Измерительные усилители служат для изменения (как правило) масштаба измеряемой величины; для согласования входа прибора с объектом измерения, а также отдельных узлов прибора между собой.

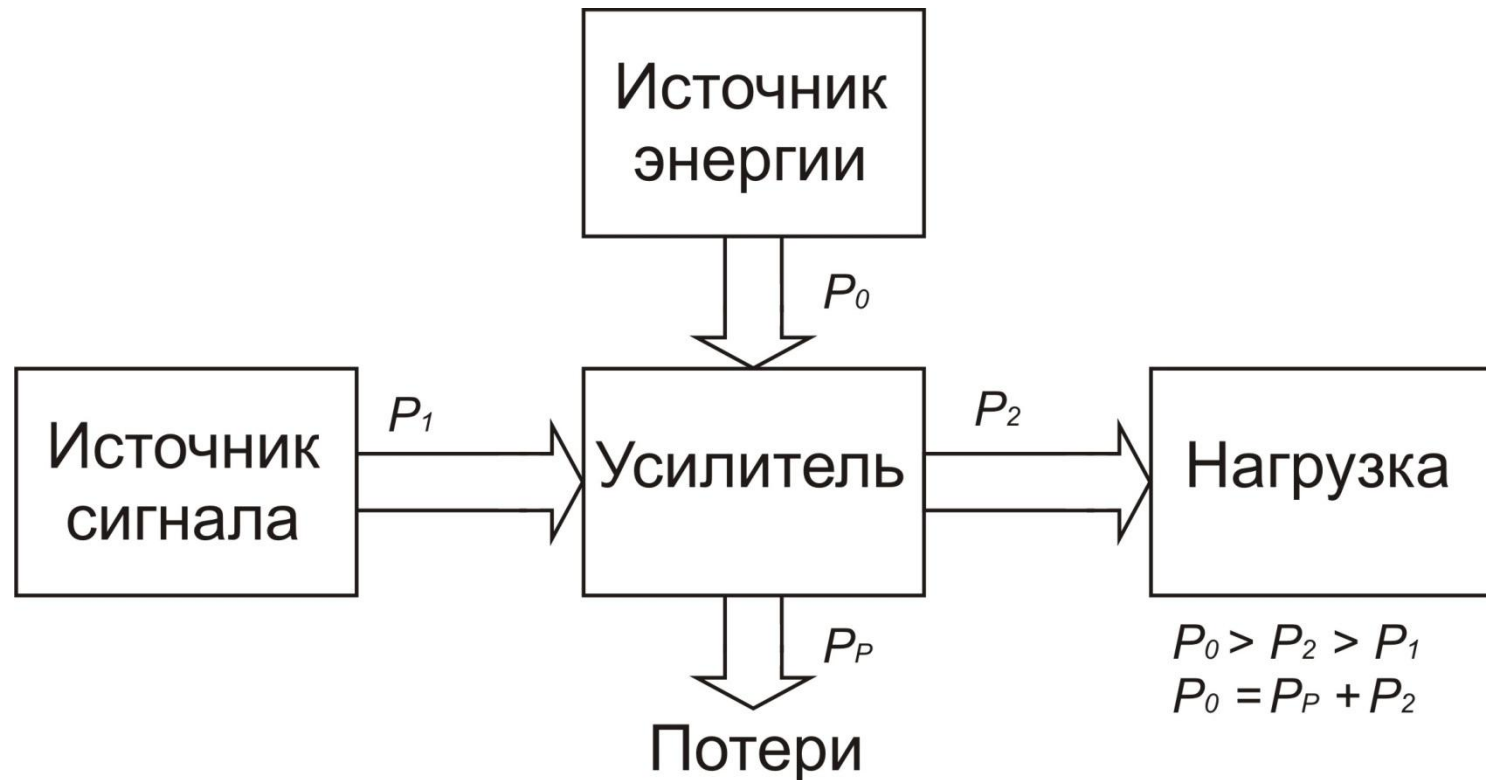
Измерительные усилители могут иметь коэффициент усиления от значения порядка единицы до значений  $10^6$  –  $10^7$  и более.

Измерительные усилители преобразуют сигналы измерительной информации и должны иметь высокую стабильность коэффициента усиления в заданном частотном диапазоне и малый дрейф нуля.

В АИП усилители используются также для обнаружения и усиления малых сигналов, например в автоматических мостах и потенциометрах. К подобным усилителям не предъявляется жестких требований к стабильности коэффициента усиления.

В аналоговых измерительных приборах применяются электромеханические (гальванометрические) и электронные усилители.

**Усилители электрических сигналов** - это электронные устройства, предназначенные для усиления напряжения, тока или мощности входных электрических сигналов за счет энергии источника питания.



*Передача сигнала с помощью усилителя*

# Классификация усилителей

— По роду усиливаемого сигнала усилители делятся на усилители постоянного тока (УПТ), усиливающие электрические сигналы с частотой от нуля герц и выше и усилители переменного тока, усиливающие переменные сигналы с частотой, отличной от нуля.

