

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА УСИЛИТЕЛЯ



Операционные усилители, инструментальные усилители, дифференциальные усилители, УНЧ... Разобраться в их многообразии и выбрать нужный вариант для разработки поможет материал известного специалиста в области аналоговой схемотехники Рона Манчини из компании Texas Instruments.

ВВЕДЕНИЕ

Современная электронная промышленность предлагает настолько широкий выбор усилителей, что зачастую их выбор вызывает затруднения у разработчиков — разбираться в различиях непросто. Одних только типов более десятка — операционные усилители, инструментальные усилители, усилители низкой частоты (аудио), дифференциальные усилители, усилители с обратной связью по току (current feedback), усилители высокой частоты, буферы, различные типы усилителей мощности и т.д. При этом, выбор усилителя исходя из его типа затруднителен — названия типов зачастую носят «исторический» оттенок, мало связанный с современ-

ными примерами использования. Например, название ОУ (операционный усилитель) берет свое начало с аналоговых вычислительных машин, где операционные усилители выполняли математические операции. Единственной общей чертой полупроводниковых усилителей является наличие встроенной или внешней обратной связи. Базовыми «строительными кирпичиками» усилителей являются транзисторы, которые характеризуются, в частности, напряжением база-эмиттер и коэффициентом усиления по току, причем эти характеристики подвержены влиянию технологического процесса, температуры окружающей среды, нагрузок и просто временному дрейфу. Из-за этого

контролировать коэффициент усиления усилителя без обратной связи не представляется возможным, его вариации могут превышать десятикратную величину. Наилучший способ контроля коэффициента усиления — использование обратной связи, однако здесь таятся свои «подводные камни» — при введении ОС могут появиться выбросы, «звоны» и генерация [1]. Встроенная обратная связь (она также называется внутренней компенсацией) позволяет избавиться от этих неприятных эффектов. Такая обратная связь незаметна для пользователя, усилитель при этом ведет себя стабильно при использовании рекомендованной производителем схемы включения и соблюдении рекомендуемых им условий эксплуатации; однако, при определенных условиях любой усилитель с коэффициентом усиления больше единицы может самовозбуждаться. Для усилителей с внешней обратной связью (компенсацией) следует применять дополнительные внешние элементы для предотвращения генерации и насыщения. Вопрос корректной компенсации следует обязательно учитывать при выборе усилителя, в противном случае вы рискуете попасть в неприятную ситуацию, получив в своей схеме генератор вместо усилителя.

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ОУ)

Операционный усилитель является универсальным инс-

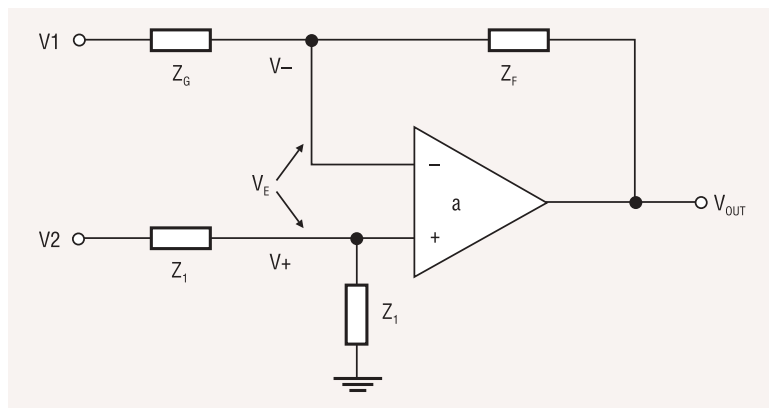


Рис. 1. На основе этой базовой схемы включения ОУ можно построить множество различных схем

трументом — им (разумеется, в пределах его возможностей) можно заменить любой другой усилитель. При разработке следует учитывать предельные возможности ОУ, опытный разработчик также должен знать, что можно предпринять, когда этих возможностей уже недостаточно. Часто предел возможностей определяется не собственно усилителем, а внешними компонентами его «обвязки». На рис. 1 показана наиболее универсальная схема включения операционного усилителя. В таблице 1 приведены различные варианты использования этой схемы в зависимости от выбора внешних элементов схемы. Обратите внимание, что замена импедансов конденсаторами делает схемы частотнозависимыми, а в зависимости от точки подключения входного сигнала изменяется функция каскада. Существует целый ряд усилителей специального назначения, используемых там, где возможностей ОУ общего назначения недостаточно, однако грань между ОУ общего назначения и специальными усилителями является настолько размытой, что в большинстве схем можно успешно использовать как те, так и другие. В данной статье мы рассмотрим различные типы усилителей специального

