

5. ТЕОРИЯ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Обратной связью (ОС) в усилителях называют явление передачи сигнала из выходной цепи во входную. Электрические цепи, обеспечивающие эту передачу, носят название цепей обратной связи. Структурная схема усилителя, охваченного ОС, приведена на рис. 4.5. В нём выходной сигнал усилителя 1 (в виде напряжения $U_{\text{вых.}}$ или тока $I_{\text{вых.}}$) через цепь обратной связи 2 частично или полностью подаётся к схеме сравнения. В ней происходит вычитание (или сложение) входного сигнала $U_{\text{вх}}$ или $I_{\text{вх}}$ и сигнала ОС $U_{\text{ос}}$ или $I_{\text{ос}}$. В результате этого на вход усилителя поступает сигнал, равный разности или сумме входного сигнала и сигнала обратной связи.

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

Местной обратной связью (местной петлей обратной связи) принято называть ОС, охватывающие отдельные каскады или части усилителя, а общей обратной связью – такую ОС, которая охватывает весь усилитель.

Обратную связь называют отрицательной, если её сигнал вычитается из основного сигнала, и положительной, если сигнал ОС суммируется с входным. При отрицательной ОС коэффициент усиления уменьшается, а при положительной -- увеличивается. Из-за схемных особенностей усилителя и цепи ОС возможны варианты, когда обратная связь существует либо только для медленно изменяющейся составляющей выходного сигнала, либо только для переменной составляющей его, либо для всего сигнала. В этих случаях говорят, что обратная связь осуществлена по постоянному, по переменному, а также как по постоянному, так и по переменному токам.

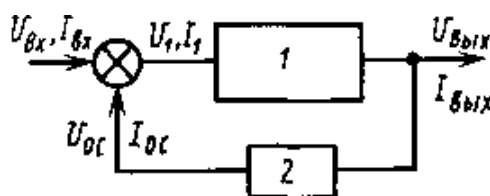


Рис.5.1 Структурная схема усилителя, охваченного обратной связью:
1-усилитель; 2-цепь обратной связи

В зависимости от способа получения сигнала различают обратную связь по напряжению (рис.5.2,а), когда снимаемый сигнал ОС пропорционален напряжению выходной цепи; обратную связь по току (рис.5.2,б), когда снимаемый сигнал ОС пропорционален току выходной цепи; комбинированную ОС (рис.5.2,в), когда снимаемый сигнал ОС пропорционален как напряжению, так и току выходной цепи.

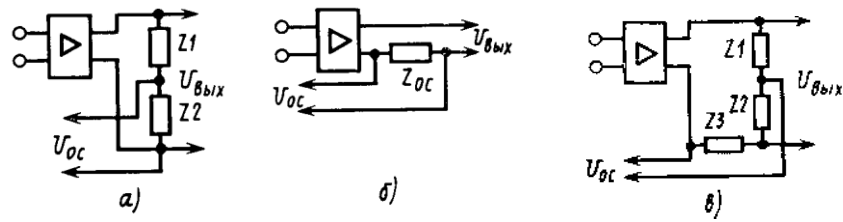


Рис. 5.2. Схемы обратной связи сигнал который снимается: по напряжению (а); по току (б); комбинированно (в)

По способу введения во входную цепь сигнала обратной связи различают: последовательную схему введения ОС (рис.5.3,а), когда напряжение сигнала ОС суммируется с входным напряжением; параллельную схему введения ОС (рис.5.3,б), когда ток цепи ОС суммируется с током входного сигнала; смешанную схему введения ОС (рис.5.3,в), когда с входным сигналом суммируются ток и напряжение цепи ОС.

Для количественной оценки степени влияния цепи обратной связи используют коэффициент обратной связи γ , показывающий, какая часть выходного сигнала поступает на вход усилителя. В общем случае $\gamma = U_{oc}/U_{вых}$.

Однако значительно чаще у определяют как отношение напряжения или токов:

$$\gamma_u = U_{oc}/U_{вых}; \quad \gamma_i = I_{oc}/I_{вых}; \quad (5.1)$$

причем при рассмотрении обратной связи по напряжению индекс u обычно опускается.

Рассмотрим, как изменяются основные параметры усилителя, охваченного обратной связью.