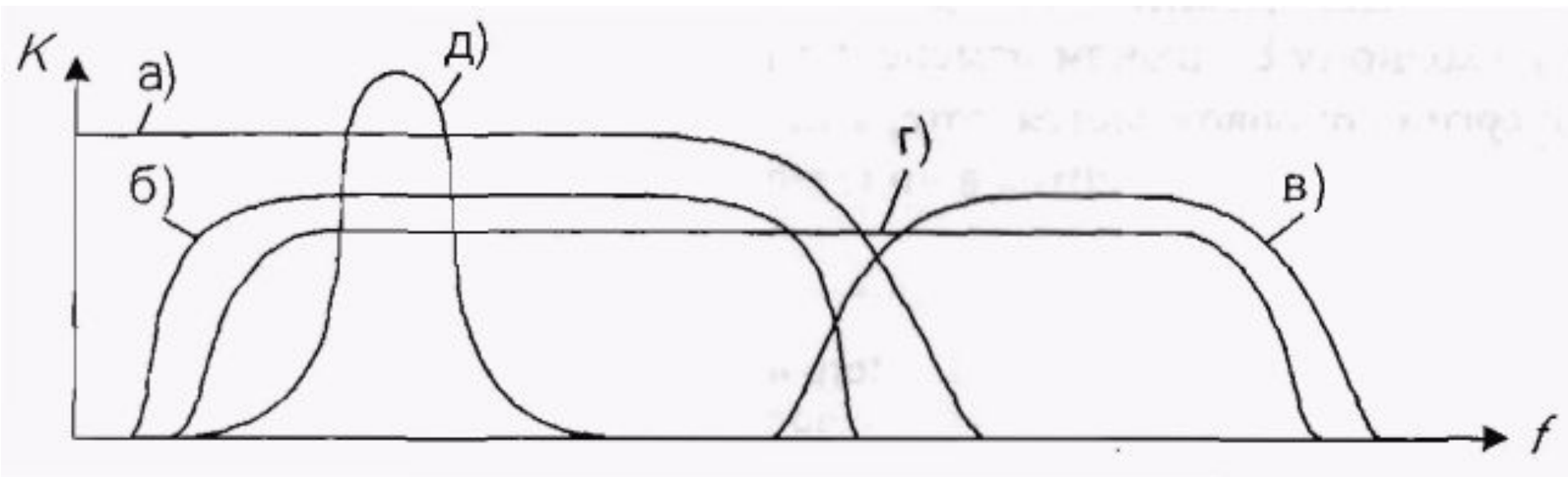
— По частоте усиливаемого сигнала могут быть выделены следующие группы:

— усилители низкой частоты (УНЧ) — устройства с диапазоном усиливаемых частот от единиц герц до сотен килогерц;

— усилители высоких частот (УВЧ) — устройства с диапазоном усиливаемых частот от сотен килогерц до сотен мегагерц и выше;

— широкополосные усилители (ШПУ) —  
устройства с диапазоном усиливаемых частот  
от десятков - сотен герц до сотен мегагерц;

— избирательные (резонансные) усилители  
(ИУ), обеспечивающие усиление в узком  
диапазоне частот.



Амплитудные частотные характеристики:  
а) УПТ, б) УНЧ, в) УВЧ, г) ШПУ, д) ИУ

— По виду усиливаемого сигнала - усилители гармонических и импульсных сигналов:

— Усилители гармонических сигналов предназначены для усиления сигналов, изменение которых происходит много медленнее длительностей переходных процессов в самих усилителях;

— Усилители импульсных сигналов предназначены для импульсных, периодических и непериодических сигналов.

При этом длительность собственных переходных процессов в усилителе не должна вызывать искажений исходной формы усиливаемых сигналов.



- По функциональному назначению - усилители напряжения, тока и мощности;

- По виду соединительных цепей усилительных каскадов:

- Усилители с гальванической (непосредственной) связью, предусматривающие передачу между каскадами сигнала как переменного, так и постоянного токов;

- Усилители с RC - связями, в которых между выходом предыдущего и входом последующего каскадов включают резистивно - емкостную связь, исключающую передачу сигналов постоянного тока;

- Усилители с индуктивной (трансформаторной) связью, в которых между каскадами включается трансформатор.

# Основные характеристики и параметры усилителей

- **Коэффициент усиления** - В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления по напряжению  $K_U$ , току  $K_I$  или мощности  $K_P$  :

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}, K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}, K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}},$$

Коэффициенты часто выражают в логарифмических единицах - децибелах:

