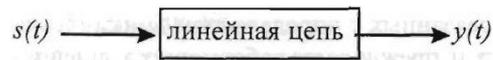


Дифференциальное уравнение и переходная функция в качестве независимой переменной имеют время, передаточная функция - комплексную переменную s , а амплитудно-фазовая частотная характеристика - угловую частоту ω .

Прохождение сигналов через линейную цепь. Рассмотрим линейную цепь, на которую воздействует сигнал $s(t)$. На выходе возникает реакция - выходной сигнал $y(t)$ (рис.).

Известно, что при воздействии на линейную цепь гармонического сигнала $s(t) = S m \cos(\omega t + \phi_s)$, на выходе цепи устанавливается сигнал, форма которого тоже гармоническая: $y(t) = Y m \cos(\omega t + \phi_Y)$. Гармонический сигнал - единственный сигнал, не изменяющий свою форму при прохождении через линейную электрическую цепь.



Пусть на линейную цепь воздействует сложный негармонический сигнал $s(t)$. Форма сложного сигнала при прохождении через цепь будет искажаться. Для расчетов искажений выходного сигнала $y(t)$ наиболее часто используются спектральные методы и их обобщения. Суть спектрального метода проста. Сложный сигнал с помощью рассмотренных выше спектральных разложений представляется в виде суммы гармонических колебаний. Затем находятся частичные реакции линейной цепи на каждый их гармонических входных сигналов. После этого, в соответствии с принципом суперпозиции результирующий выходной сигнал находится как сумма частичных реакций линейной цепи.

Спектральный метод анализа линейных цепей определяет два простых правила, которыми следует пользоваться при определении характера прохождения сигнала через эти цепи.

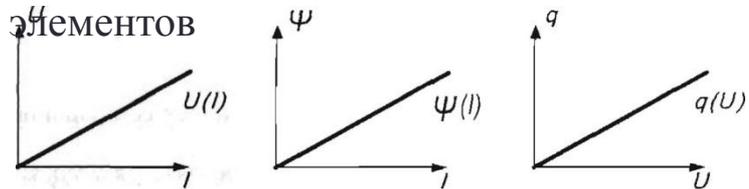
Во-первых, в зависимости от требований к форме выходного сигнала следует сравнить спектр входного сигнала и амплитудно-частотную характеристику цепи. Допустим, что требования к форме выходного сигнала достаточно высоки, тогда форма АЧХ должна быть такой, чтобы без затухания передавать все значимые гармоники входного сигнала.

Во-вторых, в результате сравнения спектра сигнала и АЧХ линейной цепи можно оценить форму выходного сигнала. В качестве примера рассмотрим прохождение прямоугольных импульсов через фильтр нижних частот.

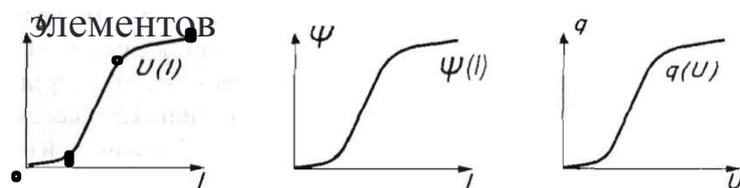
Прямоугольный импульс формируется набором нечетных гармоник, однако за формирование фронта и среза отвечают высокие гармоники, а за формирование вершины импульса - нижние гармоники. При прохождении сигнала через фильтр высокие гармоники подавляются, следовательно, в выходном сигнале уменьшится их амплитуда. Это приведет к тому, что фронты прямоугольных импульсов будут более пологими, а вершины не изменятся.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Характеристики линейных элементов