Коэффициент усиления. Для простоты и наглядности будем считать, что фазовые сдвиги в цепях усилителя и обратной связи отсутствуют. Цепь положительной обратной связи охватывает весь усилитель. Сигнал обратной связи пропорционален выходному напряжению (обратная связь по напряжению).

Коэффициент усиления усилителя, охваченного такой цепью ОС,

$$K_{oc} = U_{вых}/U_{вх} . \quad (5.2)$$

Из рис. 4.5 видно, что

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{вх} + U_{oc}; \\ U_{oc} &= \gamma U_{вых} \\ U_{вых} &= K U_1, \end{aligned} \quad (5.3)$$

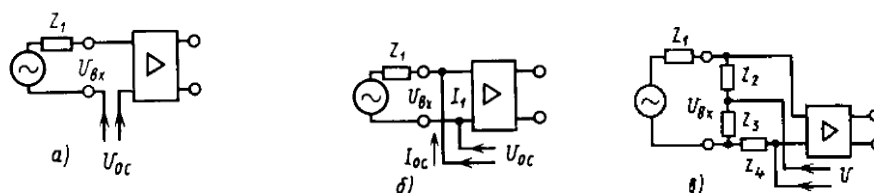


Рис. 5.3. Схемы введения сигналов ОС: а—последовательная, б— параллельная, в —смешанная

где K —коэффициент усиления усилителя без обратной связи. Тогда (5.2) переписать:

$$K_{ос} = K U_1 / (U_1 - U_{ос}) = K U_1 / (U_1 - K\gamma U_1) = K / (1 - K\gamma). \quad (5.4)$$

Произведение $K\gamma$ называют петлевым усилением, а $(1 - K\gamma)$ — глубиной обратной связи.

Так входной сигнал и сигнал обратной связи суммируются, то в рассматриваемом случае имеет место положительная ОС. Она увеличивает значение коэффициента усиление усилителя. Значение петлевого усиления при положительной обратной связи согласно (4.25) ограничено условием

$$K\gamma < 1. \quad (5.5)$$

При $K\gamma \geq 1$ усилитель теряет устойчивость и не может рассматриваться как усилитель, так как выходной сигнал перестает быть однозначно зависимым от входного сигнала (первое условие потери устойчивости). При этом возможны возникновение автоколебаний, когда выходное напряжение мало зависит от входного сигнала и периодически изменяется с какой-либо частотой, или появление триггерных «эффектов», при которых усилитель скачкообразно переходит из одного устойчивого состояния в другое при определённом уровне входного сигнала. Сущность этих режимов заключается в следующем: если $K\gamma \geq 1$, то любой малейший входной сигнал, вызванный наводками или колебаниями параметров активных элементов, усилится и вернётся обратно на вход усилителя. Причём значение этого пришедшего сигнала равно ($K\gamma = 1$) или больше входного сигнала. Суммируясь с ним, он вызывает появление большего выходного сигнала, который, в свою очередь, снова суммируется с входным и вызывает дальнейшее увеличение выходного сигнала. В итоге любой малый входной сигнал, возникший в линейной усилительной цепи, охваченной положительной ОС, вызовет появление выходного сигнала, значение которого стремится к бесконечности. В реальном усилителе такое усиление невозможно из-за ограничений, выступающих при каком-то значении выходного сигнала. В результате будет не «бесконечно» большое усиление, а появятся незатухающие автоколебания или на выходе будет максимальное напряжение, которое может появиться в усилителе. Форма автоколебаний зависит от характера и параметров цепи обратной связи и коэффициента петлевого усиления.

Так как сигнал обратной связи суммируется с входным сигналом, т.е. фазовый сдвиг между ними равен нулю, то можно сформулировать второе условие возникновения автоколебаний: фазовый сдвиг, вносимый усилителем и цепью обратной связи, должен быть равен 0° на частоте автоколебаний.

Таким образом, если на какой-то частоте выполняются условия $|K\gamma| \geq 1$ и $\varphi = 0^\circ$, то усилитель потеряет устойчивость. Если эти условия выполняются только на одной частоте, то сигнал автоколебаний будет иметь синусоидальную форму.