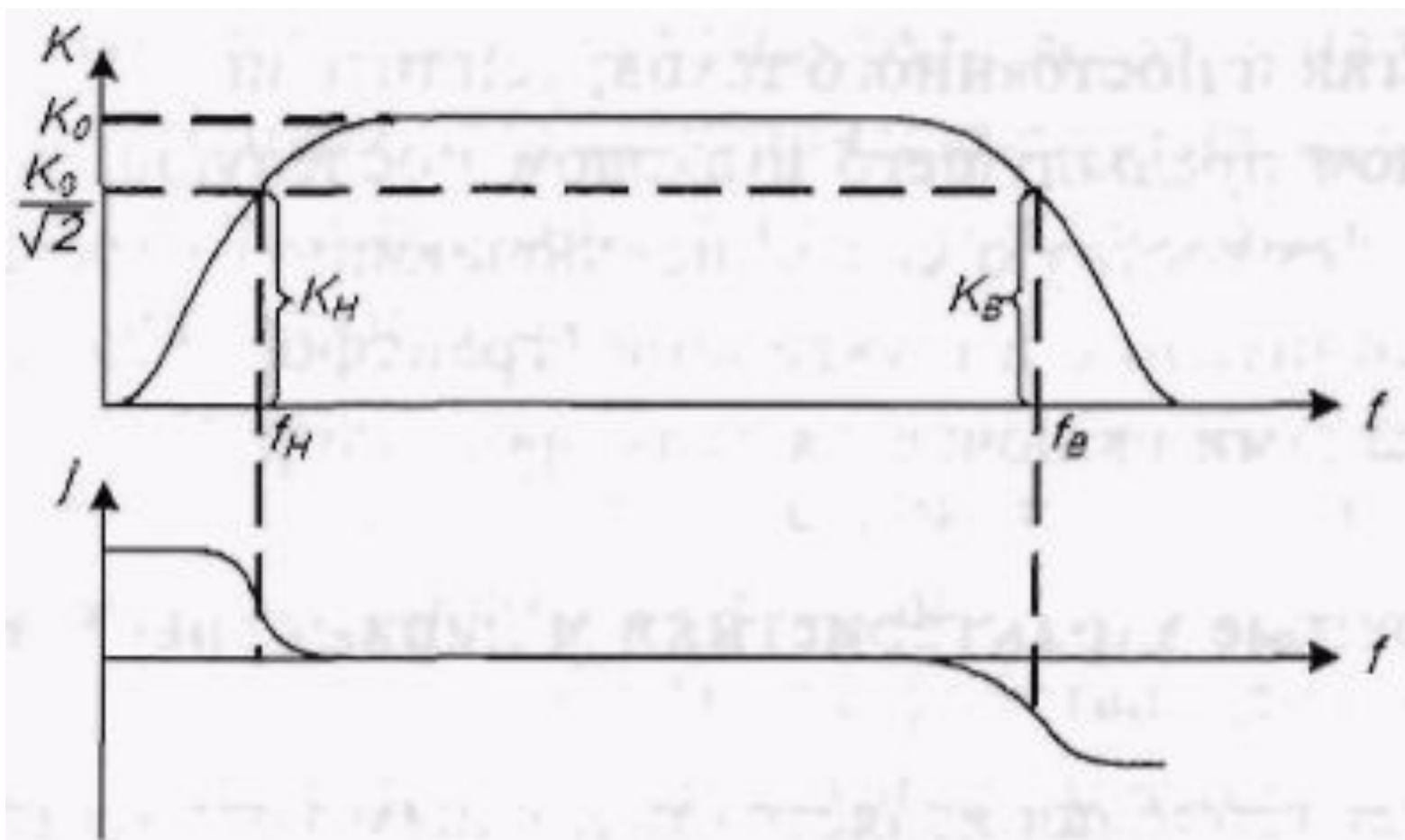
$$K_U (\text{дБ}) = 20 \lg K_U; K_I (\text{дБ}) = 20 \lg K_I; K_P (\text{дБ}) = 10 \lg K_P.$$

Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов. Общий коэффициент усиления:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

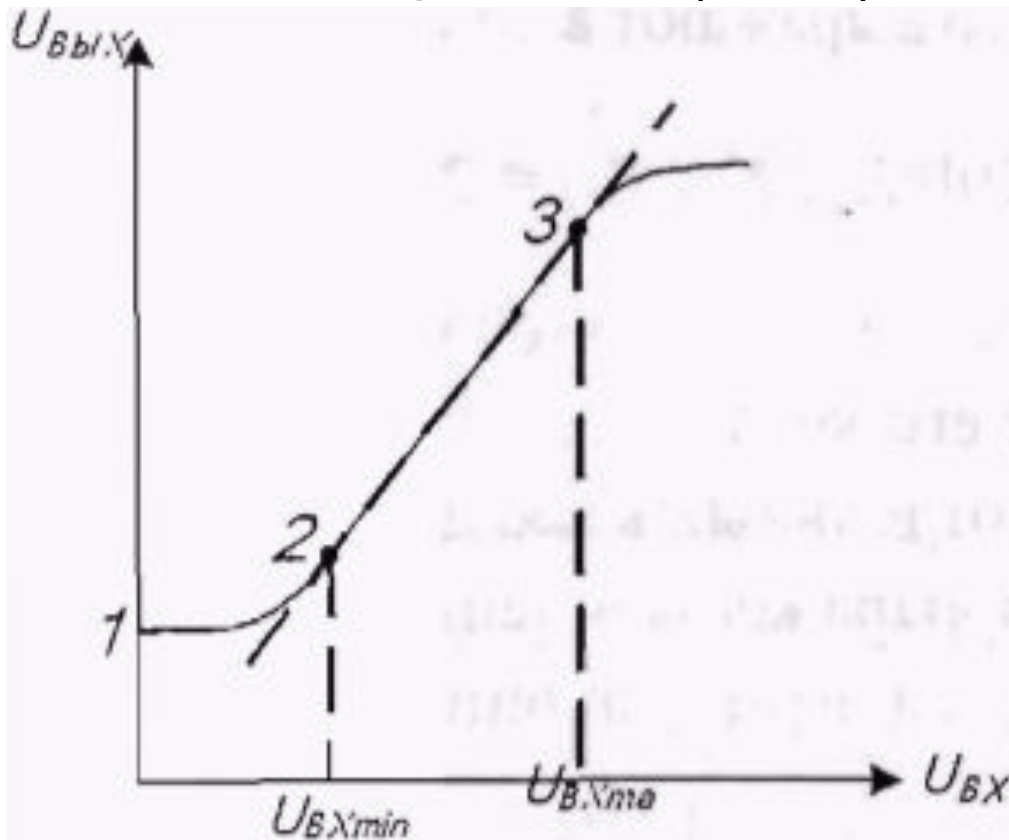
$$K(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ})$$

- **АЧХ и ФЧХ усилителя.** АЧХ -это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты, а ФЧХ - зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжением от частоты.



АЧХ и ФЧХ усилителя

- **Амплитудная характеристика** - это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока).



