

# Эволюция инструментальных усилителей

Грег ДЭВИС (Greg DAVIS),  
ст. менеджер по маркетингу продукции,  
Microchip Technology

Инструментальные усилители (ИУ) широко применяются в разных приложениях, будь то медицинское оборудование для коррекции зрения или промышленные прессы. Эти устройства востребованы в тех системах, где требуется обеспечить усиление сигналов датчиков на уровне микровольт и в то же время подавить синфазные помехи.

В прошлом термин «инструментальный усилитель» часто использовался некорректно. В первую очередь он обозначал приложение, а не архитектуру устройства. Основу инструментальных усилителей составляет та же архитектура, что и у операционных усилителей (ОУ), но ИУ являются специализированной разновидностью ОУ. Инструментальные усилители с высоким дифференциальным коэффициентом усиления (КУ) предназначены для усиления микровольтовых сигналов датчиков и подавления синфазных сигналов высокого уровня в несколько вольт. Такая функция необходима для того, чтобы выделять малые сигналы.

Мы рассмотрим несколько приложений, в которых используются инструментальные усилители. Например, в медицинских измерительных приборах датчики применяются для точного позиционирования шаговых электродвигателей в глазной хирургии при коррекции зрения. В этом приложении очень важно обеспечить высокую точность сигналов, поступающих с датчиков в оборудование операционной комнаты.

В качестве еще одного примера можно привести промышленный пресс, который применяется для штамповки металлических изделий. Датчики, которыми оснащено это оборудование, выдают сигнал на его включение, если в их поле зрения попадает рука оператора. В этом случае важно, чтобы электромагнитные помехи от другого промышленного оборудования не нарушили функционирование прессы. В обоих случаях сигналы с датчиков проходят через инструментальный усилитель и должны усиливаться с высокой точностью при любых условиях эксплуатации.

Инструментальные усилители специально предназначены для решения этой задачи – точного усиления малых сигналов в зашумленных средах. Кроме того, эти устройства должны обладать малым энергопотреблением, что увеличивает срок службы батарей. Широкий диапазон вход-

ного напряжения обеспечивает совместимость с большим количеством датчиков, а согласование импедансов на входе позволяет реализовать «бесшовный» интерфейс с датчиками.

## Эволюция ИУ

За многие годы развития медицинские, потребительские и промышленные приложения были усовершенствованы так, чтобы в полной мере использовались преимущества характеристик ИУ. Давайте проследим эволюцию схем с инструментальными усилителями, начиная с исходной концепции и заканчивая современными ИУ. Анализ этих схем, выявляющий их преимущества и ограничения, позволит увидеть те усовершенствования, которыми имеют в нынешних приложениях. Прежде чем мы рассмотрим разные подходы, давайте сначала обратимся к рис. 1.

Выходные сигналы датчика поступают на входы ИУ, который усиливает дифференциальное напряжение. Источниками кондуктивного шума и излучаемых помех являются многие устройства, к которым, например, относятся импульсные источники питания, электродвигатели и беспроводные сети. Этот

шум можно уменьшить с помощью экрана и хорошо продуманной топологии печатных плат, но, как бы то ни было, от части помех избавиться не удастся.

К счастью, большая часть этого шума совпадает по фазе – синфазное напряжение  $V_{CM}$  накладывается на дифференциальное напряжение датчика  $V_{DM}$  (рис. 1), и измерительное оборудование с хорошим коэффициентом ослабления синфазных сигналов (КОСС) в значительной мере подавляет эти помехи, обеспечивая высокую точность. Минимальное значение КОСС, как правило, указывается по постоянному току, а значение КОСС по переменному току определяется по рабочим характеристикам.

## Дифференциальный усилитель на дискретных компонентах

Для усиления разности напряжений на выходе датчика применяется простой операционный усилитель, у которого, однако, имеется немало недостатков. В схеме на рис. 2 напряжение  $V_{IN+}$  смещено относительно опорного напряжения  $V_{REF}$  (которое, как правило, составляет половину величины от напряжения питания) в приложениях с одним источником питания.

