

### 3. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ТРАКТАХ УСИЛЕНИЯ

#### 3.1. Структурная схема идеального управляемого источника с однопетлевой отрицательной обратной связью (ООС) и ее использование для анализа влияния ООС на параметры и характеристики усилителя

**Обратная связь (ОС) в усилительных каскадах**– это процесс передачи выходного сигнала или его части на вход усилительного устройства.

Различают следующие разновидности ОС:

- *внутреннюю*, которая присуща усилительным приборам (лампы, транзисторы и т.п.) и определяется наличием параметра обратной передачи  $Y_{12}$ ;
- *паразитную*, которая определяется несовершенством монтажа, а также наличием связи через общий источник питания;
- *внешнюю*, специально устанавливаемую разработчиком.

В дальнейшем наибольшее внимание будет уделено внешней ОС, с помощью которой можно целенаправленным образом воздействовать на показатели функциональных, в частности, усилительных устройств (особенно в интегральном исполнении).

#### Структурная схема усилителя с однопетлевой ОС

На рис. 3.1. изображена структурная схема усилительного устройства, охваченного внешней однопетлевой ОС.

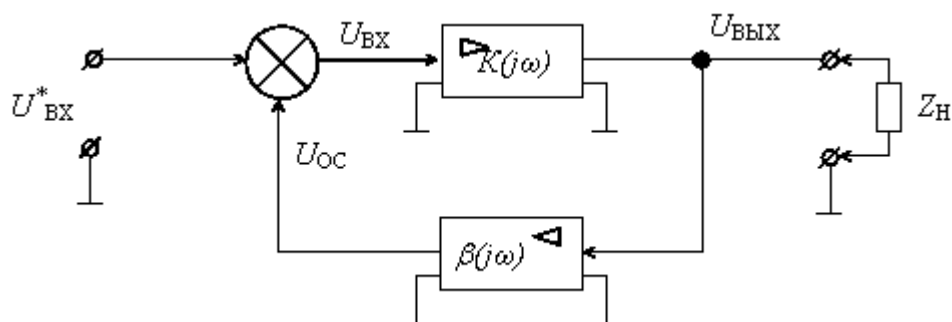


Рис. 3.1. Структурная схема усилителя с ОС

В цепи прямой передачи включен активный четырехполюсник с комплексным коэффициентом усиления  $K(j\omega)$ , а в цепи обратной связи – четырехполюсник, который чаще всего является пассивным и в общем случае обладает комплексным коэффициентом передачи  $\beta(j\omega)$ .

О других обозначениях на рис. 3.1:

$U_{ВХ}$  – комплексная амплитуда напряжения на входных зажимах активного четырехполюсника;

$U_{ВХ}^*$  – комплексная амплитуда напряжения на входных зажимах усилительного устройства, охваченного ОС;

$U_{ОС}$  – комплексная амплитуда напряжения обратной связи на выходных зажимах четырехполюсника, включенного в цепь обратной передачи сигнала.

При сложении колебаний с комплексными амплитудами  $U_{ВХ}^*$  и  $U_{ОС}$  образуется результирующее колебание на входе усилителя с амплитудой  $U_{ВХ}$ . Оно возрастает, если оба эти колебания находятся в фазе, и уменьшается, если колебания складываются в противофазе. В первом случае имеет место положительная обратная связь, во втором – отрицательная обратная связь. На практике совпадение или противоположность фаз возможны только в ограниченном диапазоне усиливаемых частот, так как присущие активным элементам фазовые сдвиги изменяются с частотой. Это обстоятельство может привести к тому, что ОС, отрицательная для одних частот, превращается в положительную для других. Поэтому принято относить ОС к отрицательной или положительной по тому, какой знак она имеет в области средних частот.

Запишем выражения для отдельных блоков структурной схемы рис. 3.1.

– Коэффициент передачи усилителя без обратной связи:

$$K(j\omega) = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}. \quad (3.1)$$

– Коэффициент передачи цепи обратной связи:

$$\beta(j\omega) = U_{ОС}/U_{ВЫХ}. \quad (3.2)$$

– Коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью:

$$K^*(j\omega) = U_{ВЫХ}^*/U_{ВХ}^* = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}. \quad (3.3)$$

В выражениях (3.1) . . . (3.3) все величины в общем случае являются комплексными.

Установим связь между  $K$ ,  $K^*$  и  $\beta$  для случая, когда обратная связь является отрицательной.

