Токочувствительный усилитель, работающий в четырех квадрантах

АЛЬФРЕДО САБ, руководитель инженерной службы по применению
ТИНА АЛИКАИ, инженер по применению, Maxim Integrated Products (США)

Схема на базе операционных усилителей уменьшает погрешности, связанные с резистивным измерением тока, особенно вызванные высоким синфазным напряжением.

Многие токочувствительные (current-sensing) ИС подходят для приложений, которые требуют одноквадрантного режима работы, при котором имеется положительное синфазное напряжение, а ток протекает только в одном направлении. Существуют также ИС, которые могут обрабатывать протекание тока в обоих направлениях, т.е. поддерживают двухквадрантный режим. Однако выбор становится более ограниченным, если диапазоны напряжения и тока включают положительные и отрицательные значения, что требует схем, способных работать в четырех квадрантах.

Одно из решений — четырехквадрантная токочувствительная усилительная схема на базе операционных усилителей (ОУ) и дискретных компонентов. Такая усилительная схема минимизирует влияние ошибок, встречающихся в схемах измерения тока на базе резистора, что особенно заметно при наличии высокого синфазного напряжения.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА

Простейший способ измерения электрического тока — это введение резистора в цепь его протекания и определение падения напряжения. Исторически, с тех времен, когда все измерительные приборы были по сути вольтметрами, такой тип резистора называли шунтом. В таких измерительных приборах резистор пропускает сильный ток в обход прибора (шунтирует прибор), давая возможность проводить измерения, работая с напряжением.

Термин, ныне чаще используемый применительно к электронным системам, — «измерительный резистор» (sense resistor), хотя иногда встречается название «балластный резистор» (burden resistor). Измерение упрощается, если один вывод резистора подключен к точке с опорным потенциалом («земля»); в таком случае измерение называется «измерением тока на нижней стороне» (low-side current sensing).

Если имеется потенциал относительно «земли», добавленный к напряжению между выводами измерительного резистора V_{CM} («измерение на верхней стороне», high-side sensing), то измерение усложняется вследствие увеличенного синфазного напряжения. Простейший случай измерения на верхней стороне — это когда имеется только положительное синфазное напряжение, а ток протекает только в одном направлении. Такие условия описываются одноквадрантным режимом работы (предполагается пара координатных осей, вдоль которых отложены параметры V_{CM} и I).

Компании, производящие аналоговые полупроводниковые приборы, предоставляют широкий спектр токочувствительных ИС для одноквадрантного режима работы. Эти устройства обладают достаточно высокой точностью и просты в использовании.

Существуют также ИС, нормально работающие с током, протекающим в обоих направлениях (двухквадрантный режим работы). На рисунке 1 показано типичное применение такой ИС. Оба типа схем работают с приемлемой точностью в пределах одной полярности (только положительной) диапазона V_{CM}, ограниченного максимальным и минимальным рабочим напряжением.

Величина минимального рабочего напряжения может быть определена как истинное минимальное рабочее напряжение, ниже которого схема перестает работать. Однако, так как погрешность быстро растет при приближении к этому истинному минимуму, практически минимальное напряжение имеет более высокую величину. В любом случае, минимальное напряжение редко включает ноль и близкие к нулю значения.

Если измеряемый ток может протекать в любом направлении и V_{CM} может быть любой полярности (четрехквадрантный режим работы), измерения становятся более сложными. Сложность измерений также возрастает, если предъявляются повышенные требования к точности или частотному отклику схемы. Такой режим измерения тока требуется во многих приложениях управления двигателями, системах коррекции магнитного поля и в других схемах с наличием переменной составляющей.

