

РАЗРАБОТКА РАДИОЧАСТОТНЫХ СИСТЕМ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ. Часть 1

БРЮС КАРТЕР (BRUCE CARTER), инженер-исследователь, Texas Instruments

В первой части статьи, посвященной построению высокочастотных схем на операционных усилителях, рассматриваются характеристики ОУ, важные с точки зрения высокочастотной техники.

Появление быстродействующих операционных усилителей (ОУ) сделало их привлекательным решением для применения в радиочастотных цепях. Разработчики, использующие ОУ в усилительных каскадах, получают некоторые преимущества, например простоту реализации. Традиционные методы проектирования ВЧ-систем с применением дискретных транзисторов практиковались в течение десятилетий. Проектировщики недорогих систем, чувствительных к стоимости, могут задаться вопросом: «Зачем менять транзистор за несколько центов на компонент стоимостью несколько долларов?» В то же время, разработчики высококачественных систем хотели бы использовать ОУ в своих проектах, но испытывают сомнения в связи с неизбежными затратами времени на изучение новых технологий.

ПРЕИМУЩЕСТВА

При использовании дискретных транзисторов смещение и рабочая точка транзистора влияют на усиление и настройку каскада. При использовании же ОУ разработчику необходимо всего лишь подключить соответствующий источник питания к выводам питания ОУ. При тщательной проработке схемы им может потребоваться только один источник питания. Коэффициент усиления каскада определяется двумя резисторами и не влияет на настройку каскада.

В отличие от транзисторов, при использовании ОУ эффекты теплового дрейфа характеристик практически полностью исключены.

НЕДОСТАТКИ

Если используется однополярное питание от единственного источника, то необходимо устанавливать рабочую точку. Эта процедура значительно проще установки смещения транзисторного каскада.

С самого начала следует оговорить различие в терминологии, которое может привести к недоразумениям.

Разработчики радиочастотных систем используют в качестве единиц измерения коэффициента усиления децибелы (дБ) по мощности. При этом коэффициент усиления 10 дБ соответствует усилению в десять раз, 20 дБ – усилению в 100 раз. Разработчикам же операционных усилителей более привычны величины, выраженные в децибелах по напряжению, которые не зависят от полного сопротивления и отличаются от децибелов по мощности множителем, равным двойке. В единицах децибелов по напряжению 20 дБ соответствуют усилению в 10 раз, 40 дБ — усилению в 100 раз.

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ИЛИ ПО ТОКУ?

Разработчик должен решить, какие ОУ лучше использовать в проекте: с обратной связью по напряжению или с обратной связью по току? Значение полосы пропускания, приводимое в технических данных ОУ, относится к той точке, где произведение единичного коэффициента усиления на ширину полосы пропускания уменьшается на 3 дБ (по напряжению) за счет внутренней компенсации или паразитных компонентов. Это не слишком удобно для определения фактического диапазона рабочих частот устройства.

Полоса пропускания усилителя с обратной связью по напряжению и внутренней компенсацией определяется внутренним «доминирующим полюсом», связанным с компенсирующим конденсатором. Это приводит к тому, что произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания является постоянной величиной. Усилители с токовой обратной связью могут работать намного ближе к своей максимальной частоте с более высоким коэффициентом усиления. Иными словами, в этом случае зависимость коэффициента усиления от полосы пропускания значительно меньше.

Для иллюстрации сравним ОУ с обратной связью по напряжению и по току:

– THS4001, усилитель с обратной связью по напряжению и шириной полосы пропускания 270 МГц (–3 дБ по напряжению) при разомкнутой цепи обратной связи, может применяться лишь до частоты приблизительно 10 МГц при коэффициенте усиления 10 (20 дБ по напряжению);

– THS3001, усилитель с обратной связью по току и шириной полосы пропускания 420 МГц (–3 дБ по напряжению) при разомкнутой цепи обратной связи, может применяться до частоты приблизительно 150 МГц при коэффициенте усиления 10 (20 дБ по напряжению).