При этом напряжение  $U_{ВХ}$  меньше, чем напряжение  $U_{ВХ}^*$  на входных зажимах устройства:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}^* - U_{\text{ОС}}. \quad (3.4)$$

Тогда можно получить следующее выражение:

$$U_{\text{ВХ}}^* = U_{\text{ВХ}} + U_{\text{ОС}} = U_{\text{ВХ}} + \beta \cdot U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} + \beta K U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot (1 + K \cdot \beta) \quad (3.5)$$

Подставляя в (3.3) выражение (3.5) и учитывая, что в соответствии с рис. 3.1:

$U_{\text{ВЫХ}}^* = U_{\text{ВЫХ}}$ , получим:

$$K^* = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^*}{U_{\text{ВХ}}^*} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot (1 + K \cdot \beta)} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} \quad (3.6)$$

Величина  $(1 + \beta K)$  называется коэффициентом обратной связи.

### **Типы обратных связей**

Следует подчеркнуть, что в общем случае структура цепи ОС такова, что трудно и даже невозможно причислить обратную связь к какому-то конкретному типу. Однако в простых случаях, когда усилитель, охваченный обратной связью (см. рис. 3.1), можно представить в виде собственно усилителя (без обратной связи) с коэффициентом усиления  $K(j\omega)$  и четырехполюсника обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta(j\omega)$ , целесообразно ввести классификацию типов ОС по способу соединения входных и выходных зажимов указанных четырехполюсников.

Известны четыре способа такого соединения: последовательно-последовательное, параллельно-параллельное, последовательно-параллельное и параллельно-последовательное. В соответствии со способом соединения устанавливают четыре типа ОС.

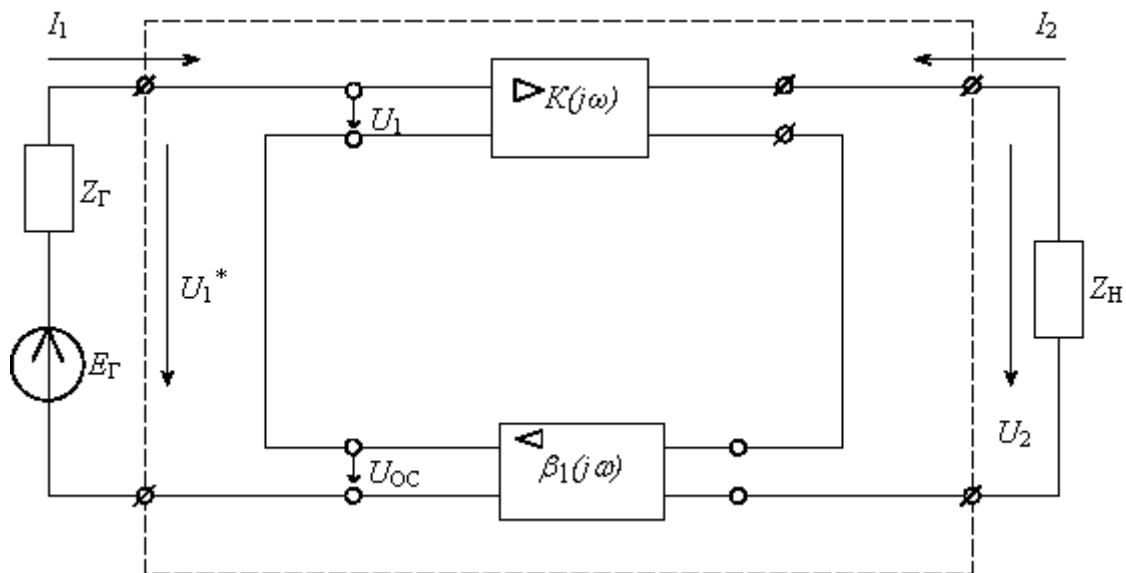
Рассмотрим способы соединения четырехполюсников и соответствующие типы ОС.

### **Последовательно-последовательное соединение четырехполюсников.**

Тип обратной связи:

#### **Последовательная обратная связь по току (ОС Z-типа).**

Последовательно-последовательное соединение двух четырехполюсников изображено на рис. 5.2.



**Рис. 3.2.** Схема последовательного соединения двух четырехполюсников

Оценим изменение основных показателей усилительного устройства при введении последовательной ОС по току:

1. Коэффициент усиления напряжения

$$K^*(j\omega) = U_2 / U_1^* = U_2 / (U_1 + U_{OC}) = U_2 / U_1(1 + U_{OC} / U_1) = K / F, \quad (3.7)$$

где  $F = (1 + U_{OC} / U_1) \geq 1$ .

