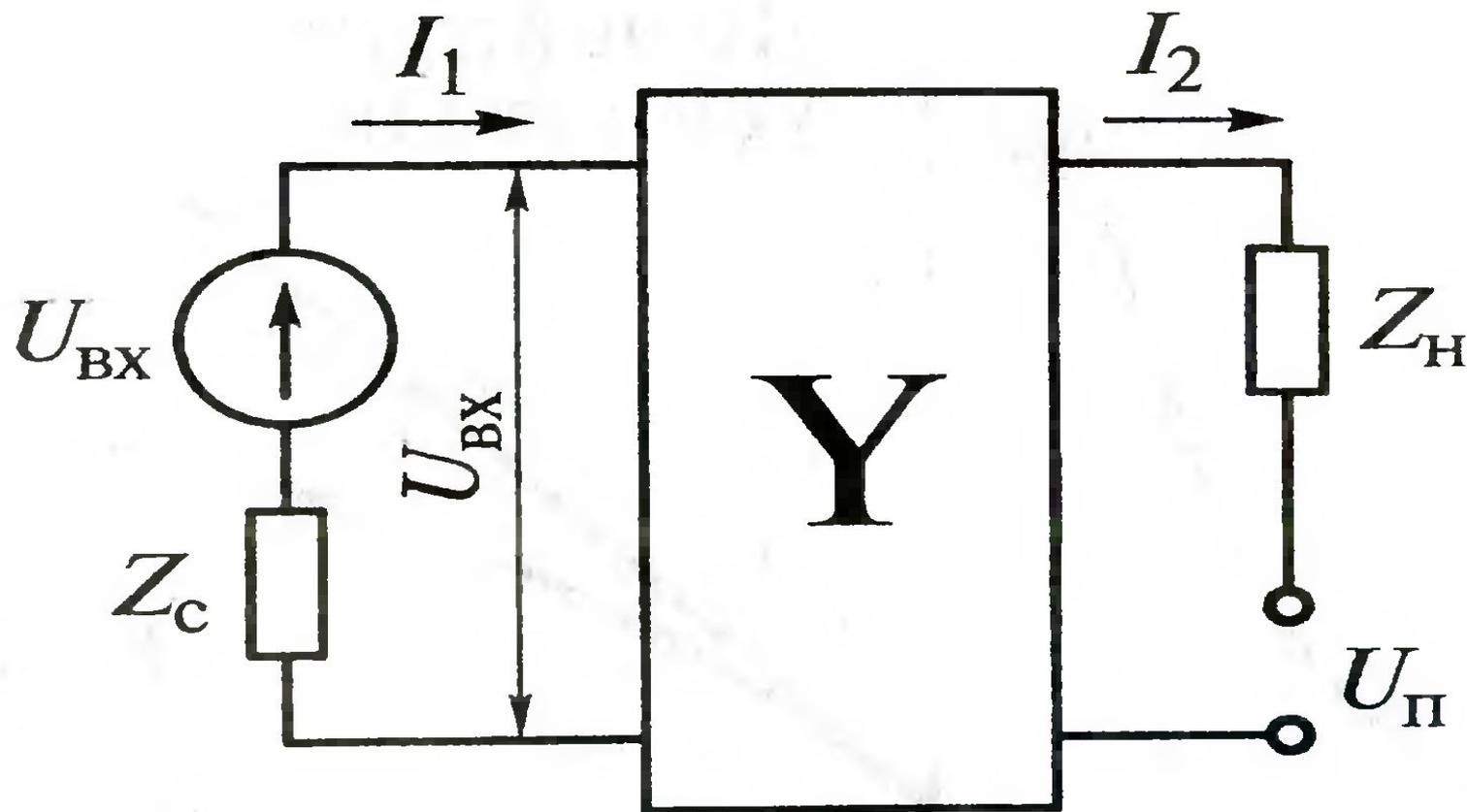


# Лекция №3-4

**Тема: Аналоговые усилители. Классификация. Основные характеристики и параметры усилителей.**

Усилителем называется устройство, предназначенное для усиления входных электрических сигналов по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Усилитель включает в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом  $U_{\text{вх}}$ , источник питания  $U_{\text{п}}$  и нагрузочное устройство с сопротивлением  $Z_{\text{н}}$ .

