KiT#83(6).qxd 6/18/2008 4:46 PM Page 16

Как сделать «идеальный» операционный усилитель, или о том, как бывает полезно помнить закон Ома

Дмитрий ИВАНОВ,
к. т. н.
di@efo.ru

Статья посвящена одному из последних достижений компании National Semiconductor в области совершенствования характеристик интегральных операционных усилителей. Рассмотрен новый метод подавления входных токов операционных усилителей и описана микросхема LMP7721 — прецизионный операционный усилитель с ультранизкими входными токами, в котором использован этот метод. Идею метода «подсказал» Георг Ом.

Введение

На первый взгляд, какая связь между законом Ома и операционными усилителями? О законе Ома слышал каждый старшеклассник. Некоторые из них даже могут его сформулировать, хотя автору доводилось встречать студентов технического университета, которые затруднялись это сделать. Операционные усилители, наоборот, известны только специалистам в области аналоговой электроники. В 1826 году, когда никому еще тогда не известный немецкий ученый Георг Ом опубликовал результаты своих исследований в области электричества, такое сложное устройство, как операционный усилитель, никто и представить себе не мог. Тем не менее, следствие из математического уравнения, известного нам как закон Ома, имеет самое прямое отношение к новейшему операционному усилителю LMP7721, анонсированному компанией National Semiconductor в марте 2008 года. Метод подавления входных токов, используемый в LMP7721, заключается в том, что во входных цепях усилителя искусственно создаются эквипотенциальные узлы, между которыми, как следует из закона Ома, не протекает электрический ток.

Причины возникновения входных токов операционных усилителей

На уровень входных токов операционного усилителя, вне зависимости от конкретного типа микросхемы, оказывают влияние следующие основные факторы: схемотехника входных цепей усилителя, характеристики компонентов, на которых выполнен входной каскад усилителя, синфазное входное напряжение усилителя и температура окружающей среды.

Интегральные операционные усилители первого поколения были построены на биполярных транзисторах. Наиболее распространенный тип усилителя того времени — это трехкаскадный усилитель с дифференциальным усилительным каскадом на входе и эмиттерным повторителем на выходе. Входные токи такого усилителя являются базовыми токами биполярных транзисторов и обычно лежат в пределах от 20 нА до 10 мкА [1]. В качестве примера можно привести самый первый интегральный операционный усилитель μA702 (Fairchild Semiconductor), который был разработан Робертом Видларом в 1964 году [2]. Типовое значение среднего входного тока этого усилителя равно 1,2 мкА при температуре окружающей среды +25 °C и напряжениях положительного и отрицательного источников питания +6 и –3 В, соответственно, а максимальные входные токи при тех же условиях могут достигать 3,5 мкА.

В конце 1970-х годов были созданы операционные усилители на принципиально новой элементной базе. Во входных каскадах вместо биполярных транзисторов стали применять полевые транзисторы с *p-n*-переходом (JFET), благодаря чему удалось снизить входные токи менее чем до 1 нА. Например, у усилителя μA740 (Fairchild Semiconductor) типовое значение входного тока равно 100 пА.

В начале 1980-х годов во входных каскадах операционных усилителей стали использовать полевые транзисторы с изолированным затвором — МОП полевые транзисторы (MOSFET). Это позволило снизить входные токи усилителей еще на несколько порядков, но породило новую проблему. Оказалось, что МОП полевые транзисторы очень уязвимы к электростатическим разрядам и поэтому нуждаются в специальной защите. Если не принять никаких защитных мер, то даже сравнительно небольшое входное напряжение, например 10 В, может вызвать необратимые повреждения микросхемы, в то время как электрический потенциал человека может достигать 1000 и более вольт [3].