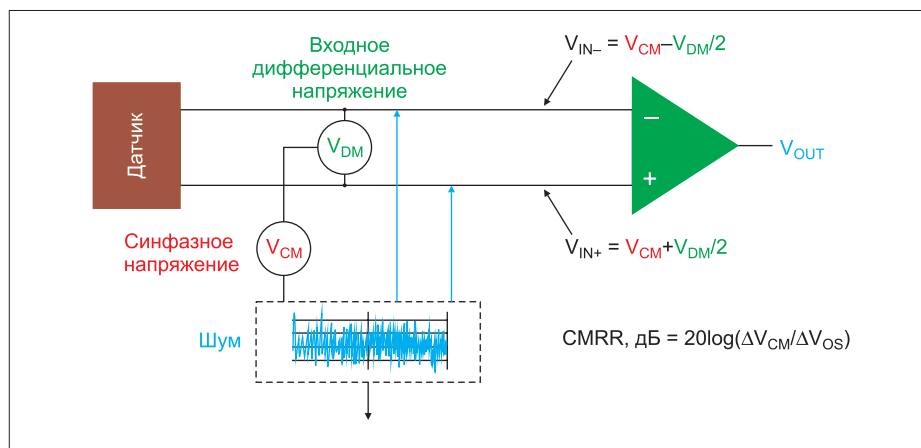


Рис. 1. Структурная схема датчикового интерфейса с ИУ

У операционного усилителя, который предназначен для усиления дифференциального напряжения, — хороший показатель КОСС, но это преимущество нивелируется внешней схемой. Любое рассогласование между внешними резисторами (включая то, которое обусловлено цепью делителя, подключенного к  $V_{REF}$ ), ограничивает способность ОУ подавлять синфазные сигналы, что ведет к уменьшению КОСС.

Отклонения величины сопротивления от номинального значения достаточно велики, чтобы обеспечить хорошее значение коэффициента КОСС, которым характеризуется ИУ. Посмотрим, как рассогласованные резисторы влияют на коэффициент КОСС.

Уравнение ниже описывает КОСС усилителя разности с коэффициентом усиления  $G = 1 \text{ В/В}$  и допуском на величину сопротивления  $T_R$  следующим образом:

$$КОСС_{DIFF} \approx 20 \lg \left( \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{K} \right),$$

где  $K$  — рассогласование соотношений  $R_1/R_2$  с  $R_3/R_4$ . Величина  $K$  достигает  $4T_R$  в наихудшем случае. С помощью уравнения получаем:

- если  $T_R = 1\%$ , то в наихудшем случае  $КОСС_{DIFF}$  равен 34 дБ;
- если  $T_R = 0,1\%$ , то в наихудшем случае  $КОСС_{DIFF}$  равен 54 дБ.

Усиление дифференциального напряжения на входе с коэффициентом  $G$  определяется следующим образом:

$$V_{OUT} = G \cdot V_{DM} = (R_1/R_2) \cdot (V_{IN+} - V_{IN-}) + V_{REF}$$

Проблема в том, что дифференциальное напряжение ( $V_{IN-}$  и  $V_{IN+}$ ) включает наложенный шум, а любая неподавленная синфазная помеха (из-за невысокого коэффициента КОСС) усиливается, что приводит к появлению шума в выходном сигнале.

У этого простого подхода имеются и другие недостатки. Как правило, входной импеданс ОУ достаточно высок и находится в диапазоне от МОм до ГОм. Однако из-за тракта обратной связи и источника опорного напряжения этот импеданс уменьшается и становится несбалансированным, что ухудшает точность измерения датчика.

### Три ОУ в одной ИС

Три микросхемы операционных усилителей в одном корпусе объединены в ИС стандартного инструментального усилителя (рис. 3). Во входном каскаде имеются два инвертирующих буферных усилителя, а выходной каскад представляет собой

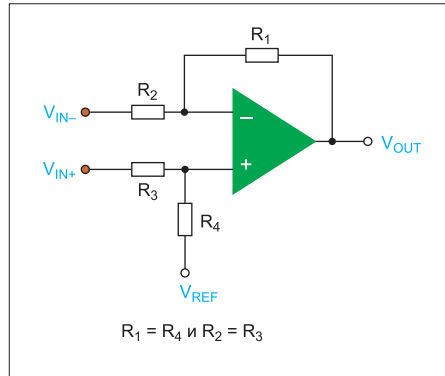


Рис. 2. Схема дифференциального усилителя на дискретных компонентах

стандартный дифференциальный усилитель. Внутренние резисторы, которые используются в этой схеме, согласованы с очень высокими требованиями по точности, что возможно только в хорошо сбалансированных полупроводниковых схемах, благодаря чему коэффициент КОСС стал намного больше.