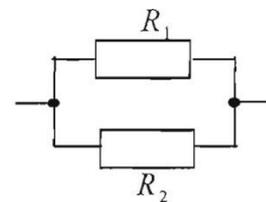
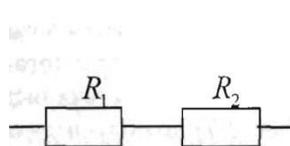
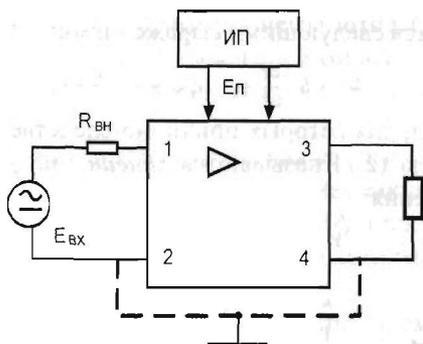


Характеристики нелинейных элементов

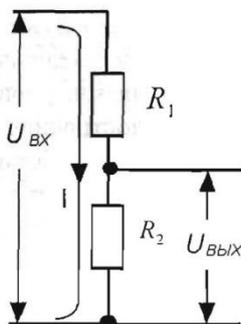


Усилителем называют устройство позволяющее преобразовывать входной сигнал в сигнал большей мощности (тока, напряжения) без существенного искажения его формы. При усилении тока или напряжения одновременно происходит усиление мощности.

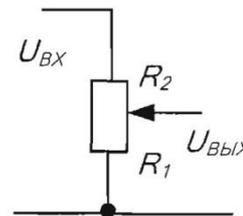
Структурная схема усиления электрических сигналов



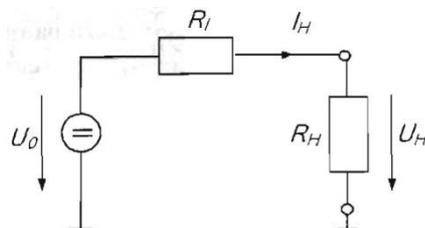
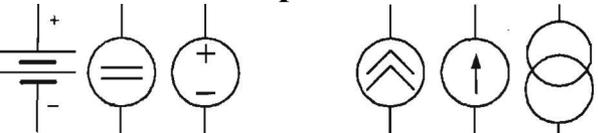
Делитель напряжения – аттенуатор



Регулируемый делитель напряжения



Источники напряжения и тока



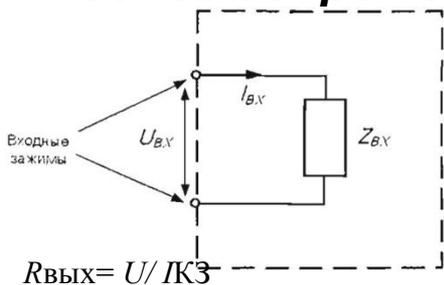
$$U_H = U_0 - I_H R_i$$

где U_0 - напряжение холостого хода (э.д.с. Источника),
 R_i - внутреннее сопротивление источника

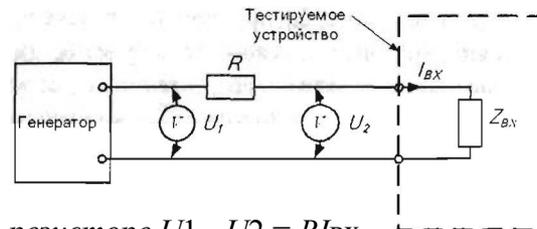
Закон Ома

Входное сопротивление

$$Z_{ВХ} = U_{ВХ} / I_{ВХ}, [Ом]$$



$$R_{ВЫХ} = U / I_{КЗ}$$



На резисторе $U_1 - U_2 = R I_{ВХ}$
 $I_{ВХ} = (U_1 - U_2) / R$ $R_{ВХ} = U_2 / I_{ВХ}$
 $R_{ВХ} = R U_2 / (U_1 - U_2) = R / (U_1 / U_2 - 1)$