На сегодняшний день эта проблема в основном решена [3, 4]. Разработаны достаточно простые и эффективные способы защиты микросхем с помощью внешних цепей, состоящих из резисторов, диодов, стабилитронов и ряда других пассивных компонентов. Многие современные операционные усилители имеют встроенные ограничительные диоды (в дальнейшем — «ESD-диоды»), которые служат для защиты входных цепей от электростатического разряда, а заодно пре-

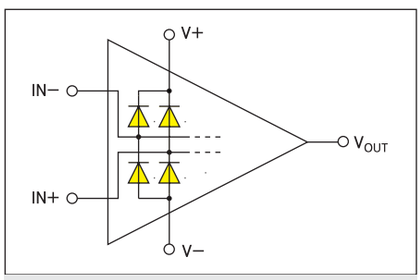

Рис. 1. Защита входов операционного усилителя с помощью встроенных ограничительных диодов

KiT#83(6).qxd 6/18/2008 4:46 PM Page 17

дохраняют входы усилителя от любых перенапряжений в процессе эксплуатации (рис. 1). Далее под словами «операционный усилитель» (или просто «усилитель») подразумевается интегральная микросхема именно такого типа, то есть с МОП-транзисторами во входном усилительном каскаде и со встроенными ESD-диодами.

К сожалению, ESD-диоды, выполняющие вспомогательную функцию, являются одной из главных причин возникновения входных токов современного операционного усилителя. Под действием обратных напряжений, приложенных к диодам, через них протекают токи, величина которых зависит от вида вольтамперных характеристик диодов, приложенных к диодам напряжений и температуры.

Если пренебречь токами утечки, протекающими через материал диэлектрика между любым из входных выводов микросхемы и другими ее выводами (как по корпусу самой микросхемы, так и по печатной плате), то, как следует из первого закона Кирхгоффа, входной ток I_{IN} усилителя (рис. 2) будет описываться следующим выражением:

$$I_{IN} = I_2 - I_1 - I_G, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 — обратные токи диодов D1 и D2 соответственно, а I_G — ток утечки затвора входного МОП-транзистора, на величину которого оказывают влияние проводимость изолятора затвора и туннельный эффект в изоляторе, что приводит к дополнительному току утечки между затвором и каналом транзистора.

Детальное описание природы туннельного тока затвора МОП-транзистора можно найти в работе [5], а также в тех публикациях, на которые ссылаются авторы работы. В данной статье речь пойдет только о той составляющей входного тока усилителя, которая обусловлена обратными токами ESD-диодов.

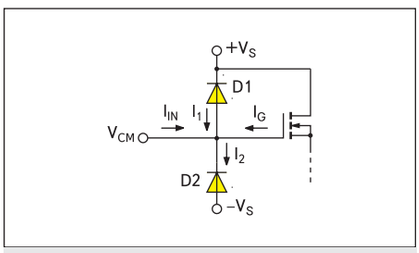

Рис. 2. Баланс токов на входе операционного усилителя

Чтобы представить себе порядок входных токов современных операционных усилителей, обратимся к таблице 1. В ней приведены типовые значения параметров нескольких прецизионных усилителей двух производителей, входящих в группу мировых лидеров в области производства этих компонентов — National Semiconductor и Analog Devices. Отбор микросхем был проведен по следующему алгоритму. Сначала в программе поставок каждого из производителей [6, 7] были выбраны одноканальные усилители с КМОП входами и нижним пределом напряжения питания не более 5 В. Затем элементы каждой группы были расставлены в порядке возрастания типового значения входного тока (при напряжении питания +5 В, синфазном напряжении +2,5 В и температуре +25 °С) и отброшены те микросхемы, у которых интересующий нас параметр превышает 300 фА. Наконец, из каждой группы были отобраны по три усилителя с минимальным типовым значением напряжения смещения. При равенстве напряжений смещения выбор был сделан в пользу того усилителя, у которого шире полоса пропускания. В результате получился список из шести микросхем, которые по своим входным характеристикам в наибольшей степени (с поправкой на субъективность критериев отбора) соответствуют так называемому «идеальному» усилителю — абстрактной модели операционного усилителя, используемой в аналоговой схемотехнике для упрощения анализа электрических цепей. Как известно, у идеального усилителя входные токи (а также напряжение смещения, температурный дрейф и ряд других параметров) равны нулю. А теперь сравним данные, приведенные в таблице 1, с параметрами вышеупомянутой микросхемы µA702, у которой типовой средний входной ток равен 1,2 мкА, а разность входных токов — 120 нА. Результаты сравнения показывают, каких успехов достигли производители аналоговых интегральных микросхем менее чем за 45 лет развития этой отрасли. У «худшего» из представленных в таблице 1 современных усилителей входной ток в 4 миллиона раз, а разность входных токов в 600 тысяч раз ниже, чем у µA702.