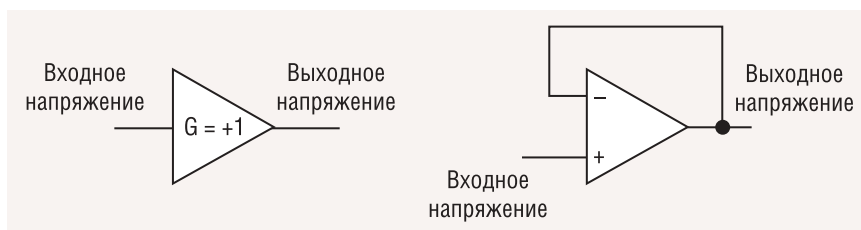


Рис. 2. Два типа обозначения буфера

назначения, при этом не будем забывать о том, что появление таких типов усилителей всегда связано с улучшением какого-либо параметра классического операционного усилителя.

БУФЕРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

В этом разделе мы рассмотрим лишь повторители напряжения (см. рис. 2), повторители тока строятся при помощи соответствующего выбора цепей обратной связи. Повторители (буферы) имеют коэффициент усиления, равный единице, а также исключительно высокий входной и низкий выходной импедансы. В базовой схеме включения ОУ входной импеданс определяется компонентами на входе и свойствами самого ОУ. В схеме буфера входной импеданс определяется исключительно свойствами ОУ. Таким образом, входной импеданс такой схемы зависит только от свойств операци-

онного усилителя. В базовой схеме входные компоненты нагружают входной сигнал, что нежелательно в том случае, когда источник сигнала имеет высокое выходное сопротивление. Проблема повышения входного импеданса решается при помощи буферных либо инструментальных усилителей. Следует отметить, что выходное сопротивление ОУ является комплексной функцией, т.к. на него влияют цепи обратной связи. Определяющее влияние на выходной импеданс оказывает сопротивление выходного каскада. Обычно в качестве выходного каскада используется эмиттерный повторитель, имеющий низкий выходной импеданс, определяемый как $r_{ib} + R_B/\beta$ и имеющий типовое значение в 25 Ω . Выходной импеданс эмиттерного повторителя растет с увеличением частоты, образуя перемещающиеся полюса (полюсами называются точки резкого

Таблица 1. Построение различных схем при помощи изменения величины компонентов базовой схемы на рис. 1

Тип схемы	V1	V2	ZG	ZF	Z1	Z2
Инвертирующий усилитель	входной сигнал	земля	определяется усилением	определяется усилением	отсутствует	$ZG \parallel ZF$
Неинвертирующий усилитель	земля	входной сигнал	определяется усилением	определяется усилением	$ZG \parallel ZF$	отсутствует
Инвертирующий интегратор	входной сигнал	земля	RG	CG	отсутствует	$ZG \parallel ZF$
Буфер	земля	входной сигнал	отсутствует	замкнут	замкнут	отсутствует
Схема вычитания	входной сигнал —	входной сигнал +	RG	RF	RG	

изменения частотной характеристики) и порождая погрешности на высоких частотах. Еще хуже обстоят дела в операционных усилителях, диапазон сигнала которых равен диапазону питающего напряжения (так называемые rail-to-rail усилители), т.к. выходной каскад в них построен по схеме с общим коллектором; суммарный импеданс в этом случае зависит от нагрузки и может достигать значительных величин, до нескольких килоом. Помочь в этом случае может правильный выбор петлевого усиления, которое влияет на импеданс выходного каскада и способно значительно его снизить. В результате на постоянном токе и в области низких частот можно добиться очень низких значений выходного импеданса операционного усилителя, до долей Ом. Выходное сопротивление повышается с ростом частоты, так как при повышении частоты снижается усиление ОУ. Высокий выходной импеданс чреват двумя проблемами — влияние токов нагрузки на сигнал и проблемами со стабильностью, возникающими из-за того, что выходные конденсаторы создают полюса. Наилучшим решением при работе с высокими токами нагрузки является использование специально разработанных для этих целей ОУ. Ещенесколько лет назад для работы на терминированный кабель (что требует нескольких сотен миллиампер выходного тока) использовались специальные буферные каскады, на данный же момент существуют специально разработанные операционные усилители, способные без проблем работать на такую нагрузку. Преимущество бу-