Из (3.7) следует, что при введении последовательной ОС по току  $K^*(j\omega)$  уменьшается.

2. Коэффициент усиления тока

$$K_I^*(j\omega) = I_2 / I_1 = K_I(j\omega),$$

т.е. этот коэффициент при введении последовательной ООС по току не изменяется.

3. Входной импеданс

$$Z_{ВХ}^*(j\omega) = U_1^* / I_1 = (U_1 + U_{OC}) / I_1 = U_1(1 + U_{OC} / U_1) / I_1 = Z_{ВХ} * F \quad (3.8)$$

Следовательно,  $Z_{ВХ}^*$  возрастает по сравнению с входным сопротивлением  $Z_{ВХ}$  усилителя, не охваченного ООС Z-типа.

4. Выходной импеданс

$$Z_{ВЫХ}^* = U_2 / I_2.$$

Оценим изменение величины  $Z^*_{\text{ВЫХ}}$  чисто качественно. Поскольку напряжение обратной связи  $U_{\text{ОС}}$  пропорционально выходному току  $I_2$ , то в данном случае стабилизируется выходной ток. Значит, модель выходной цепи усилителя, охваченного ООС, должна содержать генератор тока, как показано на рис. 3.3.

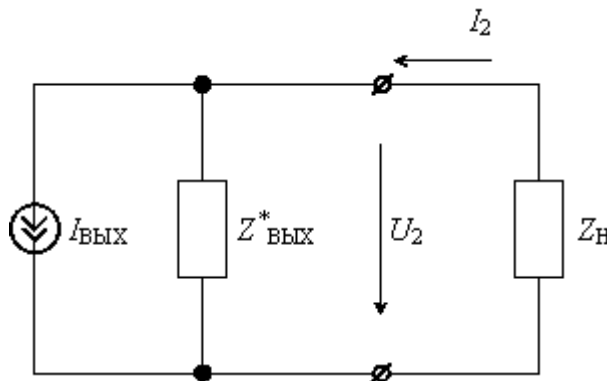


Рис. 3.3. Модель выходной цепи усилителя, охваченного ООС Z-типа

Из рассмотрения этой модели следует, что стабилизация тока  $I_2$ , т.е. его независимость от величины  $Z_{\text{Н}}$ , будет наблюдаться при возрастании  $Z^*_{\text{ВЫХ}}$ . Более того, этот эффект особенно отчетливо проявляется, если предположить, что  $Z^*_{\text{ВЫХ}} \rightarrow \infty$ . Следовательно, при введении ООС Z-типа выходное сопротивление усилительного устройства возрастает.

### Параллельно-параллельное соединение четырехполюсников

Тип обратной связи:

Параллельная обратная связь по напряжению (ОС Y-типа).

Параллельно-параллельное соединение двух четырехполюсников изображено на рис. 3.4.

Как видно из рис. 3.4, имеет место соотношение

$$I_1 = I_1^* - I_{\text{ОС}}, \quad (3.9)$$

поскольку входные зажимы собственно усилителя и выходная цепь четырехполюсника обратной связи соединены параллельным образом. Выходные зажимы основного усилителя и входные зажимы четырехполюсника обратной связи соединены также параллельно. При таком включении ток обратной связи  $I_{\text{ОС}}$  зависит от  $U_2$ , а именно,  $I_{\text{ОС}} \approx \beta * U_2$ . Приведенные нами рассуждения,

которые основаны на рис. 3.4, позволяют назвать такой вид ОС параллельной по напряжению.

