

Обратная связь в усилительных устройствах

Явление передачи (частичной или полной) выходного сигнала на вход устройства называется **обратной связью**.

Структурная схема в общем виде усилителя с обратной связью, приведена на рис. 1.

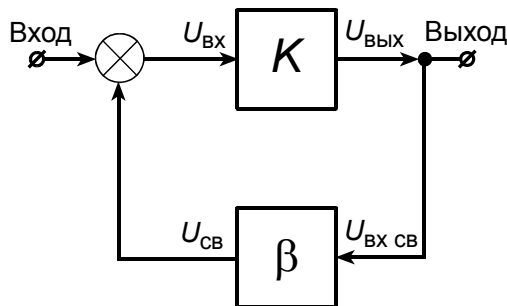


Рис. 1.

K – усилитель без обратной связи, коэффициент усиления которого

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

β – цепь обратной связи (усилитель обратной связи) с коэффициентом передачи

$$\beta = \frac{U_{\text{СВ}}}{U_{\text{ВХ СВ}}}.$$

$U_{\text{ВХ СВ}}$ – входное напряжение цепи обратной связи, которое может быть равно либо всему значению $U_{\text{ВЫХ}}$ либо части $U_{\text{ВЫХ}}$.

$U_{\text{СВ}}$ – выходное напряжение цепи обратной связи, поступающее на вход усилителя.

В общем случае все параметры (напряжения, коэффициенты передачи) являются комплексными, но в рабочем диапазоне частот их зачастую полагают действительными числами.

Виды обратной связи (общий случай)

1. Внутренняя обратная связь.

Обусловлена физическими свойствами и конструкцией реальных усилительных элементов (биполярный транзистор, однопереходной транзистор (двухбазовый диод), диностор, тиристор, туннельный диод и т. д.).

2. Паразитная обратная связь

Возникает из-за наличия связи между входными и выходными цепями устройства через паразитные емкости и индуктивности. Данная связь является весьма вредной, поскольку сильно ухудшает свойства усилителя и практически не поддается учету. Такую связь всеми силами стараются ослабить, тщательно продумывая конструкцию усилителя.

3. Полезная обратная связь (ОС).

Это специально создаваемая ОС через специально применяемые элементы связи с целью сделать большинство (а лучше все) параметров усилителя лучше!

В данном разделе будем рассматривать влияние ОС на свойства (параметры) усилителя.

В качестве цепей обратной связи применяются, как правило RC - цепи, т. е. пассивные цепи.

Введем несколько важных понятий.

Замкнутый контур, включающий в себя цепь ОС и часть усилителя, которую данная цепь охватывает, называется *петлей обратной связи*. Петля ОС может охватывать как весь усилитель, так и один или несколько каскадов многокаскадного усилителя.

ОС может быть организована как по постоянной составляющей сигнала, так и по переменной, в этих случаях её называют *ОС по постоянному току* и *ОС по переменному току*, соответственно.

Если ОС организована только в узком диапазоне частот, то она называется *частотно – избирательной ОС*.

Если $U_{св}$ совпадает по фазе со входным напряжением, то такая связь называется *положительная ОС (ПОС)*.

Если $U_{св}$ противофазно входному напряжению, то связь называется *отрицательной обратной связью (ООС)*.

Наибольшее распространение на практике получила ООС, улучшающая почти все основные параметры усилителя. ПОС применяется при создании схем различных генераторов.

Классификация видов ОС в зависимости от способа получения сигнала ОС

В зависимости от способа получения сигнала обратной связи $U_{вх св}$ различают обратную связь по напряжению, по току, комбинированную.

1. Обратная связь по напряжению.

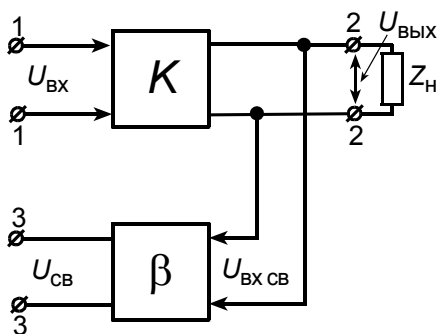


Рис. 2

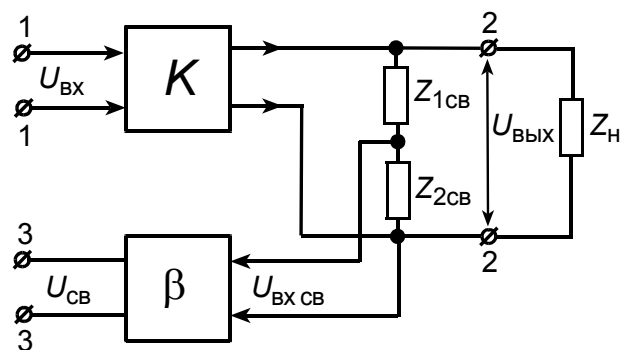


Рис. 3

На вход цепи обратной связи может поступать либо всё выходное напряжение (рис. 2), либо его часть (рис. 3). Главный признак рассматриваемой связи – она исчезает при коротком замыкании (КЗ) на выходе.