# Структурная схема усилительного устройства



Входной сигнал  $U_{\text{вх}}$  управляет параметрами нелинейного элемента (рис. 5.8). В качестве нелинейного элемента используются электровакуумные приборы, транзисторы и др.

Усилитель может иметь один или два входа и один или два выхода. Один из входов обычно является прямым, а второй — инверсным.

Классификация усилителей проводится по многим признакам:

- по виду усиливаемого сигнала — усилители гармонических и импульсных сигналов;
- по типу усиливаемого сигнала — усилители напряжения, тока и мощности;
- по диапазону усиливаемых частот — усилители постоянного тока и усилители переменного тока. В свою очередь усилители переменного тока в зависимости от диапазона усиливаемых частот делятся на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные и избирательные. Последние обеспечивают усиление в узком диапазоне частот;

- по виду нагрузки — усилители с активной, активно-индуктивной и емкостной нагрузкой.

Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными с гальванической, емкостной и индуктивной связью.

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: с линейным режимом работы и с нелинейным режимом работы.

Основными характеристиками любого усилителя являются (рис. 5.9):

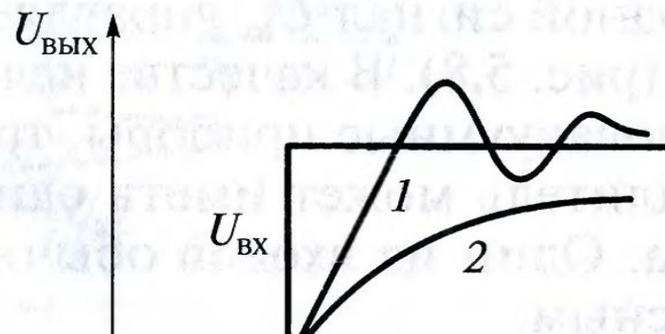
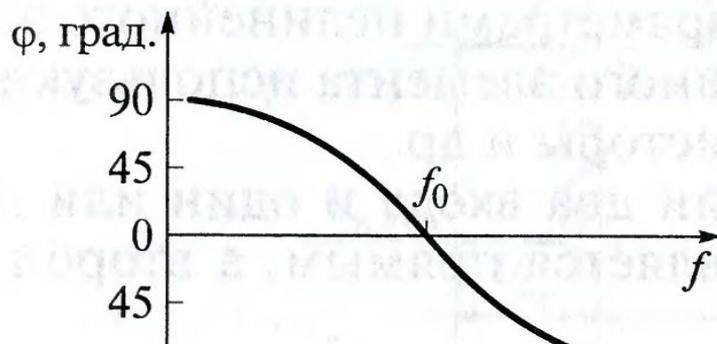
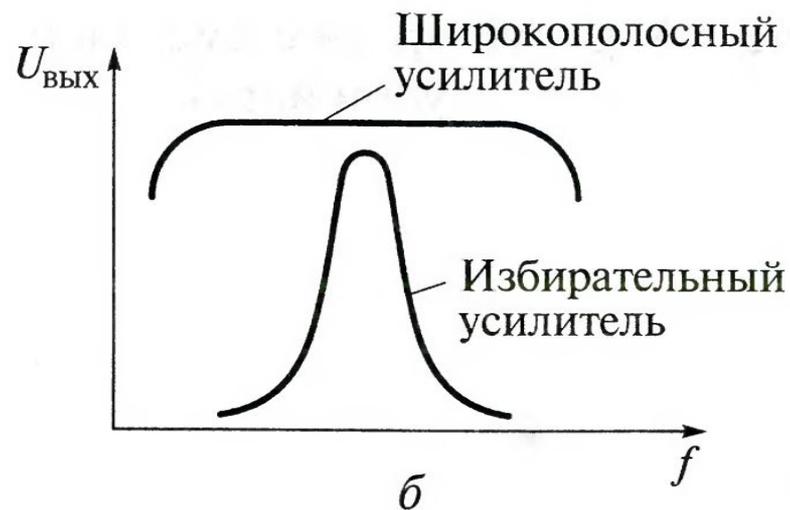
- амплитудная характеристика, которая представляет собой зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(U_{\text{ВХ}})$ . Для линейных усилителей это прямая, проходящая через начало координат;

- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(f)$  отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Реально в усилителях из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей различные частоты усиливаются неодинаково;

- фазово-частотная характеристика  $U_{\text{ВЫХ}} = \lambda(f)$  отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала;

- переходная характеристика отражает реакцию усилителя на единичный скачок входного напряжения. Переходная характеристика определяется по ее изображению на экране осциллографа при подаче на вход усилителя входного сигнала прямоугольной формы. Процесс изменения выходного сигнала может быть колебательным (кривая 1) либо апериодичным (кривая 2) (рис. 5.9, з).

# Характеристики усилителя



*a* — амплитудная; *б* — амплитудно-частотная; *в* — фазово-частотная; *г* — переходная

Важнейшими параметрами усилителя являются:

- коэффициенты усиления по току  $K_I$ , напряжению  $K_U$  и мощности  $K_P$ :

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}; \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}},$$

где  $I_{\text{ВХ}}$ ,  $I_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_{\text{ВХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $P_{\text{ВХ}}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}}$  — действующие значения токов, напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя:

- полоса пропускания усилителя  $2\Delta f$  (рис. 5.10) характеризует его частотные свойства. Измеряется на уровне 0,707 от  $K_{\text{max}}$ ,

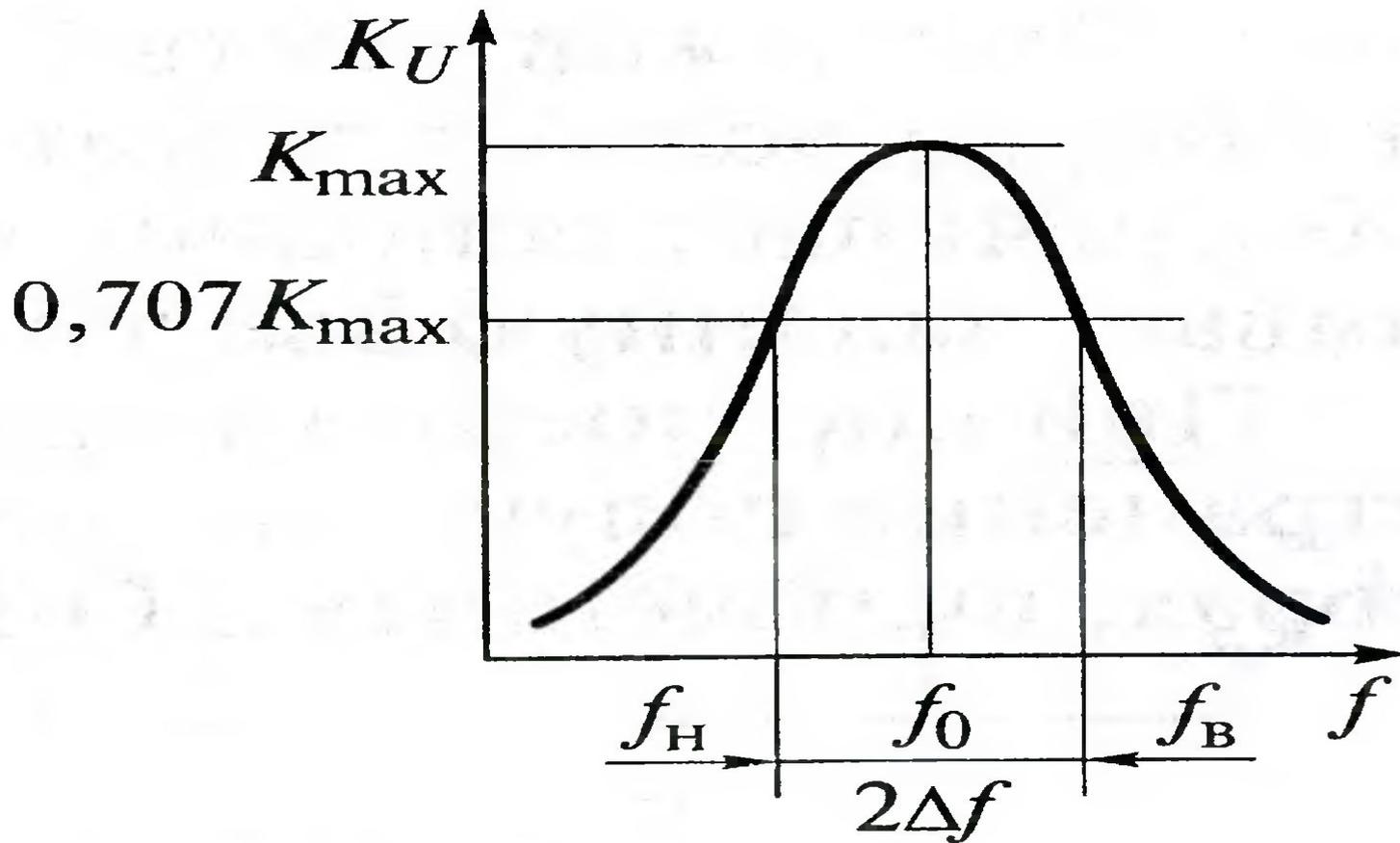
$$2\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}}.$$

