

1. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратная связь – это структурный прием, который заключается в передаче сигнала с выхода некоторого электронного узла на вход. Передача сигнала осуществляется конкретной электрической связью.

Все виды обратной связи сильно изменяют свойства усилительного устройства, поэтому они широко используются для направленного изменения его параметров.

В общем случае сигнал обратной связи может либо суммироваться с входным, либо вычитаться из входного сигнала усилителя. В зависимости от этого соответственно различают положительную и отрицательную обратные связи.

Получим значение коэффициента усиления для обоих этих случаев. Обратная связь называется положительной, если фаза входного сигнала усилителя и сигнала обратной связи совпадают. В этом случае для обобщенной структурной схемы усилителя с обратной связью, приведенной на рис. 5.21, можно записать:

$$u_{\text{вых}} = K_{\text{УУ}} u_{\text{вх сум}};$$

$$u_{\text{вх сум}} = u_{\text{вх0}} + b_{\text{ОС}} u_{\text{вых}},$$

где $b_{\text{ОС}}$ — коэффициент передачи цепи обратной связи.

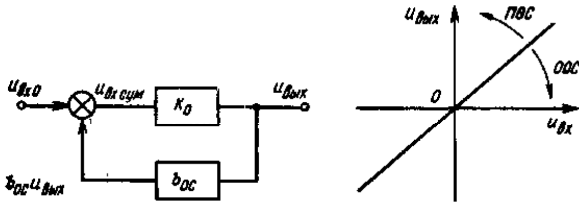


Рис. 5.21. Обобщенная структурная схема усилительного устройства с цепью обратной связи

Рис. 5.22. Изменение передаточной характеристики усилительного устройства при введении различных цепей обратной связи

Отсюда

$$K_{\text{УОС}} = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх0}} = K_{\text{УУ}}/(1 - b_{\text{ОС}} K_{\text{УУ}}). \quad (5.19)$$

Полученное выражение показывает, что введение в усилитель положительной обратной связи увеличивает коэффициент усиления. Физически это означает увеличение наклона передаточной характеристики усилителя (рис. 5.22).

Обратная связь называется отрицательной, если фазы входного сигнала усилителя и сигнала обратной связи отличаются на угол π . В этом случае для обобщенной структурной схемы усилителя с обратной связью (см. рис. 5.21), можно записать:

$$u_{\text{вх сум}} = u_{\text{вх0}} - b_{\text{ОС}} u_{\text{вых}}.$$

Тогда

$$K_{\text{УООС}} = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх0}} = K_{\text{УУ}}/(1 + b_{\text{ОС}} K_{\text{УУ}}). \quad (5.20)$$

Введение отрицательной обратной связи уменьшает коэффициент усиления усилителя. Это проявляется в уменьшении наклона его передаточной характеристики. Следовательно, введение любой обратной связи приводит к вращению его передаточной характеристики относительно начала координат (см. рис. 5.22).

Следует отметить, что если цепь обратной связи охватывает весь усилитель, ее принято называть общей обратной связью. В противном случае, т. е. если обратная связь охватывает только часть усилителя, ее называют местной.

По способу получения сигнала обратной связи принято различать обратную связь по напряжению и по току. Для получения обратной связи по напряжению сигнал обратной связи должен быть пропорционален выходному напряжению усилителя (рис. 5.23, а).

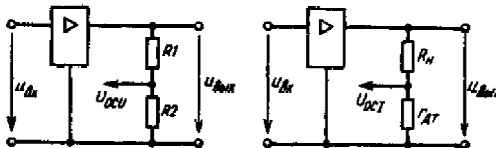


Рис. 5.23. Способы получения сигнала ОС
а — по напряжению; б — по току

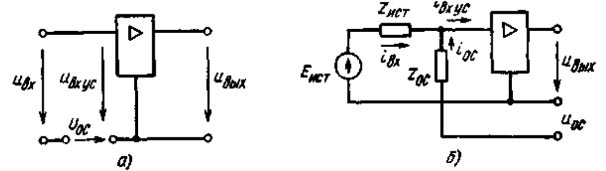


Рис. 5.24. Способы введения сигнала обратной связи во входную цепь усилительного устройства:
а — последовательная, б — параллельная

Для получения обратной связи по току, сигнал обратной связи снимают с дополнительного измерительного элемента (датчика тока $R_{\text{ДТ}}$), включенного последовательно с нагрузкой (рис. 5.23, б).