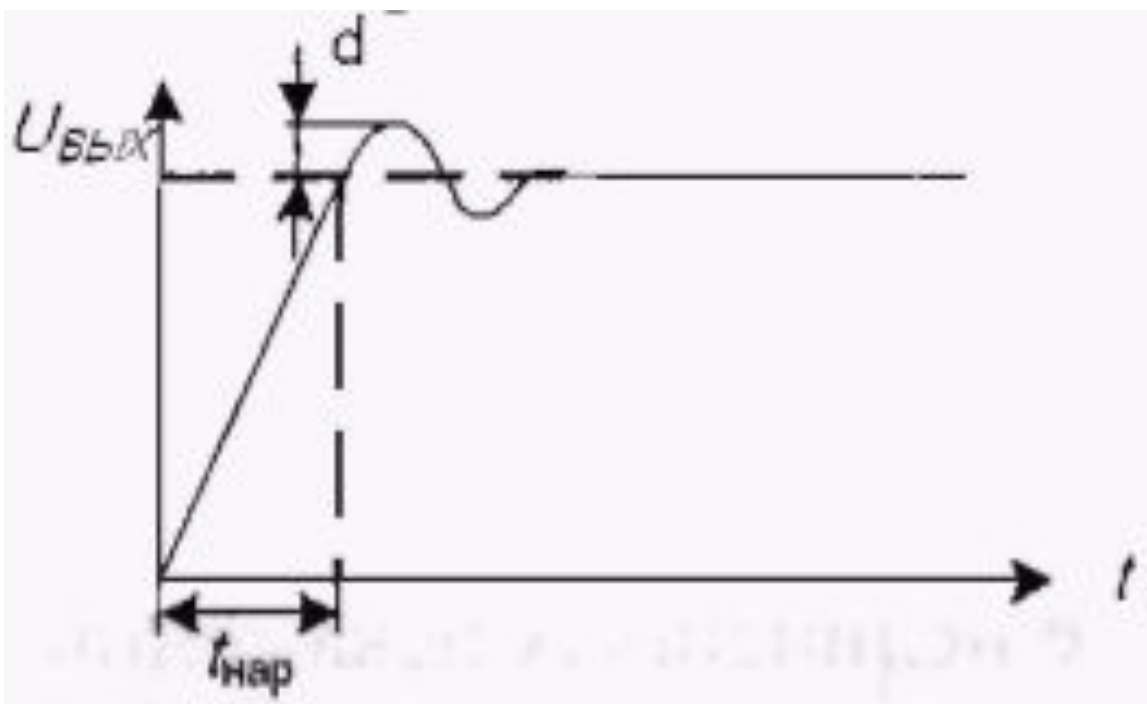
Точка 1 соответствует сигналу шумов, измеряемому при нулевом входном сигнале, точка 2 - минимальному входному напряжению, при котором можно различить сигнал на фоне шумов.

Участок 2 - 3 - это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжениями усилителя. После точки 3 наблюдается ограничение сигнала из-за попадания транзисторов в режим насыщения.

- **Динамический диапазон усиления** характеризует диапазон изменения входного сигнала:

$$D = U_{ВХ\max} / U_{ВХ\min}$$

- **Переходная характеристика усилителя** - это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии.



Переходная характеристика усилителя

Численно по данной характеристике определяют два параметра: время нарастания выходного напряжения  $t_{нар}$  и перерегулирование выходного напряжения (выброс

$$\eta = P_{\text{ВЫХ}} / P_0,$$

где  $P_0$  - мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

- **Входное и выходное сопротивление.** Их значения должны учитываться при согласовании усилителя как с источником входного сигнала (датчиком), так и с нагрузкой. В общем виде значения входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией частоты. Последняя зависимость особенно важна в случае действия на входе усилительного устройства непериодического сигнала.

- **Выходная мощность усилителя** - эта та часть мощности, которая может быть выделена в нагрузке длительное время.

- **Коэффициент гармоник (коэффициент нелинейных искажений)**  $K_r$  служит для количественной оценки величины нелинейных искажений.

Это отношение величины высших гармоник к основной в выходном сигнале, на вход усилителя подается синусоида:

$$K_r = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

где  $A_2 \dots A_n$  - действующие значения высших гармоник выходного сигнала, начиная со второй;

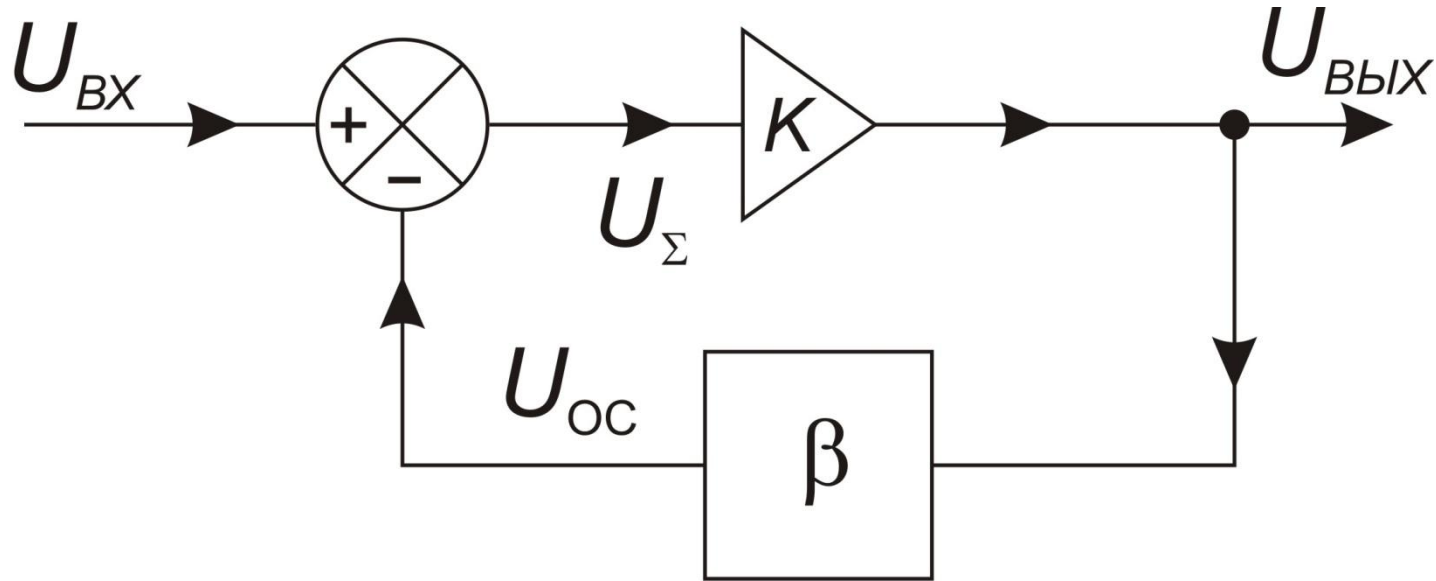
$A_1$  - действующее значение первой (основной) гармоники выходного сигнала.