U - это выходное напряжение холостого хода

U' - выходное напряжение на нагрузке R

падение напряжения на $R_{ВЫХ}$ при наличии нагрузки равно $U - U'$

выходной ток при наличии нагрузки равен U' / R

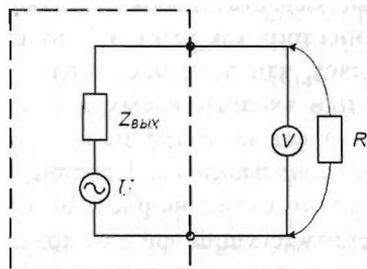
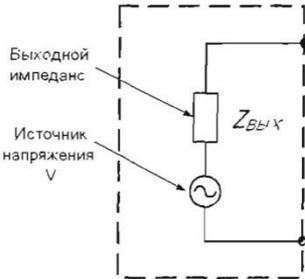
$$R_{ВЫХ} = R(U - U') / U'$$

Первый закон Кирхгофа

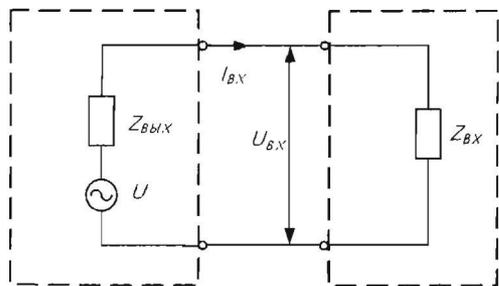
Второй закон Кирхгофа

Выходное

ие



Согласование сопротивлений для оптимальной передачи напряжения



для оптимальной передачи напряжения

$U_{ВХ}$ было почти равно U

$$U_{ВХ} = U R_{ВЫХ} / (R_{ВЫХ} + R_{ВХ})$$

$$U_{ВХ} \approx U,$$

$$R_{ВХ} \gg R_{ВЫХ}$$



Источник сигнала (например, микрофон)

Нагрузка (например, вход усилителя)

Согласование сопротивлений для оптимальной передачи мощности

$$R_{ВХ} = R_{ВЫХ}$$

$$Z_{ВХ} = Z_{ВЫХ}$$

$$R_{ВХ} = R_{ВЫХ}$$

$$X_{ВХ} = -X_{ВЫХ}$$

Согласование сопротивлений для оптимальной передачи тока

Максимум входного тока $I_{вх}$, когда полное сопротивление в цепи выбирается возможно меньшим
При фиксированном $R_{вых}$ следует стремиться к возможно меньшему значению $R_{вх}$

Классификация и основные параметры усилителей

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



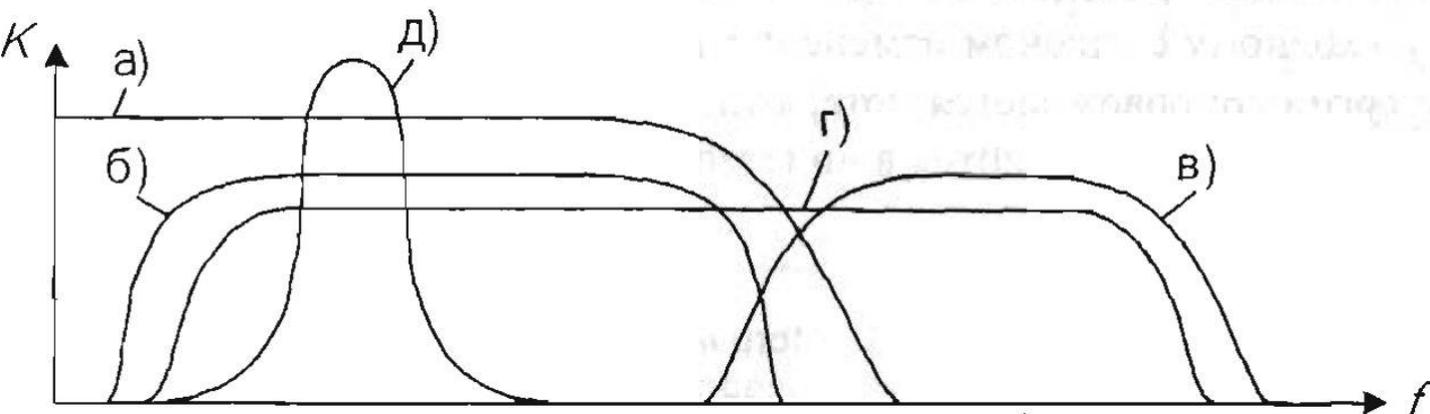
По роду усиливаемого сигнала - усилители постоянного тока (УПТ), усилители переменного тока

