

**Балтийская государственная академия  
рыбопромыслового флота**

**Кафедра СРТС**

**Прием и обработка сигналов**

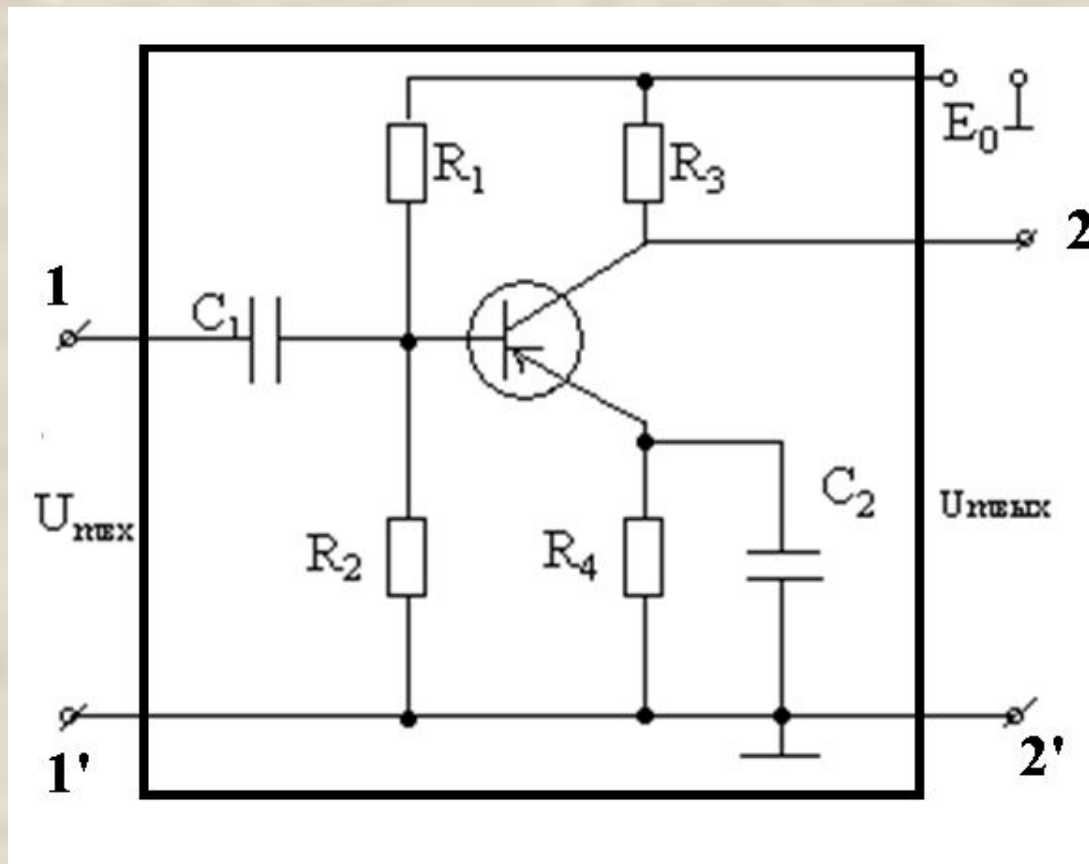
**Лекция №5**

**Резонансные усилители**

# 1. Общая характеристика электронных усилителей.

Усилителем электрических колебаний называется устройство, которое позволяет при подаче на вход колебаний с некоторым уровнем мощности  $P$  получить на выходной нагрузке колебания той же формы, но с большим уровнем мощности.

В электронном усилителе для усиления подаваемого сигнала всегда используется **активный элемент**. Усиление происходит за счет источника питания, который содержит всякий усилитель (например, транзисторный). Усилитель обеспечивает **преобразование энергии питания в энергию полезных колебаний**. Входное колебание является **управляющим**, т.к. под его



***Рисунок 1-Представление усилителя в виде четырехполюсника***

## 2. Классификация усилителей

- 1) по виду усилительного элемента – усилители ламповые, транзисторные, на туннельных диодах, параметрических диодах, на микросхемах и т.п.;
- 2) по виду усиливаемых частот – усилители постоянного тока (УПТ), низкой частоты (НЧ), радио и промежуточной частот (УРЧ, УПЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ - усилители);
- 3) по ширине полос усиливаемых частот – узкополосные, широкополосные усилители;
- 4) по характеру усиливаемого сигнала – усилители непрерывных и импульсных сигналов;
- 5) по усиливаемой электрической величине – усилители напряжения  $U$ , усилители тока  $I$ , усилители мощности  $P$ ;
- 6) по типу нагрузки - резистивные (апериодические), резонансные (избирательные) усилители.