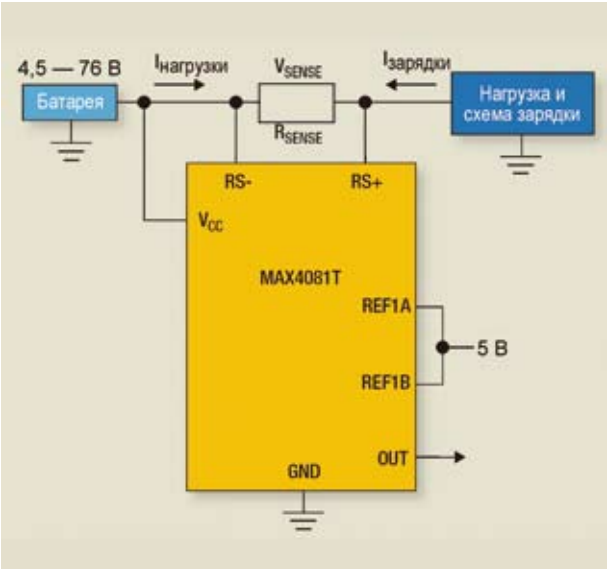

Рис. 1. ***Токовый датчик для двухквадрантного режима работы***

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Измерение тока на верхней стороне с помощью последовательно включенного резистора и ИС вносит две ошибки. Первая — это «потери» напряжения за счет падения на измерительном резисторе, включенном последовательно в питающую линию. Это падение напряжения изменяет напряжение на измеряемой линии. Вторая ошибка — это «потери» тока, небольшая величина тока, отбираемого микросхемой для своего функционирования. Этот ток приходит из цепи, в которой ток же и измеряется.

Напряжение рабочей точки (синфазное) также влияет на точность измерения, так как коэффициент ослабления синфазного сигнала (common-mode rejection ratio, КОСС) измерительной цепи не бесконечен. Так как напряжение на линии, передающей ток, — это синфазное напряжение, появляется неточность выходного сигнала, вызванная наличием синфазного напряжения, которую необходимо учитывать при составлении бюджета погрешностей. Как следствие, зависимость КОСС от температуры также следует принимать во внимание.

Измерительный резистор обязательно должен иметь четырехвыводную конфигурацию, иногда называемую подключением Кельвина. В такой конфигурации имеются две пары выводов — одна пара передает ток, а другая — напряжение сигнала. Каждый вывод одной пары соединяется с соответствующим выводом другой пары на каждой стороне резистора.

При правильной реализации четырехпроводная техника может исключить нежелательные сопротивления (контактные сопротивления), которые могут существовать на пути протекания тока, а также влияние сопротивления цепей съема напряжения, так как по ним ток не протекает.

Сопротивление измерительного резистора является коэффициентом, который напрямую переводит величину измеряемого тока в напряжение:

$$V_{SENSE} = R_{SENSE} I_{MEASURED},$$

где V_{SENSE} — контролируемое напряжение; R_{SENSE} — сопротивление измерительного резистора; $I_{MEASURED}$ — измеряемый ток.

Для использования в таком качестве, резистор должен иметь очень малый температурный коэффициент, а рост температуры резистора из-за рассеивания мощности должен быть ограничен. Это необходимо не только для поддержания точности измерения при данной величине тока, но и для сохранения линейности измерений во всем диапазоне токов. Мощность, рассеиваемая резистором, мала при малых токах, однако она быстро растет пропорционально квадрату тока. Сопротивление резистора может меняться при изменении тока, поэтому в случае больших изменений температуры характеристика становится нелинейной.

В приложениях с высокой точностью измерений, использующих дискретный высокостабильный резистор, между точками съема контролируемого напряжения не должны использоваться медные проводники. Это требование обусловлено тем, что высокий температурный коэффициент удельного сопротивления меди (0,39%/°C) ухудшает характеристики датчика, даже если используется хороший измерительный резистор.

Измерительные резисторы могут вносить погрешность и другим образом. Они могут обладать гистерезисом, т.е. не возвращаться к первоначальному сопротивлению после перегрузок. Кроме того, эти компоненты подвержены долговременному дрейфу сопротивления (в пределах месяцев и лет), если при монтаже получили механическое напряжение, которое постепенно снимается под воздействием изменений температуры.

Разработчик должен уменьшать все погрешности до уровней, соответствующих ожидаемой точности устройства путем выбора адекватной схемотехники; типа измерительного резистора, его сопротивления и точности; грамотной проработки механических и тепловых вопросов разработки, правильной топологии электрических цепей.

Если задачи измерения предполагают биполярные диапазоны и для V_{CM} и для измеряемого тока, или ноль рассматривается как часть диапазона V_{CM}, становится необходим четырехквадрантный режим работы. Однако выбор доступных ИС для таких решений ограничен. При увеличении диапазона V_{CM} и тех же ограничениях по точности, выбор ИС становится еще более скудным.

ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Одним из решений является разработка измерительной схемы «на верхней стороне» (high-side) с использованием отдельных ОУ. Естественно, такой подход имеет свои трудности. Одна из них заключается в том, что большинство современных высококачественных ОУ — низковольтные устройства с полным напряжением питания 5 В или меньше. Это усложняет разработку схемы, если диапазон синфазного напряжения (CMR, common-mode range) велик.