Когда условия самовозбуждения выполняются в полосе частот от ω_n до ω_b , причём $\omega_n > 0$, то выходной сигнал имеет несинусоидальную форму. При выполнении условий потери устойчивости на нулевой частоте автоколебания отсутствуют и наблюдается появление триггерного эффекта.

Если усилитель или цепь ОС вносит фазовый сдвиг, равный 180° , то входной сигнал и сигнал обратной связи вычитаются друг из друга: $U_1 = U_{вх} - U_{ос}$, а ОС становится отрицательной.

Коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{ос} = K/(1+K\gamma). \quad (5.6)$$

Так как положительная обратная связь ухудшает характеристики усилителя, в усилителях измерительных устройств в основном используют отрицательную обратную связь.

Применение отрицательной обратной связи обеспечивает: повышение стабильности коэффициента усиления при смене активных компонентов, изменении напряжений питания и т. д; расширения полосы пропускания усилителя; уменьшение фазового сдвига между выходным и входным напряжениями; снижения уровня нелинейных искажений и собственных помех, возникающих в той части усилителя, которая охвачена отрицательной ОС.

Для количественной оценки действия цепи обратной связи проанализируем стабильность коэффициента усилителя с ОС. Для этого продифференцируем выражение (5.6), учитывая, что в общем случае изменяются и коэффициент обратной связи γ , и коэффициент усиления K :

$$dK_{ос} = \frac{\partial K(1+K\gamma) - K\gamma \partial K - K^2 \partial \gamma}{(1+K\gamma)^2} = \frac{\partial K}{(1+K\gamma)^2} - \frac{K^2 \partial \gamma}{(1+K\gamma)^2} \quad (5.7).$$

Относительное изменение коэффициента усиления получим, разделив обе части выражения (5.7) на (5.6):

$$\frac{dK_{ос}}{K_{ос}} = \frac{\partial K}{K(1+K\gamma)} - \frac{K \partial \gamma}{(1+K\gamma)} \quad (5.8).$$

Учитывая, что в большинстве случаев применения отрицательной обратной связи $K\gamma \gg 1$, выражение (5.8) преобразуем к виду

$$\frac{dK_{ос}}{K_{ос}} \approx \frac{1}{1+K\gamma} \frac{dK}{K} - \frac{d\gamma}{\gamma} \quad (5.9).$$

Таким образом, относительное изменение коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной ОС, вызванного относительным изменением коэффициента усиления самого усилителя, уменьшается в $1 + K\gamma$ раз. Колебания параметров цепи обратной связи существенно влияют на коэффициент усиления усилителя, поэтому к их стабильности предъявляют повышенные требования. В прецизионных усилителях $d\gamma$ стремятся сделать близким к нулю. Например, пусть усилитель имел параметры $K = 10^4$; $\gamma = 0,1$; $K = 9,990$. В результате старения элементов и изменения напряжения питания коэффициент усиления усилителя уменьшился в два раза и стал $K = 5 \cdot 10^3$. Тогда относительное изменение коэффициента усиления всего усилителя

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{dK}{K(1+K\gamma)} = \frac{5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3 (1+5 \cdot 10^2)} = 1,996 \cdot 10^{-3} \approx 2 \cdot 10^{-3},$$

т.е. коэффициент усиления изменился всего на 0,2%. Изменение в два раза коэффициента обратной связи ($\gamma = 0,05$) приведёт к изменению на 50% коэффициента усиления всего усилителя.

Таким образом, если выполняется условие $K\gamma \gg 1$, то можно считать, что K_{oc} почти не зависит от параметров усилителя и приблизительно равен: $K_{oc} \approx 1/\gamma$.

При положительной обратной связи относительная нестабильность коэффициента усиления увеличивается, так как $1/(1 - K\gamma) > 1$.

Если цепь отрицательной обратной связи вносит небольшие фазовые сдвиги, то при $K\gamma \gg 1$ фазовый сдвиг усилителя существенно уменьшается и определяется в основном фазовым сдвигом цепи ОС.

