

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ТОКОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Первая часть статьи ([Э. Барнс. Операционные усилители с токовой обратной связью.](#)) была посвящена рассмотрению отличий ОУ с токовой ОС (*CF OpAmp*) от ОУ с ОС по напряжению (*VF OpAmp*). Во второй части главное место отведено применению операционных усилителей с токовой обратной связью.

1. Применение в схеме с инвертирующим включением

Инвертирующая схема на ОУ работает потому, что к инвертирующему входу подключается низкоимпедансный узел. Для ОУ с ОС по напряжению этот узел начинает обладать малым сопротивлением только после замыкания петли обратной связи.

Усилитель с токовой ОС обладает очень низким входным импедансом для инвертирующего входа. Поэтому в инвертирующем включении он будет работать очень хорошо, а идеальный ОУ с токовой ОС будет поддерживать в суммирующей точке (т.е. точке, в которой смешиваются входной сигнал и сигнал

обратной связи) напряжение земли даже при разомкнутой обратной связи.

ОУ с токовой ОС не имеют высокочастотных всплесков напряжения (пиков) в суммирующей точке, которые присущи усилителям с ОС по напряжению, особенно, в высокочастотных приложениях. Кроме того, к преимуществам ОУ с токовой ОС в инвертирующем включении следует отнести максимальную скорость нарастания выходного напряжения и более низкие погрешности, связанные с тепловым временем установления.

2. Применение в качестве преобразователя ток-напряжение

Следовательно, операционные усилители с токовой обратной связью можно использовать в качестве преобразователей тока в напряжение. Правда, при этом есть некоторые ограничения: полоса такого усилителя напрямую определяется сопротивлением резистора обратной связи ОУ, а это сопротивление определяет коэффициент преобразования ток-напряжение. Кроме того, шумовая компонента тока инвертирующего входа будет достаточно большой. При усилении малых токов более высокое сопротивление резистора обратной связи приводит к более высокому отношению сигнал/шум (сопротивление/шум), поскольку коэффициент усиления имеет прямую зависимость, а шум резистора определяется квадратным корнем из его

сопротивления. Удвоение сопротивления резистора обратной связи приводит к удвоению коэффициента усиления сигнала, в то же время шум возрастет лишь в 1,4 раза. К сожалению, вклад шумовой компоненты тока инвертирующего входа также удвоится, а полоса сигнала для схемы на ОУ с ОС по току уменьшится в два раза.

Таким образом, более высокий шум входного тока схемы на ОУ с токовой обратной связью может препятствовать его применению во многих случаях при использовании фотодиодов в качестве датчиков. Когда шум не является критичным фактором, сопротивление обратной связи следует выбирать исходя из требуемой полосы схемы, а основное усиление производить вторым усилительным каскадом.

3. Входной токовый шум

Повышенный входной токовый шум операционных усилителей с токовой обратной связью накладывает некоторые ограничения в применении таких ОУ. Обычно величина токового шума для ОУ с ОС по току находится в пределах от 20 до 30 пА/Гц^{1/2}. Несмотря на это, входной вольтный шум, по сравнению с аналогичными ОУ с ОС по напряжению, меньше и составляет порядка 2 нВ/Гц^{1/2}, и сопротивление резистора обратной связи может быть меньшим (обычно до 1 кОм). При коэффициенте усиления схемы, равном -1, доминирующим источником шума является шум тока инвертирующего входа, протекающего через резистор обратной связи. При плотности входного токового шума 20 пА/Гц^{1/2} и сопротивлении резистора обратной связи 750 Ом

вносящее основной вклад шумовое напряжение, приведенное ко входу, будет равняться 15 нВ/Гц^{1/2}.

При увеличении коэффициента усиления схемы (уменьшением сопротивления входного резистора) выходной шум, связанный с токовой шумовой компонентой, не будет расти, а преобладающим шумовым фактором будет становиться входной вольтный шум. При коэффициенте усиления схемы, например, 10 вклад от токовой шумовой составляющей, отнесенной ко входу, будет равен лишь 1,5 нВ/Гц^{1/2}. Общий шум, приведенный ко входу, составит 2,5 нВ/Гц^{1/2} (пренебрежимый шум резистора). Таким образом, применение операционных усилителей с токовой обратной связью привлекательно в схемах с требуемым низким уровнем собственного шума.

4. Классическая дифференциальная схема

Хотя входы операционного усилителя с токовой обратной связью неравносильны друг другу, передаточная функция идеальной классической дифференциальной схемы с четырьмя резисторами останется такой же, как и в случае применения ОУ с ОС по напряжению. На низких частотах коэффициент ослабления синфазного сигнала дифференциальной схемы ограничен точностью внешних резисторов и при 0,1% точности составляет около 66 дБ.