CMR токочувствительных усилителей с «верхним» измерением имеет три значения. Предельное (absolute maximum) напряжение CMR — это значение, при превышении которого усилитель выходит из строя. Рабочий (operating) CMR — это диапазон, в котором усилитель все еще способен анализировать падение напряжения на измерительном резисторе. Наконец, практический (useful) CMR — это диапазон изменений сигнала на измерительном резисторе, при котором погрешность выходного сигнала усилителя все еще находится в заданных пределах.

При использовании одного ОУ в конфигурации стандартного инструментального усилителя, фактором, ограничивающим рабочий CMR, является диапазон входного напряжения операционного усилителя (обычно меньший, чем размах выходного напряжения). Это вынуждает использовать очень малые коэффициенты передачи, ухудшая ситуацию с дрейфом и шумами.

В схеме инструментального усилителя с двумя ОУ (оба ОУ включены как инверторы), входные сигналы ОУ остаются близкими к опорному уровню — обычно 0 В. Таким образом, CMR ограничен только размахом выходных сигналов операционных усилителей, позволяя добиваться больших CMR при том же напряжении питания.

Для усилителей всех этих типов точность на верхних значениях практического диапазона CMR определяется главным образом величиной КОСС (коэффициент ослабления синфазного сигнала). Лучший КОСС будет вносить меньшую погрешность и таким образом повышать точность при данном синфазном напряжении. КОСС является функцией допуска на номинал применяемых резисторов. При существенном расширении пределов CMR требуемый допуск резисторов для достижения заданной точности становится чересчур жестким. Такие прецизионные резисторы могут быть недоступны, и даже если они существуют, их стоимость может оказаться чересчур высокой.

Схема на рисунке 2 смягчает эти проблемы. Сначала в схеме усиливается напряжение, снимаемое с измерительного резистора. Затем сигнал поступает на усилитель, который преобразует синфазный уровень линии, несущей ток, в уровень, привязанный к «земле». Таким образом, отношение

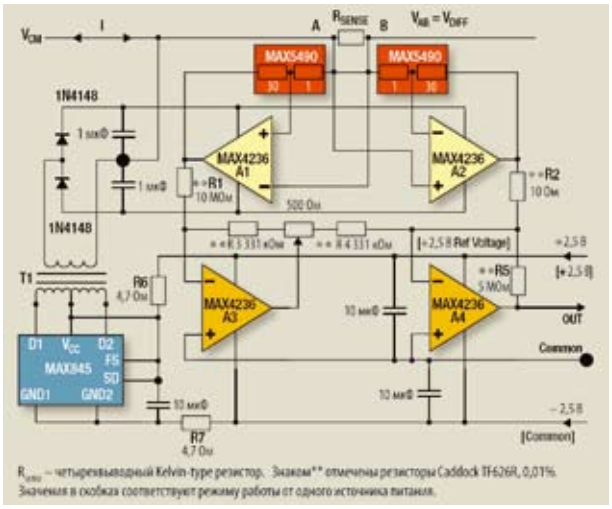

Рис. 2. ***Четырехквадрантный токовый датчик***

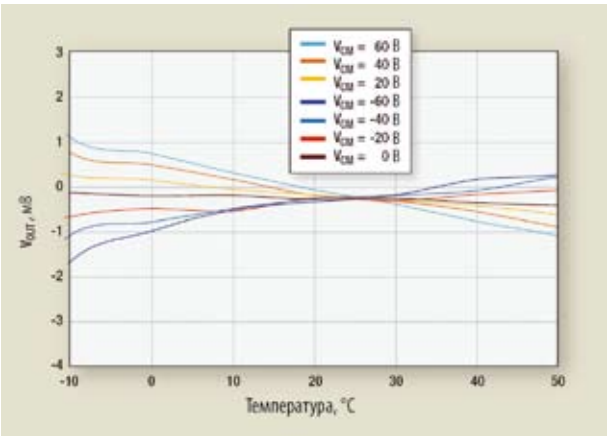

Рис. 3. ***Зависимость коэффициента ослабления синфазного сигнала усилителя по постоянному току от температуры***