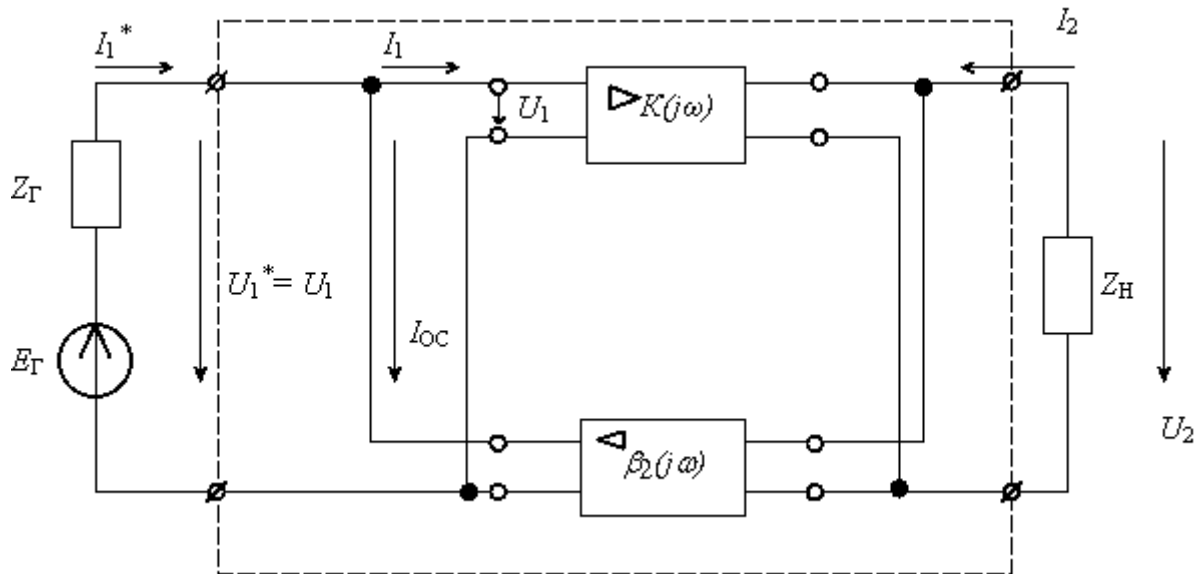


Рис. 3.4. Схема параллельного соединения двух четырехполюсников

Внутреннее сопротивление источника сигнала  $Z_G$  включено параллельно выходному сопротивлению усилителя и выходному сопротивлению цепи обратной связи. Результирующее сопротивление равно:  $Z_{PE3} = 1/(Y_G + Y_{BX} + Y_{OC})$ . Через это сопротивление протекают все токи. Ток  $I_{OC}$  создает на  $Z_{PE3}$  напряжение  $U_{OC}$ :

$$U_{OC} = I_{OC}/(Y_G + Y_{BX} + Y_{OC}).$$

Если  $Z_G = 0$ , а, следовательно,  $Y_G = \infty$ , то  $U_{OC} = 0$ . Таким образом, при ОС  $Y$ -типа  $Z_G$  не должно равняться нулю. Наибольшая эффективность такой ОС достигается при  $Z_G \rightarrow \infty$ .

Рассмотрим основные электрические показатели усилителей, охваченных ОС  $Y$ -типа:

1.  $K^*(j\omega) = U_2/U_1^* = U_2/U_1 = K(j\omega)$ , так как и  $U_1^*$  и  $U_1$  действуют на одних и тех же зажимах. Следовательно, коэффициент усиления напряжения не изменяется.

$$2. K_I^* = \frac{I_2}{I_1^*} = \frac{I_2}{I_1 + I_{OC}} = \frac{I_2/I_1}{1 + I_{OC}/I_1} = \frac{K_I}{F}, \quad (3.10)$$

где коэффициент ОС  $F = 1 + I_{OC}/I_1 = \left(1 + \beta \cdot \frac{U_2}{I_1}\right) \geq 1$ .

На основании (3.10) можно сделать вывод о том, что при введении ООС  $Y$ -типа коэффициент усиления тока уменьшается.

### 3. Входной импеданс

$$Z_{\text{ВХ}}^* = \frac{U_1^*}{I_1^*} = \frac{U_1 / I_1}{1 + I_{\text{ОС}} / I_1} = \frac{Z_{\text{ВХ}}}{F},$$

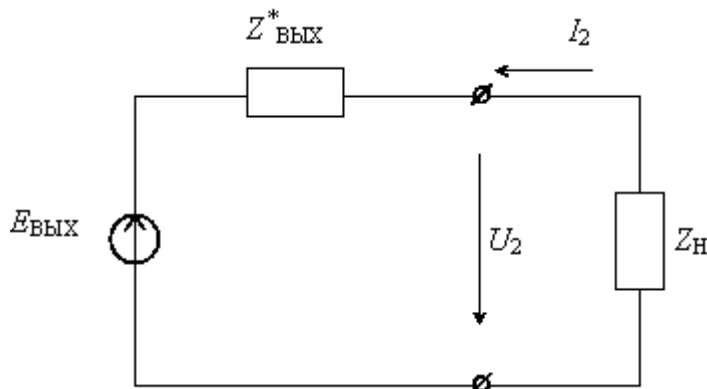
т.е. при введении ООС  $Y$ -типа входной импеданс уменьшается, что приведет к уменьшению коэффициента передачи входной цепи

$$K_{\text{ВЦ}} = E_{\Gamma} \cdot \frac{Z_{\text{ВХ}}^*}{Z_{\Gamma} + Z_{\text{ВХ}}^*}$$

и, как следствие этого, к уменьшению  $K_{\text{СКВ}} = K_{\text{ВЦ}} * K^*$ .