Разработчики должны учитывать некоторые свойства усилителей с токовой обратной связью:

– традиционные топологии схем остались неизменными в усилителях с обратной связью по току;

– для усилителей с токовой обратной связью существуют рекомендованные значения сопротивления R_F -резистора обратной связи. Эти рекомендации важны, коррекция коэффициента усиления должна производиться с помощью резистора R_F ;

– конденсаторы следует размещать вне контура обратной связи.

Все это необходимые ограничения, не считая обычной внимательности при компоновке и разводке быстродействующих радиосхем.

Следует также ограничивать емкость входа инвертирующих ОУ как с обратной связью по напряжению, так и с обратной связью по току. Это основная причина неустойчивости работы. Для уменьшения паразитной емкости, возникающей на печатной плате, TI рекомендует делать отверстие в земляных и питающих слоях под инвертирующим входом ОУ на многослойной печатной плате.

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ В УСИЛИТЕЛЬНОМ КАСКАДЕ

ОУ предназначены для работы в топологии с замкнутым контуром обратной связи, отличающимся усилением

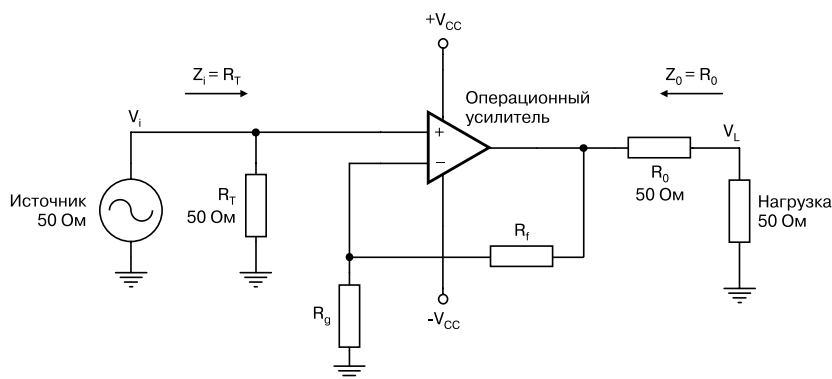


Рис. 1. ВЧ усилительный каскад на операционном усилителе

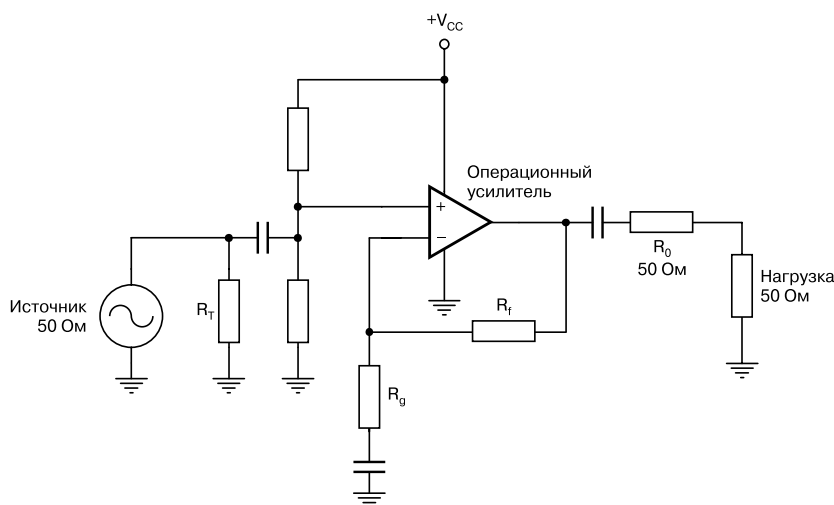


Рис. 2. ВЧ-усилитель с единственным источником питания

от контура приемника для автоматического управления. Контур обратной связи каждого ОУ должен быть замкнут локально, в пределах каждого отдельного ВЧ-каскада.