По частоте усиливаемого сигнала – УНЧ, УВЧ, ШПУ, ИУ

По виду усиливаемого сигнала - усилители гармонических и импульсных сигналов

По функциональному назначению - усилители напряжения, тока и мощности

По виду соединительных цепей усилительных каскадов - усилители с гальванической (непосредственной) связью, усилители с RC - связями, усилители с индуктивной (трансформаторной) связью



а) УПТ, б) УНЧ, в) УВЧ, г) ШПУ, д) ИУ

Основные характеристики и параметры усилителей

Коэффициент усиления является основным количественным параметром усилителя.

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

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}, \quad K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}, \quad K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$$

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

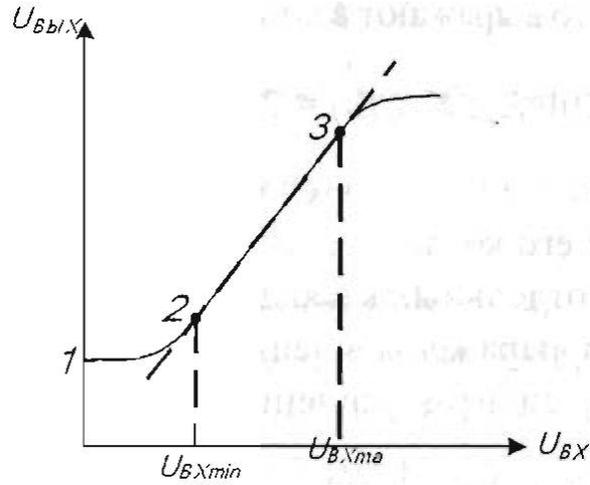
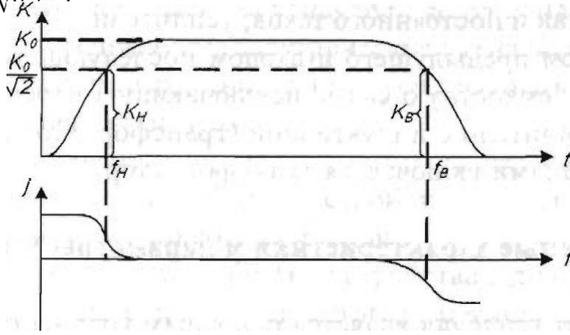
Для многокаскадного усилителя $K = K_1 K_2 \dots K_N$ $K (\text{дБ}) = K_1 (\text{дБ}) + K_2 (\text{дБ}) + \dots + K_N (\text{дБ})$

АЧХ и ФЧХ усилителя

АЧХ - зависимость модуля коэффициента усиления от частоты,

ФЧХ - зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжением от частоты.

Частоты f_H и f_B , определяемые при коэффициенте усиления $K_0 / \sqrt{2}$, определяют полосу пропускания усилителя $\Delta f = f_B - f_H$.



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

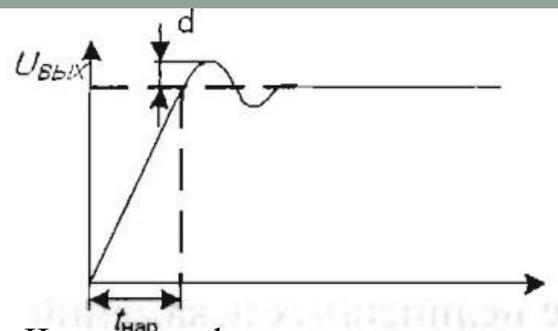
Точка 1 соответствует сигналу шумов, измеряемому при нулевом входном сигнале

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 $D = U_{\text{вхmax}} / U_{\text{вхmin}}$.