### 4. Выходной импеданс $Z_{\text{ВЫХ}}^* = U_2 / I_2$ .

Проведем качественный анализ изменения  $Z_{\text{ВЫХ}}^*$ . Логика рассуждений такова. Поскольку величина тока обратной связи пропорциональна  $U_2$  ( $I_{\text{ОС}} \approx \beta * U_2$ ), то в рассматриваемой схеме (см. рис. 3.4) происходит стабилизация выходного напряжения  $U_2$ . Поэтому модель выходной цепи усилителя, охваченного ООС  $Y$ -типа, изобразим с внутренним источником ЭДС, как показано на рис. 3.5.



**Рис. 3.5. Модель выходной цепи усилителя, охваченного ООС  $Y$ -типа**

Пусть дестабилизирующим фактором является изменение  $Z_{\text{Н}}$ . Стабилизация выходного напряжения  $U_2$  при изменении  $Z_{\text{Н}}$  возможна только при уменьшении  $Z_{\text{ВЫХ}}^*$ . В пределе при  $Z_{\text{ВЫХ}}^* = 0$  выходное напряжение инвариантно к изменению  $Z_{\text{Н}}$ . Следовательно, величина выходного импеданса при введении ООС  $Y$ -типа уменьшается.

Рассмотренные типы ОС позволяют сделать следующие выводы:

1. Последовательная ОС, реализуемая при последовательном соединении входных зажимов, увеличивает входное сопротивление устройства.
2. ОС по току, реализуемая при последовательном соединении выходных зажимов, увеличивает выходное сопротивление устройства.
3. Параллельная ОС, реализуемая при параллельном соединении входных зажимов, уменьшает входное сопротивление устройства.
4. ОС по напряжению, реализуемая при параллельном соединении выходных зажимов, уменьшает выходное сопротивление устройства.

С использованием этих выводов кратко рассмотрим еще два типа ОС.

### Последовательно-параллельное соединение четырехполюсников.

Тип обратной связи:

#### Последовательная обратная связь по напряжению (ОС *H*-типа).

Последовательно-параллельное соединение двух четырехполюсников изображено на рис. 3.6.

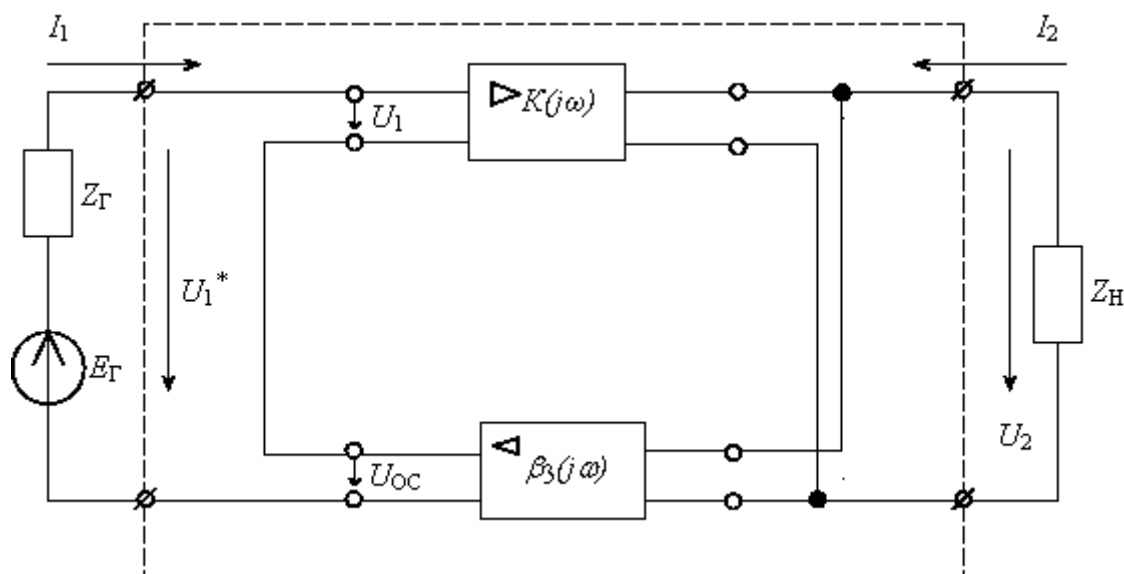


Рис. 3.6. Схема последовательно-параллельного соединения двух четырехполюсников

По аналогии с предыдущим анализом двух видов ООС произведем оценку основных электрических показателей усилителя, охваченного ООС *H*-типа.