### 3. Основные характеристики усилителей

#### Коэффициентом усиления

называется отношение выходной величины, характеризующей уровень сигнала, к входной.

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad \text{или} \quad K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

В усилителях на полевых транзисторах имеет смысл только  $K_v$ , так как входной ток очень мал. В биполярных транзисторах определяют обычно  $K_I$ ,  $K_v$ ,  $K_P$ , однако, наиболее часто используется  $K_v$ . Обозначают:  $K$ ,  $K_I$ ,  $K_v$ ,  $K_P$ ,  $K_{\text{ус}}$ .

#### Амплитудно-частотная, фазо-частотная и переходная характеристики усилителей

Усиление сигнала обычно сопровождается изменением формы (искажениями) сигнала. Искажения делятся на линейные и нелинейные. Нелинейные искажения



**Линейные искажения** усилителей оцениваются с помощью **амплитудно-частотной (АЧХ)**, **фазо-частотной (ФЧХ)** и **переходной** характеристик.

Коэффициент усиления по напряжению (току) является комплексной величиной  $K(j\omega)e^{j\varphi(\omega)}$

**АЧХ** понимают зависимость отношения амплитуды напряжения (тока) на выходе усилителя к амплитуде данных сигналов на входе от частоты входного электрического сигнала.

Иногда **АЧХ** называют зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты при постоянной величине амплитуды входного сигнала. При анализе усилителя часто пользуются **нормированной характеристикой**:

$$\bar{K}(\omega) = \frac{K(\omega)}{K_0}$$

**Фазо-частотной характеристикой (ФЧХ)** усилителя называется зависимость фазового сдвига выходного гармонического колебания относительно входного при изменении частоты входного сигнала  $f$ .

**Переходной характеристикой** усилителя  $U_{\text{вых}}(t)$  называется зависимость мгновенного значения выходного напряжения  $U$  от времени  $t$  при единичном скачкообразном изменении входного напряжения. Эта характеристика отражает переходные процессы в схеме и позволяет судить  $U_{\text{вых}}(t)$  об искажении усиливаемого импульсного сигнала. Для сравнения свойств усилителей переходную характеристику нормируют:

Нелинейные искажения проявляются в изменении спектра выходного сигнала по отношению к спектру сигнала на входе. Оценивают **коэффициентом гармоник** (**коэффициентом нелинейных искажений**)  $K_{\Gamma}$ . Этот коэффициент измеряется на выходе усилителя при подаче на вход гармонического колебания и определяется соотношением:

$$K_{\Gamma} = \frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1} \cdot 100\%$$

где  $P_2, P_3, \dots, P_n$  - мощность второй, третьей и  $n$ -ой гармоник.

При резистивной нагрузке активного элемента допустимый уровень нелинейных искажений определяется:

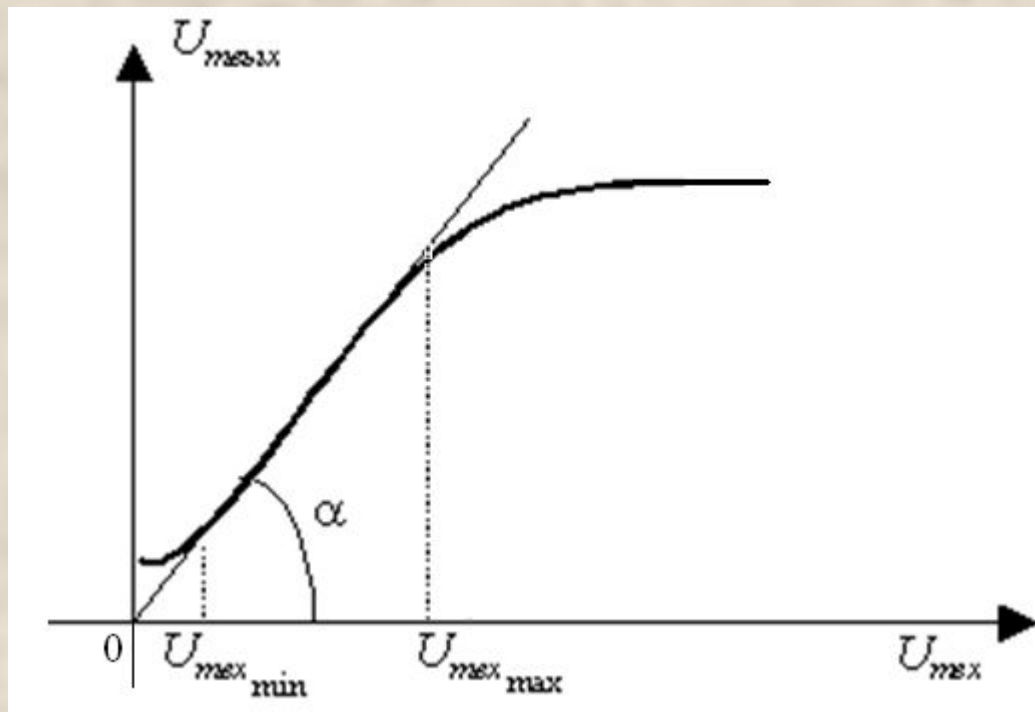
$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots + U_{mn}^2}}{U_{m1}} \cdot 100\%$$

**Амплитудная характеристика, динамический диапазон, КПД усилителя.**

О линейности усилителя можно судить и по его **амплитудной характеристике**, то есть зависимости амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$$





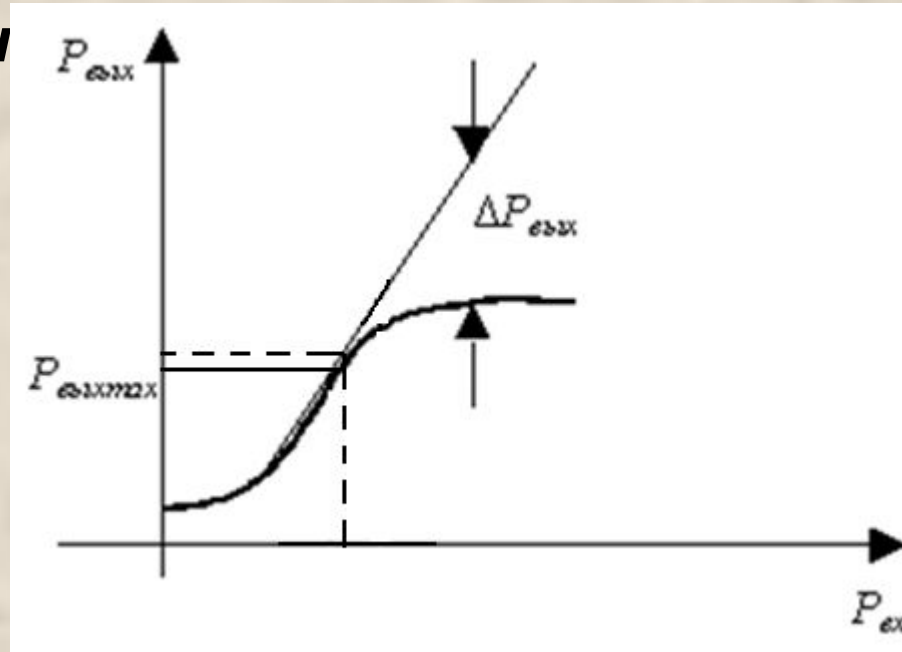
**Рисунок 2 – Графическое представление амплитудной характеристики усилителя**

**Коэффициент усиления  $K$  на линейном участке АХ не зависит от амплитуды входного сигнала и может быть определен, как тангенс угла  $\alpha$  наклона АХ к оси абсцисс.**

**Динамический диапазон усилителя оценивается как:**

$$D_y = \frac{U_{m_{ex} \max}}{U_{m_{ex} \min}}$$

В **усилителях мощности (УМ)** под **АХ** чаще понимается зависимость выходной мощности от входной мощн



Количественно мера нелинейности оценивается как отношение отклонения АХ от линейной характеристики:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\%$$

В усилителях мощности **динамический диапазон** определяется с помощью характеристики  $K(P_{\text{вх}})$ .