Основные характеристики и параметры усилителей



Переходная характеристика усилителя - это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии. Эта характеристика используется для определения динамических свойств устройства. Численно по данной характеристике определяют два параметра: время нарастания выходного напряжения $t_{нар}$ и перерегулирование выходного напряжения (выброс фронта импульса) δ .

Частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя однозначно связаны друг с другом. Области верхних частот соответствует переходная характеристика в области малых времен, области низких частот - переходная характеристика в области больших времен.

Коэффициент полезного действия (КПД):

$\eta = P_{вых} / P_0$ где P_0 - мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

КПД характеризует экономичность усилителя. Особенно важен для мощных выходных каскадов.

Входное и выходное сопротивление. Их значения учитываются при согласовании усилителя с источником входного сигнала (датчиком) 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.

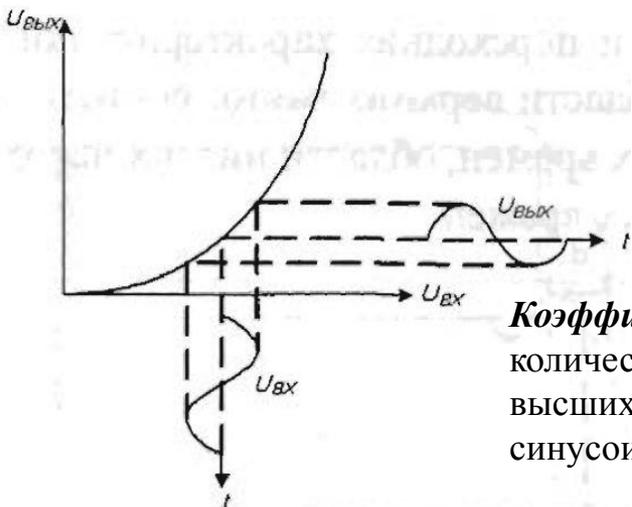
Выходная мощность усилителя - это та часть мощности, которая может быть выделена в нагрузке длительное время.

Основные характеристики и параметры усилителей

Искажение сигналов в усилителе связано:

1. с нелинейной зависимостью выходного сигнала от входного, обусловленной нелинейностью статических ВАХ применяемых элементов,
2. с зависимостью коэффициента передачи усилителя от частоты.

Поэтому при анализе работы усилителей рассматривают два вида искажений выходного сигнала по отношению к входному: нелинейные и линейные (частотные и фазовые), в результате которых меняется как форма, так и частотный спектр усиливаемого сигнала.



Причина возникновения нелинейных искажений:

При воздействии на вход усилителя синусоиды выходной сигнал кроме входной гармоники будет содержать ряд дополнительных гармоник. Появление этих гармоник обусловлено зависимостью коэффициента усиления от величины входного сигнала. Следовательно, появление нелинейных искажений всегда связано с появлением на выходе дополнительных, отсутствующих на входе гармонических составляющих.

Коэффициент гармоник (коэффициент нелинейных искажений) K_{Γ} для количественной оценки величины нелинейных искажений. Отношение величины высших гармоник к основной в выходном сигнале, на вход усилителя подается синусоида:

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

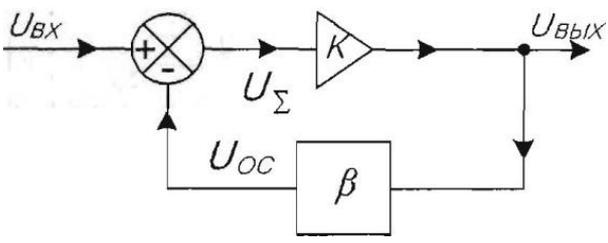
где $A_2..A_n$ - действующие значения высших гармоник выходного сигнала, начиная со второй; A_1 - действующее значение первой (основной) гармоники выходного сигнала.