Это можно сделать двумя способами. Операционный усилитель может быть инвертирующим и неинвертирующим. С точки зрения конструкции ВЧ-системы это часто не имеет значения. Во всех практических применениях любая конфигурация будет работать, давая одинаковые результаты. По этой причине здесь будет отдано предпочтение неинвертирующей конфигурации, поскольку она более проста в применении.

На рисунке 1 показан неинвертирующий ВЧ-усилитель. Полное входное сопротивление неинвертирующего входа велико. Усиление по напряжению задается отношением R_f и R_g :

$$G = 20 \lg \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \text{ дБ.}$$

Для требуемого коэффициента усиления соотношение сопротивлений должно составлять

$$1 + \frac{R_f}{R_g} = 2 \cdot 10^{6/20}.$$

Коэффициент усиления изображенного каскада никогда не будет меньше одной второй (-6 дБ по напряжению), поскольку большинство ОУ имеют стабильный единичный коэффициент усиления.

Сопротивление выходного каскада компенсируется в сопротивление 50 Ом путем последовательного подключения к выходу 50-Ом резистора. В сочетании с нагрузкой 50 Ом это означает, что коэффициент усиления делится на два (-6 дБ по напряжению) в делителе напряжения. Таким образом, единичный коэффициент усиления (0 дБ) усилительного каскада превращается в коэффициент усиления 1/2, т.е. -6 дБ по напряжению.

Усилитель, работающий с двумя резисторами по 50 Ом, — не самое лучшее решение для некоторых ОУ. Многие из них предназначены для работы с нагрузкой 600 Ом. Важно учитывать рекомендации производителя по нагрузке операционного усилителя.

Разработчик ВЧ-систем может заметить, что требования к источнику питания были усложнены за счет добавле-

ния второго отрицательного питающего напряжения. Этот каскад можно легко модифицировать для работы от единственного источника питания, как показано на рисунке 2.

Виртуальная «земля» генерируется на неинвертирующем входе после разделительного конденсатора. Это повышает рабочую точку ОУ до потенциала виртуальной «земли» посередине между напряжением питания и потенциалом «земли». Поскольку блок ОУ каскада теперь в качестве опорного имеет половинное напряжение источника питания, он должен быть изолирован по постоянному току. Разделительные конденсаторы необходимы для изоляции предшествующих и последующих каскадов, а также определяющего усиление резистора R_g от постоянного потенциала виртуальной «земли». Эти конденсаторы должны иметь низкое полное сопротивление на рабочей частоте.

ПАРАМЕТРЫ S-МАТРИЦЫ

Коэффициент прямой передачи S_{21}

S_{21} определяется в интересующем нас диапазоне рабочих частот. Коэффициент S_{21} никогда не указывается в технических данных ОУ, поскольку он является функцией коэффициента усиления, определяемого резисторами входной цепи и цепи обратной связи R_f и R_g . Коэффициент прямой передачи неинвертирующего каскада ОУ составляет:

$$S_{21} = A_L = \frac{V_L}{V_i} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right).$$

В спецификациях ОУ приводятся коэффициент усиления и фаза при разомкнутой цепи обратной связи. К счастью, узнать коэффициент усиления и фазу при замкнутой цепи обратной связи нетрудно. Очень часто технические данные включают в себя графики для полосы пропускания при разомкнутой цепи обратной связи, а иногда содержат и сведения о фазе. При замыкании цепи обратной связи на графике получается прямая линия с требуемым коэффициентом усиления, переходящая в кривую в соответствии с предельным значением. График для полосы пропускания при разомкнутой цепи обратной связи следует использовать в качестве абсолютного максимума значений. При приближении к границе высоких частот разработчик вынужден использовать расширенную компенсацию и сложную технологию компоновки печатной платы.