$$1. K^*(j\omega) = U_2 / U_1^* = U_2 / (U_1 + U_{oc}) = U_2 / U_1 (1 + U_{oc} / U_1) = K / F,$$

$$\text{где } F = 1 + U_{oc} / U_1 = 1 + \beta \cdot \frac{U_{oc} \cdot U_2}{U_1 \cdot U_2} = (1 + K\beta) \geq 1$$



$$2. K_I^*(j\omega) = I_2 / I_1 = K_I(j\omega).$$

$$3. Z_{\text{ВХ}}^*(j\omega) = U_1^* / I_1 = (U_1 + U_{\text{ОС}}) / I_1 = U_1(1 + U_{\text{ОС}} / U_1) / I_1 = Z_{\text{ВХ}}^* F.$$

Поскольку использование ООС  $H$ -типа, как и ООС  $Y$ -типа, приводит к стабилизации выходного напряжения  $U_2$ , то в рассматриваемом случае при введении ООС  $H$ -типа величина  $Z_{\text{ВЫХ}}^*$  также уменьшается.

### Параллельно-последовательное соединение четырехполюсников.

Тип обратной связи:

Параллельная обратная связь по току (ОС  $G$ -типа).

Параллельно-последовательное соединение четырехполюсников изображено на рис. 3.7.

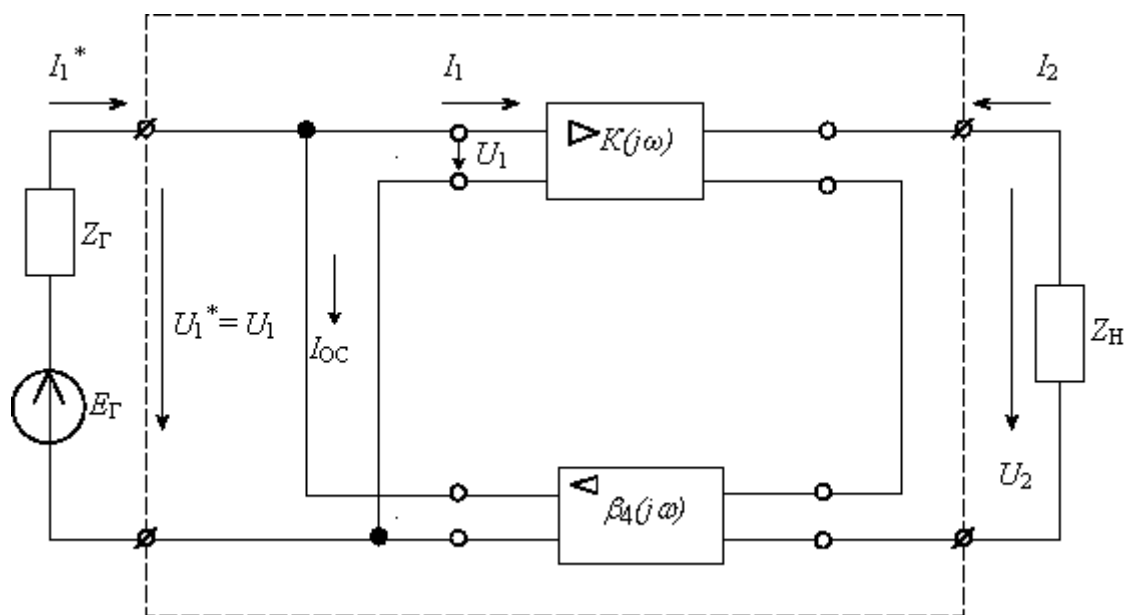


Рис. 3.7. Схема параллельно-последовательного соединения двух четырехполюсников

Сформулируем общее правило определения типа ОС:

1. Если при коротком замыкании нагрузки  $Z_{\text{Н}}$  напряжение ОС (или ток ОС) исчезает, то это – ОС по напряжению; в противном случае – ОС по току.
2. Если при коротком замыкании сопротивления источника входного сигнала  $Z_{\text{Г}}$  обратная связь исчезает, то это параллельная ОС; в противном случае – последовательная.