Отношение  $P_{\text{вых max}}$  к выходной мощности собственных шумов  $P_{\text{вых шум}}$  на входе усилителя принимается за **динамический диапазон**:

$$D_y = 10 \log \left( \frac{P_{\text{вых max}}}{P_{\text{вых шум}}} \right)$$

При оценке мощных усилителей используют параметр **КПД**, который определяется как отношение мощности  $P_{\text{вых}}$  полезного сигнала на выходной нагрузке к мощности  $P_0$  потребляемой от источника:

$$\eta_y = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0}$$

### **Входная и выходная проводимости**

Под **входной комплексной проводимостью** понимается отношение комплексных амплитуд тока и напряжения на входе усилителя при подключенной нагрузке к его выходу:

$$Y_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{I_{m_{\text{вх}}}}{U_{m_{\text{вх}}}}$$

**Входная комплексная проводимость является нагрузкой для источника сигнала, поэтому от ее величины зависит мощность, потребляемая усилителем от источника сигнала.**

**Комплексной выходной проводимостью** называют проводимость на выходе усилителя при подключенном источнике сигнала на вход:

**Иногда удобнее оценивать не проводимости, а сопротивления усилителя:**

$$Z_{ex}(j\omega) = \frac{1}{Y_{ex}(j\omega)}; \quad Z_{вых}(j\omega) = \frac{1}{Y_{вых}(j\omega)}$$

**Знание проводимостей и сопротивлений позволяет правильно согласовать усилитель с источником сигнала и последующим каскадом.**

**Все перечисленные характеристики одинаково важны для различных типов усилителей. Помимо названных, существуют и другие характеристики: устойчивость, стабильность, коэффициент шума,**

## 4. Усилитель как линейный активный четырехполюсник

Усилитель в пределах динамического диапазона может быть представлен как линейный четырехполюсник. Так как в состав усилителя входят источник энергии и активный элемент, то соответствующий ему четырехполюсник будет активным. По сути дела – это источник тока, управляемый