- **Коэффициент частотных искажений** численно равен:

$$M = K_0 / K_f,$$

где  $K_f$  - модуль коэффициента усиления на заданной частоте.

# Обратная связь в усилителях



Усилитель, охваченный обратной связью

**Петлей обратной связи** называют замкнутый контур, включающий в себя цепь ОС и часть усилителя между точками ее подключения.

**Местной обратной связью** принято называть ОС, охватывающую отдельные каскады или части усилителя, а **общей обратной связью** - такую ОС, которая охватывает весь усилитель.

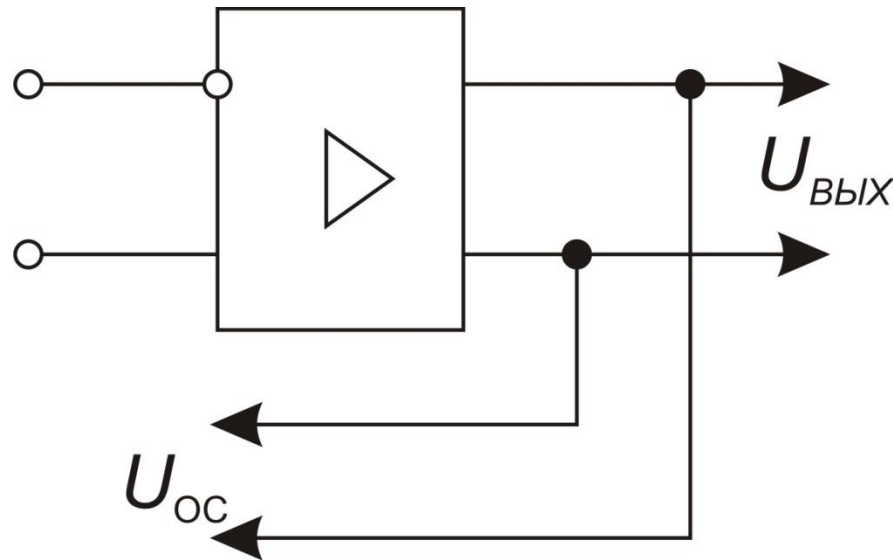


## Варианты ОС:

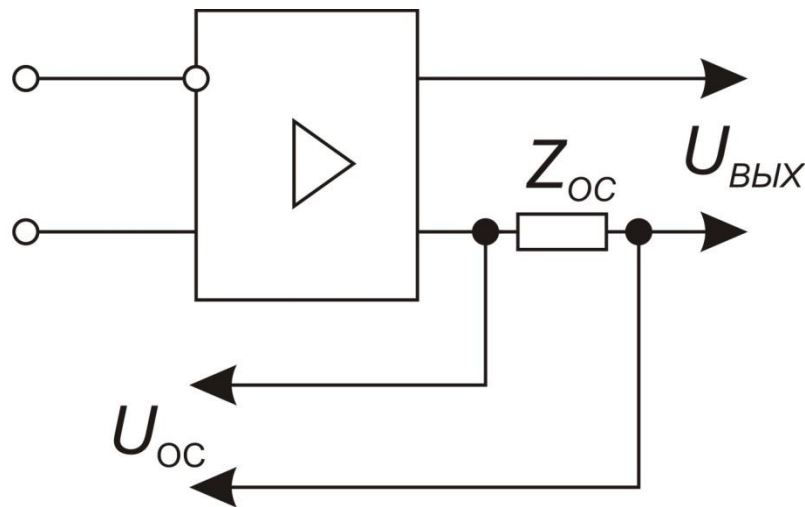
- только для медленно изменяющейся составляющей выходного сигнала;
- только для переменной составляющей его;
- для всего выходного сигнала.

В таких случаях говорят, ОС реализована по постоянному, по переменному, а также по постоянному и переменному токам.