Входные каскады усилителей тоже имеют высокий импеданс, что минимизирует нагрузку на датчики. Резистор  $R_G$ , задающий коэффициент усиления, позволяет выбрать любое значение  $G$  в рабочем диапазоне устройства, который, как правило, составляет 1–1000 В/В.

Выходным каскадом является стандартный дифференциальный усилитель. Отношение  $R_2/R_1$  внутренних резисторов задает КУ собственного усилителя разности с типовой величиной 1 В/В для большинства инструментальных усилителей (суммарный КУ задается усилителем в первом каскаде). Благодаря хорошо сбалансированным сигнальным трактам между входом и выходом КОСС очень высок. Эта схема легко реализуется, занимает мало место на печатной плате и содержит меньше компонентов, что позволяет сократить общие расходы. Кроме того, она совместима с однополярными источниками питания

за счет вывода  $V_{REF}$ . Однако даже у этого варианта имеются свои ограничения. Микросхема инструментального усилителя на трех ОУ обеспечивает высокий КОСС при постоянном токе благодаря согласованию внутренних резисторов усилителя разности, но контур обратной связи может существенно ухудшить КОСС по переменному току.

Кроме того, из-за того что паразитные емкости нельзя полностью согласовать, возникают несоответствия, и коэффициент КОСС уменьшается с ростом частоты. Входной диапазон синфазного напряжения ограничен так, что внутренние узлы не насыщаются. Выводу  $V_{REF}$  требуется буферный усилитель для оптимальной работы. Наконец, температурные коэффициенты внешних и внутренних резисторов, определяющих КУ, не согласованы, что приводит к ухудшению КОСС.

Точность усиления зависит от согласования резисторов следующим образом:

$$V_{OUT} = (G \cdot V_{DM}) + V_{REF}$$

где  $G = 1 + [1 + (2R_F/R_G)] (R_2/R_1)$ ;  
 $V_{DM} = (V_{IN+} - V_{IN-})$

### Непрямая обратная связь по току

В инструментальном усилителе с непрямой обратной связью по току (indirect current feedback, ICF) применяется новый метод преобразования напряжения в ток (рис. 4). Схема состоит из двух согласованных усилителей тока  $G_{M1}$  и  $G_{M2}$ , управляемых напряжением, и усилителя напряжения  $A3$ , управляемого током. Поскольку в этой схеме отсутствует необходимость в собственных сбалансированных резисторах, себестоимость такого решения ниже. Еще одним преимуществом является то, что внешние резисторы не требуется согласовывать с резисторами кристалла. Следует только как можно лучше согласовать температурные