Пусть усилитель без ОС вносит фазовый сдвиг φ_1 . Тогда коэффициент усиления усилителя $\underline{K} = K e^{j\varphi_1}$ – комплексный. Фазовый сдвиг, вносимый цепью ОС (φ_2), во много раз меньше фазового сдвига усилителя. Коэффициент усиления усилителя с ОС при $|K\gamma| \gg 1$

$$\underline{K}_{oc} = (K e^{j\varphi_1}) / (1 + K e^{j\varphi_1} \gamma e^{j\varphi_2}) \approx \underline{1} e^{-j\varphi_2} \gamma \quad (5.10)$$

При $\varphi_2 \rightarrow 0$ фазовый сдвиг, вносимый усилителем с ОС, достаточно мал и в первом приближении стремится к нулю.

Рациональным подбором цепи ОС можно обеспечить необходимый коэффициент усиления и требуемую стабильность его, а также обеспечить нулевой или требуемый фазовый сдвиг фазового сигнала относительно входного.

Выходное сопротивление усилителя сильно зависит от того, каким образом снимается сигнал ОС. Если он снимается по напряжению, то выходное сопротивление уменьшается, если по току – увеличивается.

Для усилителя без ОС выходное сопротивление определяется из выражения

$$\Delta U_{вых} = Z_{вых} \Delta I_{вых} \quad (5.11)$$

При подключении цепи ОС выходное напряжение начнет изменяться не только под влиянием тока нагрузки, но и вследствие изменения сигнала обратной связи на входе усилителя. Так, если отрицательная ОС снимается по напряжению, то изменение выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} = \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} \Delta I_{\text{ВЫХ}} - \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} \gamma K ,$$

$$\text{Откуда } \underline{Z}_{\text{ВЫХ ОС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / \Delta I_{\text{ВЫХ}} = \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} / (1 + K\gamma) . \quad (5.12)$$

Из (5.12) видно, что при использовании отрицательной обратной связи снятой по напряжению выходное сопротивление усилителя уменьшается в $1 + K\gamma$ раз.

Отрицательная обратная связь снятая по току увеличивает выходное сопротивление. Значение его может быть найдено аналогичным образом. При отсутствии ОС выходной ток усилителя напряжения

$$I_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{Н}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}) . \quad (5.13)$$

Изменение сопротивления нагрузки $\underline{Z}_{\text{Н}}$ на $-\Delta \underline{Z}_{\text{Н}}$ приведет к изменению выходного тока и изменению напряжения на выходном сопротивлении $\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}$:

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}) . \quad (5.14)$$

При включении цепи обратной связи изменение тока $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$ приведет к изменению напряжения обратной связи

$$\Delta U_{\text{ОС}} = \Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} \underline{Z}_{\text{ОС}} \quad (5.15)$$

которое, попадая на вход усилителя, вызывает изменение выходного тока:

$$\Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}) - I_{\text{ВЫХ ОС}} \underline{Z}_{\text{ОС}} \gamma K / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} + \underline{Z}_{\text{Н}} - \Delta \underline{Z}_{\text{Н}}) \quad (5.16)$$

Преобразуем это выражение, считая, что $|\Delta \underline{Z}_{\text{Н}}| \ll |\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} + \underline{Z}_{\text{Н}}|$:

$$\Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} [1 + K \gamma \underline{Z}_{\text{ОС}} / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} + \underline{Z}_{\text{Н}})] = U_{\text{ВЫХ ОС}} / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}) , \quad (5.17)$$

или

$$\underline{Z}_{\text{ВЫХ ОС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / \Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} = \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} [1 + K\gamma(\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}) / (\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} + \underline{Z}_{\text{Н}})] . \quad (5.18)$$

Если выполняется условие $\underline{Z}_{\text{Н}} \ll \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}}$, то

$$\underline{Z}_{\text{ВЫХ ОС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / \Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} = \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} + \underline{Z}_{\text{ОС}} (1 + K\gamma) . \quad (5.19)$$

Таким образом, выходное сопротивление усилителя, охваченного отрицательной ОС по току, повышается. Его приращение, в основном определяется сопротивлением $\underline{Z}_{\text{ОС}}$, с которого снимается сигнал обратной связи, и петлевым усилением $K\gamma$. Если сам усилитель имеет малое выходное сопротивление $\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ и выходное сопротивление в основном определяется сопротивлением $\underline{Z}_{\text{ОС}}$, а $\underline{Z}_{\text{Н}} \ll \underline{Z}_{\text{ОС}}$, то можно считать, что введение отрицательной ОС сигнал который снят по току увеличивает выходное сопротивление в $1 + K\gamma$ раз и $\underline{Z}_{\text{ВЫХ ОС}} \approx \underline{Z}_{\text{ОС}}(1 + K\gamma)$.