2. Обратная связь по току.

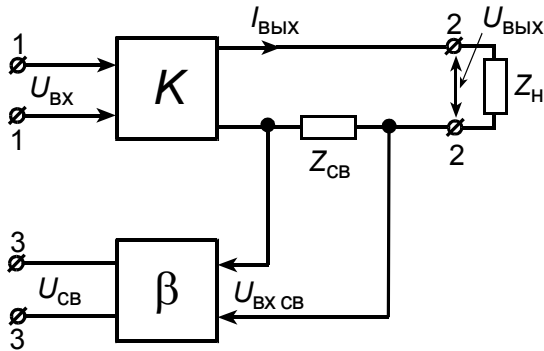


Рис. 4

Для получения сигнала обратной связи последовательно с сопротивлением нагрузки включено дополнительное сопротивление $Z_{СВ}$ (рис. 4). $U_{ВХ\ СВ}$ прямопропорционально $I_{ВЫХ}$. Главный признак данной связи – исчезает при холостом ходе (ХХ).

3. Комбинированная ОС.

Напряжение обратной связи пропорционально и выходному току и выходному напряжению. Главный признак связи – сохраняется при КЗ и при ХХ на выходе.

Классификация видов ОС в зависимости от способа подключения цепи ОС к входу

1. Последовательная.

В данном случае $U_{СВ}$ включается последовательно с сигналом, действующим на выходе источника сигнала (рис. 5), следовательно, связь пропадает при разрыве цепи источника сигнала. Очевидно, что $U_{ВХ} = U \pm U_{СВ}$ – алгебраическое сложение по второму закону Кирхгофа. Знак плюс в выражении соответствует положительной ОС, а минус – отрицательной.

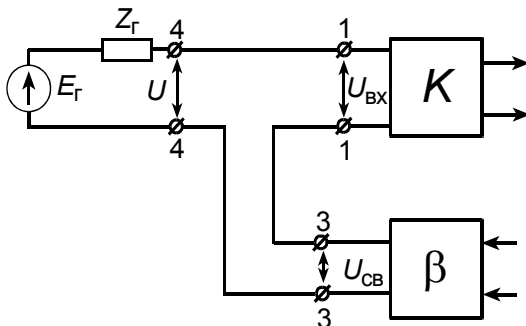


Рис. 5

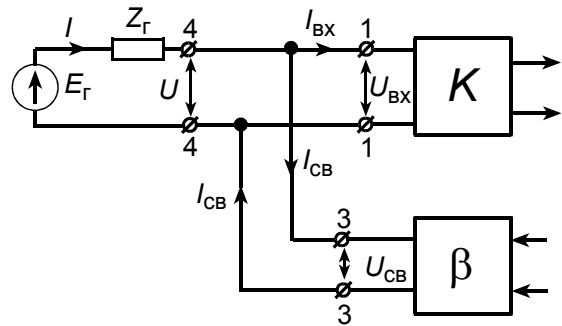


Рис. 6

2. Параллельная.

На рис. 6 видно, что напряжение связи $U_{\text{св}}$ подводится к входу усилителя, т. е. следовательно, признаком данной связи является то, что она пропадает при закорачивании источника входного сигнала. В данном случае происходит алгебраическое сложение в соответствии с законом Кирхгофа:

$$I_{\text{вх}} = I \pm I_{\text{св}}.$$

Знак в последнем выражении зависит от типа связи.

Влияние обратной связи на свойства усилительных каскадов

I. Влияние ОС на коэффициент усиления.

Рассмотрим влияние обратной связи на коэффициент усиления на примере усилителя с последовательной обратной связью по напряжению (рис. 7).

В общем случае все параметры усилителя носят комплексный характер, однако в рабочей полосе частот их можно полагать действительными числами. Усилитель и цепь ОС являются линейными.

При наличии ОС под коэффициентом усиления по напряжению будем понимать:

$$K_{\text{ос}} = U_{\text{вых}} / U,$$

где U – напряжение на зажимах источника сигнала.