На высоких частотах КОСС снижается из-за емкостных составляющих входных импедансов. Высокоскоростные ОУ с обратной связью по напряжению обычно имеют одинаковую емкость входных выводов, и, поэтому, КОСС у них равен около 60 дБ на частоте 1 МГц. Из-за несбалансированности входов в ОУ с ОС по току, входные емкости также оказываются несбалансированными. Это означает, что в дифференциальной схеме должны использоваться

внешние резисторы с небольшим сопротивлением (от 100 до 200 Ом) для уменьшения влияния разных входных емкостей.

При тщательном выборе резисторов КОСС дифференциальной схемы с ОУ с ОС по току на высоких частотах будет сопоставим со значением этого параметра для схемы с ОУ с ОС по напряжению. Для повышения ослабления синфазного сигнала в обеих

схемах могут применяться подстроечные конденсаторы. Однако при этом полоса выходного сигнала может ограничиться. При высоких требованиях, лучшим выбором может оказаться монолитный высокоскоростной дифференциальный усилитель, например, AD830, не требующий внешних резисторов. Этот усилитель обладает КОСС более 75 дБ на частоте 1 МГц и около 53 дБ на частоте 10 МГц.

5. Конденсатор в цепи обратной связи

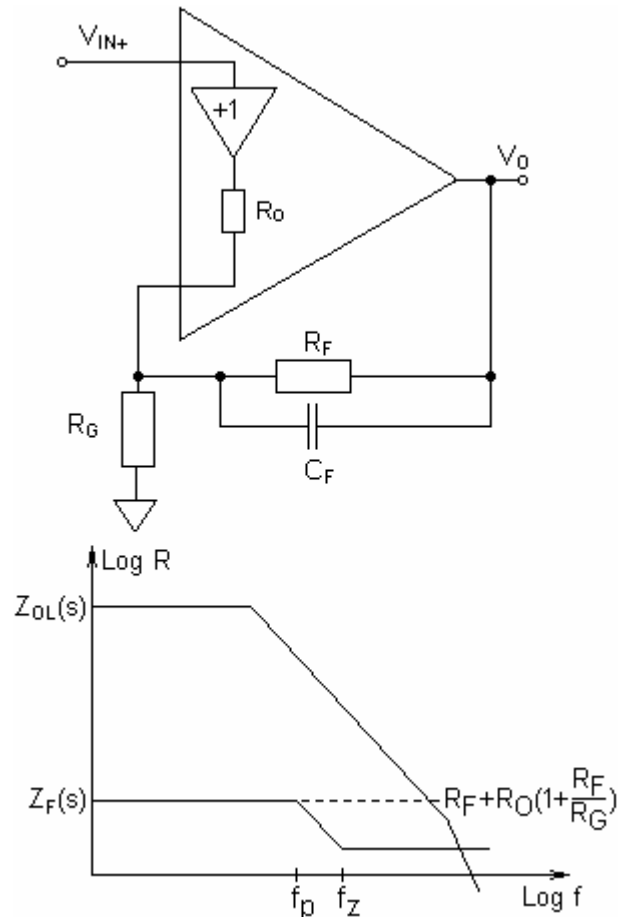
Первые соображения по поводу конденсатора в цепи обратной связи следующие. У ОУ с ОС по напряжению создается полюс на графике шумового усиления. Такой же полюс и нуль имеют место на графике трансимпеданса с обратной связью у ОУ с ОС по току, как показано на рисунке ниже. Необходимо помнить, что запас по фазе в точке пересечения графиков трансимпеданса с обратной связью и без определяет стабильность усилителя в схеме с замкнутой ОС.

Трансимпеданс с конденсатором C_F , включенным параллельно резистору R_F , определяется следующим образом:

$$Z_F(s) = \left[R_F + R_O \left(1 + \frac{R_F}{R_G} \right) \right] \frac{1 + \frac{s C_F R_F R_G R_O}{R_F R_G + R_F R_O + R_G R_O}}{1 + s C_F R_F}$$

Полюс возникает в точке $1/2\pi R_F C_F$, а нуль - на более высокой частоте $1/[2\pi(R_F \parallel R_G \parallel R_O) C_F]$. Если точка пересечения графиков Z_F и Z_{OL} располагается на очень высокой частоте, может возникнуть нестабильность из-за чрезмерного фазового сдвига при разомкнутой обратной связи. Если R_F стремится к бесконечности (как в схеме интегратора), полюс располагается на низкой частоте и очень небольшое сопротивление, существующее на высоких частотах, ограничивает петлевое усиление. Исходя из этого, на высоких частотах устойчивость интегратора на ОУ с ОС по току может быть повышена включением резистора последовательно с интегрирующим конденсатором.