Таблица 1. Входные токи современных операционных усилителей (V_S = 5 В, $V_{CM} = V_S/2$)

Тип микросхемы	Производитель	Типовой входной ток (T_A = 25 °С), фА	Максимальный входной ток (T_A = 25 °С), пА	Разность входных токов (T_A = 25 °С), фА	Максимальный входной ток (T_A = 85 °С), пА	Максимальный входной ток (T_A = 125 °С), пА
LMP7721 (V_{CM} = 1 В)	National Semiconductor	±3	±0,02	6	±0,9	±5
LMP2231	National Semiconductor	20	1	5	15	50
LMP7711	National Semiconductor	100	1	10	50	100
AD8603	Analog Devices	200	1	100	50	500
AD8605	Analog Devices	200	1	100	50	250
AD8661	Analog Devices	300	1	200	50	300

Примечание: V_S — напряжение питания, T_A — температура окружающей среды, V_{CM} — синфазное входное напряжение

При сравнении современных операционных усилителей между собой следует обратить внимание на четвертую колонку таблицы 1: у большинства усилителей входные токи при комнатной температуре могут достигать 1 пА и только у одного из них (LMP7721) значение этого параметра в 50 раз ниже. Именно это обстоятельство и побудило автора написать несколько строк в дополнение к той информации о микросхеме LMP7721, которая уже опубликована на нескольких тысячах веб-сайтов различных компаний, имеющих отношение к миру электронных компонентов.

С математической точки зрения задача снижения входного тока операционного усилителя кажется достаточно простой. Как следует из равенства (1), если обеспечить выполнение условия:

$$I_1 = I_2, \quad (2)$$

то входной ток усилителя будет равен току утечки через изолированный затвор входного МОП-транзистора, то есть достигнет своего минимального значения, предельного для данного уровня технологии производства интегральных микросхем.

По своей природе каждый из токов I_1 и I_2 является обратным током, протекающим через *p-n*-переход, и может быть описан функцией двух переменных f(T, V), где T — температура перехода, а V — обратное напряжение, приложенное к переходу [8]. Функция f принимает нулевое значение в точке (T, 0) и при T = const является непрерывной монотонно возрастающей функцией переменной «V».

Поскольку диоды D1 и D2 (рис. 2) расположены на одном кристалле, они имеют практически одну и ту же температуру. Будем считать, что температура диодов равна температуре окружающей среды, то есть тепловой режим является установившимся, и внутри микросхемы отсутствует существенное выделение тепла, которое могло бы привести к перегреву кристалла по отношению к окружающей среде.

В отличие от температуры, напряжения, приложенные к диодам, равны только тогда, когда синфазное входное напряжение усилителя V_{CM} равно нулю при двухполярном симметричном питании или половине напряжения питания V_S при однополярном питании. При изменении синфазного входного сигнала падение напряжения на одном из диодов увеличивается, а на другом уменьшается.