Различают ОС по напряжению:

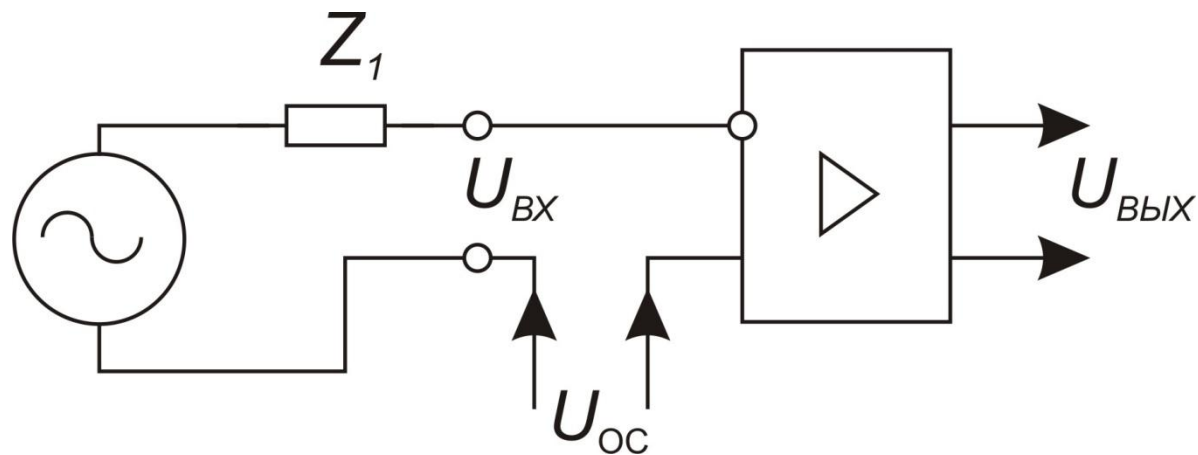


*ОС по току:*

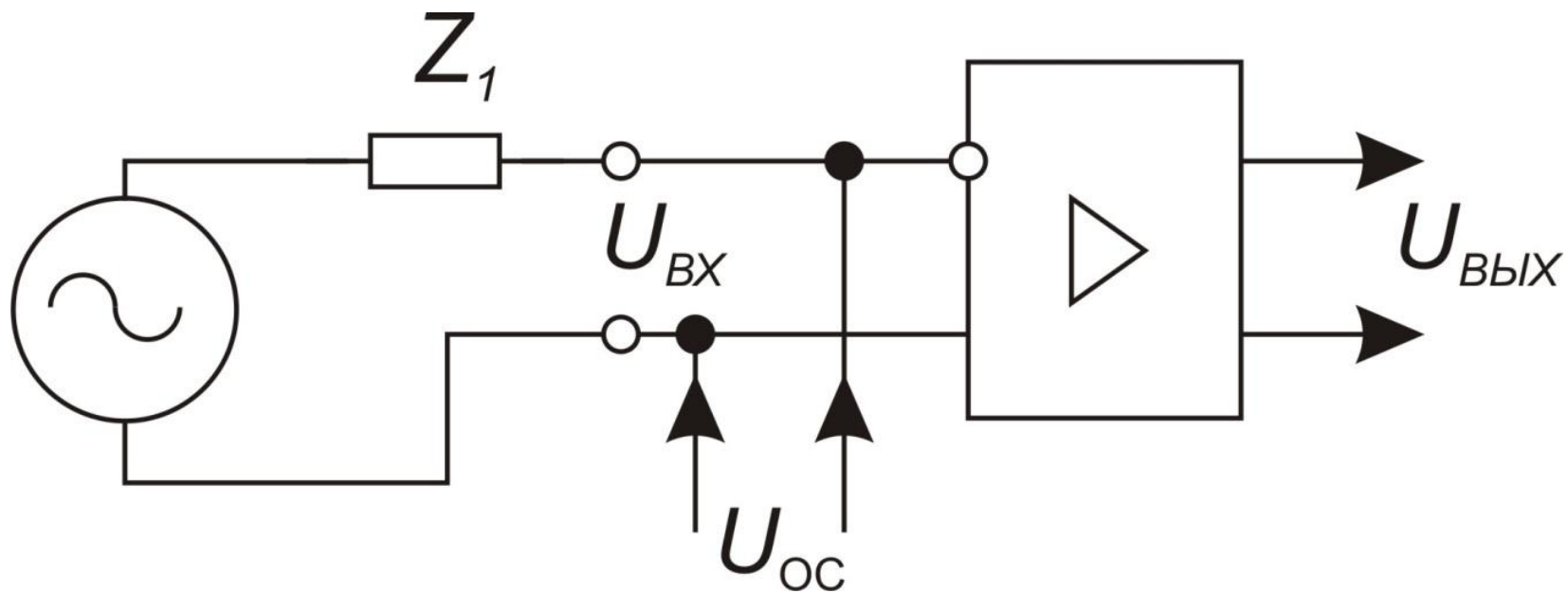


*По способу введения сигнала обратной связи различают:*

*- последовательную схему введения ОС, когда напряжение сигнала ОС суммируется со входным напряжением;*



- параллельную схему введения ОС, когда ток цепи ОС суммируется с током входного сигнала.



Для количественной оценки степени влияния обратной связи используют **коэффициент обратной связи**  $\beta$ , показывающий, какая часть выходного сигнала поступает на вход усилителя:

$$\beta_U = U_{OC} / U_{ВЫХ}, \quad \beta_I = I_{OC} / I_{ВЫХ}$$

а также **коэффициент петлевого усиления**:

$$K \beta,$$

и

$$(1 - K \beta)$$

- **глубину обратной связи**.

**Последовательная ООС** увеличивает входное сопротивление, что является положительным фактором:

$$Z_{ВХ ООС} = Z_{ВХ} (1 + \beta K)$$

где  $Z_{ВХ ООС}$ ,  $Z_{ВХ}$  – входное сопротивление усилителя соответственно с ООС и без ООС.