По способу введения сигнала можно выделить последовательную и параллельную обратные связи.

Для получения последовательной обратной связи сигнал с выхода усилителя вводится последовательно с источником входного напряжения (рис. 5.24, а). В этом случае на входе усилителя выполняется алгебраическое суммирование напряжений

$$u_{\text{вх ус}} = u_{\text{вх}} + u_{\text{ОС}}.$$

Для получения параллельной обратной связи сигнал с выхода усилителя вводится параллельно источнику входного напряжения (рис. 5.24, б). В этом случае на входе усилителя происходит алгебраическое суммирование токов

$$i_{\text{вх ус}} = i_{\text{вх}} + i_{\text{ОС}}.$$

Конкретный знак входных сигналов усилителя зависит от того, какая (положительная или отрицательная) обратная связь вводится в устройство. Возможны комбинированные способы как снятия, так и введения сигнала обратной связи. Однако из-за противоположного действия на свойства усилительного устройства такие способы на практике не используются весьма редко.

В соответствии со сказанным, можно выделить четыре основных типа цепей обратной связи:

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

Каждый из указанных типов может осуществляться как положительную, так и отрицательную обратные связи.

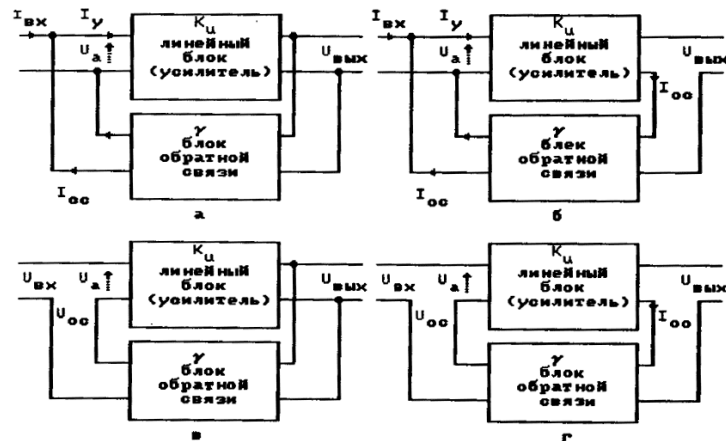


рис. 2.8. Различные виды обратных связей.
а) параллельная ОС по напряжению,
б) последовательная ОС по напряжению,
в) параллельная ОС по току,
г) последовательная ОС по току.

2. **Операционный усилитель (ОУ)** — унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, удовлетворяющий следующим требованиям к электрическим параметрам:

- коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности ($K_{\text{У}} \rightarrow \infty$);
- входное сопротивление стремится к бесконечности ($R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$);
- выходное сопротивление стремится к нулю ($R_{\text{вых}} \rightarrow 0$);
- если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение также равно нулю ($U_{\text{вх}}=0 \rightarrow U_{\text{вых}}=0$);
- бесконечная полоса усиливаемых частот ($f \rightarrow \infty$).

Рассмотрим типовые устройства, которые могут быть построены с использованием ОУ

Далее будем пользоваться следующими обозначениями:

$U_{\text{вхн}}$ — входное напряжение на неинвертирующем входе ОУ;

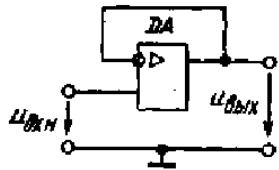
$U_{вх}$ — входное напряжение на инвертирующем входе ОУ;

$U_{вых}$ — выходное напряжение ОУ;

K_{uo} — коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

Повторитель напряжения

Это усилитель, охваченный цепью последовательной ООС по выходному напряжению с коэффициентом передачи $b_{oc}=1$, т. е. 100%-ной ООС. Свойства такого усилителя



подобны свойствам эмиттерного или истокового повторителя и для него выполняются условия:

$$U_{вх} = U_{вых} \quad R_{вхООС} = R_{вх0}(1 + K_{uo})$$

$$R_{вхООС} = R_{вх0}/(1 + K_{uo})$$

Неинвертирующий усилитель

Для получения коэффициент к передачи, превышающего единицу в схеме на рис.1, необходимо обеспечить $b_{oc} < 1$. Для этого в цепь ООС необходимо ввести делитель напряжения.