В общем случае, вследствие технологического разброса характеристик, диоды D1 и D2 описываются разными функциями, которые обозначим, соответственно, f_1 и f_2. Тогда, в новых обозначениях и с учетом сделанного выше допущения о температуре диодов, при двухполярном симметричном питании усилителя (рис. 2) выражение (2) принимает вид:

$$f_1(T_A, V_S - V_{CM}) = f_2(T_A, V_S + V_{CM}), \quad (3)$$

KiT#83(6).qxd 6/18/2008 4:46 PM Page 18

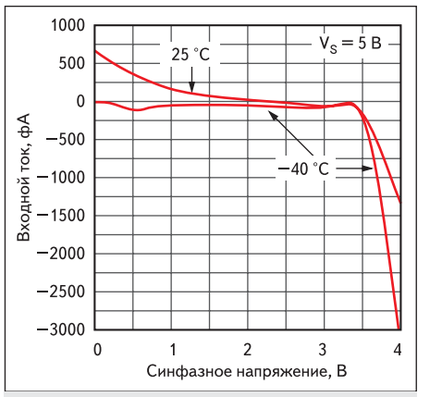

Рис. 3. Зависимости входного тока операционного усилителя LMP7711 от синфазного напряжения при температуре −40 °C и +25 °C

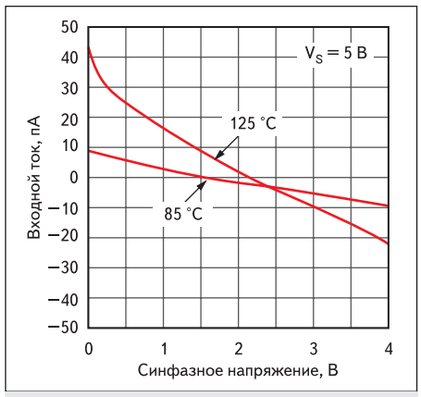

Рис. 4. Зависимости входного тока операционного усилителя LMP7711 от синфазного напряжения при температуре +85 °C и +125 °C

где T_A — температура окружающей среды, V_{CM} — синфазное входное напряжение, V_S — напряжение питания усилителя.

При T_A = const, V_S = const и изменении V_{CM} в пределах от $-V_S$ до $+V_S$ функция f_2 монотонно возрастает от нуля до $f_2(T_A, 2V_S)$, а функция f_1 монотонно убывает от $f_1(T_A, 2V_S)$ до нуля. На границах отрезка $[-V_S, +V_S]$ разность функций $f_1–f_2$ имеет значения разных знаков. Поскольку разность непрерывных функций также является непрерывной функцией, то, как утверждает теорема о прохождении непрерывной функции через нуль при смене знаков, на отрезке $[-V_S, +V_S]$ существует точка, в которой $f_1–f_2 = 0$.

Очевидно, что если бы диоды D1 и D2 имели абсолютно идентичные вольтамперные характеристики, то равенство их обратных токов достигалось бы в точке $V_{CM} = 0$ ($V_{CM} = V_S/2$ при однополярном питании), то есть тогда, когда к диодам приложены одинаковые обратные напряжения. В реальной жизни точка равновесия смещается от середины отрезка $[-V_S, +V_S]$, причем ее положение изменяется в зависимости от температуры окружающей среды и напряжения питания.

Таким образом, изменение любой из трех величин: температуры, синфазного входного напряжения и напряжения питания, приводит к изменению разности обратных токов ESD диодов, и, следовательно, к изменению входного тока операционного усилителя. Проиллюстрируем этот вывод на примере усилителя LMP7711, разработанного компанией National Semiconductor в 2006 году.

На рис. 3 и 4 приведены типовые зависимости входного тока усилителя LMP7711 от синфазного входного напряжения при четырех значениях температуры и постоянном напряжении питания +5 В (схема питания однополярная) [6]. На основании этих графиков построена таблица 2.

Графики и данные, приведенные в таблице 2, показывают, что при температуре –40 °C типовой входной ток усилителя LMP7711 не выходит за пределы ±100 фА при изменении синфазного напряжения в пределах от 0 до +3,4 В. При повышении температуры интервал синфазных напряжений, в котором входной ток находится в тех же пределах, что и при более низкой температуре, во-первых, сужается, а во-вторых, смещается середина этого интервала. Например, при +25°C входной ток находится в пределах ±100 фА при изменении синфазного напряжения на интервале от +1,6 до +3,4 В, то есть на интервале +2,5 ±0,8 В, за границами которого входной ток может достигать значения ±500 фА и более. При температуре +85 °C изменение синфазного входного напряжения на 1 В на интервале от 0 до +4 В приводит к изменению входного тока в среднем на 5 пА, а при +125 °C — на 14 пА.