**Параллельная ООС** уменьшает входное сопротивление усилителя  $Z_{ВХ}$  в  $(1 + \beta K)$  раз.

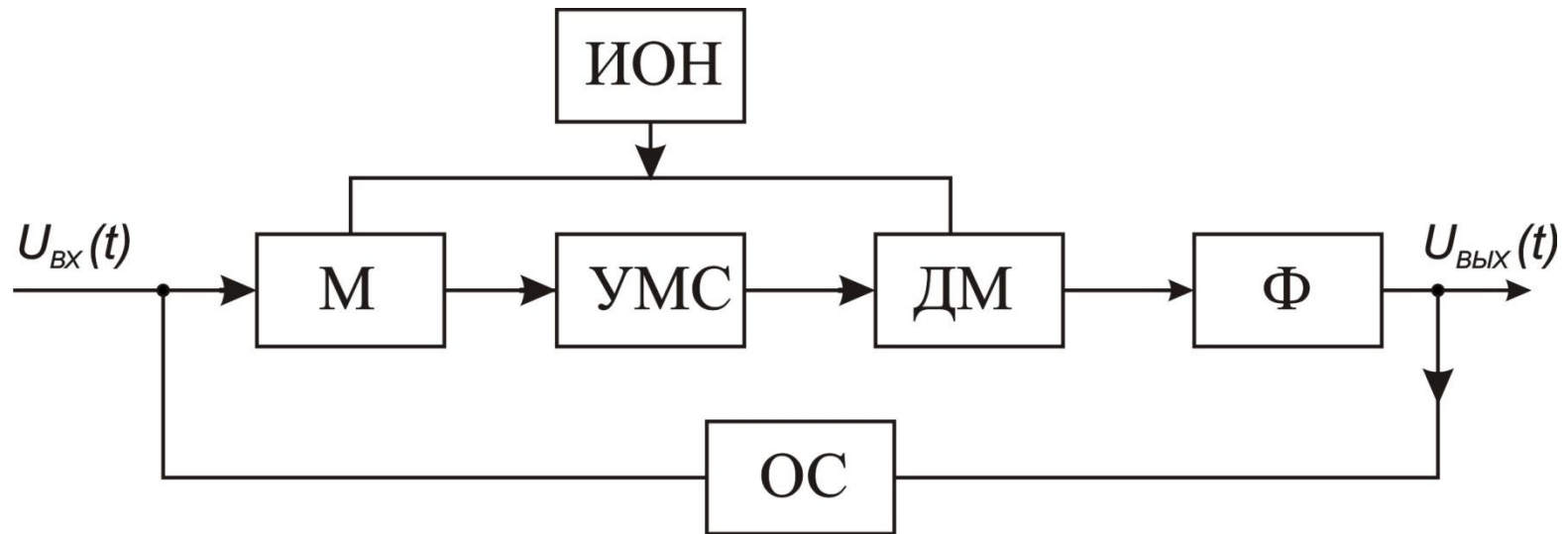
Влияние ООС позволяет улучшить характеристики усилителя: повысить стабильность коэффициента усиления; увеличить входное и уменьшить выходное сопротивление (последовательная ООС по напряжению), уменьшить входное и увеличить выходное сопротивление (параллельная ООС по току); расширить полосу пропускания усилителя; уменьшить нелинейные, частотные и фазовые искажения в схеме; уменьшить уровень собственных помех.

# Усилители постоянного тока

Применяются в электронных вольтметрах, осциллографах и т.д.

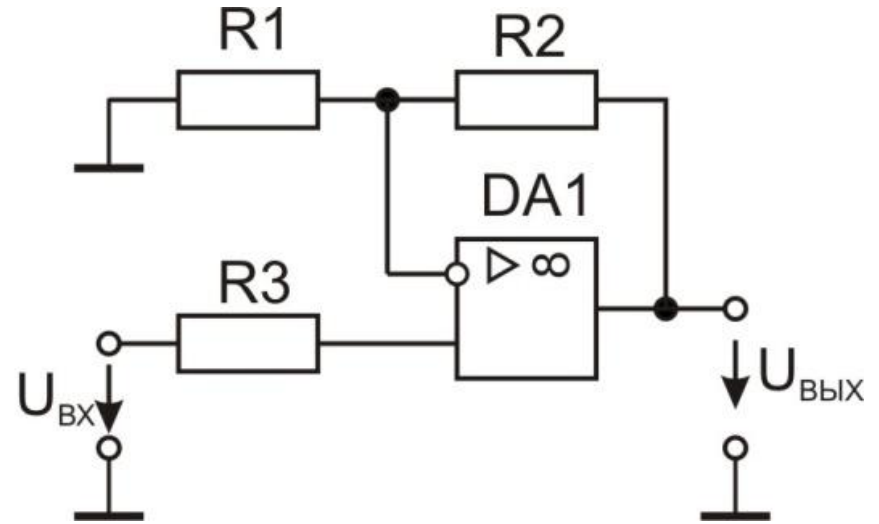
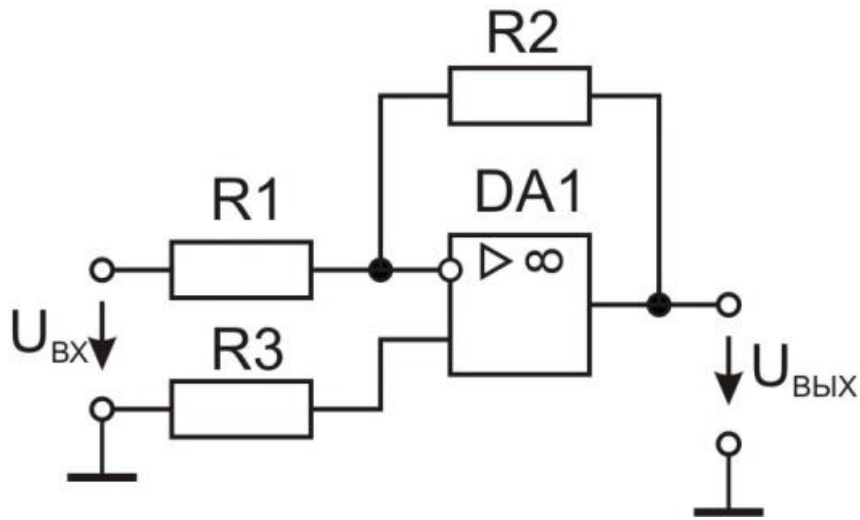
Делятся на две группы:

- Усилители с преобразованием спектра сигнала;
- Усилители без преобразования спектра сигнала.