По аналогии с рассмотренными выше ОС можно провести качественный анализ основных электрических показателей УУ, охваченного ООС *G*-типа. Влияние различных видов ООС на основные электрические показатели УУ отражено в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

| Электрические показатели<br>Вид ООС | Коэффициент<br>усиления<br>$K^*(j\omega)$ | Входное<br>сопротивление<br>$Z_{ВХ}^*(j\omega)$ | Выходное<br>сопротивление<br>$Z_{ВЫХ}^*(j\omega)$ | Какой<br>параметр<br>стабилизируется |
|-------------------------------------|---|---|---|--------------------------------------|
| <i>Z</i> -типа                      | $K(j\omega)/F$                            | $Z_{ВХ} \cdot F$                                | Увеличивается                                     | Выходной ток                         |
| <i>Y</i> -типа                      | Не изменяется                             | $Z_{ВХ}/F$                                      | Уменьшается                                       | Выходное напряжение                  |
| <i>H</i> -типа                      | $K(j\omega)/F$                            | $Z_{ВХ} \cdot F$                                | Уменьшается                                       | Выходное напряжение                  |
| <i>G</i> -типа                      | Не изменяется                             | $Z_{ВХ}/F$                                      | Увеличивается                                     | Выходной ток                         |

### 3.2. Стабилизирующее влияние ООС на характеристики усилителя

#### Влияние ООС на стабильность коэффициента усиления напряжения на средних частотах

В схему усилителя входят транзисторы, конденсаторы, резисторы. Предприятия – изготовители транзисторов, конденсаторов, резисторов указывают средние значения параметров элементов и допустимый разброс номиналов, например, для резистора: сопротивление 1 кОм с допустимым разбросом  $\pm 10\%$ . Конкретный экземпляр резистора при этом может иметь номинал 900 Ом или 1057 Ом и т.д. Аналогичная ситуация с конденсаторами и транзисторами. Если в рассчитанный усилитель включить реальные транзисторы, конденсаторы и резисторы, то характеристики усилителя – коэффициент усиления, граничные частоты – будут отличаться от расчетных значений. Если отличия выходят за пределы допустимых, то производят подстройку номиналов элементов. Эта подстройка

обеспечит требуемые характеристики при фиксированной температуре. Если же температура окружающей среды изменилась, то характеристики устройства опять изменятся, так как от температуры зависят значения параметров транзистора и значения номиналов резисторов и конденсаторов, в соответствии с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Производить подстройку для разных температур накладно. Ослабить влияние температуры можно, вводя ООС.

Итак, мы рассмотрим влияние ООС на стабильность коэффициента усиления при наличии неконтролируемых дестабилизирующих факторов.

Пусть при воздействии дестабилизирующего фактора (изменения температуры или колебания напряжения питания) коэффициент усиления в отсутствие ООС меняется в пределах:  $K_0 \pm \Delta K_0$ . Относительное изменение коэффициента усиления в отсутствие обратной связи обозначим через  $\delta$ :

$$\delta = \Delta K_0 / K_0. \quad (3.11)$$

Если устройство охвачено последовательной ООС, а это имеет место при действии ООС *H*-типа или *Z*-типа, то выражение для коэффициента усиления имеет вид:

$$K^*_0 = \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot \beta}, \quad (3.12)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления без охвата ООС,  $K^*_0$  – коэффициент усиления при действии ООС.

При охвате устройства ООС усиление меняется в пределах:  $K^*_0 \pm \Delta K^*_0$ .

Относительное изменение коэффициента усиления при действии обратной связи обозначим через  $\delta^*$ :

$$\delta^* = \Delta K^*_0 / K^*_0. \quad (3.13)$$

Если известны значения величин  $\delta$  и  $\delta^*$ , то можно определить, как изменяется нестабильность усиления при введении ООС. Для характеристики такого изменения используют функцию чувствительности  $S_{K_0}^{K^*_0}$  (читается:

чувствительность  $K_0^*$  по отношению к изменениям  $K_0$ ). Функция чувствительности выражается в виде:

$$S_{K_0}^{K_0^*} = \frac{\delta^*}{\delta} = \frac{\partial K_0^*}{\partial K_0} \cdot \frac{K_0}{K_0^*} \quad (3.14)$$

Выражение (3.14) получается из (3.11) и (3.13), если заменить конечные приращения  $\Delta$  на бесконечно малые  $\partial$ .

Найдем функцию чувствительности устройства, охваченного ООС. Для этого используем выражением (3.12). Получим:

$$S_{K_0}^{K_0^*} = \frac{(1+\beta K_0 - \beta K_0)(1+\beta K_0)K_0}{(1+\beta K_0)^2 \cdot K_0} = \frac{1}{(1+\beta K_0)} = \frac{1}{F}. \quad (3.15)$$

Из (3.15) следует, что при охвате устройства обратной связью его нестабильность уменьшается в  $F$  раз. Отметим, что и усиление устройства уменьшается в  $F$  раз. Это плата за повышенную стабильность.