фера по сравнению с типовой схемой включения ОУ заключается в том, что буфер всегда имеет меньший импеданс, т.к. его петлевое усиление максимально, а выходной каскад также разработан с учетом требований минимизации импеданса. По отношению к емкостным нагрузкам разные ОУ ведут себя по-разному — одни становятся нестабильными, другие же не имеют подобных проблем. Операционные усилители, способные работать на нагрузки с большой емкостью, имеют очень низкое сопротивление выходного каскада, однако, при этом проигрывают в скорости, т.к. требуют выходных транзисторов повышенных размеров. Резюмируя вышесказанное — в зависимости от требований к выходному импедансу разработчику следует отдать выбор операционному усилителю, буферу либо усилителю мощности.

СХЕМА ВЫЧИТАНИЯ ИЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

При построении схем на основе ОУ в качестве внешних элементов используются резисторы и конденсаторы. Как видно из таблицы 1, в том случае, когда все импедансы являются резистивными и равными друг другу, результирующая схема является дифференциальным усилителем или схемой вычитания. Работа такой схемы описывается формулой 1:

$$V_{\text{OUT}} = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right) - V_1 \frac{R_F}{R_G} \quad (1)$$

Когда $R_2 = R_F$ и $R_1 = R_G$, формула 1 принимает вид

$$V_{\text{OUT}} = (V_2 - V_1) \frac{R_F}{R_G} \quad (2)$$

В тех случаях, когда при разработке схемы требуется подавление синфазной составляющей — т.е. когда $V_2 = V_{2\text{Signal}} + V_{\text{CM}}$ и $V_1 = V_{1\text{Signal}} + V_{\text{CM}}$ — то условием для перехода к формуле 2 является очень точное соответствие резисторов. Существуют два типа реализации формулы 2 — на дискретных компонентах и ОУ и на специализированных интегральных схемах (ИС). Наиболее часто встречается решение на базе ОУ, т.к. в продаже существует множество недорогих ИС, содержащих несколько ОУ в одном корпусе, кроме этого, дискретными резисторами легко регулировать усиление. Недостатком такого решения является необходимость точного подбора и согласования резисторов. Например, при использовании резисторов с разбросом в 1% в идеале можно было бы получить схему с коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС) в 40 дБ, но для наихудшего случая распределения разброса резисторов мы получим КОСС всего лишь в 24,17 дБ [2]. В то же время интегральные дифференциальные усилители обеспечивают КОСС на уровне более 100 дБ. Транзисторы входного каскада в таких микросхемах специально подстраиваются для обеспечения максимального согласования и идентичности. Кроме этого, в них используются специальные тонкопленочные резисторы, осажденные на подложке ИС. Несмотря на то, что тонкопленочные резисторы обладают высокой точностью, для