*М – модулятор; УМС – усилитель модулированного сигнала;  
ДМ – демодулятор; ИОН – источник опорного напряжения;  
Ф – фильтр; ОС – цепь обратной связи.*

# УПТ без преобразования



а - инвертирующий усилитель;

б - неинвертирующий усилитель.

Для инвертирующего усилителя коэффициент усиления:

$$K_u = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{K\beta}{(1 + K\beta)},$$

где  $\beta = R1 / (R1 + R2)$ .

Входное и выходное сопротивления равны соответственно:

$$R_{ex \text{ и}} = R_1 + \frac{R_2}{K+1};$$

$$R_{вых \text{ и}} = \frac{R_{вых}}{(1 + K\beta) + R_{вых} / (R_1 + R_2)}.$$

Для неинвертирующего усилителя коэффициент усиления:

$$K_{нл} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{K\beta}{1 + K\beta};$$

Входное сопротивление равно:

$$R_{ex \text{ нл}} = \frac{R_{сф} R_3}{R_{сф} + R_3},$$

где

$$R_3 = \frac{R_{ex} (1 + K_1\beta) + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)}{1 - K\beta / K_{ос}}$$



$$K_1 = K(I - I/2K_{oc})$$

$R_{сф}$  - входное сопротивление синфазному сигналу.

Если

$$K_{oc} \gg \beta K$$

$$R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \ll R_{BX}$$

то

$$R_{ex} = \frac{R_{сф} R_{ex} (1 + K\beta)}{R_{сф} + R_{ex} (1 + K\beta)};$$

$$R_{вых \text{ нц}} = \frac{R_{вых}}{(1 + K\beta) + R_{вых} / (R_1 + R_2)}.$$

# Усилители переменного тока

Строятся по схеме усилителей:

- с непосредственной связью;
- с резистивно-емкостной связью.

В первом случае полоса пропускания усилителя ограничена только сверху (при расчёте следует оценивать влияние наличия дрейфа как в УПТ). Во втором, полоса пропускания имеет ограничение и сверху и снизу (при расчёте влияние дрейфа рассматривается только для работы отдельно каскада).

Причинами появления погрешностей в усилителях переменного тока являются

- 1) собственные шумы пассивных и активных элементов схемы;
- 2) воздействие на усилитель внешних помех;
- 3) непостоянство коэффициента усиления усилителя за счет изменения: во времени свойств активных и пассивных элементов схемы; условий эксплуатации усилителя; неинформативных параметров сигнала.

Первые две причины приводят к появлению **погрешности нуля**, а третья – **мультипликативной погрешности**.

К мультипликативным относятся также погрешности, вызванные наличием **нелинейных искажений сигнала**, которые зависят от входного напряжения. Следует отметить, что эта зависимость нелинейная.

Как правило, погрешности усилителей нормируются не более чем двучленной формулой. Несовпадение между реальной функцией погрешности и выражением, используемым для нормирования, ведет к завышению допустимой погрешности усилителя при некоторых значениях входного сигнала.

Кроме нелинейных искажений в усилителе присутствуют **линейные искажения**, которые не связаны непосредственно со значением сигнала, а зависят от скорости его изменения, спектра. Линейные искажения обычно называют **частотными**.

Погрешности усилителя, обусловленные частотными искажениями, относятся к **динамическим**. Для анализа частотных искажений пользуются АЧХ и ФЧХ. На АЧХ различают область низших частот в окрестности нижней граничной частоты  $f_H$ , область высших частот  $f_B$  в окрестности верхней граничной частоты и расположенную между ними область средних частот.

В усилителях измерительных устройств изменение коэффициента усиления на граничных частотах составляет 1 – 6, реже 10% по сравнению с его значением на средних частотах.

**Избирательные усилители** это усилители, полоса пропускания которых сужена с целью отделить сигналы в нужной полосе частот от сигналов, помех, или шумов других частот. В таких усилителях в усилительном тракте или в цепи обратной связи используются частотно-зависимые LC и RC-цепи.

Избирательный усилитель с одним или несколькими резонансными контурами, настроенными на одну частоту называют **резонансным**. Данные усилители широко используются в анализаторах спектра, электронных указателях равновесия мостовых схем.

# Рекомендуемая литература

1. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Г. Г. Раннев и др.]; под ред. Г. Г. Раннева – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 512 с.

2. Павлов В. Н., Ногин В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2001.– 320 с.

3. Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств. Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б.Ф. Лаврентьев – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.

4. Аналоговые электроизмерительные приборы: Учебное пособие для вузов по специальности "Информационно-измерительная техника" /Бишард Е.Г. и др. –2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 415 с.

5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

6. Операционные усилители и компараторы. Справочник –

# Задания для СРС

1. Какие функции в измерительных устройствах выполняют усилители?
2. Какие типы усилителей используются в измерительных устройствах?
3. Что такое усилители с МДМ и для чего они используются?
4. Какие требования предъявляются к измерительным усилителям?
5. Что такое дифференциальный усилитель?
6. Что такое широкополосный усилитель?  
Импульсный усилитель? Избирательный усилитель?