Введём новое обозначение для напряжения на выходе цепи обратной связи

$$U_{\text{св}} = U_{\text{ос}}.$$

С учётом этого перепишем выражение для коэффициента передачи цепи обратной связи

$$\beta = U_{\text{св}} / U_{\text{вх св}}.$$

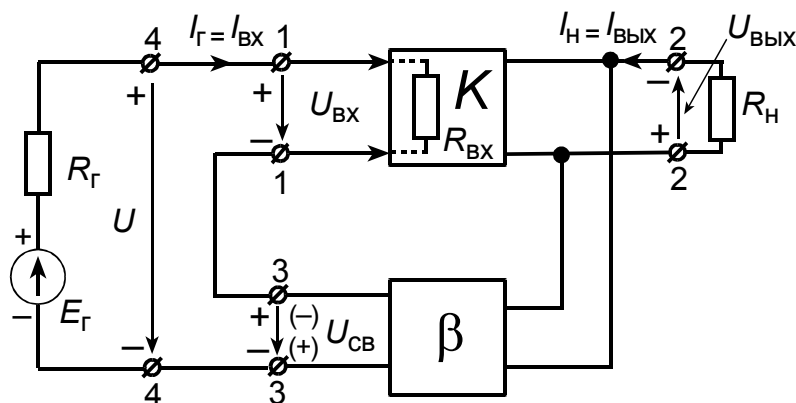


Рис. 7

Введём новое понятие – петлевое усиление:

$$\beta K = \frac{U_{oc}}{U_{вых}} \cdot \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{oc}}{U_{вх}}.$$

Полярность E_r определяет полярности напряжений U и $U_{вх}$ (такая же как у E_r). Полярность U_{oc} зависит от вида связи. При отрицательной обратной связи U_{oc} противофазно E_r , U и $U_{вх}$, а при положительной U_{oc} синфазно с ними.

1. Последовательная ООС

Для отрицательной обратной связи полярность U_{oc} на рис. 7 показана без скобок. Связь будет отрицательной в том случае, если выходное напряжение противофазно входному. Это возможно в том случае если сам усилитель инвертирует выходной сигнал, а цепь обратной связи составлена из резисторов и фазы не меняет.

По второму закону Кирхгофа для входной цепи справедливо

$$U = U_{вх} + U_{oc} \Rightarrow U_{вх} = U - U_{oc}.$$

Видно, что использование ООС уменьшает входное напряжение усилителя. Тогда

$$K_{oc} = \frac{U_{вых}}{U} = \frac{U_{вых}}{U_{вх} + U_{oc}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх} \left(1 + \frac{U_{oc}}{U_{вх}}\right)} = \frac{K}{1 + \beta K},$$

где K_{oc} – коэффициент усиления усилителя с ОС; K – коэффициент усиления без ОС.

Из последнего выражения следует, что использование ООС вызывает уменьшение коэффициента усиления усилителя в $(1 + \beta K)$ раз по сравнению с его значением без ОС.

Выражение $(1 + \beta K)$ принято называть глубиной обратной связи. Если $\beta K \gg 1$, то единицей в знаменателе можно пренебречь, и тогда

$$K_{oc} \cong \frac{K}{\beta K} = \frac{1}{\beta}.$$

Видно, что K_{oc} зависит только от свойств цепи обратной связи, а не от свойств усилителя.

I. Последовательная ПОС.

Для того чтобы ОС стала ПОС, нужно изменить полярность U_{oc} (полярность на рисунке - в скобках).

Для входной цепи справедливо по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{oc} + \dot{U}.$$

Видно, что ПОС увеличивает входное напряжение.

Воспользуемся выражением для коэффициента ОС, полученным ранее:

$$K_{oc} = \frac{(-)K}{1 + (-)\beta \cdot (-)K}.$$

Поскольку в нашем случае связь положительная, коэффициент усиления самого усилителя должен быть действительным числом, т. е. вместо $(-)K$ в этом выражении надо использовать $(+)K$:

$$K_{oc} = \frac{K}{1 - \beta \cdot K}.$$

Видно, что коэффициент усиления усилителя с ПОС возрастает по сравнению со значением без ОС. данное возрастание существенно зависит от величины $\beta \cdot K$. При приближении $\beta \cdot K \rightarrow 1$ коэффициент усиления $K_{oc} \rightarrow \infty$ и усилитель самовозбуждается, превращаясь в генератор.

Данный режим является запрещенным для усилительных устройств.

При самовозбуждении усилитель теряет работоспособность, поскольку паразитный входной сигнал существенно превышает полезный.

В данном случае условием самовозбуждения усилителя является равенство $\beta \cdot K \geq 1$.

ПОС специально используется в генераторах.