Для иллюстрации на рисунке 3 показаны два гипотетических операционных усилителя с частотой 1 ГГц: один с обратной связью по напряжению, а второй — с токовой обратной связью. Если требуется коэффициент усиления по напряжению 20 дБ, то усилитель с обратной связью

Энергосберегающие решения для управления электропитанием

High-Performance Analog >>Your Way™

Вот уже более 20 лет компания TI помогает своим клиентам разрабатывать высокоэффективные устройства для преобразования энергии, отвечающие строгим стандартам эффективности. С беспроблемным энергосберегающим дизайном, предлагаемым компанией TI, путь ваших изделий на рынок может стать короче. **High-Performance Analog >> Your Way.**

UCC28600	ШИМ-контроллер с поддержкой режима энергосбережения Green Mode.	Обеспечивает соответствие внешних источников питания стандартам энергосбережения.
TPS40140	Нарастаемый многофазный контроллер.	Повышает эффективность управления питанием в точке нагрузки в центрах обработки данных и на телекоммуникационном оборудовании с высокими потребностями в электроэнергии.
TPS2410	ORing-контроллер на полевых транзисторах для шин электропитания.	Заменяет диоды с низким КПД на высокоэффективные и высоконадежные решения для управления питанием и обеспечения защиты.
UCC28060 UCC28070	Первый в отрасли однокристалльный многофазный контроллер коррекции коэффициента мощности (ККМ).	Двухфазность обеспечивает высокую эффективность и плотность энергии, а также простоту управления фазами для энергосбережения при низкой нагрузке.
UCD9112 UCD9240	Цифровой контроллер с конфигурируемым графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ).	Удобное в эксплуатации, гибкое решение управления питанием в точке нагрузки для топологий многофазных систем электропитания с несколькими питающими шинами.
PTH08T250W	Неизолированный модуль питания на 50A с поддержкой технологии TurboTrans™.	Коэффициент полезного действия 96%. Нарастаемый и удобный в применении модуль управления питанием в точке нагрузки для серверов, беспроводной инфраструктуры, оборудования передачи данных и телекоммуникационного оборудования.
TMS320F28335	Цифровой сигнальный контроллер.	Высокоинтегрированный цифровой контроллер повышает эффективность систем с возобновляемыми источниками энергии.

www.ti.com/greenpower-ru

или звоните по телефону +7 (495) 981 07 01
Доступны образцы, оценочные модули и руководство по выбору решений для управления электропитанием.



 **TEXAS
INSTRUMENTS**

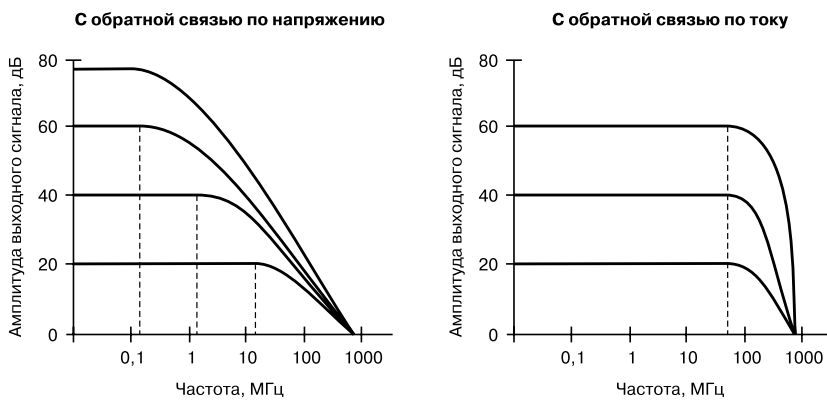


Рис. 3. Сравнение коэффициента усиления от полосы пропускания для операционных усилителей с обратной связью по напряжению и по току

