

## ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ТОКОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

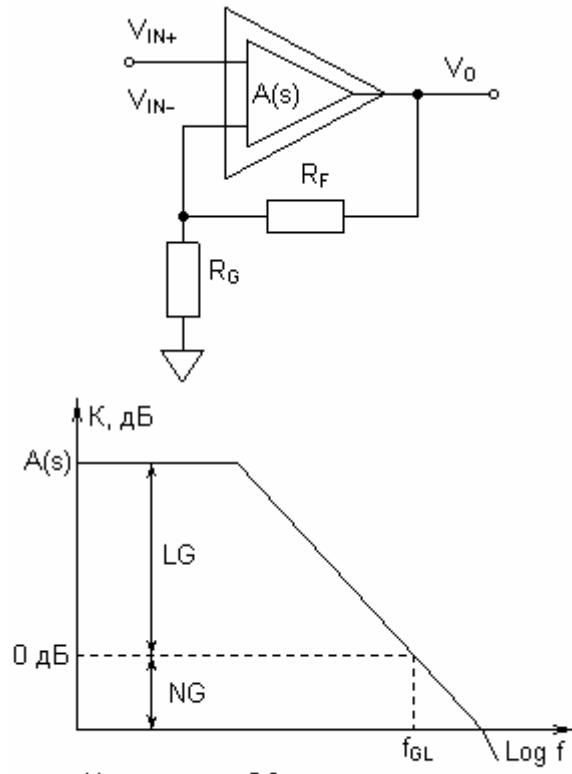
В последнее время среди разработчиков высокочастотных усилительных схем особую популярность приобрели операционные усилители с токовой обратной связью (*current feedback opamp*). В этой статье описаны отличия таких ОУ от усилителей с обратной связью по напряжению.

### 1. Характеристики основных типов усилителей

Обратная связь (ОС) по напряжению, как следует из названия, относится к петлезамкнутым конфигурациям, в которых сигнал ошибки представляет собой сигнал напряжения. В традиционных операционных усилителях обратная связь формируется сигналом напряжения, т.е. входные выводы реагируют на изменение напряжения; при этом вырабатывается соответствующее выходное напряжение. Обратная связь по току относится к петлезамкнутым конфигурациям, в которых сигнал ошибки, используемый для реализации обратной связи, представляет собой ток. В ОУ с токовой обратной связью ток ошибки передается на один из его входных выводов; при этом на выходе также вырабатывается соответствующее выходное напряжение. Заметьте, что при работе обе структуры пытаются достигнуть одинакового результата: нулевое дифференциальное входное напряжение и нулевой входной ток. Идеальный ОУ с обратной связью по напряжению имеет высокоомные входы, результатом чего является нулевой входной ток, и использует обратную связь по напряжению для поддержания нулевого входного напряжения. ОУ с обратной связью по току, напротив, имеют низкоомный вход и используют токовую обратную связь для поддержания нулевого входного тока.

Передаточная функция трансимпедансного усилителя является зависимостью выходного напряжения от входного тока, и коэффициент "усиления" (точнее, коэффициент преобразования) такого усилителя  $v_o/i_{in}$  имеет размерность сопротивления. Следовательно, ОУ с токовой обратной связью могут быть отнесены к трансимпедансным усилителям. Интересно отметить, что схема на ОУ с замкнутой обратной связью по напряжению, может быть также отнесена к трансимпедансным схемам при динамическом токовом управлении низкоимпедансным суммирующим выводом (например, при считывании сигнала фотодиода). Такая схема формирует выходное напряжение, равное входному току, умноженному на сопротивление обратной связи.

Так как, в принципе, любая схема с ОУ может быть выполнена либо с обратной связью по току, либо с обратной связью по напряжению, то преобразователь ток-напряжение может быть выполнен на операционном усилителе с токовой обратной связью. Когда используется термин трансимпедансный усилитель, необходимо понимать разницу между ОУ с токовой ОС со специфичной структурой и любыми петлезамкнутыми преобразователями тока в напряжение, которые ведут себя как трансимпедансные схемы.



Усилитель с ОС по напряжению.  
Схема для неинвертирующего включения  
и диаграмма Бode.

В упрощенной модели операционного усилителя с ОС по напряжению (бесконечное входное сопротивление, нулевое выходное сопротивление и высокий коэффициент усиления при разомкнутой ОС) в неинвертирующем включении разность напряжений на входах ( $V_{IN+} - V_{IN-}$ ) усиливается в соответствии с коэффициентом усиления с разомкнутой обратной связью  $A(s)$ , и часть выходного напряжения передается на инвертирующий вход через резистивный делитель, состоящий из сопротивлений  $R_F$  и  $R_G$ .