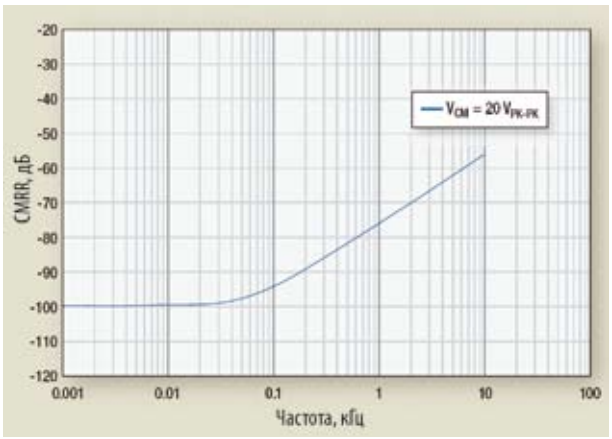

Рис. 4. ***КОСС как функция частоты***

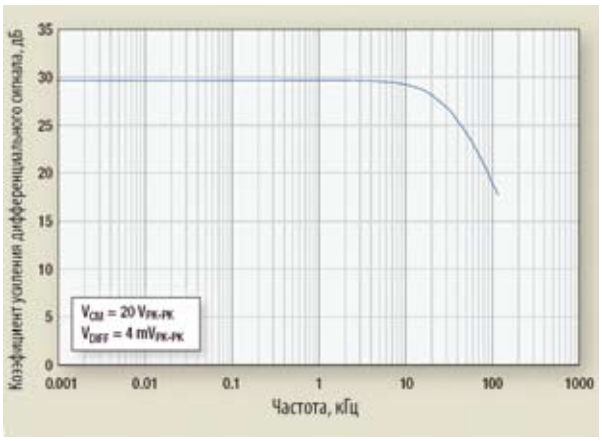

Рис. 5. ***Зависимости коэффициента усиления от частоты измеряемого напряжения***

полезного сигнала к паразитным составляющим, т.е. точность измерения, возрастает пропорционально коэффициенту передачи первого усилителя.

Так как опорный уровень первого усилителя (синфазный уровень) должен быть затем сменен, первый усилитель следует питать от изолированного источника напряжения. Схема на рисунке 2 может работать с синфазными напряжениями до ±75 В и имеет входной диапазон («потери» напряжения) ±80 мВ, что соответствует выходному напряжению ±2,5 В.

Коэффициент передачи V_{OUT}/V_{DIFF} равен 30 с точностью не менее 0,1%. Выходное напряжение сдвига при комнатной температуре меньше 100 мкВ. «Потери» тока составляют 10 мкА (за счет резистора 5 МОм) при V_{CM} равном 50 В. Предельное напряжение (не рабочее) для V_{CM} ограничено напряжениями пробоя R1, R2 или T1 (минимальным из них).

Усилители A1 и A2, образующие первый усилитель, питаются от изолированного источника напряжения, выполненного на ИС высокочастотного источника питания MAX845, который управляет трансформатором T1 с малой межобмоточной емкостью. A3 и A4 формируют инструментальный усилитель с широким CMR и высоким КОСС.

На рисунке 3 показана зависимость КОСС от температуры. Эта характеристика имеет большое значение для поддержания точности. Кривые, показанные на рисунке, позволяют разработчикам определить величину ошибки, вносимой синфазным напряжением в выходное напряжение при разных температурах. Для описанного здесь усилителя эта ошибка устанавливается в ноль при комнатной температуре (посредством 500-Ом потенциометра). Этот эффект объясняется изменениями соотношений R1/R3 и R2/R4 в показанном температурном диапазоне. Изменение выходного напряжения составляет около 2,5 мВ в диапазоне –10…50°C.

На рисунке 4 показана зависимость этой же величины КОСС от частоты. Такой график необходим для вычисления погрешности, если V_{CM} — напряжение переменного тока или содержит переменные составляющие.

На рисунке 5 приведен коэффициент усиления как функция частоты измеряемого напряжения. Этот график показывает диапазон частот (начиная с постоянной составляющей), в пределах которого усилитель применим «практически», т.е. имеет погрешность в заданных пределах.

Частотные характеристики важны потому, что затрагивают также вопросы характера изменения сдвига фаз, что имеет значение при измерении тока, используемого для вычисления мощности. Во-первых, в формулах вычисления мощности присутствует зависимость амплитуды тока от частоты. С другой стороны, при вычислении мощности рассматривается косинус угла сдвига фаз, так называемый коэффициент мощности.

Статья впервые опубликована на английском языке в журнале Power Electronics Technology, February, 2008.