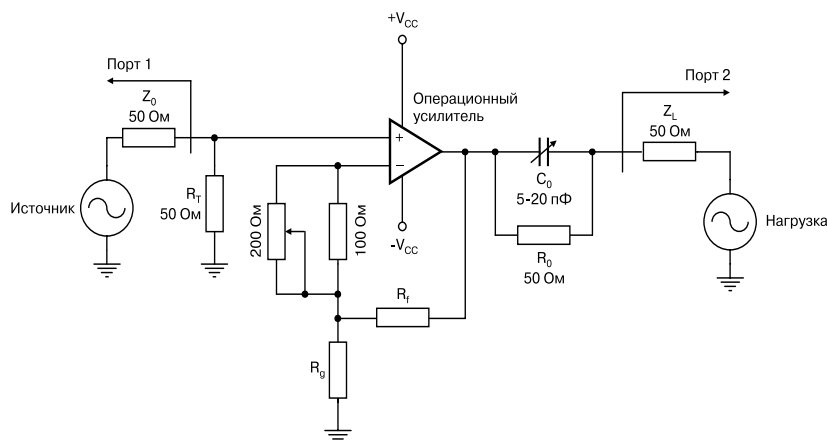


Рис. 4. Достижение максимума частотной характеристики

по напряжению имеет предельное значение немного выше 10,7 МГц — этого достаточно только для усилителя ПЧ для частотной модуляции. Если требуется коэффициент усиления по напряжению 40 дБ, то предельное значение частоты уменьшается до значения немного выше 1 МГц, т.е. он пригоден лишь для усиления в СВ-диапазоне и для амплитудной модуляции.

С другой стороны, усилитель с обратной связью по току может применяться до частоты приблизительно 50 МГц в обоих случаях. Разработчику необходимо приложить особые усилия, чтобы исключить генерацию колебаний (осцилляции) при высоких коэффициентах усиления.

Коэффициент обратной передачи S_{12}
Топология ОУ, в особенности усилителей с токовой обратной связью, под-

разумевает, что оба входа подключены к низкому полному сопротивлению, поэтому имеют превосходные характеристики. Другая причина того, что ОУ имеют столь хорошую развязку, состоит в следующем. Вместо элемента усиления, представляющего собой единственный транзистор (с соответствующим током утечки), обратный сигнал ОУ должен пройти через десятки или сотни транзисторов, сформированных на полупроводниковом кристалле операционного усилителя.

Развязка иногда оказывается лучше в неинвертирующих конфигурациях усилителя с токовой обратной связью. Причина состоит в том, что и здесь ток утечки должен пройти через цепи, соединяющие неинвертирующие и инвертирующие входы, чтобы дойти до источника.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Таблица 1. Уровень шума для различной ширины полосы пропускания

Ширина полосы, кГц	Евн, мВ	Сигнал/шум, дБ
280	6,09	-104,3
230	5,52	-105,2
180	4,88	-106,2
150	4,45	-107,0
110	3,81	-108,4
90	3,45	-109,2

В усилителях с токовой обратной связью можно легко реализовать резистивную подстройку для коррекции коэффициента усиления на высоких частотах, не влияющей на усиление в прямом направлении. На рисунке 4 показано, как осуществить такую коррекцию, добавив подстроечный резистор в контур обратной связи неинвертирующей схемы.

Величины сопротивлений резисторов R_f и R_0 следует уменьшить для компенсации дополнительного подстроечного сопротивления, однако отношение этих сопротивлений и, следовательно, коэффициент усиления должны оставаться прежними.

ТОЧКА КОМПРЕССИИ -1 ДБ

Точка компрессии -1 дБ определяется как мощность, на которой выходная мощность усилителя на 1 дБ (по мощности) ниже расчетной. Точка компрессии 1 дБ в значительной степени определяется шинами питания.

Разработчики операционных усилителей и разработчики радиочастотных устройств совершенно по-разному подходят к шинам питания, что связано с разными требованиями к системам, которые они проектируют. Разработчик систем сбора данных и схем автоматики стремится не допустить увеличения амплитуды сигнала до напряжения питания.