ОУ с обратной связью по току не пригодны для использования в схемах активных фильтров, использующих реактивную обратную связь. Но для фильтров Саллена-Кея, в которых ОУ применяются в качестве усилителей с фиксированным коэффициентом усиления, такие операционные усилители могут подойти. В общем, нежелательно подключать конденсатор параллельно резистору обратной связи R_F ОУ с токовой обратной связью.



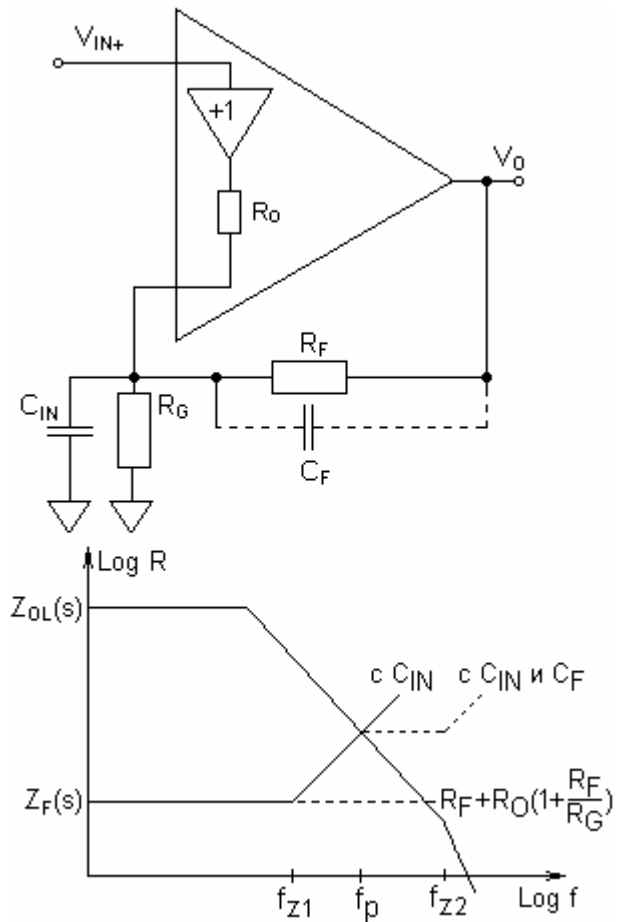
Другую проблему создает эффект емкостного шунтирования инвертирующего входа. В усилителях с обратной связью по напряжению эта емкость создает нуль на графике шумового усиления, который приводит к увеличению отношения между шумовым усилением и усилением с разомкнутой обратной связью и, как следствие, создает избыточный фазовый сдвиг, приводящий к нестабильности, если не принять меры по компенсации. Такой же эффект наблюдается и для ОУ с обратной связью по току, но проблема может быть менее отчетливо выражена.

Трансимпеданс в случае с шунтирующей емкостью C_{IN} выглядит следующим образом:

$$Z_F(s) = \left[R_F + R_O \left(1 + \frac{R_F}{R_G} \right) \right] \frac{1 + \frac{s C_{IN} R_F R_G R_O}{R_F R_G + R_F R_O + R_G R_O}}{1 + s C_{IN} R_F}$$

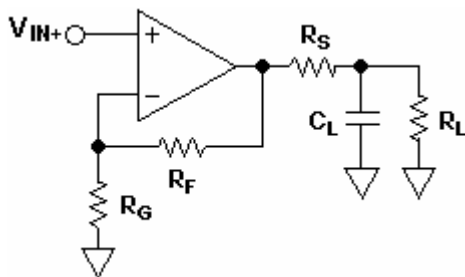
Нуль располагается на частоте f_{z1} (следующий рисунок), ее значение определяется как $1/[2\pi(R_F \parallel R_G \parallel R_O) C_{IN}]$. Этот нуль приводит к таким же проблемам, как и в случае использования ОУ с ОС по напряжению, но частотный излом на нуле характеристики имеет тенденцию быть более высокочастотным из-за более низкого импеданса

инвертирующего входа. При $R_F=750$ Ом, $R_G=750$ Ом и $C_{IN}=10$ пФ нуль для ОУ с ОС по напряжению будет располагаться на частоте приблизительно 40 МГц, в то же время для ОУ с ОС по току с $R_O=40$ Ом - на частоте около 400 МГц. Предполагая частоту единичного усиления для обоих усилителей 500 МГц, в схеме на ОУ с ОС по напряжению потребуется конденсатор в цепи обратной связи для компенсации влияния C_{IN} . Однако это приведет к уменьшению полосы сигнала. Конечно, схема на усилителе с обратной связью по току тоже покажет дополнительный фазовый сдвиг относительно нуля, но не такой большой, поскольку точка пересечения располагается на частоте в десять раз выше. Сигнальная полоса будет более широкой, а компенсация может потребоваться только для получения более плоской частотной характеристики или для оптимизации импульсной характеристики. Улучшения формы отклика можно добиться включением конденсатора с небольшой емкостью параллельно резистору R_F для уменьшения разницы между Z_F и Z_{OL} . Для запаса по фазе по крайней мере 45° конденсатор в цепи обратной связи должен выбираться так, чтобы полюс характеристики трансимпеданса с подключенной обратной связью располагался в точке пересечения графиков Z_F и Z_{OL} (частота f_p на рисунке). Необходимо помнить об эффекте высокочастотного нуля от влияния конденсатора обратной связи (частота f_{z2}).