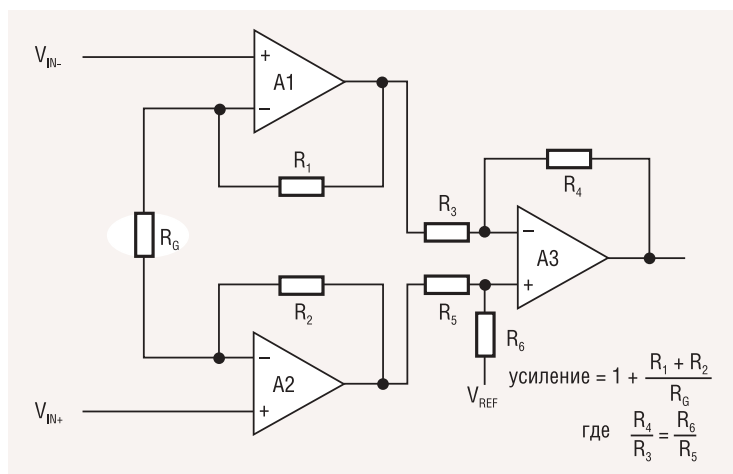


Рис. 3. Инструментальный усилитель на базе трех ОУ

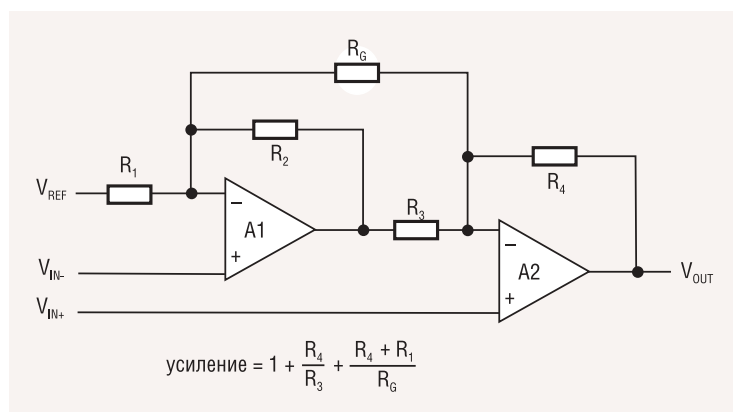


Рис. 4. Инструментальный усилитель с уменьшенным числом элементов

достижения 100 дБ КОСС они проходят дополнительную лазерную подгонку. Ввиду того, что дифференциальные усилители содержат резисторы на входе, их входное сопротивление не является наилучшим. Во многих случаях, например, при тензометрических измерениях, требуется высокий КОСС для подавления синфазных помех, однако мостовые измерители имеют существенное выходное сопротивление, что вызывает сложности при согласовании с низким входным сопротивлением дифференциального усилителя. В таких случаях требуются схемы подавления

синфазных помех с высоким входным сопротивлением.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Инструментальные усилители совмещают высокий входной импеданс и высокий КОСС, этим обусловлен их выбор во многих инженерных задачах (см. рис. 3). Обратите внимание, что оба входа инструментального усилителя на базе трех ОУ являются неинвертирующими входами ОУ; в такой конфигурации обеспечивается максимальный входной импеданс, при этом не приходится прибегать к помощи цепей обратной связи. Схема

вычитания образована резисторами $R_3..R_6$ и ОУ A_3 , она обеспечивает высокий КОСС, а операционные усилители A_1 и A_2 осуществляют буферизацию входов схемы вычитания, обеспечивая высокий входной импеданс. Такая схема способна успешно усиливать сигнал от мостовых датчиков с высоким КОСС и низкой погрешностью. Еще одно полезное свойство инструментальных усилителей — для установки коэффициента усиления используется всего один резистор, что снимает проблему согласования пар резисторов. Недостатком инструментальных усилителей является высокая стоимость, дополнительные задержки сигнала и пониженный диапазон синфазных входных напряжений. Инструментальный усилитель на базе двух ОУ также содержит схему вычитания для обеспечения высокого КОСС (см. рис. 4) и в нем также используются в качестве входов схемы неинвертирующие входы ОУ, что позволяет добиться высокого входного импеданса. Такой инструментальный усилитель имеет более широкий диапазон синфазных входных напряжений благодаря использованию двух ОУ вместо трех, но при этом задержка входных сигналов в нем неодинакова для разных входов. Инвертирующий вход имеет двухступенчатую задержку, а неинвертирующий — только одноступенчатую. Неодинаковость задержек приводит к искажениям, даже на невысоких частотах, причем с повышением частоты искажения растут. Минимальный уровень искажений обеспечивается в рабочей полосе инструментального усилителя.

УСИЛИТЕЛИ С ТОКОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (CURRENT FEEDBACK)

Основным преимуществом усилителей с токовой обратной связью является широкая рабочая полоса частот. Все рассмотренные ранее усилители используют обратную связь по напряжению, коэффициент усиления без обратной связи которых начинает падать даже при совсем низких частотах (зачастую от 10 Гц) со скоростью спада в 20 дБ на декаду. Такое их поведение приводит к большим погрешностям на высоких частотах. Из рис. 5 видно, что усилители с обратной связью по напряжению имеют большой спад по усилению на высоких частотах, в то время, как коэффициент усиления ОУ с ОС по току сохраняют коэффициент усиления на этих частотах.