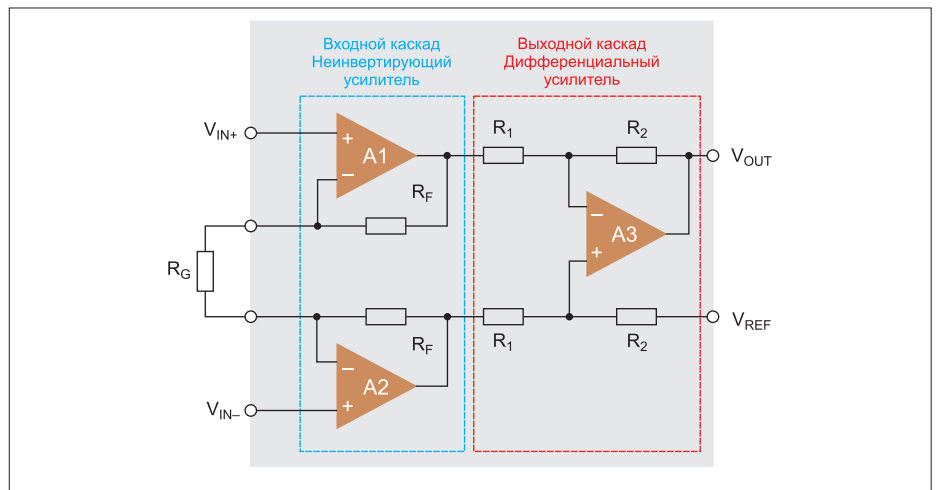


Рис. 3. Использование трех ОУ в одной ИС

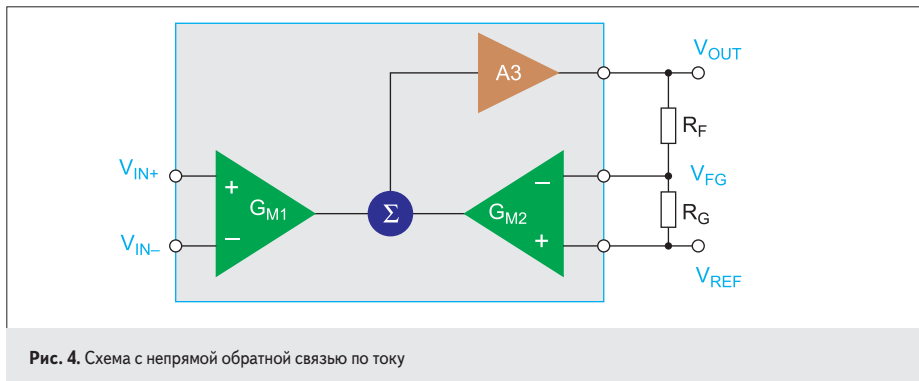


Рис. 4. Схема с непрямой обратной связью по току

коэффициенты внешних резисторов  $R_F$  и  $R_G$ , чтобы минимизировать дрейф коэффициента усиления.

КОСС по постоянному току достаточно высок благодаря тому, что усилитель  $G_{M1}$  подавляет синфазные сигналы, а КОСС по переменному току уменьшается незначительно с ростом частоты. Как уже упоминалось, в схеме с тремя ОУ диапазон входного напряжения ограничен во избежание насыщения внутреннего узла. В схеме с непрямой обратной связью по току размах напряжения не связан с входным синфазным напряжением, что позволяет расширить рабочий диапазон, недостижимый в схеме с тремя ОУ.

Второй каскад, в который входят усилитель  $G_{M2}$  и  $A3$ , дифференциально усиливает

сигнал и подавляет синфазный шум на выходах  $V_{FG}$  и  $V_{REF}$ . И в этой схеме реализовано однополярное питание путем смещения на выводе  $V_{REF}$ .

Коэффициент усиления инструментального усилителя с непрямой обратной связью по току определяется следующим образом:

$$V_{OUT} = (G \cdot V_{DM}) + V_{REF}$$

где  $V_{DM}$  — дифференциальное напряжение:

$$V_{DM} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = (V_{FG} - V_{REF}).$$

На рис. 5 показано несколько распространенных приложений с использованием инструментальных усилителей. Сигналы с датчиков с высокой точностью усиливаются

с помощью ИУ и затем поступают в преобразователь и микроконтроллер.

## Выводы

Необходимость в усилении малых сигналов в шумной среде претерпела эволюцию за многие годы. Использование операционного усилителя на дискретных компонентах в качестве ИУ не позволяет решить эту задачу. У интегрального подхода на основе трех ОУ имеются большие преимущества, включая высокий КОСС по постоянному току, а также сбалансированные и высокие входные импедансы при одном резисторе, задающем КУ.

Однако у этого подхода имеются ограничения в виде синфазного напряжения. Кроме того, достаточно трудно согласовать температурные коэффициенты внутренних и внешних резисторов, что приводит к дрейфу КУ. Импеданс на выводе  $V_{REF}$  тоже может негативно влиять на КОСС, если не используется буфер.