И наоборот, разработчик ВЧ-системы пытается выжать «последние полдецибела» усиления на границе полосы частот радиосхемы. При этом допустима небольшая отсечка сигнала при условии, что результирующие «зубцы» остаются в пределах технических условий.

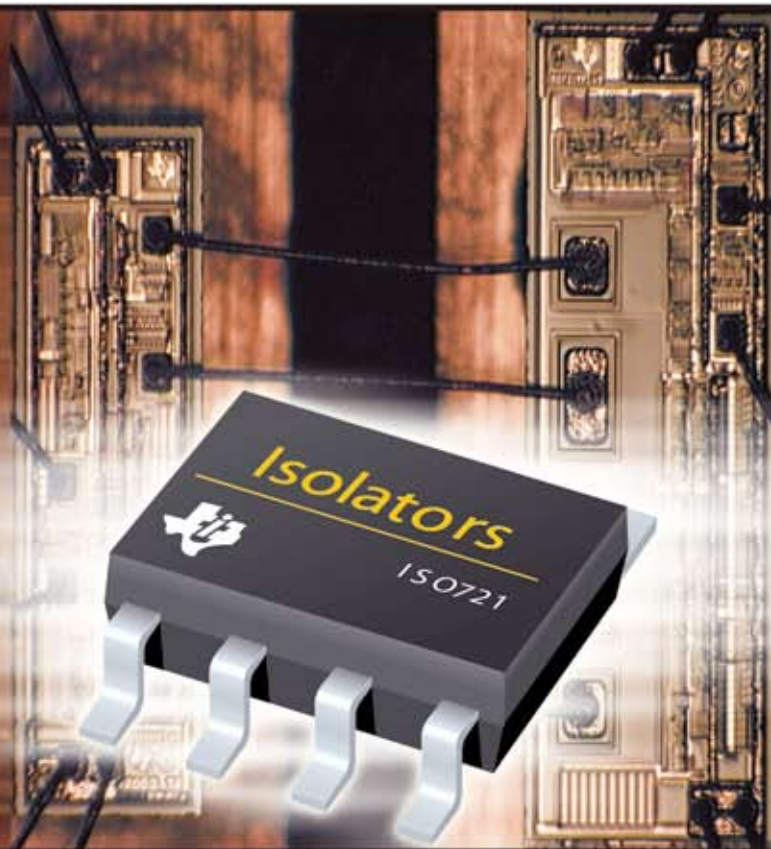
Два параметра характеризуют точку -1 дБ. Это V_{OM} (приводится в документации) и скорость нарастания выходного напряжения. На низких частотах повышение мощности входа на фиксированной частоте неизбежно выведет выходной сигнал на шину питания. Входной сигнал при этом описывается как спецификация V_{OM} . Эта спецификация часто подразделяется на две — V_{OL} и V_{OH} , соответствующие шинам низкого и высокого напряжения. Необходимо соблюдать обе спецификации и избегать работы за пределами ограничений.

На высоких частотах ОУ достигают предела скорости переходного процесса на выходе (скорость реакции на ступенчатый входной сигнал). Это ограничивает скорость нарастания выходного напряжения усилителя. Значение скорости нарастания выходного напряжения ОУ надо делить на 2, поскольку на выходе применяется согласующий резистор.

КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

Коэффициент высокочастотного шума представляет собой то же самое, что и шум операционного усилителя,

ИЗОЛИРОВАННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКИ



Основные параметры емкостных цифровых изоляторов

Наименование	Количество каналов	Напряжение изоляции (VRMS)	Макс. скорость передачи данных (Mbps)	Описание
IS0150	2	1500	80	Двухканальный, двунаправленный
IS0721x	1	2500	100, 150	Одноканальный
IS0722x	1	2500	100, 150	Одноканальный
IS07220x	2	2500	1, 25, 150	Двухканальный,
IS07221x	2	2500	1, 25, 150	Двухканальный, двунаправленный
IS07230x	3	2500	1, 25, 150	Трехканальный
IS07240x	4	2500	1, 25, 150	Четырехканальный

