

## Усилители с автоматической коррекцией нуля: без мистики – Часть 2

Они действительно подавляют смещение, дрейф и шум вида  $1/f$ . Здесь приведены некоторые схемотехнические решения.

Эрик Нолан, Реза Могими

В части 1 данной статьи изложены основные принципы работы усилителей с автокоррекцией нуля и были приведены их наиболее важные характеристики. В данном разделе обсуждаются некоторые схемотехнические идеи, которые особенно успешно воплощаются на усилителях с автоподстройкой нуля.

Применение усилителей с автоподстройкой нуля мало отличается от применения любых других операционных усилителей. Большинство новых ОУ с автоподстройкой нуля обладают совместимостью по выводам и по параметрам с распространенными усилителями. Коэффициент усиления на постоянном токе усилителей с автоподстройкой нуля устанавливается с помощью резисторов так же, как в обычных ОУ. В большинстве конструкций при использовании усилителя с автоподстройкой нуля рекомендуется ограничить полосу сигнала для того, чтобы подавить шум ключевой схемы автоподстройки и интермодуляционные искажения (IMD). Для усилителей с автоподстройкой нуля с фиксированной частотой работы схемы коррекции рабочая полоса частот обычно ограничивается диапазоном от постоянного тока до 1–2 кГц.

### ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛА ТОКОВОГО ШУНТА

Характеристики прецизионного токового шунта значительно улучшаются при использовании уникальных достоинств усилителя с автоподстройкой нуля, включенного по схеме измерительного усилителя (рис. 1). Токковые шунты используются в схемах прецизионных источников тока в качестве элемента цепи обратной связи. Они также применяются во многих других устройствах, включая схемы измерения тока при батарейном питании, схемы контроля пускового тока двигателей и прецизионные схемы измерения электроэнергии.

В данной схеме желательно использовать шунт с очень малым сопротивлением для минимизации падающего на нем напряжения; при этом потери мощности будут минимальны и при измерении больших токов напряжение за счет шунта упадет незначительно.

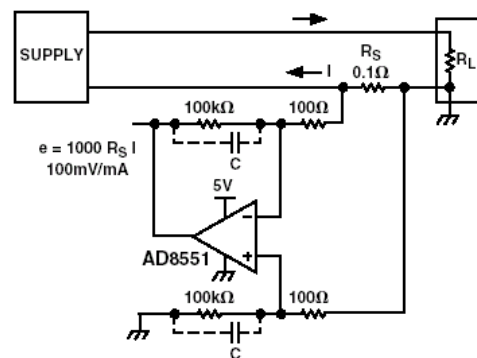


Рис. 1. Усилитель токового шунта

Типичный шунт может иметь сопротивление 0.1 Ом. При измерении тока величиной 1 А и более выходной сигнал шунта составит сотни милливольт или даже вольты, и при этом погрешность усилителя по постоянному току не критична. Другое дело – при малых измеряемых токах, порядка 1 мА: для достаточно точного измерения напряжения величиной 100 мкВ с выхода шунта необходим ОУ с очень малым напряжением смещения и с очень малым дрейфом этого напряжения. Также необходимо иметь минимальный ток утечки выхода, чтобы он не вносил заметную погрешность в измеряемый сигнал. Высокие значения коэффициента усиления с открытой петлей обратной связи, коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) и коэффициента ослабления влияния изменений напряжения питания (PSR) способствуют получению высокой точности всей системы. Если ток изменяется не слишком быстро, то с помощью усилителя с автоподстройкой нуля с фиксированной частотой работы схемы автоподстройки можно добиться превосходных результатов.

Обычно желательно ограничить полосу частот обрабатываемого сигнала до минимально необходимой величины, так как это минимизирует влияние импульсных помех схемы автоподстройки, и кроме того, минимизирует общий уровень шума. Помните, что суммарный шум напряжения усилителя с автоподстройкой нуля пропорционален квадратному корню из ширины полосы ( $E_N = e_N \times \sqrt{BW}$ ). Простой низкочастотный фильтр может быть создан за счет добавления дополнительных конденсаторов (С) параллельно резисторам обратной связи. Дополнительное усиление и фильтрацию усиливаемого сигнала можно обеспечить с помощью дополнительного каскада с обычным операционным усилителем. Усилитель с автоподстройкой нуля с присущим ему большим коэффициентом усиления с открытой петлей обратной связи может обеспечить 100 или 1000-кратное усиление, что позволяет в качестве следующего каскада использовать дешевый КМОП усилитель с напряжением смещения в несколько милливольт и большим уровнем шума напряжения без риска ухудшить точность системы. Кроме того, применение каскада с большим коэффициентом усиления на ОУ с автоподстройкой нуля может обеспечить дополнительный полюс и более быстрый спад АЧХ фильтра, если произведение