Более подробную информацию можно получить у официальных дистрибьюторов компании Maxim в России: www.maxim-ic.ru/contact

АРХИВ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ»

«ИД Электроника» предлагает компакт-диски с архивом журнала «Электронные компоненты» за 2004—2005 гг., 2006 г.

Стоимость 1 диска для РФ (2004-2005 гг.) – 250 руб.
Стоимость 1 диска для РФ (2006 г.) – 300 руб.
Стоимость 1 комплекта (2 диска) для РФ – 500 руб.

При переводе денег следует пользоваться только услугами Сбербанка.

Реквизиты для заполнения банковской квитанции:

ООО «ИД Электроника»
ИНН 7728298032
№ счета получателя платежа 40702810004000000194
в КБ «Экспобанк» ООО, г. Москва,
корр. счет 30101810900000000460
БИК 044585460

Наименование платежа: Электронная версия журнала «ЭК»
(указать, за какие годы)

Не забудьте сообщить в редакцию свой почтовый адрес!

По вопросу приобретения компакт-дисков обращайтесь в ИД «Электроника»

115114, Москва, ул. Дербеневская, д. 1, стр. 1, п/я 35
Тел. (495) 741-7701 (отдел распространения)
e-mail: red@ecomp.ru
http://www.elcp.ru

СОБЫТИЯ, ЛЮДИ

| ИЗДАТЕЛЬСКОМУ ДОМУ «ДОДЭКА-XXI» — 15 ЛЕТ | 15 лет назад издательство «Додэка» выпустило первую книгу. За прошедшее время им пройден значительный путь от новичка до маститого издательства, приобретено уважение коллег и заслуженное внимание читательской аудитории. Вспоминает Андрей Огневский — один из основателей Издательского дома, ныне вице-президент группы компаний «Симметрон»: «Все начиналось в 90-х гг., когда у нас возникла мысль создать свою структуру. Набралось 12 человек, среди которых был большой любитель нумерологии. Именно он придумал название «Додэка», происходящее от числа 12. Нам пришла идея — издавать справочную техническую литературу».

Автор идеи, бывший главный редактор издательства, а ныне генеральный директор «Додэка-электрик» Александр Перебаскин, говорит: «В те времена не было нормальных компьютеров для верстки, не было Windows как графической среды. Мы нашли специалистов по информатике, нашли каких-то ребят, которые в чем-то рисовали. Темой первого справочника стали операционные усилители. Работу по подготовке технической документации, как правило, выполняли случайные люди. Результаты были соответствующими».

Первая книга называлась «Операционные усилители. Том I». «Микросхемы для телевидения» была второй книгой — «Том II». Это привело к совершенно катастрофическим последствиям. Читатели требовали «Микросхемы для телевидения. Том I». Тираж второй книги тоже насчитывал 50 тыс. экз., но разошлась она гораздо быстрее. Был продан весь тираж, ее даже включили в учебные пособия для вузов. Именно тогда у «Додэки» начала создаваться репутация серьезного издательства».

В серии «Энциклопедия ремонта» уже выпущено 23 книги, причем последняя вышла недавно — в феврале 2008 г. Чрезвычайно популярной оказался и справочник «Маркировка электронных компонентов», который выдержал уже 11 изданий. Однако безусловным лидером, если считать по тиражам, является серия «Библиотека электронных компонентов (БЭК)». Начиная с первой, вышедшей в 1999 г., и по 32-ю — «INFINEON: микросхемы для телекоммуникационных систем», суммарный выпуск книг серии превысил 275 тыс. экз.!

В ближайшее время выйдет в свет знаменитая книга Титце и Шенка «Полупроводниковая схемотехника». На Западе она переиздавалась 12 раз, в СССР вышла единожды — в 1982 г. Выпуск будет существенно отличаться от известных: книга не только дополнена новыми главами, что сказалось на объеме (теперь это двухтомник, в каждом томе которого по 900 с.), но и значительно улучшена полиграфия. В целом на 2008 г. запланировано значительное увеличение выпуска книг как по номенклатуре, так и по тематическим разделам. В настоящее время прайс-лист книготорговой фирмы охватывает свыше 2500 наименований наиболее востребованных научных и научно-технических изданий, причем все они есть в наличии на складе! Добавим, что издательство имеет собственный интернет-магазин: www.dokabooks.ru.

ИД «Электроника» с большим удовольствием поздравляет «Додэку» с днем рождения и желает дальнейшего процветания