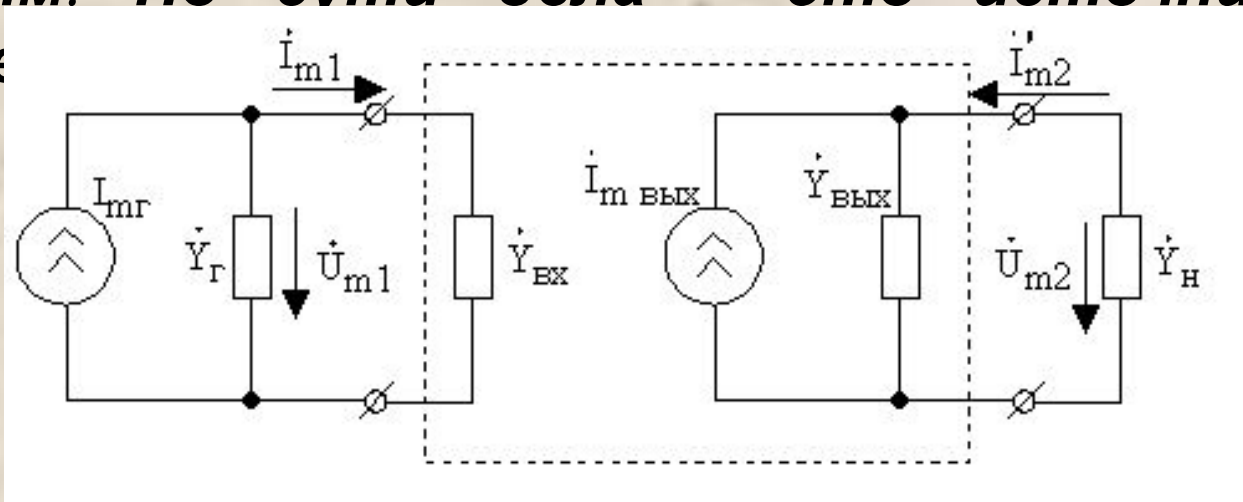


Рисунок 4



При описании четырехполюсников с помощью  $Y$ -параметров два уравнения связывают входные и выходные сигналы (на внешних парах зажимов) друг с другом:

$$\begin{cases} I_{m1} = Y_{11} \dot{U}_{m1} + Y_{12} \dot{U}_{m2} \\ I'_{m2} = Y_{21} \dot{U}_{m1} + Y_{22} \dot{U}_{m2} \end{cases}$$

Зная  $Y$ -параметры можно найти и определить характеристики нагруженного четырехполюсника:

Найдем коэффициент передачи  $K_U$  четырехполюсника а дополнив систему уравнений уравнением нагрузки:

$$\begin{aligned} -\dot{U}_{m2} Y_n &= Y_{21} \dot{U}_{m1} + Y_{22} \dot{U}_{m2} \Rightarrow Y_{22} \dot{U}_{m2} + \dot{U}_{m2} Y_n = -Y_{21} \dot{U}_{m1} \Rightarrow \\ \Rightarrow K_U(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = -\frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_n} \end{aligned}$$

**Определим входную проводимость. Разделим первое уравнение на комплексную амплитуду напряжения на входных зажимах:**

$$\frac{I_{m1}}{U_{m1}} = Y_{11} + Y_{12} \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \Rightarrow Y_{ex}(j\omega) = Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22} + Y}$$

**Определим выходную проводимость, погасив источник тока на входе и включив источник электрической энергии со стороны выходных зажимов.**

$$\frac{I_{m2}}{U_{m2}} = Y_{22} + Y_{21} \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \Rightarrow Y_{вых}(j\omega) = Y_{22} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{11} + Y}$$

**Из формул для  $Y_{ex}$  и  $Y_{вых}$  следует, что при отсутствии проводимости обратной передачи ( $Y_{12}=0$ ) входная и выходная проводимости равны соответственно характеристическим проводимостям, а коэффициент обратной передачи равен нулю.**

**Численные значения параметров усилителя - четырехполюсника зависят от типа используемого**

## 5. Обратная связь и ее влияние на характеристики усилителя

Если на вход усилителя, помимо сигнала от внешнего источника, поступает также выходной сигнал или его часть, то в усилителе присутствует **обратная связь** (ОС).

Существует два вида ОС: **внутренняя** и **внешняя**. При внутренней ОС часть выходного напряжения  $U$  поступает на вход усилителя за счет внутренних цепей активных элементов (в частности  $\gamma_{12}$ ).

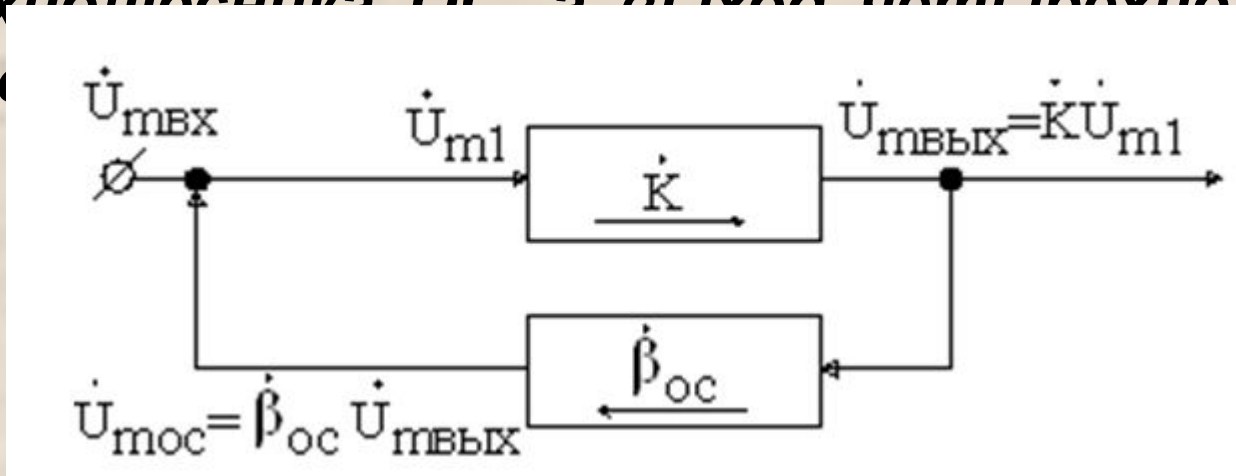
Попадание выходного сигнала на вход может происходить также из-за нерационального размещения отдельных усилительных каскадов. Такие ОС называются **паразитными**. Для их исключения применяют следующие меры:

- рациональное расположение деталей;
- разбиение на блоки секции

При специально созданной **внешней ОС** напряжение или ток ОС поступает на вход усилителя за счет введения в схему дополнительных элементов и цепей.

Такая ОС широко используется при конструировании усилителей, так как позволяет целенаправленно влиять практически на все показатели усилителя.

Представим усилитель в виде четырехполюсника, выход которого соединим с входом четырехполюсника ОС, а вход четырехполюсника ОС с входом



**Рисунок 5**

**В реальных условиях четырехполюсник ОС не всегда присутствует в явном виде, однако, всегда можно найти численное значение коэффициента передачи по напряжению:**

$$\beta_{oc} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{вых}}$$

**Напряжение на входе усилителя образуется при сложении напряжений (или токов) источника сигнала и цепи ОС.**

**$\dot{U}_{вх1} > \dot{U}_m$  Если входной сигнал и сигнал ОС синфазны, то напряжение**

**и ОС называют *положительной (ПОС)*.**

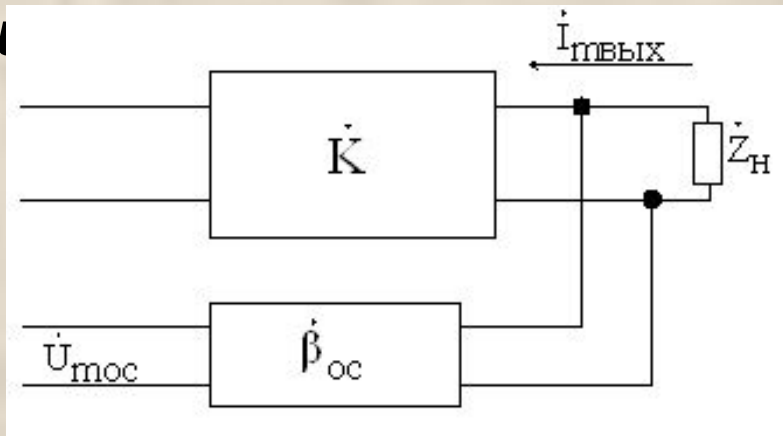
$$\dot{U}_{вх1} < \dot{U}_m$$

**Если напряжения  $\dot{U}_{m\text{ вх}}$  и  $\dot{U}_{m\text{ ос}}$  противофазны, то напряжение**

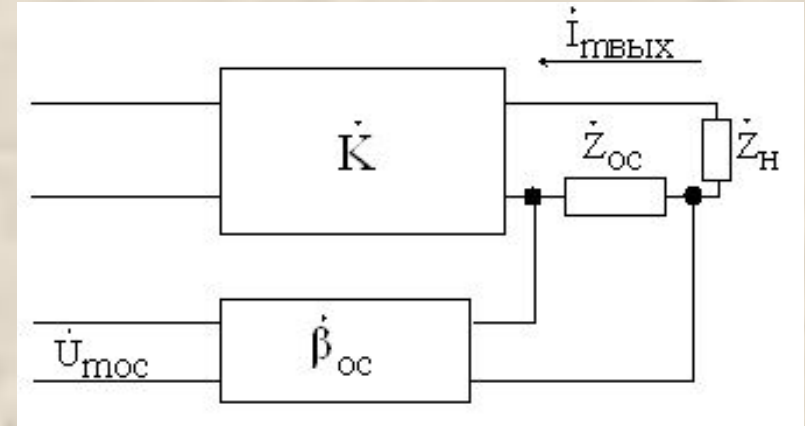
**и ОС называют *отрицательной ОС (ООС)*.**