коэффициента усиления на полосу пропускания ОУ (GBW), деленное на установленный коэффициент усиления, даст величину, меньшую чем половина частоты работы схемы компенсации нуля. Однако характеристики получившегося фильтра будут зависеть от GBW, а величина GBW различается у разных экземпляров усилителя.

Если частота сигнала превышает приблизительно половину частоты работы схемы компенсации нуля, то лучше использовать усилитель с псевдослучайным генератором тактовых импульсов, такой как AD8571. В этом случае широкополосный шум будет несколько большим и иметь более широкую полосу, но зато тактовый генератор схемы автоподстройки не будет вызывать появление максимумов на частоте тактового генератора, и кроме того, интермодуляционные эффекты (IMD) будут минимизированы.

### ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛА МОСТОВОГО ТЕНЗОДАТЧИКА

Еще одна область применения, где низкое значение постоянного смещения и соответствующая производительность на низкой частоте помогают получить большой динамический диапазон, – это устройства с мостовыми датчиками. Эти датчики используются при измерении силы и давления, а также в электронных весах; они обычно дают на выходе относительно небольшое напряжение, даже при максимальной нагрузке. В данном примере три из четырех усилителей, имеющих в ИС AD8554, используются для возбуждения датчика и дифференциального усиления сигнала (рис. 2).

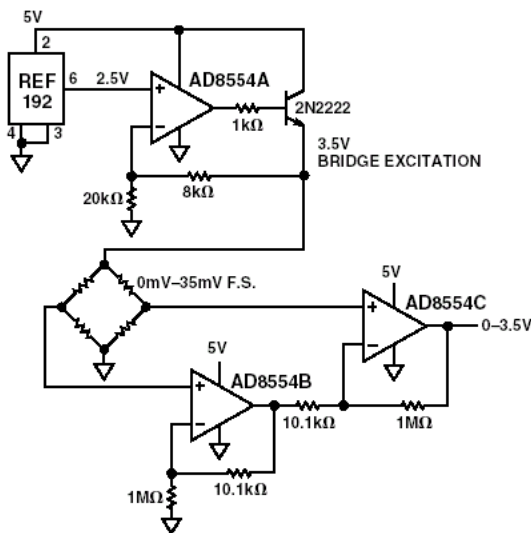


Рис. 2. Схема подключения тензодатчика

Максимальный сигнал тензодатчика составляет несколько десятков милливольт. В данном случае очень низкое напряжение смещения усилителя с автокоррекцией нуля способствует минимизации погрешности измеряемого сигнала. Благодаря отсутствию шума вида  $1/f$  возможно производить отсчеты входного сигнала с большими интервалами. Так как уровень временного дрейфа усилителя достаточно низкий, то рекалибровку устройства

можно делать реже или в некоторых случаях не делать вообще.

Устройства с датчиками давления, в которых обычно требуется линейризация для получения точной величины выходного сигнала, выигрывают от применения усилителя с малым напряжением смещения и малым дрейфом этого напряжения. Сигнал от датчика с хорошими характеристиками может быть масштабирован и линейризован без учета влияния усилителя, так как дополнительные погрешности, вносимые усилителем, незначительны. Малый входной ток усилителя позволяет использовать датчики с высоким сопротивлением; это может значительно уменьшить потребляемый системой ток в портативных устройствах или в устройствах, питающихся от сигнальной цепи, так как ток возбуждения датчиков может быть гораздо меньшим при том же выходном напряжении. Меньший ток возбуждения также минимизирует погрешности, связанные с саморазогревом датчика. Большинство устройств с тензодатчиками низкочастотны по своей сути, поэтому ограниченная рабочая полоса частот усилителей с автоподстройкой нуля и с фиксированной частотой работы схемы автоподстройки не является проблемой. При использовании мостового датчика с более высокой частотой выходного сигнала или датчика с возбуждением переменным током рекомендуется применять усилитель с автоподстройкой нуля с псевдослучайным генератором тактовых импульсов (семейства AD857х).