Для наглядности в ряде случаев АЧХ строится в относительных единицах усиления:

$$N(f) = \frac{K(f)}{K_{\max}},$$

где  $K(f)$  — коэффициент усиления на частоте  $f$ ;  $K_{\max}$  — максимальный коэффициент усиления;

# Амплитудно-частотная характеристика усилителя



- входное и выходное сопротивления, которые необходимо учитывать при согласовании с источником входного сигнала и с нагрузкой. В общем случае значения входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией от частоты:

$$Z_{\text{ВХ}}(f) = U_{\text{ВХ}}(f)/I_{\text{ВХ}}(f); Z_{\text{ВЫХ}}(f) = U_{\text{ВЫХ}}(f)/I_{\text{ВЫХ}}(f);$$

• выходная мощность усилителя — мощность, которая выделяется на нагрузке;

• искажения сигналов в усилителе — отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала. Различают два вида искажений: статические (нелинейные) и динамические (линейные).

*Нелинейные искажения* возникают в усилителе за счет работы его на нелинейном участке ВАХ. Количественно нелинейные искажения оцениваются коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{\text{Н}} = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1},$$

где  $A_n$  — амплитуда  $n$ -й гармоники;  $A_1$  — амплитуда основной гармоники выходного сигнала.

*Линейные искажения* определяются АЧХ усилителя и количественно оцениваются коэффициентами частотных искажений на низких и высоких частотах.

Для получения высоких коэффициентов усиления в состав усилителя входит обычно несколько каскадов. Первым каскадом, как правило, является предварительный усилитель, затем идут промежуточный усилитель и усилитель мощности. Предварительный усилитель обеспечивает связь источника сигнала с усилителем. Он должен иметь большое входное сопротивление для того, чтобы не ослаблять входной сигнал. Промежуточный усилитель обеспечивает основное усиление, а усилитель мощности обеспечивает заданную выходную мощность.

При построении усилительных устройств наибольшее распространение получили каскады на биполярных и полевых транзисторах, включенных с ОЭ (ОИ) или с ОК (ОС).

Обратной связью (ОС) называется такая связь, при которой сигнал с выхода усилителя через электрическую цепь поступает на его входы. ОС изменяет свойства усилителя, поэтому она широко используется для получения его требуемых параметров.

В общем случае ОС в усилителе может быть положительной и отрицательной. *Отрицательной* называется *положительной*.