Для этой схемы:

$$v_o = (v_{IN+} - v_{IN-}) \times A(s),$$

$$v_{IN-} = \frac{R_G}{R_G + R_F} \times v_o$$

Подставляя и упрощая, получаем:

$$\frac{v_o}{v_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \times \frac{1}{1 + \frac{1}{LG}}, \text{ где } LG = \frac{A(s)}{1 + \frac{R_F}{R_G}}$$

Верхняя граница частотного диапазона (полоса) схемы с замкнутой обратной связью равна частоте, на которой петлевое усиление  $LG$  имеет единичное значение (0 дБ). Член  $1 + R_F/R_G$ , называемый коэффициентом усиления шума (*noise gain*), для неинвертирующей схемы также является коэффициентом усиления сигнала. На

диаграмме Бode полоса схемы с замкнутой обратной связью определяется как пересечение графиков коэффициента усиления ОУ с разомкнутой обратной связью  $A(s)$  и коэффициента усиления шума  $NG$ . Большой коэффициент усиления шума уменьшает петлевое усиление и, следовательно, полосу при замкнутой ОС. Если график  $A(s)$  имеет наклон 20 дБ/декада, произведение коэффициента усиления схемы на ее полосу будет постоянной величиной. Таким образом, увеличение коэффициента усиления схемы на 20 дБ приведет к сужению полосы на одну декаду (в десять раз).

В упрощенной модели усилителя с обратной связью по току при неинвертирующем включении неинвертирующий вход является высокоимпедансным входом буфера с единичным коэффициентом усиления, а инвертирующий вход - низкоомный выход этого буфера. Буфер позволяет току ошибки  $I_{ERR}$  втекать или вытекать из инвертирующего входа, и единичный коэффициент усиления вынуждает инвертирующий вход следовать за сигналом неинвертирующего входа. Ток ошибки через резистор  $R_F$  передается в высокоимпедансный узел, где он преобразуется в напряжение и передается через буфер (на схеме не показан) на выход. Высокоимпедансный узел является частотно-зависимым сопротивлением  $Z(s)$ , по роли своей аналогичным усилению с разомкнутой обратной связью для ОУ с ОС по напряжению; он обладает высоким значением импеданса по постоянному току и имеет наклон 20 дБ/декада.

обладает нулевым выходным сопротивлением, т.е.  $R_O=0$ , то

$$\frac{V_O - V_{IN-}}{R_F} + \frac{-V_{IN-}}{R_G} + I_{ERR} = 0 \text{ и } I_{ERR} = \frac{V_O}{Z(s)}$$

Подставляя и решая для  $V_O/V_{IN+}$ , имеем

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \times \frac{1}{1 + \frac{1}{LG}}, \text{ где } LG = \frac{Z(s)}{R_F}$$

Передаточная функция для усилителя с токовой ОС такая же, как и для усилителя с ОС по напряжению, но петлевое усиление  $LG$  зависит только от сопротивления обратной связи  $R_F$ . Таким образом, частотная полоса ОУ с токовой ОС определяется значением  $R_F$ , а не шумовым усилением  $1 + R_F/R_G$ . Пересечение графиков  $R_F$  и  $Z(s)$  определяет петлевое усиление и полосу при замкнутой обратной связи. Несомненно, что произведение коэффициента усиления схемы на ее полосу в этом случае не является константой, что является преимуществом схемы с токовой обратной связью.

На практике, входной буфер неидеален - он обладает выходным сопротивлением порядка 20...40 Ом, которое модифицирует сопротивление обратной связи. При этом входные напряжения не равны друг другу. Делая подстановку в предшествующие уравнения, получаем:

$$V_{IN-} = V_{IN+} - I_{ERR} \times R_O$$

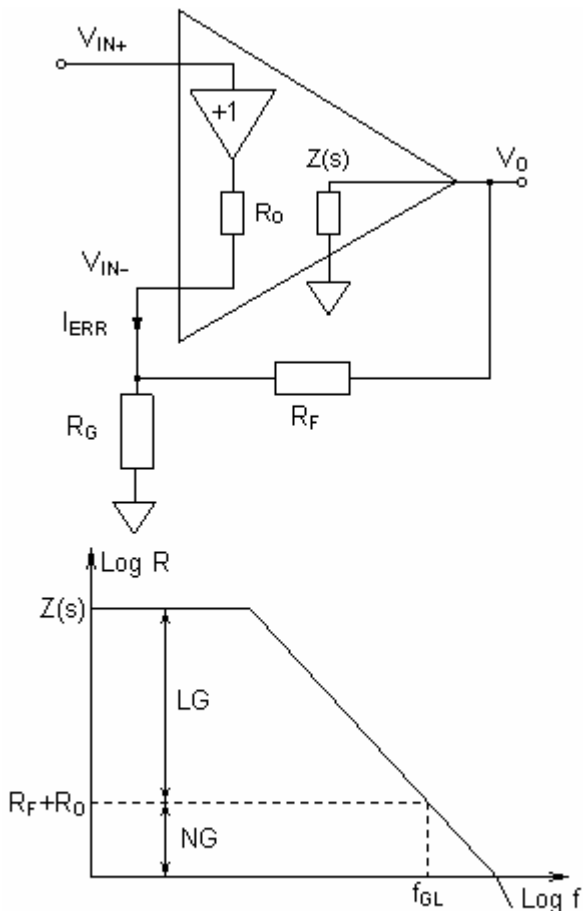
Решение для  $V_O/V_{IN+}$  даст следующий результат:

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \times \frac{1}{1 + \frac{1}{LG}}, \text{ где}$$

$$LG = \frac{Z(s)}{R_F + R_O \times \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

Добавка к сопротивлению обратной связи означает, что, в действительности, петлевое усиление отчасти зависит от коэффициента усиления схемы с замкнутой обратной связью. При малых коэффициентах усиления определяющим является сопротивление резистора  $R_F$ , но при большом усилении значение добавки в уравнении будет увеличиваться и уменьшать петлевое усиление, что, в свою очередь, приведет к сужению полосы схемы с замкнутой обратной связью.

Должно быть понятно, что соединение выхода и инвертирующего входа с отключенным резистором  $R_G$  (схема повторителя напряжения) будет сильно увеличивать петлевое усиление. По аналогии с ОУ с ОС по напряжению, максимальная обратная связь возникает, когда выходное напряжение передается на вход целиком, но предельный ток обратной связи равен току короткого замыкания. Чем меньшим будет сопротивление, тем большим будет ток. Графически,  $R_F=0$  будет задавать более высокочастотное пересечение с графиком  $Z(s)$  и полюс более высокого порядка. Как и в случае ОУ с ОС по напряжению, полюс более высокого порядка для  $Z(s)$  будет вызывать большой фазовый сдвиг на более высоких частотах, приводя к нестабильности при фазовом сдвиге более 180°. Так как оптимальное значение сопротивления  $R_F$  различно при разных коэффициентах усиления, диаграмма Бode полезна при определении полосы и запаса устойчивости по фазе для различных



Усилитель с ОС по току.  
Схема для неинвертирующего включения и диаграмма Бode.

Передаточная функция при  $V_{IN+}=V_{IN-}$  определяется суммой токов в  $V_{IN-}$  узле. Если предположить, что буфер

усилений. Более широкая полоса может быть достигнута при меньшем запасе устойчивости; работа при пиковом значении полосы приведет в частотной области к перерегулированию, а во временной области - к звону. В справочных данных для устройств с токовой обратной связью приводятся определенные оптимальные значения сопротивления резистора  $R_F$  для различных коэффициентов усиления схемы.

Усилители с токовой обратной связью обладают прекрасными характеристиками по скорости нарастания выходного сигнала. Скорость нарастания выходного напряжения у традиционного, не сильно нагруженного усилителя с ОС по напряжению ограничена током, необходимым для перезарядки внутренней емкости компенсации. Когда вход подвергается сильному сигнальному воздействию, входной каскад насыщается, и