Коэффициент частотных искажений численно равен

$M = K_0/K_f$, где K_f - модуль коэффициента усиления на заданной частоте.

Частотные и фазовые искажения особенно проявляются при усилении сложного сигнала, содержащего ряд гармоник. Эти гармоники усиливаются неодинаково, в результате чего происходит искажение формы выходного сигнала. Фазовые искажения проявляются также при сложном входном сигнале, при этом происходит фазовый сдвиг различных гармоник, что приводит к искажению выходного сигнала.

Обратная связь в усилителях



Обратной связью в усилителях называют процесс передачи сигнала из выходной цепи во входную.

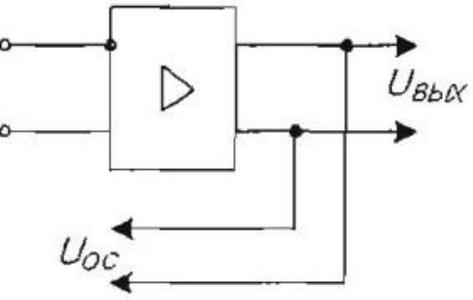
Электрические цепи, обеспечивающие передачу сигнала из выходной цепи во входную, называются цепями обратной связи.

Выходной сигнал усилителя (в виде напряжения $U_{вых}$) через цепь обратной связи частично или полностью подается к схеме сложения. В ней происходит вычитание сигнала ОС $U_{ос}$ из входного сигнала $U_{вх}$. В результате этого на вход усилителя поступает сигнал, равный разности входного сигнала и сигнала обратной связи U_{Σ} .

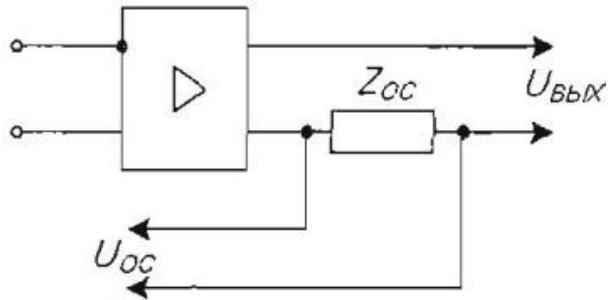
Петлей обратной связи называют замкнутый контур, включающий в себя цепь ОС и часть усилителя между точками ее подключения. В качестве цепей ОС часто используют пассивные цепи, коэффициенты преобразования и частотные свойства которых существенно влияют на свойства усилителей.

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

Обратную связь называют отрицательной, если ее сигнал вычитается из входного сигнала, и положительной, если сигнал ОС суммируется со входным. При отрицательной ОС (ООС) коэффициент усиления усилителя уменьшается, а при положительной (ПОС) - увеличивается.



а)

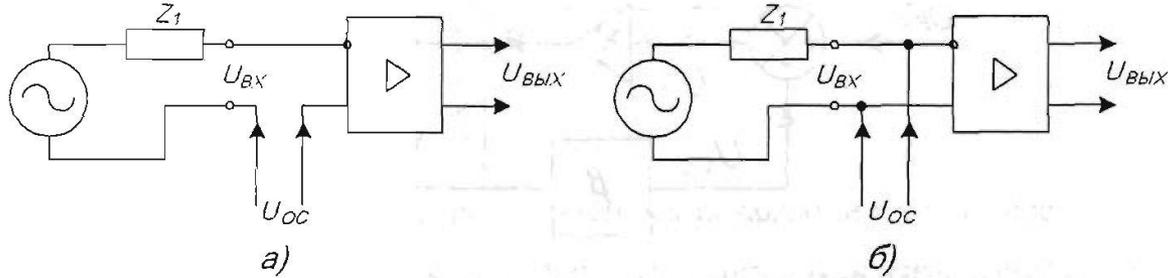


б)

В зависимости от способа получения сигнала различают ОС по напряжению (рис. а), когда снимаемый сигнал ОС пропорционален напряжению выходной цепи; ОС по току (рис. б), когда снимаемый сигнал пропорционален току выходной цепи.