$$b_{oc} = Z_1/(Z_{oc} + Z_1)$$

$$K_{uООС} = K_{uo}/(1 + K_{uo})$$

$$b_{oc} = K_{uo}/[1 + Z_1 K_{uo}/(Z_{oc} + Z_1)]$$

С учётом $K_{uo} \rightarrow \infty$

$$\Rightarrow K_{uООС} = (Z_1 + Z_{oc})/Z_1 =$$

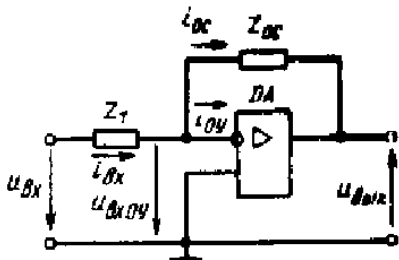
$$1 + Z_{oc}/Z_1 = 1/b_{oc} \approx Z_{oc}/Z_1$$

коэффициент передачи неинвертирующего усилителя обратно пропорционален коэффициенту передачи цепи ООС;

при любых сопротивлениях резисторов в цепи ООС коэффициент передачи неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы.

Инвертирующий усилитель

Для получения инвертирующего усилителя входной сигнал и сигнал обратной связи должны подаваться на один и тот же инвертирующий вход, т. е. цепь ООС превращается из последовательной в параллельную



$$b_{oc} = Z_1/(Z_{oc} + Z_1)$$

$$K_{uООС} = K_{дел} K_{uo}/(1 + K_{uo} b_{oc}) = [Z_{oc}/(Z_1 + Z_{oc})][K_{uo}/(1 + Z_1 K_{uo}/(Z_{oc} + Z_1))]$$

$$K_{uo} \rightarrow \infty \Rightarrow K_{uООС} = Z_{oc}/Z_1$$

Выбором резисторов цепи ООС коэффициент передачи неинвертирующего усилителя может быть уменьшен до сколь угодно малой величины.

$$R_{вхООС} = R_{вх0} R_{oc}/[R_{вх0}(1 + K_{uo}) + R_{oc}] \approx R_{oc}/(1 + K_{uo})$$

Усилитель с дифференциальным входом

По существу, данная схема является комбинацией рассмотренных ранее схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

$$U_{вых}(U_{вхуСИ}) = -U_{вхуСИ} R_{oc}/R_1$$

$$U_{вых}(U_{вхуСН}) = -U_{вхуСН} [R'/(R_2 + R')] [(R_1 + R_{oc})/R_1]$$

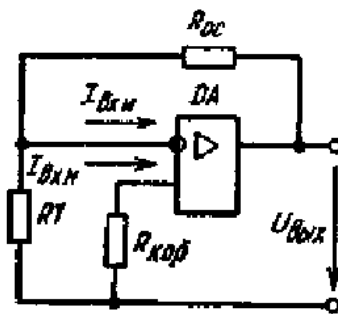
$$U_{вых} = U_{вых}(U_{вхуСН}) + U_{вых}(U_{вхуСИ}) =$$

$$= [R'/(R_1)] [(R_1 + R_{oc})/(R_2 + R')] U_{вхуСН} - [R_{oc}/R_1] U_{вхуСИ}$$

$$R_1 = R_2 \text{ и } R_{oc} = R' \Rightarrow$$

$$U_{вых} = (U_{вхуСН} - U_{вхуСИ}) R_{oc}/R_1$$

Влияние параметров реального ОУ на работу усилителя



Параметры реального ОУ, строго говоря, не полностью соответствуют требуемым параметрам идеального ОУ. Входное сопротивление реального ОУ не равно бесконечности.

Поэтому протекает ток $I_{вх}$. Этот ток для разных входов может быть неодинаков, что, в свою очередь, приводит к появлению $\Delta U_{вх}$.

$$K_{uООС} = (R_1 + R_{oc})/R_1$$

$$U_{вых}(U_{см}) =$$

$$K_{uООС} U_{см} - U_{см}(R_1 + R_{oc})/R_1$$

$$U_{см}=0 \Rightarrow U_{вх}(I_{вх}) = U_{вхИ} - U_{вхН} =$$

$$I_{вхИ} R_{кор} - I_{вхН} [R_1 R_{oc}/(R_1 + R_{oc})]$$

$$U_{вых}(I_{вх}) = K_{uООС} U_{вх}(I_{вх}) = [(R_1 + R_{oc})/R_1] I_{вх} [R_{кор} - R_1 R_{oc}/(R_1 + R_{oc})]$$