Если сигнал ОС по фазе совпадает с входным, то связь назы-

В этом случае:

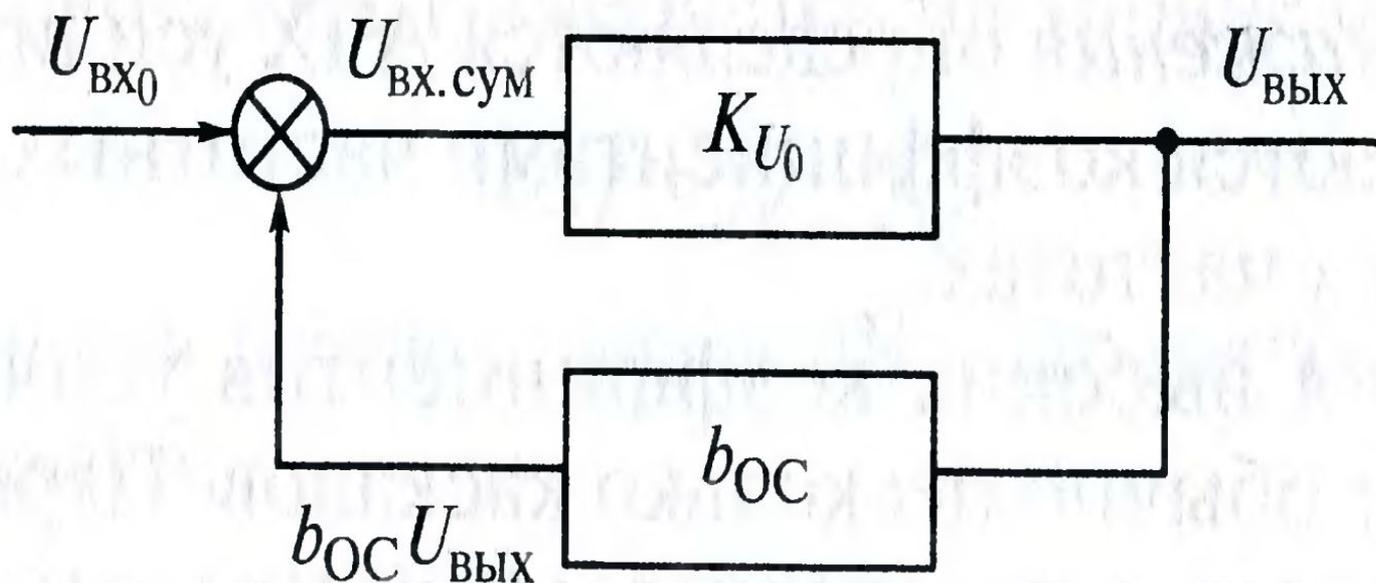
$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{U_0} U_{\text{ВХ.СУМ}}; U_{\text{ВХ.СУМ}} = U_{\text{ВХ}} + b_{\text{ОС}} U_{\text{ВЫХ}};$$

$$K_{U_{\text{ПОС}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}_0}} = \frac{K_{U_0}}{1 - b_{\text{ОС}} K_{U_0}},$$

где  $K_{U_0}$  — коэффициент усиления усилителя без ОС;  $K_{U_{\text{ПОС}}}$  — коэффициент усиления усилителя с положительной обратной связью (ПОС);  $b_{\text{ОС}}$  — коэффициент передачи в цепи ОС.

Полученное выражение показывает, что введение в усилитель ПОС увеличивает коэффициент усиления.

## Структурная схема усилителя с ОС



*Отрицательная обратная связь (ООС) возникает, если фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного составляет  $180^\circ$ :*

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{U_0} U_{\text{ВХ.СУМ}}; U_{\text{ВХ.СУМ}} = U_{\text{ВХ}} - b_{\text{ОС}} U_{\text{ВЫХ}};$$

$$K_{U_{\text{ООС}}} = \frac{K_{U_0}}{1 - b_{\text{ОС}} K_{U_0}}.$$

Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя. По способу получения сигнала ОС принято различать обратную связь по напряжению и по току