Усилители с обратной связью по напряжению вынуждены работать в частотной области, где их коэффициент усиления падает, т.к. коэффициент усиления ОУ с разомкнутой петлей ОС начинает падать уже на небольших частотах. Усилители с обратной связью по току не имеют таких ограничений, поэтому они обеспечивают наименьшие искажения. Скорость спада усиления примерно одинакова для обоих типов усилителей; для усилителей с ОС по току она выглядит более «крутой» только благодаря другому масштабу оси частот. Модель, изображенная на рис. 6 отображает тот факт, что в усилителях с ОС по току взамен коэффициента усиления используется трансимпеданс. Входной ток «отображается» на выходной каскад и буферизуется им. Такая конфигура-

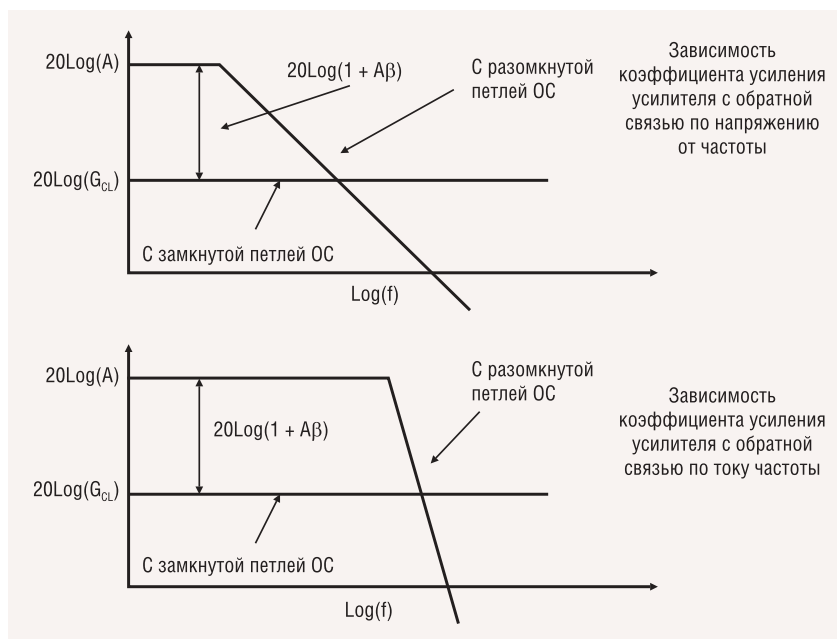


Рис. 5. Частотные характеристики усилителей с обратной связью по току и по напряжению

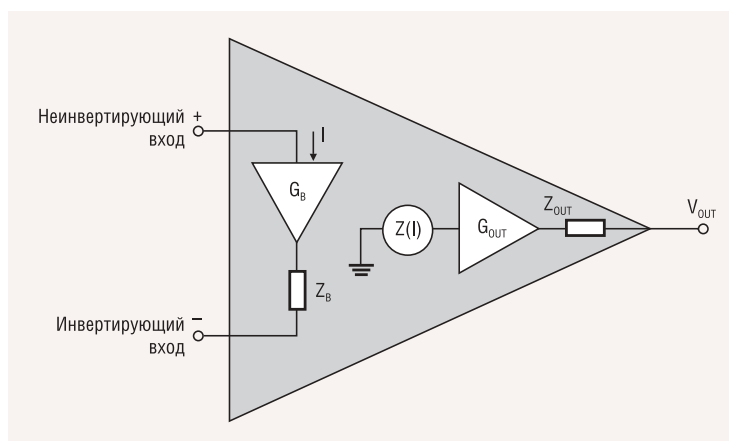


Рис. 6. Упрощенная модель усилителя с ОС по току

ция обеспечивает максимальную полосу рабочих частот среди ИС, использующих одноканальный технологический процесс. Обычно усилители с ОС по току строятся на базе биполярных транзисторов, т.к. типовая сфера их применения — высокоскоростные коммуникации, видео и т.д., как правило, не требует высоких входных импедансов и размаха выходных напряжений

равного питающему напряжению (rail-to-rail). Обратите внимание, что инвертирующий вход связан с выходным каскадом буфера; поэтому он имеет очень низкий импеданс, по порядку равный выходному импедансу эмиттерного повторителя. Неинвертирующий вход является входом буфера, поэтому он обладает высоким импедансом. У усилителя с обратной связью по