Схема с непрямой обратной связью по току, обеспечивающая высокий КОСС (даже при сравнительно более высоких частотах) и более широкий диапазон синфазного напряжения, исключает необходимость во внутренних сбалансированных резисторах, что уменьшает стоимость решений и дрейф КУ при несогласованных температурных коэффициентах. ■

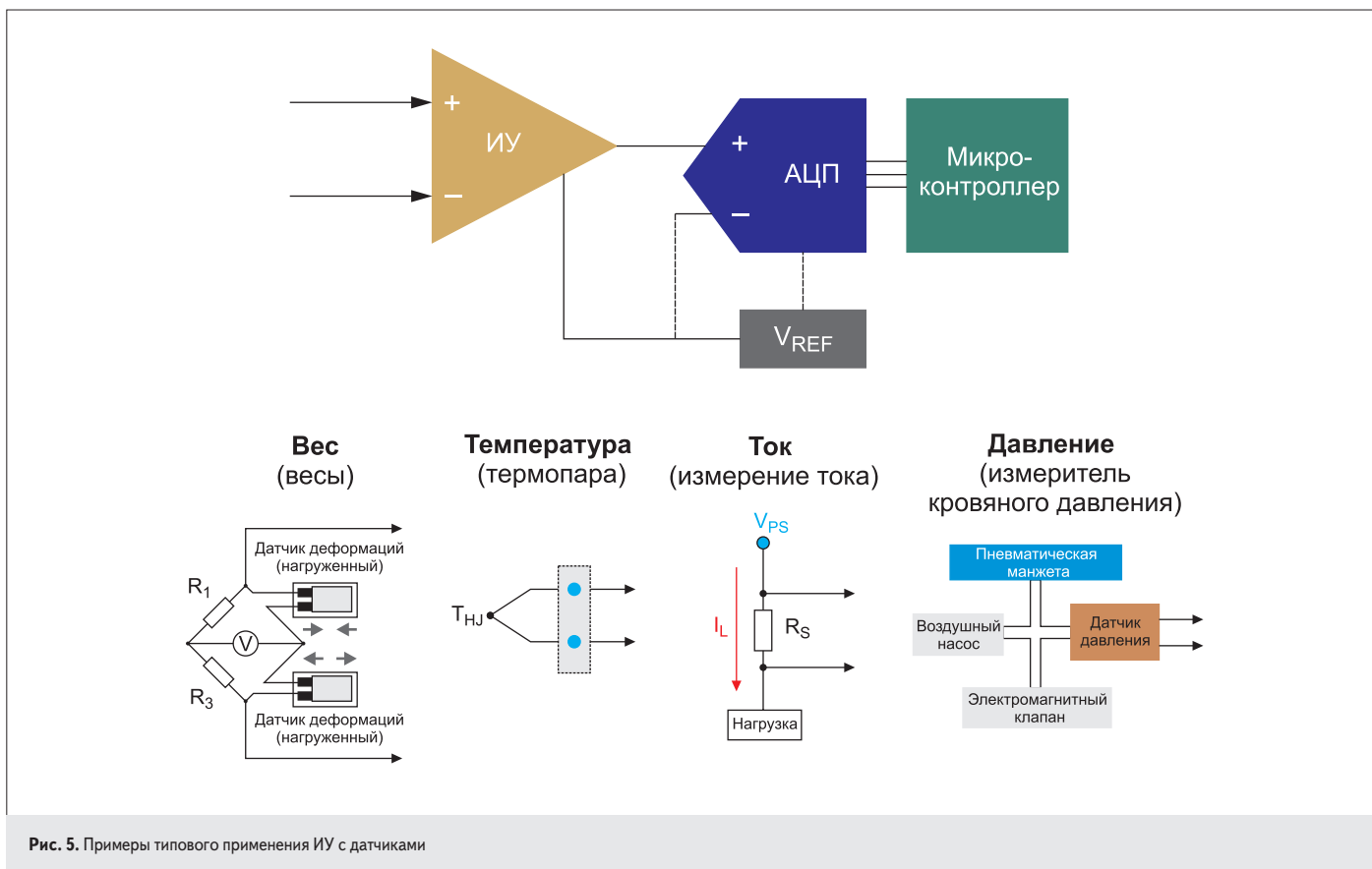


Рис. 5. Примеры типового применения ИУ с датчиками