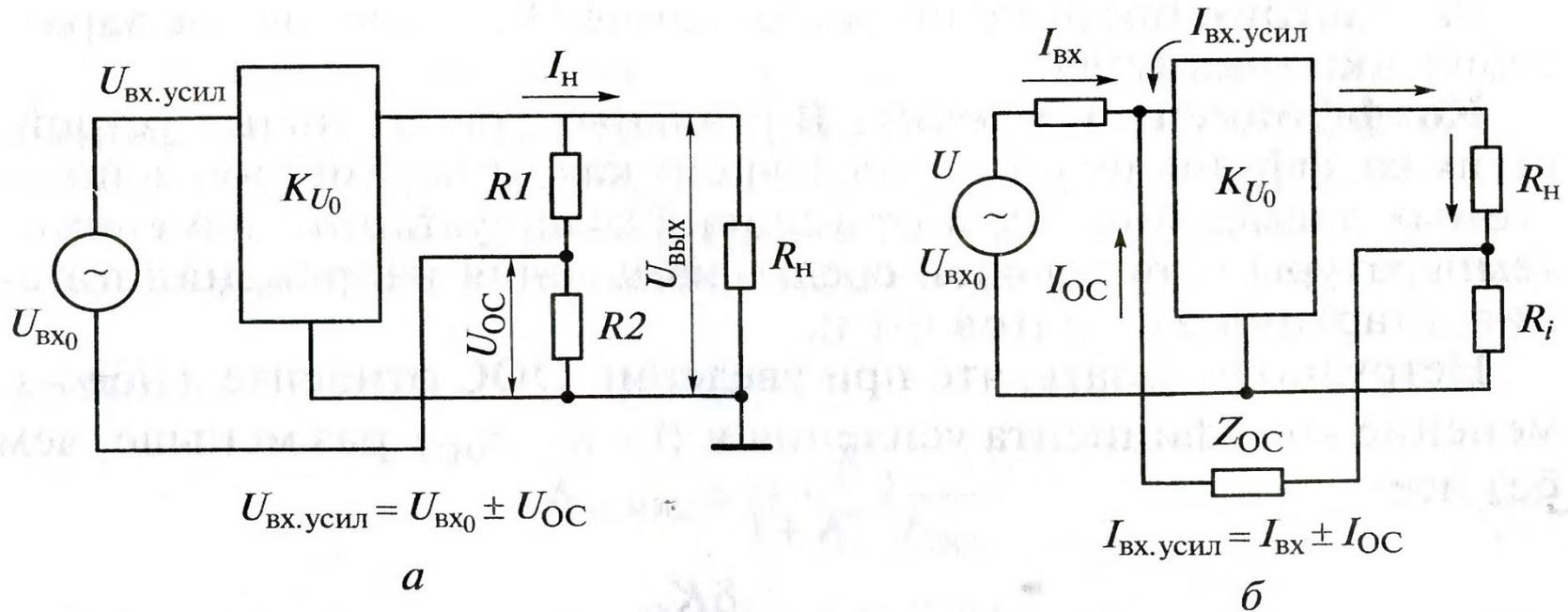


Рис. 5.12. Обратная связь по напряжению (а) и току (б)

Можно выделить четыре основные типа цепей ОС:

- последовательная по выходному напряжению;
- последовательная по выходному току;
- параллельная по выходному напряжению;
- параллельная по выходному току.

Каждая из указанных ранее цепей может осуществлять как положительную, так и отрицательную ОС.

В общем случае значение коэффициента передачи цепи ОС может как зависеть, так и не зависеть от частоты сигнала. В соответствии с этим различают частотозависимую и частотонезависимую ОС. Применение частотозависимых цепей ОС позволяет изменять параметры усилительного устройства только в требуемом диапазоне частот.

**Коэффициент усиления.** В реальных усилительных устройствах коэффициент усиления зависит как от параметров используемых элементов, так и от условий эксплуатации: изменения температуры окружающей среды, изменения напряжения питания, старения элементов и т. п.

$$\delta K_{U_0 OC} = \frac{\delta K_{U_0}}{1 + K_{U_0} b_{U_0}}.$$

**Полоса усиливаемых частот.** Введение цепи ООС всегда расширяет полосу усиливаемых частот усилителя в  $(1 + K_{U_0} b_{ОС})$  раз. В свою очередь, при введении ПОС полоса пропускания усилителя уменьшается в  $(1 - K_{U_0} b_{ОС})$  раз.

**Нелинейные искажения.** Введение в усилительное устройство ООС снижает коэффициент нелинейных искажений усилителя и повышает его помехоустойчивость.

Коэффициент нелинейных искажений определяется соотношением

$$K_{\text{н}} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}{U_{1m}},$$

где  $U_{im}$  — амплитуда  $i$ -гармоники.