II. Влияние последовательной ООС на стабильность коэффициента усиления.

В общем случае значение коэффициента усиления усилителя весьма сильно меняется под воздействием внешних дестабилизирующих факторов:

1. температура окружающей среды;
2. влажность;
3. разброс параметров;
4. старение элементов;
5. замена компонентов при ремонте.

В некоторых случаях к стабильности коэффициента усиления предъявляются весьма жесткие требования, например, в измерительных устройствах нестабильность может составлять лишь доли процента.

Стабилизация коэффициента усиления усилителя осуществляется, как правило, с помощью последовательной ООС по напряжению.

Механизм стабилизации:

Под действием дестабилизирующих факторов:

$$U_{\text{вых}} \uparrow \Rightarrow \uparrow U_{\text{ос}} = \beta \cdot U_{\text{вых}} \uparrow \Rightarrow \downarrow U_{\text{вх}} = U - U_{\text{ос}} \uparrow \Rightarrow \downarrow U_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{вх}} \downarrow.$$

Такой механизм имеет место при эмиттерной стабилизации по постоянному току.

Видно, что наличие последовательной ООС по напряжению вызывает стабилизацию выходного напряжения усилителя, а следовательно и коэффициент усиления всего тракта усиления.

Известно, что при наличии последовательной ООС по напряжению выражение для коэффициента усиления определяется выражением:

$$K_{\text{ос}} = \frac{(-)K}{1 + \beta \cdot K}; \text{ если } \beta \cdot K \gg 1, \text{ то } K_{\text{ос}} \cong \frac{(-)K}{\beta \cdot K} = (-)\frac{1}{\beta}.$$

Минус говорит о том, что переворачивается фаза $U_{\text{вх}}$.

Очевидно, что чем больше $\beta \cdot K$, тем выше стабильность коэффициента усиления усилителя. Видно, что $K_{\text{ос}}$ будет определяться лишь коэффициентом передачи цепи ОС - β , который является весьма стабильной величиной в случае, когда цепь ОС составлена только из пассивных элементов, например, резисторов.

Другое пояснение. Т.к. усилитель строится из активных элементов (транзисторов, ОУ), ток сильно изменяется по действием

дестабилизирующих факторов. Но при $\beta K \gg 1$, $K_{\text{ос}}$ определяется только β .

Если цепь ОС составлена из высокостабильных элементов (резисторов, конденсаторов), то и $K_{\text{ос}}$ будет весьма стабильной величиной.

Тенденция: чем выше стабильность коэффициента усиления $K_{\text{ос}}$, тем меньше его величина!

II. Влияние последовательной ООС на входное сопротивление усилителя.

(Схема соответствует рассмотренной в п. I.1)

Под входным сопротивлением усилителя без ОС понимают сопротивление, нагружающее источник сигнала на клеммах (4-4), т. е.

$$\underline{z}_{ex} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\dot{I}_{ex}}.$$

При наличии ОС под входным сопротивлением усилителя понимается то же самое сопротивление, нагружающее источник сигнала на зажимах (4-4)

$$\underline{z}_{exoc} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_\Gamma} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_{ex}}.$$

При последовательной ООС по напряжению по второму закону Кирхгофа для входной цепи справедливо:

$$\dot{U} = \dot{U}_{ex} + \dot{U}_{oc}.$$

Перепишем выражение для входного сопротивления с учетом полученного выражения:

$$\underline{z}_{exoc} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_{ex}} = \frac{\dot{U}_{ex} + \dot{U}_{oc}}{\dot{I}_{ex}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\dot{I}_{ex}} \cdot \left(1 + \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{ex}}\right) = \underline{z}_{ex} \cdot \left(1 + \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{вых}} \cdot \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{ex}}\right) = \underline{z}_{ex} \cdot (1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}).$$

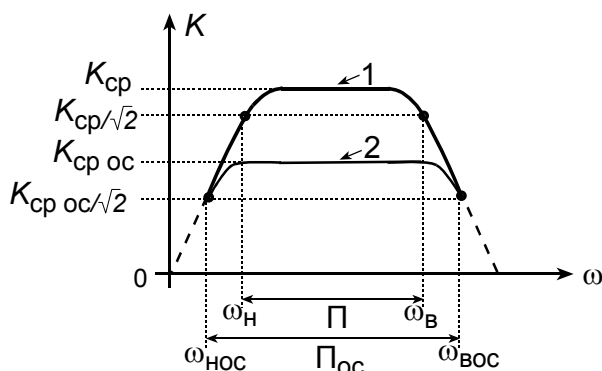
Если цепь ОС выполнена из пассивных элементов, то β является положительным действительным числом, т. е. модулем.