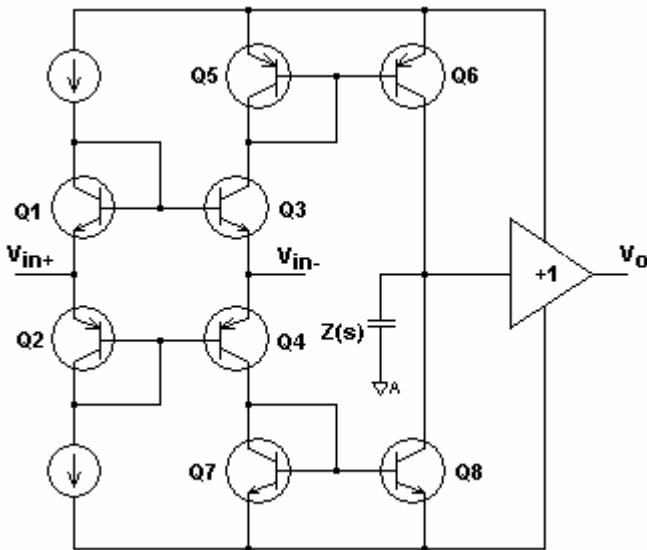
только лишь часть его тока способна перезаряжать эту емкость. У ОУ с токовой ОС низкомный вход позволяет более сильным переходным токам втекать в усилитель, что и требуется для перезарядки компенсационной емкости. Внутренние токовые зеркала передают этот входной ток в компенсационный узел, обеспечивая быструю перезарядку, теоретически пропорционально изменению входного сигнала. Более высокая скорость нарастания приводит к более быстрому времени нарастания выходного сигнала, меньшим искажениям, меньшей нелинейности и более широкой полосе для большого сигнала. Реальная скорость нарастания ограничивается насыщением токовых зеркал, которое наступает при 10...15 мА, а также входным и выходным буферами.

## 2. Точность

Точность усиления сигнала постоянного тока для усилителя с токовой ОС может быть определена из формулы его передаточной характеристики, также как и для ОУ с ОС по напряжению. Это, по существу, отношение внутреннего сопротивления к сопротивлению резистора обратной связи. При типовом значении внутреннего сопротивления 1 МОм, сопротивления обратной связи 1 кОм и выходного сопротивления  $R_O$  около 40 Ом ошибка при единичном коэффициенте усиления составит около 0,1 %. При высоком коэффициенте усиления ошибка значительно возрастает, поэтому ОУ с токовой ОС изредка используются в схемах с большим усилением, особенно в схемах, где требуется малая погрешность усиления.

должны быть равнозначными, и смещение будет небольшим от  $V_{IN+}$  до  $V_{IN-}$ . Изменение входного сигнала  $V_{IN+}$  в положительную сторону будет являться причиной уменьшения  $V_{CE}$  Q3 и уменьшения мощности рассеивания, в соответствии с возрастанием  $V_{BE}$ . У включенного диодом транзистора Q1 напряжение  $V_{CE}$  постоянно, поскольку постоянно напряжение  $V_{BE}$ . Такой же эффект будет иметь место в токовом зеркале, где изменение напряжения высокоимпедансного узла изменяет  $V_{CE}$  и, соответственно,  $V_{BE}$  для транзистора Q6, но не для Q5. Изменение  $V_{BE}$  служит причиной токовой ошибки, возвращаемой на вход  $V_{IN-}$ , которая, будучи умноженной на сопротивление  $R_F$ , будет являться результатом ошибки выходного смещения. Мощность рассеивания для каждого транзистора проявляется в области, очень небольшой для возникновения тепловой взаимосвязи между устройствами. Тепловые ошибки во входном каскаде могут быть уменьшены в схемах с инвертирующим включением, исключая синфазное входное напряжение.

Тепловое время установления зависит от частоты и формы сигнала. Этот процесс происходит не мгновенно; тепловой коэффициент транзисторов, от которого зависит процесс, определяет время изменения температуры и изменение параметров. В усилителях, сделанных согласно высокочастотному комплементарному биполярному процессу (разработка Analog Devices Inc.), эффект теплового установления не проявляется при входной частоте выше нескольких килогерц, потому что входной сигнал изменяется очень быстро. Системы связи в общем случае более чувствительны к спектральным характеристикам, поэтому такая дополнительная ошибка усиления не слишком важна. Тепловое время установления может неблагоприятно воздействовать на сигналы ступенчатой формы, которые могут присутствовать в сигналах видеозаписей. Для таких приложений ОУ с токовой обратной связью могут не обеспечивать соответствующую точность установок.



Тем не менее, для многих приложений установочные характеристики часто более важны, чем погрешность усиления. Несмотря на то, что усилители с обратной связью по току имеют очень быстрое время нарастания сигнала, во многих справочных технических данных приводится значение этого параметра только лишь 0,1 %. Такая малая величина возникает из-за теплового времени установления - основного фактора, ограничивающего точность установок.

Рассмотрим комплементарный вход буфера, в котором напряжение на выводе  $V_{IN-}$  есть смещение для вывода  $V_{IN+}$  с учетом напряжений  $V_{BE}$  транзисторов Q1 и Q3. Когда входной сигнал равен нулю, напряжения  $V_{BE}$