Положительная ОС приводит к уменьшению выходного сопротивления, так как $1 - K\gamma$ меньше единицы и $\underline{Z}_{\text{ОС}} (1 - K\gamma) < \underline{Z}_{\text{ОС}}$.

К аналогичным результатам можно прийти, анализируя не конкретный случай введения ОС в усилитель напряжения, а рассматривая усилитель тока, когда изменения выходного тока $\Delta I_{\text{ВЫХ ОС}}$ вызовут изменения тока обратной связи $\gamma_i I_{\text{ВЫХ ОС}}$ (при сигнале ОС снимаемом по току), что, в свою очередь, приведет к изменению выходного тока на $K_i \gamma_i I_{\text{ВЫХ ОС}}$. Тогда выражение для общего изменения выходного тока запишем в виде

$$\Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} = (\Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / \underline{Z}_{\text{ВЫХ}}) - \Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} K_i \gamma_i .$$

$$\text{Отсюда } \underline{Z}_{\text{ВЫХ ОС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ ОС}} / \Delta I_{\text{ВЫХ ОС}} = \underline{Z}_{\text{ВЫХ}} (1 + K_i \gamma_i) . \quad (5.20)$$

Из выражения (5.20) видно, что в случае усилителя тока выходное сопротивление тока увеличивается в $1 + K_i \gamma_i$ раз.

Введение ОС широко используется для целенаправленного изменения выходных сопротивлений и позволяет реализовать усилители с очень малыми (сотые доли Ом) и очень большими (сотни – тысячами МОм) выходными сопротивлениями. При использовании отрицательной ОС снятой по напряжению усилитель приближается к идеальному источнику напряжения, выходной сигнал которого мало изменяется при различных сопротивлениях нагрузки. Обратная связь по току стабилизирует ток нагрузки, приближая усилитель к идеальному источнику тока.

Входное сопротивление зависит от способа введения во входную цепь сигнала ОС. При отсутствии ОС входное сопротивление определяется входным напряжением и током усилителя. При $\gamma \rightarrow 0$ $Z_{вх} = U_1 / I_1$.

При последовательной схеме введения ОС входное сопротивление

$$Z_{вх ос} = U_{вх} / I_1 = (U_1 + U_{ос}) / I_1. \quad (5.21)$$

Учитывая, что $U_{ос} = U_1 K \gamma$, получим

$$Z_{вх ос} = U_1 (1 + K \gamma) / I_1 = Z_{вх} (1 + K \gamma). \quad (5.22)$$

Итак, последовательная отрицательная ОС увеличивает входное сопротивление в $1 + K \gamma$ раз, а положительная уменьшает его в $1 - K \gamma$ раз.

При параллельной ОС входное сопротивление

$$Z_{вх ос} = U_{вх} / (I_1 + I_{ос}). \quad (5.23)$$

Если ОС – отрицательная и напряжение ОС находят из выражения $U_{ос} = K U_{вх} \gamma$, то ток $I_{ос}$ определяется внутренним сопротивлением цепи обратной связи $Z_{ос}$:

$$I_{ос} = (U_{вх} + K U_{вх} \gamma) / Z_{ос} = U_{вх} (1 + K \gamma) / Z_{ос}. \quad (5.24)$$

Из (5.24) видно, что параллельная цепь ОС создает во входной цепи ток, значение которого определяется входным напряжением и сопротивлением цепи обратной связи $Z_{ос}$, уменьшенным в $1 + K \gamma$ раз. Входную проводимость усилителя с ОС определяют как

$$1 / Z_{вх ос} = I_1 / U_{вх} + I_{ос} / U_{вх} = 1 / Z_{вх} + (1 + K \gamma) / Z_{ос}. \quad (5.25)$$

Таким образом, ОС позволяет управлять значением входного сопротивления и обеспечивать как достаточно высокие (десятки – тысячи МОм), так и очень малые (десятые – тысячные доли Ом) входные сопротивления.