Таблица 2. Типовые характеристики операционного усилителя LMP7711

Температура, °C	Входной ток, пА	Синфазное напряжение, В
−40	от −0,1 до +0,1	от 0 до +3,4
+25	от −0,1 до +0,1	от 1,6 до +3,4
+85	от −10 до +10	от 0 до +4,0
+125	от −10 до +10	от 1,4 до +3,0

Из приведенных примеров можно сделать два важных вывода. Во-первых, такой параметр, как типовое значение входного тока, не отражает реальных свойств операционного усилителя в полном объеме, поскольку характеризует поведение усилителя только в окрестностях одной точки (T_A, V_{CM}), для которой он нормируется. А во-вторых, для того, чтобы приблизиться по своим входным характеристикам к идеальному усилителю, операционный усилитель должен сохранять низкие входные токи во всем рабочем температурном диапазоне и во всем диапазоне допустимых синфазных входных сигналов. Из всех упомянутых выше усилителей такими свойствами обладает только LMP7721. Методические основы построения входных цепей этого усилителя рассмотрены в следующем разделе.

Метод подавления входных токов операционного усилителя

Метод подавления входных токов операционного усилителя, предложенный специалистами компании National Semiconductor, заключается в минимизации тех составляющих входных токов, которые обусловлены обратными токами ESD-диодов. Метод базируется на трех «китах» — трех идеях, одну из которых условно можно назвать математической, вторую — электрической, а третью — схемотехнической.

Математическая идея метода тривиальна: для того, чтобы при любом значении T_A на отрезке от T_{min} до T_{max} и любом значении V_{CM} на отрезке от $-V_S$ до V_S было справедливо тождество

$$I_1(T_A, V_{CM}) - I_2(T_A, V_{CM}) \equiv 0, \quad (4)$$

достаточно, чтобы выполнялись условия:

$$I_1(T_A, V_{CM}) \equiv 0$$
$$\text{при } T_{min} \le T_A \le T_{max} \text{ и } -V_S \le V_{CM} \le V_S,$$

$$I_2(T_A, V_{CM}) \equiv 0$$
$$\text{при } T_{min} \le T_A \le T_{max} \text{ и } -V_S \le V_{CM} \le V_S, \quad (5)$$

где I_1 и I_2 — обратные токи ESD-диодов, подключенных к одному и тому же входу усилителя, T_A — температура окружающей среды, V_{CM} — синфазное входное напряжение усилителя, T_{min} — минимальная рабочая температура, T_{max} — максимальная рабочая температура, V_S — напряжение питания усилителя.