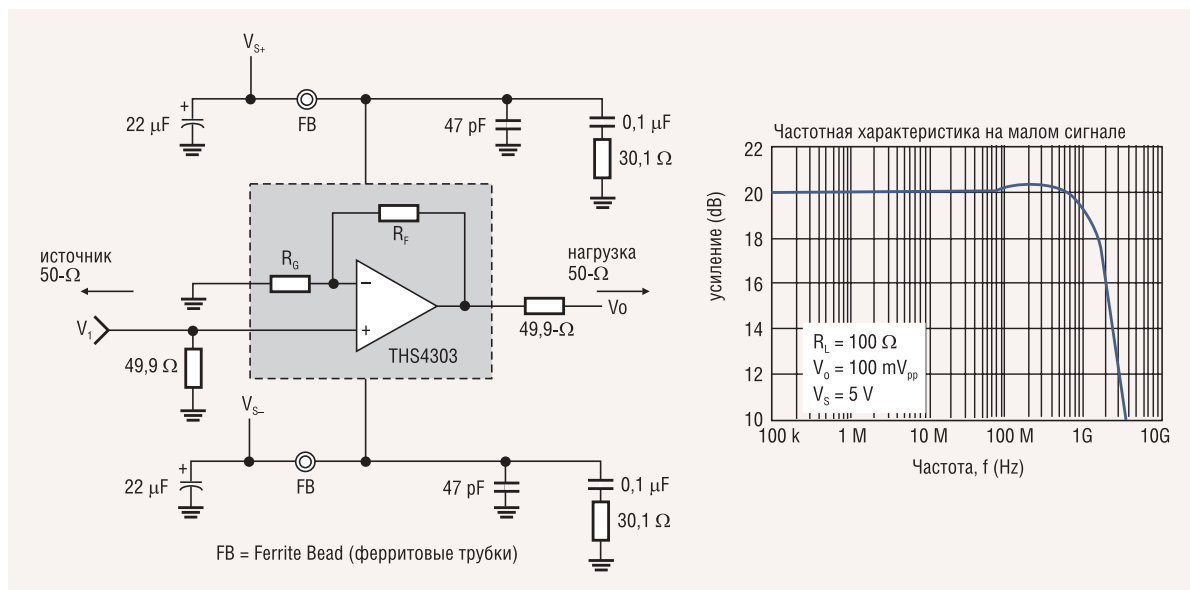


Рис. 7. При использовании WFGA особое внимание уделяется фильтрации

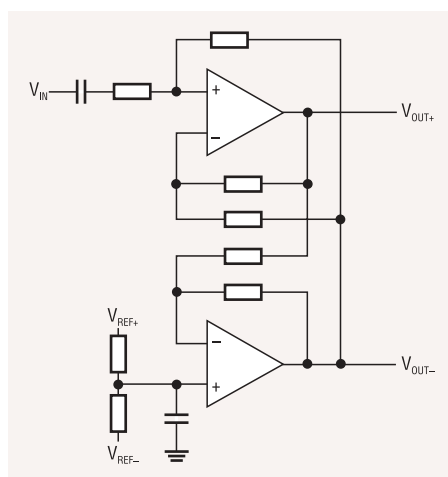


Рис. 8. Традиционная схема преобразования асимметричного сигнала в дифференциальный

напряжению входы подаются на базо-эмиттерные переходы фазоинвертора (дифференциального каскада, запитанного источником тока). Точное согласование транзисторов дифференциального каскада позволяет минимизировать входные токи и напряжения смещения, и в этом плане усилитель с обратной связью по напряжению имеет большое

преимущество. Согласование входных и выходных цепей буфера является непосильной задачей, поэтому усилители с токовой обратной связью не бывают прецизионными. Основное их назначение — высокоскоростные схемы, если для усилителей с ОС по напряжению пределом являются частоты в примерно 400 МГц, то усилители с токовой связью имеют рабочую полосу до нескольких гигагерц. Ниже мы рассмотрим исключение из этого правила — особый класс усилителей с ОС по напряжению, носящий название широкополосных усилителей с фиксированным коэффициентом усиления (WFGA). Что касается усилителей с токовой ОС, то типовым рабочим диапазоном для них является область от примерно 25 МГц до нескольких ГГц. Однако, при использовании таких усилителей следует иметь в виду одну их важную особенность. При разработке высокочастотных схем многие разработчики уповают на снижение уси-

ления при росте частоты как на фактор стабильности, справедливо полагая, что схема с усилением меньше единицы по умолчанию стабильна. Но это справедливо лишь для усилителей с ОС по напряжению, ОУ с токовой обратной связью сохраняют коэффициент усиления при росте частоты. Поэтому схемы, разработанные на базе усилителей с ОС по напряжению и стабильно работающие с ними, часто становятся нестабильными при переходе на усилители с ОС по току. Более того, вход и резистор ОС усилителя с токовой ОС чувствительны к паразитным емкостям, поэтому следует уделять повышенное внимание разводке платы. Для макетирования рекомендуется использовать предлагаемые производителями отладочные платы (evaluation boards).