В зависимости от того, как образуется сигнал ОС, различают **ОС по напряжению** и **ОС по току** (рисунки 6



**Рисунок 6**



**Рисунок 7**

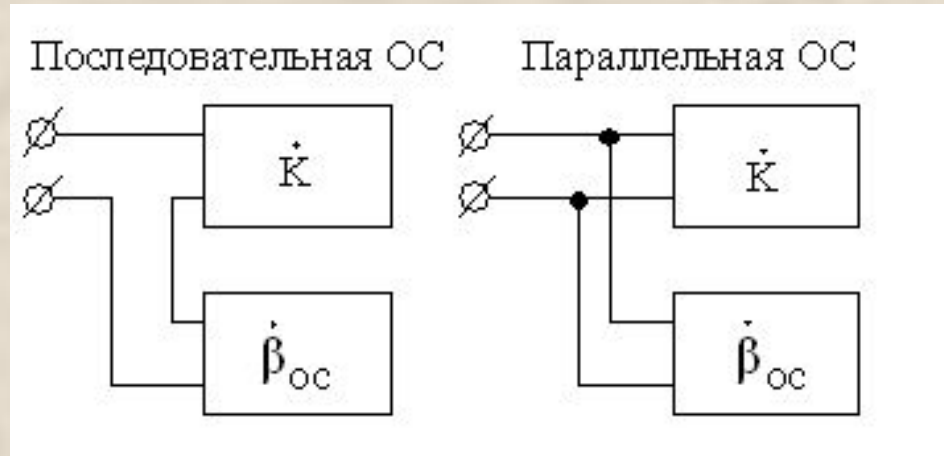
В первом случае сигнал ОС образует непосредственное сопротивление нагрузки, и коэффициент передачи цепи ОС равен:

$$\beta_{oc} = \frac{U_{oc}}{U_{вых}}$$

Во втором случае последовательно с  $Z_n$  включают сопротивление  $Z_{oc}$ , на котором создается падение напряжения и тогда:

$$\beta_{oc} = \frac{U_{oc}}{I_{вых} Z_{oc}}$$

**По способу подачи сигнала ОС на вход усилителя различают последовательную и параллельную ОС (рисунок 8).**

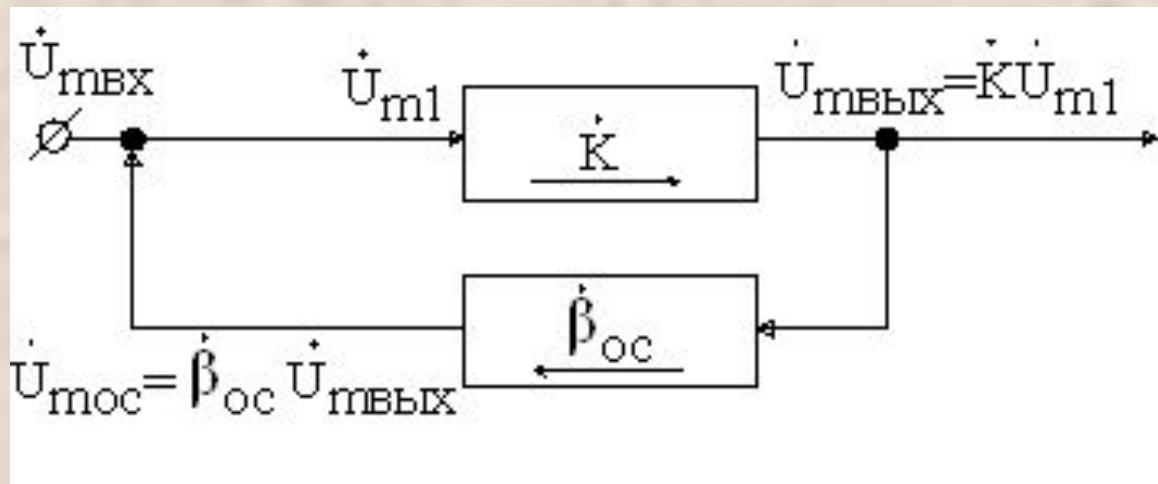


**Рисунок 8**

**При *последовательной ОС* на входе усилителя геометрически суммируются напряжения входного сигнала и сигнала ОС.**

**При *параллельной ОС* происходит геометрическое суммирование токов.**

**Полученные схемы формирования ОС и подачи его во входную цепь дают возможность получить схемы с существующим отпишем характеристик**



**Напряжение на выходе усилителя, охваченного ОС, можно записать в следующем виде:**

$$K_{\text{вых}} U_{\text{oc}} = K_{\text{m}} U_{\text{m1}}$$

**где  $U_{\text{m1}}$  - напряжение, воздействующее на вход усилителя, с учетом сигнала ОС;  $K$  - коэффициент усиления без учета ОС;  $K_{\text{oc}}$  - коэффициент усиления каскада с учетом ОС.**

**Тогда:**

$$K_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K U_{\text{m1}}}{U_{\text{m1}} - U_{\text{moc}}} = \frac{K U_{\text{m1}}}{K U_{\text{m1}} - \beta_{\text{oc}} K U_{\text{m1}}} = \frac{K U_{\text{m1}}}{K U_{\text{m1}} (1 - \beta_{\text{oc}})} = \frac{K}{1 - \beta_{\text{oc}}}$$

Величина  $\beta_{oc} K$  характеризует глубину ОС и называется петлевым усилением.

В общем случае  $\beta_{oc} K$ ;  $K_{oc}$  - комплексные величины, но в определенном частотном диапазоне их можно считать вещественными, тогда:

$$K_{oc} = \frac{K_0}{1 - \beta_{oc} K_0}$$

**ВЫВОД:** При ПОС петлевое усиление больше 1 и коэффициент усиления возрастает. При петлевом усилении равном 1 усилитель превращается в генератор, при петлевом усилении меньшем 1 (ООС), коэффициент усиления уменьшается.

Отрицательная ОС при этом увеличивает стабильность и уменьшает все виды искажений.

Введение ООС существенно влияет на величину входного и выходного сопротивлений усилителей.

При последовательной ООС входное сопротивление усилителя определяется как:

$$K_{вх, ООС} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{вх}}{I_{вх} \frac{1}{\beta_{oc} K_0 + 1}} = Z_{вх} (1 + \beta_{oc} K_0)$$

**При параллельной ООС входная проводимость оценивается по формуле:**

$$K_{вх\ oc} = \frac{Y_{вх}}{U_{вх}} = Y_{вх} + Y_{oc} (1 + \beta_{oc})$$

**Из полученных выражений следует, что при последовательной ООС входное сопротивление увеличивается в  $(1 + \beta_{oc} \cdot K)$  раз, при параллельной ООС входная проводимость увеличивается на  $(1 + \beta_{oc} \cdot K)$ .**

**Выходное сопротивление в усилителе с ООС по напряжению можно определить (при  $R_{ген} \ll Z_{вх}$ ) следующим образом:**

$$Z_{вых\ oc} = \frac{Z_{вых}}{(1 + \beta_{oc} K)}$$

**Выходное сопротивление в усилителях с ООС по току определяют как:**

$$Z_{вых\ oc} = Z_{вых} + Z_{oc} (1 + \beta_{oc} S Z_H), \quad S = \frac{K}{Z_{вых\ oc}}$$

**Таким образом, введение ООС по напряжению увеличивает выходное сопротивление усилителя в  $(1 + \beta_o \cdot K)$  раз, а введение ООС по току увеличивает выходное сопротивление на  $(1 + \beta_o \cdot S \cdot Z_H)$ .**