При составлении уравнения по второму закону Кирхгофа для входной цепи знак коэффициента передачи учтен, т.к. рассматривается именно ООС по напряжению последовательная. Следовательно, в выражении в скобках вместо комплексов можно поставить модули: $\dot{\beta} \rightarrow \beta$, $\dot{K} \rightarrow K$, тогда

$$\underline{z}_{exoc} = \underline{z}_{ex} \cdot (1 + \beta \cdot K).$$

Видно, что последовательная ООС по напряжению увеличивает входное сопротивление усилителя в глубину ОС, что очень хорошо.

Исследования показали, что любая последовательная ООС (и по току и по напряжению) увеличивает входное сопротивление, а параллельная, наоборот, уменьшает.



III. Влияние последовательной частотно – независимой ОС на частотные искажения усилителя.

АЧХ усилителя имеет вид:

Рис. 10.

На верхних и нижних частотах наблюдается завал. Известно, что K_{oc} определяется выражением: $K_{oc} = \frac{(-)K}{1 + \beta \cdot K}$.

Видно, что во всем диапазоне частот коэффициент усиления уменьшается в глубину связи.

Глубина связи есть функция коэффициента усиления усилителя без ОС: чем больше K , тем больше $(1 + \beta \cdot K)$. И, следовательно, наблюдается большее снижение коэффициента усиления K_{oc} : $K \uparrow \Rightarrow (1 + \beta \cdot K) \uparrow \Rightarrow K_{oc} \downarrow$.

Поэтому характеристика 2 лежит ниже 1.

На краях полосы пропускания, где наблюдается снижение коэффициента усиления усилителя K_{oc} , глубина ОС ослабевает, и снижение коэффициента усиления получается меньше, чем на средних частотах. Это приводит к существенному расширению полосы пропускания усилителя с ОС по сравнению с усилителем без ОС.

Другими словами, введение последовательной ООС ведет к уменьшению частотных искажений.

ООС в усилителе способствует уменьшению выходного сопротивления, снижает собственные помехи и нелинейные искажения, т.е. влияет положительно на свойства и характеристики усилителя.

Устойчивость усилителей с ОС.

Для улучшения большинства параметров усилителя в большинстве случаев широко используется ООС различного типа. Данная связь в рабочей полосе частот рассчитывается как «отрицательная», на краях частотного диапазона, т.е. в области верхних и нижних частот паразитные параметры создают дополнительные фазовые сдвиги, в результате чего ООС может превратиться в ПОС. В этом случае усилитель самовозбуждается, т.е. превращается в автогенератор вырабатывающий самопроизвольное паразитное напряжение. Работоспособность усилителя нарушается, поскольку весь усилительный тракт загружен паразитными колебаниями.

Для возбуждения усилителя необходимо выполнение двух условий:

1. Баланс фаз
2. Баланс амплитуд.
 1. Баланс фаз: $\varphi_{K\beta} = \varphi_{Ku} + \varphi_{\beta} = 0 = 2 \cdot \pi \cdot n$, где n - целое число. $n = 0, 1, 2, \dots$
 2. Баланс амплитуд: $\beta \cdot K \geq 1$.

Самовозбуждение усилителя является запрещенным режимом, поэтому при проектировании разработчик должен сделать так, чтобы баланс фаз и баланс амплитуд не выполнялись совместно во всем теоретически возможном диапазоне частот ($0 \div \infty$).

Способность усилителя нормально функционировать в рабочем диапазоне частот во всех возможных режимах эксплуатации называется устойчивостью усилителя (возможные режимы: включение питания, подключение нагрузки, выключение нагрузки, замена компонентов, работа в заданном диапазоне температур и т. д.).

Для предотвращения самовозбуждения на практике используют режим: $\beta \cdot K \geq 1$, $\varphi_{\beta K} < 180^\circ$.

Чтобы усилитель был надежно устойчив необходимо обеспечивать запас устойчивости по фазе - α .

Практические рекомендации по использованию ООС в усилительных устройствах.

1. Петля ОС должна захватывать минимально возможное число каскадов, причем использование общей ОС нежелательно вообще.
2. Цепи ОС целесообразно строить на резисторах, дающих минимальные паразитные фазовые сдвиги.
3. Целесообразно использовать в усилительных каскадах корректирующие цепи (цепи коррекции), которые состояются либо из конденсаторов либо из конденсаторов и резисторов.

Применение корректирующих цепей вызывает, как правило, снижение коэффициента усиления усилителя, и с другой стороны резко снижают полосу усиления усилителя.

Современная элементная база, как правило, снабжена внутренними цепями коррекции.