6. Работа на емкостную нагрузку

Емкостная нагрузка для ОУ с токовой обратной связью представляет собой такую же проблему, как и для ОУ с обратной связью по напряжению, увеличивая фазовый сдвиг сигнала ошибки, что приводит к уменьшению запаса по фазе и возможной нестабильности схемы. Существует несколько широко известных способов, улучшающих характеристики схемы при работе на емкостную нагрузку. Самым популярным способом для высокоскоростных усилителей является включение резистора последовательно с выходом ОУ.



Резистор находится вне цепи обратной связи, но подключен последовательно с емкостью. Поэтому усилитель не нагружен непосредственно на емкость. При применении ОУ с токовой ОС может быть предложен вариант увеличения сопротивления R_F для снижения петлевого усиления. Такая схема всегда приводит к ухудшению таких параметров, как полоса, скорость нарастания и время установления сигнала. При выборе значения сопротивления лучшее решение даст эксперимент, при котором находится оптимальное значение, позволяющее получить требуемые характеристики - скорость нарастания, время установления с необходимой точностью, минимальное перегулирование и сглаженность полосы пропускания.

7. Питание ОУ с ОС по току

В вопросе питания операционные усилители с обратной связью по напряжению топологически находятся в привилегированном положении по нескольким причинам. В усилителях, специально разработанных для хорошего управления емкостной нагрузкой, а также в *rail-to-rail* ОУ (т.е. в таких ОУ, в которых амплитуда выходного сигнала может достигать напряжения питания за вычетом напряжения

насыщения $U_{кэ}$, составляющего несколько сотен милливольт), выходные каскады обычно делаются по схеме с общим эмиттером и реже по схеме эмиттерного повторителя. Схема с общим эмиттером позволяет получить большую амплитуду выходного сигнала. Такой тип выходного каскада не может обеспечить большое быстродействие, главным образом, из-за большого выходного импеданса.

Поскольку операционные усилители с токовой обратной связью специально разработаны для высокоскоростных применений, в них используются выходные каскады, выполненные по схеме эмиттерного повторителя.

С применением новой технологии, такой как XFGB (*extra-fast complementary bipolar*) от Analog Devices Inc., стала возможной разработка выходного каскада по схеме с общим эмиттером с полосой 160 МГц и скоростью нарастания выходного сигнала 160 В/мкс при однополярном напряжении питания 5 В (ОУ AD8041). В усилителе использована обратная связь по напряжению, но даже если используется обратная связь по току, скорость нарастания все-таки ограничивается выходным каскадом. Другие XFGB-усилители с выходным каскадом по схеме эмиттерного повторителя более быстрые по сравнению с AD8041. К тому же, в однополярных входных каскадах используются рпр дифференциальные пары для того, чтобы приблизить нижний уровень сигнала к нижнему уровню напряжения питания (обычно, земля).

Тем не менее, операционные усилители с токовой обратной связью могут использоваться в схемах с однополярным питанием. Analog Devices предлагает много усилителей с напряжением питания

+5 В и даже +3 В. Что следует принимать во внимание, чтобы устройства хорошо работали при однополярном питании? В первую очередь, необходимы либо сдиг уровня входного сигнала, либо развязка по переменному току. Это общее требование для большинства систем с однополярным питанием. Если схема должна работать с сигналом, уровни которого близки к уровням питания или выдвигаются требования по развязке по переменному току, то операционный усилитель с токовой обратной связью не будет являться лучшим выбором. Другим фактором является максимальный (*rail-to-rail*) размах выходного сигнала при работе на большую нагрузку. Много так называемых *rail-to-rail* усилителей не обеспечивают максимальную амплитуду при работе на нагрузку в виде 50- или 75-омных кабелей из-за увеличения напряжения насыщения коллектор-эмиттер при возрастании выходного тока. Таким образом, если необходимо иметь максимальную амплитуду выходного сигнала, то нельзя использовать операционные усилители с токовой обратной связью. Но если стоит задача получения максимальной скорости нарастания выходного сигнала и большого выходного тока, то в этом случае необходимо выбирать ОУ с ОС по току.