→ ЗАКАЗ И ПОСТАВКА ОБРАЗЦОВ УЖЕ СЕЙЧАС со склада в МОСКВЕ

Компэл

Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902

ti@compel.ru
www.compel.ru

Компэл СПб

Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403

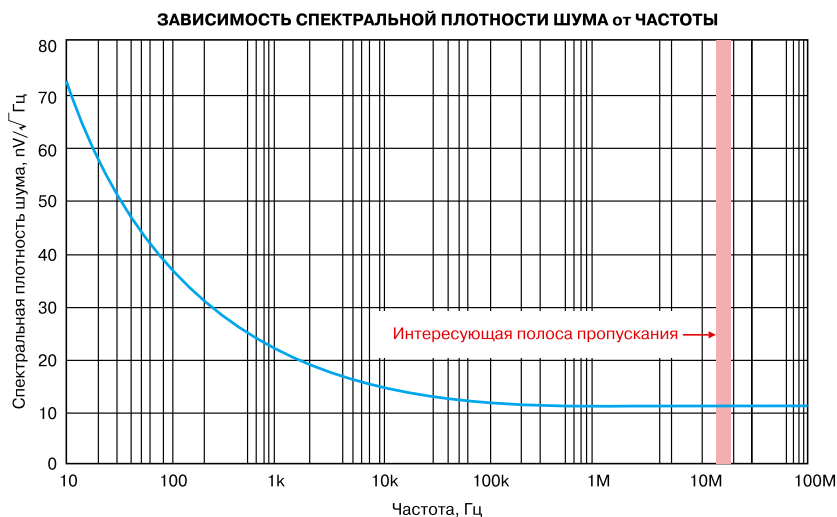


Рис. 5. Зависимость уровня шума от полосы пропускания

когда ОУ является активным элементом. Существует определенный эффект теплового шума резисторов, применяемых в ВЧ-системах, но величины сопротивления резисторов в ВЧ-системах обычно настолько малы, что их шумами можно пренебречь.

Шум в ВЧ-схеме на ОУ зависит от следующих факторов:

- полоса пропускания, в которой производится усиление;
- коэффициент усиления.

В качестве примера возьмем ОУ с коэффициентом шума $11,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Гц}}$. Приложение представляет собой усилитель промежуточной частоты 10,7 МГц. Уровень сигнала составляет 0 дБ. Коэффициент усиления единичный.

На рисунке 5 представлена экстраполяция по реальным данным. Частота сопряжения $1/f$ в данном случае намного меньше частоты интересующей нас

полосы пропускания. Следовательно, шумом $1/f$ можно полностью пренебречь, предположив, что фильтрация устраняет весь шум, способный привести к насыщению усилителя или преобразователя данных.

Для узких полос пропускания уровень шума может быть весьма низким. Данные для различных полос пропускания приведены в таблице 1.

Очевидно, что уменьшение ширины полосы пропускания дает некоторые преимущества. Впрочем, гораздо выгоднее использовать ОУ с более низким уровнем шумов.

Шум усиливается соответственно коэффициенту усиления каскада. Если каскад имеет высокий коэффициент усиления, то следует позаботиться о выборе малошумящего ОУ. Если коэффициент усиления каскада ниже, то подойдет и менее дорогостоящий ОУ.

Выводы

Операционные усилители применимы в конструкциях ВЧ-систем, если соответствующее повышение стоимости оправдано. Они являются более гибкими компонентами, чем дискретные транзисторы, поскольку установка смещения ОУ не зависит от коэффициента усиления и оконечной нагрузки. Усилители с токовой обратной связью лучше приспособлены для схем ВЧ-радиоустройств с высоким коэффициентом усиления, поскольку у них отсутствует ограничение на произведение коэффициента усиления на ширину полосы частот, присущее ОУ с обратной связью по напряжению.