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

В высокочастотных усилителях, как правило, исполь-

зуется фиксированный коэффициент усиления, по своей структуре же усилители гигагерцового диапазона являются гибридными, т.е. собранными из дискретных транзисторов и пассивных компонентов, размещаемых на подложке. Такой способ изготовления является достаточно дорогим, что непосредственно влияет на цену конечных изделий. Тем не менее, большинство разработчиков вынуждено использовать такие ИС, т.к. самостоятельное изготовление аналогичных усилителей связано с большими сложностями. Широкополосные усилители с фиксированным коэффициентом усиления (WFGA) являются сравнительно новым продуктом на рынке, поэтому особенности их изготовления держатся производителями в секрете. Для получения широкой полосы рабочих частот, позволяющей усилителям работать в гигагерцовом диапазоне, используются специальные высокочастотные технологии, а для обеспечения стабильности применяются нестандартные решения в части внутренней компенсации (см. рис. 7). Как правило, конфигурация и коэффициент усиления таких ИС не допускает изменения, но, при этом их рабочие частоты простираются до десятков ГГц. Как и любая высокочастотная схема, такие усилители требуют повышенного внимания на всех стадиях разработки для получения обещанных в документации параметров. Общие рекомендации, данные для усилителей с токовой обратной связью справедливы и для WFGA, кроме этого следует неукоснительно соблюдать все требования, имею-

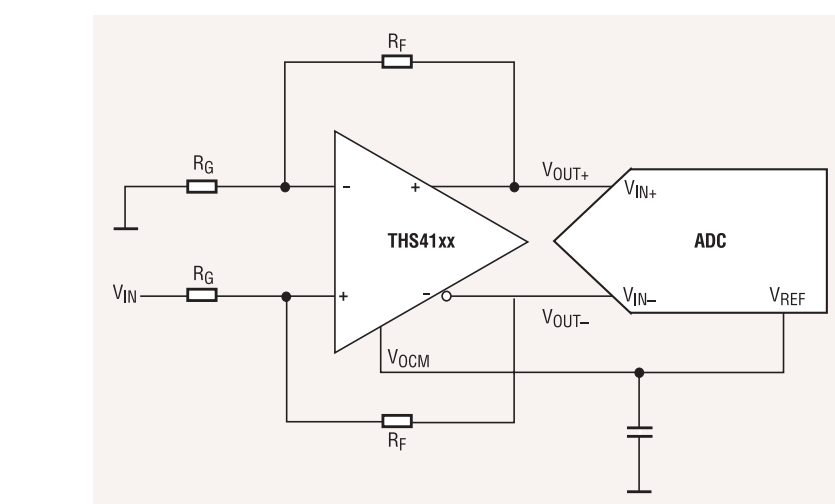


Рис. 9. Преобразование асимметричного сигнала в дифференциальный при помощи FDA

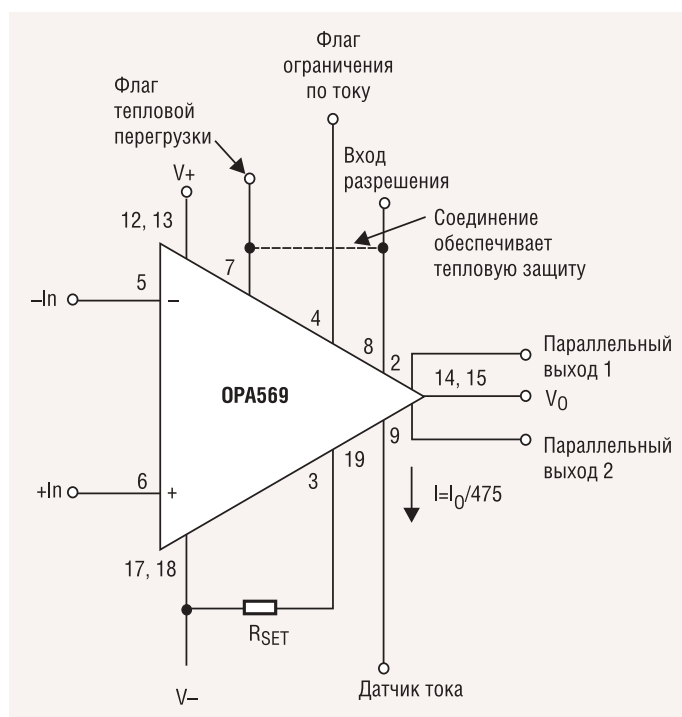


Рис. 10. Современные усилители мощности обладают также рядом дополнительных функций

щиеся в документации на усилитель.

ПОЛНОДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ (FDA)

Полнодифференциальные усилители (FDA) создают и используют полностью симметричные (дифферен-

циальные) сигналы. Многие аналогово-цифровые преобразователи используют для улучшения характеристик дифференциальные входные сигналы, в этом случае FDA может использоваться для преобразования несимметричного сигнала в симметричный. Пока не появились интеграль-

ные полнодифференциальные усилители, проблема преобразования асимметричного сигнала в дифференциальный решалась в основном при помощи схемы, изображенной на рис. 8. Для построения такого преобразователя требуется два ОУ и множество согласованных резисторов, что затрудняет разработку и повышает ее стоимость. Использование интегральных полнодифференциальных усилителей позволяет избавиться от этой проблемы (см. рис. 9). Кроме простоты и низкой цены, FDA обладает еще одним преимуществом — он обеспечивает необходимую для АЦП точку подключения «земли». При дифференциальной передаче сигналов, накладываемые на них шумы носят в основном синфазный характер. В дальнейшем такие шумы успешно давятся приемником либо АЦП благодаря их способности к подавлению синфазных сигналов.

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ (УМ)

Когда от операционного усилителя требуется отдавать в нагрузку токи, превышающие сотни миллиампер при напряжении в несколько вольт, хорошей альтернативой может служить усилитель мощности, способный работать при высоких напряжениях и больших токах. Усилители мощности представляют собой линейные схемы, обладающие высокой выходной мощностью. Изготовление усилителя мощности не заканчивается оснащением операционного усилителя большим теплоотводом с низким

тепловым сопротивлением, хотя это тоже весьма важная часть УМ. Кроме этого, вводятся токовые датчики, защита от перегрузок, специальные решения, позволяющие параллельное включение и т.д. (см. рис. 10). В отличие от УМ предыдущих поколений, современные усилители мощности обладают большим набором различных функций таких, как установка ограничения по току, токовый шунт, возможность параллельного соединения, вход разрешения, флаги ограничения по току и по перегреву и т.д.

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ (УНЧ)

Существует такое разнобразие усилителей низкой частоты, что они выделены в отдельный класс еще с 50-ых годов прошлого столетия. Большинство крупных производителей полупроводниковых компонентов предлагают целую линейку усилителей низкой частоты в диапазоне от простых ОУ до современных импульсных усилителей.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ШАГИ

В данной статье мы обсудили некоторые вопросы выбора типа усилителя исходя из требований проекта, где он будет применяться. Ответом на вопрос «что делать дальше?» будет — направляться в Интернет. Любой уважающий себя производитель интегральных схем сейчас имеет свой сайт, всего за несколько часов Вы можете посетить большинство сайтов по выбранной тематике. Просматривая информацию об интеграль-

ных микросхемах на веб-сайтах, не забывайте заглядывать в разделы «Информация о применении» (applications information). Некоторые производители имеют массу такой информации, другие — немного, либо же она вообще отсутствует. В то же время, наличие подобной информации влияет на скорость и качество выполнения Вами работы. Если, к примеру, вы упустили из виду фильтрующие конденсаторы или температурный дрейф, эти проблемы напомнят вам о себе на этапе макетирования. Однако есть и другой путь — заранее прочитать раздел с информацией о применении и избежать ошибок еще на стадии разработки. Поэтому, при выборе производителя ИС следует учитывать также полноту предоставления дополнительной информации, если только Вы не хотите разбираться со всеми возникающими проблемами самостоятельно.

ССЫЛКИ

1. Ron Mancini, Op Amps for Everyone (Newnes Publishers, 2003). Предыдущее издание 2002 года доступно для скачивания по адресу www.s.ti.com/sc/techlit/slod006

2. Ron Mancini, «Worst-case circuit design includes component tolerances», EDN (April 15, 2004), pp. 61–64. Доступно в Интернете по адресу www.edn.com/article/CA408380.html

СЕТЕВЫЕ РЕСУРСЫ ПО ТЕМЕ

<http://amplifier.ti.com>
<http://focus.ti.com/lit/ml/slyb115/slyb115.pdf>