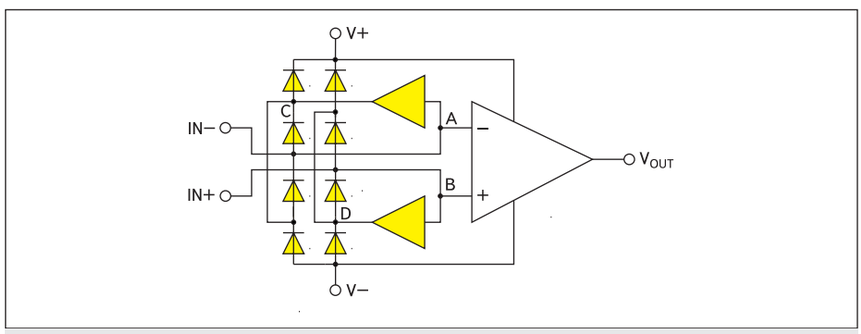

Рис. 5. Метод подавления входных токов операционного усилителя

KiT#83(6).qxd 6/18/2008 4:46 PM Page 19

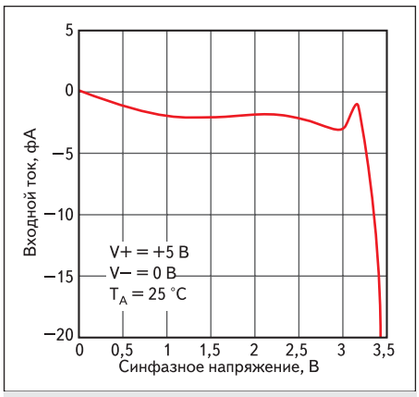

Рис. 6. Зависимость входного тока операционного усилителя LMP7721 от синфазного напряжения при температуре +25 °C

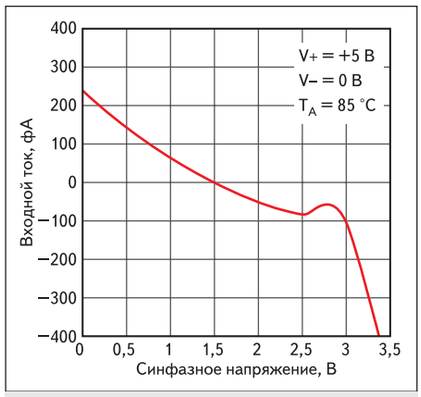

Рис. 7. Зависимость входного тока операционного усилителя LMP7721 от синфазного напряжения при температуре +85 °C

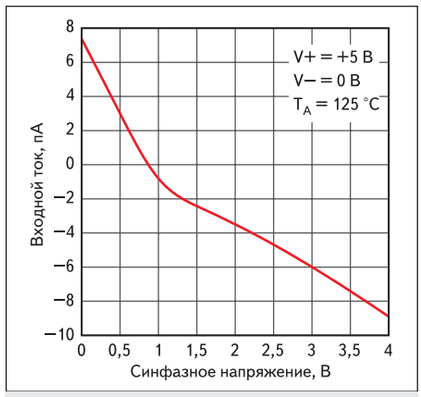

Рис. 8. Зависимость входного тока операционного усилителя LMP7721 от синфазного напряжения при температуре +125 °C

Электрическая идея является следствием из закона Ома: если потенциалы анода и катода диода будут равны, то через диод не будет протекать электрический ток.

Схемотехническая идея заключается в том, чтобы вместо двух диодов (рис. 1) использовать для защиты каждого из входов усилителя две пары последовательно соединенных между собой диодов и вспомогательный повторитель напряжения, как показано на рис. 5. Задача повторителей напряжения — поддерживать равенство потенциалов узлов A и C и узлов B и D, соответственно, при изменении синфазного входного сигнала.

Теоретически, при точном совпадении потенциалов указанных выше узлов, обратные токи диодов, которые непосредственно подключены к входам усилителя, равны нулю, то есть не зависят ни от синфазного входного напряжения, ни от температуры.

Предложенный метод прошел успешную апробацию. На его основе был создан уникальный операционный усилитель LMP7721, анонс которого состоялся 18 марта 2008 года. Высокие характеристики усилителя полностью подтвердили правоту заложенных в него теоретических идей. Типовое значение входного тока LMP7721 равно ±3 фА при температуре 25 °C. Много это или мало? На этот вопрос мы ответим немного позже. А пока рассмотрим LMP7721 более внимательно.

LMP7721 — прецизионный операционный усилитель с ультранизкими входными токами

Эту микросхему по праву можно отнести к числу выдающихся достижений компании National Semiconductor в области совершенствования характеристик операционных усилителей. На сегодняшний день LMP7721 имеет не только самое низкое типовое значение входных токов, но, что более важно, самые низкие предельно допустимые (гарантированные) значения входных токов (табл. 1):

- ±20 фА при +25 °C,
- ±900 фА при +85 °C,
- ±5 пА при +125 °C.