Матрицы S-параметров ВЧ-усилителей, построенных на ОУ, имеют хорошие характеристики. Коэффициент стоячей волны по напряжению входа и выхода мал, поскольку оконечные и согласующие резисторы могут применяться независимо от установки смещения каскада. Развязка имеет хорошие показатели, так как ВЧ-каскад построен на ОУ, состоящем из десятков или сотен транзисторов, а не из единственного транзистора. В случае усилителя с токовой обратной связью усиление в прямом направлении также очень велико.

В первой части статьи были рассмотрены основы проектирования радиочастотных систем на операционных усилителях. В части II этой статьи внимание будет сосредоточено на усилительных каскадах для применения в реальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ti.com/sc/device/th54001.
2. www.ti.com/sc/device/th53001.
3. www.amplifiers.ti.com.

СОБЫТИЯ РЫНКА

| СЕМИНАР «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ МИКРОСХЕМ POWER INTEGRATIONS» | 15 апреля 2008 г. компания «Макро Групп» приглашает принять участие в семинаре «Проектирование импульсных источников питания на основе новых микросхем Power Integrations».

Семинар организован компанией «Макро Групп» с участием представителей Power Integrations и пройдет в рамках выставки «Экспоэлектроника-2008» в конференц-зале №1 с 14:00 до 18:00.

В программе семинара:

14:00 Знакомство с компанией Power Integrations

14:20 Широкие возможности проектирования источников питания на основе микросхем PI

15:00 Обзор семейства микросхем TinySwitch-PK

15:30 Обзор семейства микросхем TOPSwitch-HX

16:00 Презентация готовых решений в области зарядно-питающих устройств, источников питания для светодиодов и осветителей, счетчиков электроэнергии, телевизионных приставок и др.

16:45 Средства разработки источников питания: знакомство с новой версией программы PI Expert (6.6)

17:20 Ответы на вопросы.

Для участия в семинаре и получения комплекта информационных материалов рекомендуется зарегистрироваться он-лайн на сайте www.macrogroupp.ru.

www.macrogroupp.ru

«Макро Групп» — официальный дистрибьютор Power Integrations на территории России и СНГ.

3 ФАЗЫ



120...960 Вт на DIN-рейку

- Работа: -25...+71 °С
- Высокий КПД, до 93%
- Конкурентоспособные цены



ЛУЧШЕ ЧЕМ ОДНА...



- Универсальный вход
340...575 В AC, 47...63 Гц или 480...820 В DC
- Выход 12, 24 или 48 В
- Параллельная работа по выходу
- Защита от короткого замыкания на выходе
- Защита от перенапряжения на выходе
- Естественное охлаждение, защита от перегрева

www.eltech.spb.ru

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР CHINFA ELECTRONICS



- | | | | | | | | | | |
|--|--|---|---|--|---|--|--|--------------------------------|--|
| НОВЫЙ ОФИС | | | | НОВЫЙ ОФИС | | | | НОВЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА | |
| Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 10, кор. 6, тел.: (812) 635-50-60, факс: (812) 635-50-70, e-mail: chinfa@eltech.spb.ru | | | | | | | | | |
| Москва | Новосибирск | Екатеринбург | Ростов-на-Дону | Ижевск | Чебоксары | Минск | | | |
| (495) 788-59-48
(495) 788-59-46
info@eltech.msk.ru | (383) 212-58-74
(383) 212-58-75
info@eltech.nsk.ru | (343) 351-00-94
(343) 257-70-37
info@eltech.ur.ru | (863) 220-30-71
(863) 220-30-72
info@eltech.rostov.ru | (3412) 93-10-18
(3412) 93-10-19
info@eltech.udm.ru | (8352) 21-05-05
(8352) 21-38-78
cheboksary@eltech.org | (37517) 256-18-60
(37517) 256-18-61
info@eltech.by | | | |