Из-за схемных особенностей усилителя и цепи ОС возможны варианты, когда ОС существует только для медленно изменяющейся составляющей выходного сигнала, либо только для переменной составляющей его, либо для всего выходного сигнала. В таких случаях говорят, ОС реализована по постоянному, по переменному, а также по постоянному и переменному токам.

Обратная связь в усилителях



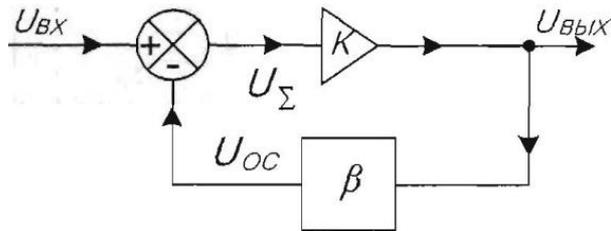
По способу введения сигнала обратной связи различают: последовательную схему введения ОС (рис. а), когда напряжение сигнала ОС суммируется со входным напряжением; параллельную схему введения ОС (рис. б), когда ток цепи ОС суммируется с током входного сигнала.

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

$$\beta_U = U_{oc} / U_{ввх}, \quad \beta_I = I_{oc} / I_{ввх}$$

а также коэффициент петлевого усиления $K\beta$ и $(1 - K\beta)$ - глубину обратной связи.

Влияние ОС на параметры усилителей



Коэффициент усиления. Рассмотрим усилитель, обладающий конечным коэффициентом усиления и охваченный петлей ООС, образующий неинвертирующий усилитель

Коэффициент усиления усилителя при разомкнутой цепи обратной связи равен K , а благодаря обратной связи из входного напряжения вычитается часть выходного ($\beta U_{\text{ВЫХ}}$). На вход усилителя поступает напряжение, равное $U_{\text{ВХ}} - \beta U_{\text{ВЫХ}}$. Выходное напряжение больше входного в K раз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K(U_{\text{ВХ}} - \beta U_{\text{ВЫХ}})$$

и коэффициент усиления по напряжению при замкнутой цепи ООС равен $K_{\text{ООС}} = K/(1+\beta K)$.

Обратная связь оказывает влияние практически на все основные характеристики усилителя. Введение ООС повышает стабильность основных характеристик усилителя. Если $\delta_K = \Delta K/K$ - относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя, где ΔK - абсолютная нестабильность, то относительная нестабильность коэффициента усиления усилителя, охваченного ООС,

$$\delta_{K_{\text{ООС}}} = \Delta K_{\text{ООС}} / K_{\text{ООС}} = \delta_K / (1+\beta K).$$

Следовательно, в результате воздействия ООС нестабильность коэффициента усиления уменьшается в $/(1+\beta K)$ раз.

При $\beta K \gg 1$ коэффициент усиления усилителя, охваченного глубокой ООС, равен $K_{\text{ООС}} \approx 1/\beta$.

-> Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью определяется только обратной связью и не зависит от параметров самого усилителя.

Применение ООС обеспечивает повышение стабильности коэффициента усиления при изменении параметров элементов, при смене активных элементов, изменении напряжения питания и т.д., снижение нелинейности, которая определяется изменениями коэффициента усиления в зависимости от уровня сигнала и собственных помех, возникающих в той части усилителя, которая охвачена ООС.

Отрицательная обратная связь позволяет уменьшить все воздействия на усилитель, охваченный ООС, но не компенсирует воздействий на цепь обратной связи. Поэтому в качестве элементов цепи ООС рекомендуется использовать резистивные делители, выполненные на высокостабильных резисторах.