Приведенные на рис. 6–8 графики типовых характеристик усилителя при различных значениях температуры показывают, что низкие входные токи сохраняются при изменении синфазного входного напряжения усилителя в очень широких пределах. Например, при 25 °C типовые входные токи не превышают 3 фА при изменении синфазного сигнала в переделах от нуля до 3,2 В.

Следует отметить, что, являясь лидером по одному из параметров, LMP7721 не уступает лучшим прецизионным усилителям по другим характеристикам. При температуре 25 °C и напряжении питания +5 В усилитель имеет параметры, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Параметры усилителя LMP7721

Напряжение смещения, мкВ	26
Температурный дрейф напряжения смещения, мкв/°C	–1,5
Плотность шума на частоте 1 кГц, нВ/√Гц	6,5
Коэффициент усиления, дБ	120
Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ	100
Общие гармонические искажения (THD), %	0,0007
Полоса пропускания, МГц	17
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	12,76
Напряжение питания, В	1,8–5,5
Потребляемый ток, мА	1,3
Рабочий температурный диапазон, °C	–40...+125

Микросхема LMP7721 имеет 8-выводной корпус SOIC, но, в отличие от других одноканальных усилителей в таком же корпусе, LMP7721 имеет оригинальную цоколевку (рис. 9). Особое расположение выводов позволяет улучшить изоляцию между входными выводами микросхемы и остальными ее выводами (выходом и выводами питания), а также между входами микросхемы и внешними электрическими цепями, находящимися под другими потенциалами.

Минимизация токов утечки во входных цепях прецизионных усилителей

Когда речь идет о токах величиной несколько единиц фемтоампер, уже нельзя пренебрегать паразитными токами утечки, которые могут протекать между входами усилителя и другими электрическими цепями по корпусу микросхемы или по диэлектрическому материалу печатной платы.

Для предотвращения токов утечки в микросхеме LMP7721 приняты следующие конструктивные меры. Во-первых, входные выводы IN+ и IN– микросхемы расположены не рядом, как, например, у LMP2231 (рис. 9), а на противоположных сторонах корпуса, то есть на большем расстоянии друг от друга.

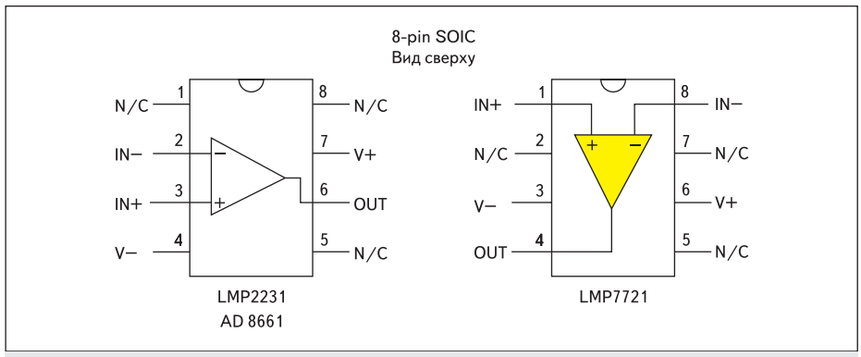

Рис. 9. Отличие цоколевки микросхемы LMP7721 от традиционной цоколевки

KiT#83(6).qxd 6/18/2008 4:46 PM Page 20

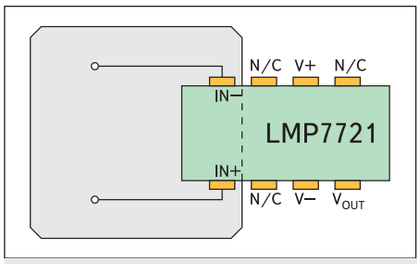

Рис. 10. Предотвращение токов утечки с помощью охранных колец

Во-вторых, между входными выводами и выводами питания V+ и V– есть изолированные выводы N/C, которые не соединены ни с одной из внутренних цепей микросхемы. Такое расположение выводов позволяет создать вокруг входных выводов микросхемы охранную зону достаточно большой площади с помощью эквипотенциальных охранных колец (рис. 10).