### **Влияние ООС на частотные, фазовые, импульсные и нелинейные искажения**

Раньше было показано, что введение ООС приводит к стабилизации выходного напряжения  $U_2$  или выходного тока  $I_2$  усилителя. В качестве дестабилизирующих факторов можно рассматривать частотные и фазовые искажения. Тогда наличие стабилизирующего действия ООС должно привести к уменьшению этих искажений, т.е. к расширению полосы пропускания АЧХ и повышению линейности ФЧХ. Выше было сказано, что обратная связь по напряжению, которая реализуется в ООС  $H$ - и  $Y$ -типа, стабилизирует выходное напряжение. Эффект стабилизации можно объяснить следующим образом. Если происходит спад усиления, то уменьшается выходное напряжение. Уменьшение выходного напряжения приводит к уменьшению напряжения обратной связи, а, значит, к увеличению напряжения на базе транзистора. При введении ООС последовательной по входу, что имеет место в ООС  $H$ - и  $Z$ -типа, уменьшается входная проводимость  $Y_{вх} = g_{вх} + j\omega C_{вх}$ , а, значит, увеличивается входное сопротивление  $R_{вх}$  и уменьшается входная емкость. Увеличение  $R_{вх}$  приводит к увеличению постоянной времени заряда разделительной емкости, а, значит, к

расширению АЧХ в области нижних частот. Уменьшение  $C_{ВХ}$  приводит к уменьшению постоянной времени входной цепи в области верхних частот, а, значит, к расширению АЧХ в области верхних частот. При введении ООС последовательной по выходу, что имеет место в ООС  $G$ - и  $Z$ -типа, уменьшается входная проводимость  $Y_{ВЫХ} = g_{ВЫХ} + j\omega C_{ВЫХ}$ , а, значит, увеличивается выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  и уменьшается выходная емкость. Увеличение  $R_{ВЫХ}$  приводит к увеличению постоянной времени в области нижних частот, а, значит, к расширению АЧХ в области нижних частот. Уменьшение  $C_{ВЫХ}$  приводит к уменьшению постоянной времени каскада в области верхних частот, а, значит, к расширению АЧХ в области верхних частот.

Таким образом, все типы ООС приводят к расширению АЧХ.

Поскольку существует известная связь между переходной характеристикой  $g(t)$  и частотными характеристиками усилителя, то очевидно, что введение ООС приводит, в конечном итоге, к уменьшению импульсных искажений как в области малых, так и в области больших времен.

Введение ООС в усилитель уменьшает уровень нелинейных искажений, а в конечном итоге приводит к повышению линейности амплитудной характеристики и увеличению динамического диапазона устройства. Мерой нелинейных искажений является коэффициент нелинейных искажений, или клир-фактор  $k_{\Gamma}$ . Он представляет собой отношение эффективных значений высших гармоник к эффективному значению суммарного выходного сигнала и определяется выражением:

$$k_{\Gamma} = \sqrt{\frac{U^2_2 + U^2_3 + U^2_4 + \dots}{U^2_1 + U^2_2 + U^2_3 + U^2_4 + \dots}} \cong \frac{\sqrt{U^2_2 + U^2_3}}{U_1}$$

При охвате усилителя ООС значение коэффициента гармоник уменьшается:

$$k_{\Gamma}^* = k_{\Gamma} / F$$

Платой за уменьшение  $k_{\Gamma}$  является необходимое увеличение уровня входного сигнала в те же  $F$  раз.

### ***Контрольные вопросы***

1. В чем смысл отрицательной и положительной обратной связи?
2. Что понимают под последовательной ООС по току? Как изменяются основные показатели усилительного устройства при введении такой ООС?
3. Что понимают под параллельной ООС по напряжению? Как изменяются основные показатели усилительного устройства при введении такой ООС?
4. Что понимают под последовательной ООС по напряжению? Как изменяются основные показатели усилительного устройства при введении такой ООС?
5. Что понимают под параллельной ООС по току? Как изменяются основные показатели усилительного устройства при введении такой ООС?
6. Сформулируйте общее правило определения вида ООС.
7. Поясните влияние ООС на стабильность коэффициента усиления напряжения ( или тока ) на средних частотах.
8. Как влияет ООС на частотные, фазовые и импульсные искажения?
9. Поясните, как влияет ООС на уровень нелинейных искажений.

◀ НАЗАД

ВПЕРЕД ▶