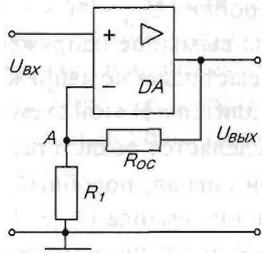
ООС оказывает влияние на входное и выходное сопротивление усилителя.

Последовательная ООС увеличивает входное сопротивление, что является положительным фактором:

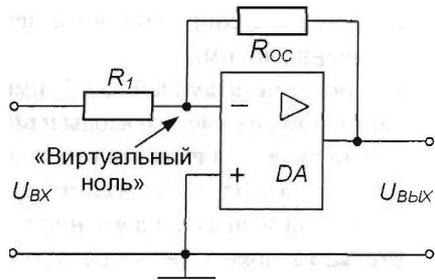
$Z_{\text{ВХОС}} = Z_{\text{ВХ}}(1+\beta K)$, где $Z_{\text{ВХОС}}$, $Z_{\text{ВХ}}$ — входное сопротивление усилителя соответственно с ООС и без ООС.

Влияние ОС на параметры усилителей

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



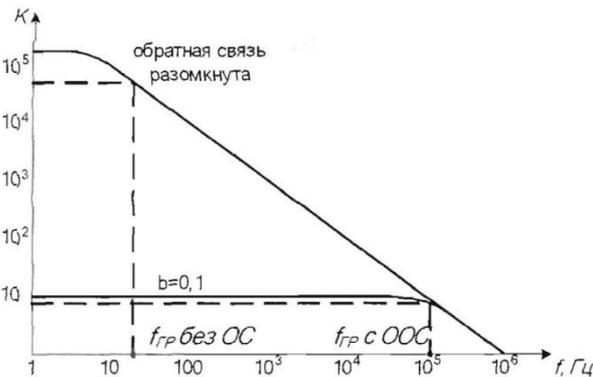
В качестве примера последовательной ООС схема неинвертирующего усилителя на ОУ. Входное сопротивление этой схемы определяется по формуле $Z_{ВХОС} = Z_{ВХ}(1 + \beta K)$. Параллельная ООС в схеме инвертирующего усилителя на ОУ (рис.). Входное сопротивление при введении ООС уменьшилось в $(1 + \beta K)$ и равно R_1 . Введение ООС по напряжению уменьшает выходное сопротивление усилителя $Z_{ВЫХОС} = Z_{ВЫХ} / (1 + \beta K)$, а ООС по току увеличивает $Z_{ВЫХ}$ на то же значение. Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя содержат ООС по напряжению.



Влияние ООС на частотную характеристику усилителей.

Никакой усилитель не дает один и тот же коэффициент усиления на всех частотах. Коэффициент усиления любого усилителя начинает падать на высоких частотах, главным образом из-за его внутренней паразитной емкости. Это вызывает частотные искажения. ООС может скорректировать частотную характеристику в пределах интервала частот, на котором коэффициент усиления без ОС остается много большим, чем усиление с обратной связью, в этих пределах применимо равенство $K_{ООС} = 1/\beta$ и усиление не зависит от частоты.

На рис. приведены частотные характеристики усилителя на основе К140УД7. Верхняя кривая относится к разомкнутой петле обратной связи. Быстрое уменьшение усиления на высоких частотах введено умышленно с помощью внутреннего конденсатора из соображений устойчивости. Кривая, расположенная ниже, показывает, как ООС выравнивает частотную характеристику за счет усиления: приведена характеристика усилителя с обратной связью и она достаточно ровная вплоть до области частот, где коэффициент усиления с ООС достигает кривой, относящейся к случаю разомкнутой петли ОС.



□ ООС расширяет полосу пропускания усилителя. Так как АЧХ усилителя однозначно определяет ФЧХ, то ООС оказывает благотворное влияние на нее, а соответственно уменьшаются частотные и фазовые искажения в схеме.

□ 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.

Уменьшение коэффициента усиления может быть скомпенсировано введением дополнительных усилительных каскадов.