Чтобы охранные кольца правильно выполняли свою функцию, нужно придерживаться следующих рекомендаций:

- входные выводы микросхемы должны располагаться внутри замкнутого охранного кольца, как показано на рис. 10;
- охранных колец должно быть два (на каждой стороне печатной платы) и они должны быть электрически соединены между собой;
- охранные кольца должны находиться под потенциалом, равным потенциалу того из входов усилителя, который имеет более низкоомную связь с «аналоговой землей»;
- не следует наносить защитную маску на области печатной платы, окруженные охранными кольцами (с обеих сторон платы).

Для подключения усилителя LMP7721 к выходу удаленного источника сигнала (например, к выходу высокоимпедансного датчика) рекомендуется [6] использовать триаксиальный (Triax) кабель и, если требуется, триаксиальные разъемы, которые имеют двойное экранирование. Внешние экраны кабеля и разъемов соединяются с общим входом усилителя, центральный провод подключается к сигнальному входу усилителя, а на внутренний (защитный) экран с помощью дополнительного повторителя напряжения подается потенциал, равный потенциалу второго входа усилителя (рис. 11). Благодаря такому подключению защитного экрана подавляются паразитные токи утечки через изоляцию кабеля и, следовательно, снижается составляющая аддитивной погрешности, обусловленная входным током усилителя и высоким внутренним сопротивлением источника входного сигнала.

Заключение

В заключение вернемся к вопросу, заданному во второй части статьи: «3 фемтоампера — это много или мало?» Это всего 20 электронов за одну миллисекунду!

Литература

1. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1980.
2. Келл Г. Магические числа электроники: 702, 709, 741 // Новости электроники. 2007. № 14.
3. Adolfo Garcia, Wes Freeman. Overvoltage Effects On Analog Integrated Circuits. **http://search.analog.com/search/default.aspx?query=ESD+prevention+manual&local=en**
4. James Bryant, Walt Kester, Chuck Kitchin, Eamon Nash. Protecting Instrumentation Amplifiers. **http://search.analog.com/search/default.aspx?query=ESD+prevention+manual&local=en**
5. Мустафаев А. Г., Мустафаев А. Г. Материалы затворного диэлектрика для КМОП-технологии. — Электронный научный журнал «Исследовано в России». **http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/175.pdf**
6. Справочно-информационный портал компании National Semiconductor по операционным усилителям. **http://www.national.com/appinfo/amplifiers**
7. Справочно-информационный портал компании Analog Devices. **http://www.analog.com/en**
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1.

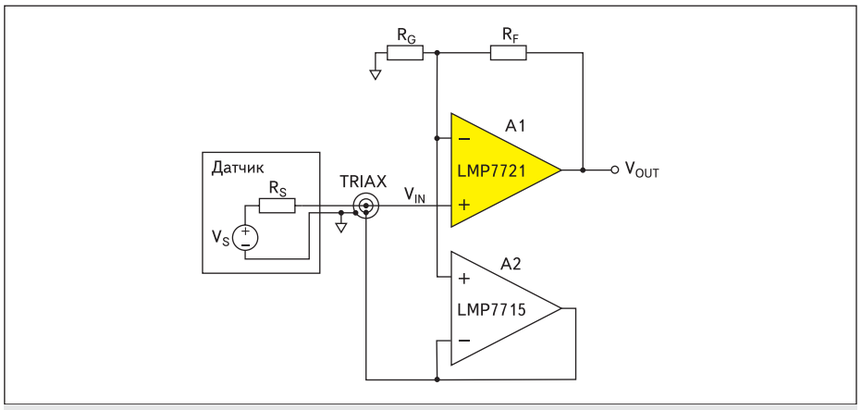

Рис. 11. Функциональная схема неинвертирующего усилителя напряжения для высокоимпедансных датчиков