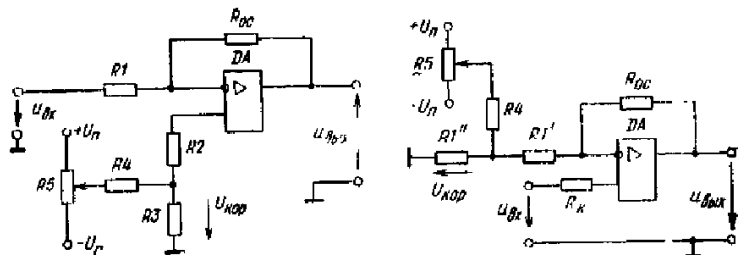
Чтобы определить величину и знак погрешности, допустим, что $I_{вхИ} > I_{вхН}$

$$\Delta U_{выхMAX} = [(R_1 + R_{oc})/R_1] [U_{см} + I_{вх} [R_{кор} - R_1 R_{oc}/(R_1 + R_{oc})] + \Delta I_{вх} R_{кор}]$$

$$R_{кор} = R_1 R_{oc}/(R_1 + R_{oc}) \Rightarrow$$

$$\Delta U_{выхMAX} =$$

$$K_{uООС} [U_{см} + \Delta I_{вх} R_1 R_{oc}/(R_1 + R_{oc})]$$



$$U_{смMAX} \leq \Delta U_{кор} =$$

$$= U_n R_3/(R_3 + R_4) \approx U_n R_3/R_4$$

$$R_{кор} = R_2 + R_3$$

$$R_4 \gg R_3$$

$$R_5 \ll R_4$$

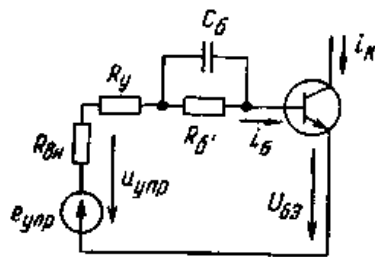
Схема инвертирующего (слева) и неинвертирующего (справа) усилителя с внешними цепями компенсации напряжения $U_{см}$

3. Повышение быстродействия ключей на биполярных транзисторах.

Метод форсированного переключения

транзистора широко применяют на практике для повышения быстродействия ЭК. Суть данного метода состоит в том, что на интервалах включения и выключения формируют такие значения управляющего сигнала, которые существенно превосходят аналогичные, необходимые с точки зрения обеспечения стационарно включенного и выключенного состояний биполярного транзистора.

Оптимальным с точки зрения уменьшения времен переключения транзистора является управляющий сигнал, приведенный на рис. 10.16. Параметры этого сигнала должны выбираться из следующих условий: $I_{Б\text{нф}}$ и $I_{Б\text{зф}}$ должны обеспечивать заданные времена включения и выключения транзистора; $I_{Б\text{нас}}$ и $I_{Б\text{зап}}$ должны гарантировать работу транзистора соответственно в режимах насыщения и отсечки; интервалы t_1 и t_2 должны равняться $t_1 = t_{\text{зад}} + t_{\text{ф}} + t_{\text{нак}}$, $t_2 = t_{\text{рас}} + t_{\text{сп}} + t_{\text{уст}}$.



Наиболее просто эта идея реализуется в схеме с форсирующим конденсатором в управляющей цепи (рис.). В момент включения управляющего сигнала $e_{упр} = U_y$ у нас, в соответствии со вторым законом коммутации, входной базовый ток скачкообразно изменяется от 0 до $I_{Б\text{нф}}$ —начального импульса базового тока. По мере заряда конденсатора ток базы постепенно уменьшается до стационарного значения $I_{Б\text{нас}}$ (рис. 10.17,6). Базовый ток в момент включения $e_{упр}$ определяется выражением

$$I_{Б\text{нф}} \approx (U_{y\text{нас}} + U_{C_б\text{вкл}} - U_{Бэ})/R_y.$$

Расчеты показывают, что существенную долю времени выключения биполярного транзистора, особенно при пассивном запираании, составляет время его рассасывания. Поэтому исключение этого интервала приводит к существенному повышению быстродействия СК