### ИНФРАКРАСНЫЕ (IR) ДАТЧИКИ

Инфракрасные датчики все шире используются при измерении температуры в таких разных областях, как контроль климата в автомобиле, ушные термометры, измерение термоизоляции жилищ и диагностика двигателя при ремонте автомобиля. Довольно небольшой выходной сигнал датчика требует большого усиления при минимальном напряжении смещения и минимальном дрейфе во избежание ошибки по постоянному току. Если используется связь по переменному току между каскадами усиления (рис. 3), малое смещение и дрейф позволяют избежать перехода входного каскада усиления в насыщение в результате дрейфа.

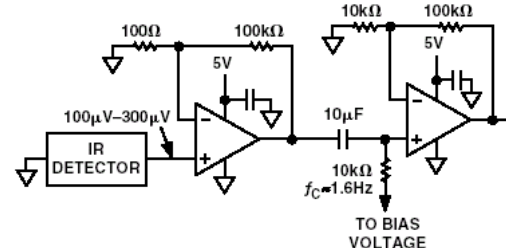


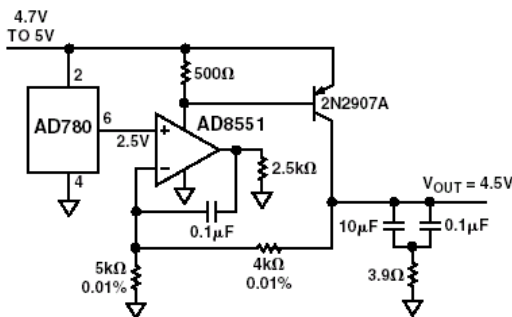
Рис. 3. Усилитель для датчика инфракрасного излучения

Низкий входной ток обеспечивает минимальную погрешность при высоком выходном импедансе сенсора. Как и в случае датчиков давления, очень низкий уровень временного и температурного

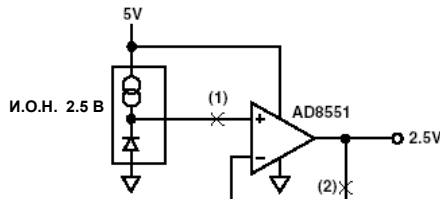
дрейфа усилителя позволяет избежать появления дополнительной погрешности после того, как была произведена однократная калибровка. Низкий уровень шума вида  $1/f$  улучшает соотношение сигнал/шум (SNR) при измерениях сигнала постоянного тока с периодом отсчетов, превышающим  $1/5$  секунды. На рис. 3 показана схема усилителя, усиливающая сигнал в 100-300 мкВ до уровня 1-3 В.

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Интегральные микросхемы прецизионных источников опорного напряжения в низковольтных системах иногда не обеспечивают необходимых для конкретного случая возможностей.

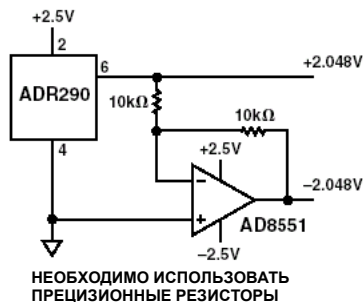


а. Источник опорного напряжения +4.5 В с напряжением питания +4.7 В



(1) В ЭТОЙ ТОЧКЕ НЕОБХОДИМ РЕЗИСТИВНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ, ЕСЛИ НУЖНО ПОЛУЧИТЬ НА ВЫХОДЕ НАПЯЖЕНИЕ <2.5 В  
(2) В ЭТОЙ ТОЧКЕ НЕОБХОДИМ РЕЗИСТИВНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ, ЕСЛИ НУЖНО ПОЛУЧИТЬ НА ВЫХОДЕ НАПЯЖЕНИЕ >2.5 В

б. Простой способ буферизации источника опорного напряжения.



в. Двухполярный источник опорного напряжения  $\pm 2.048$  В, работающий при напряжении питания  $\pm 2.5$  В

Рис. 4. Расширение возможностей источников опорного напряжения при помощи прецизионных усилителей.

Например (а) может требоваться малое падение напряжения или (б) требуется обеспечить значительный ток, или (в) в устройстве помимо положительного опорного напряжения требуется источник отрицательного опорного напряжения.

Подключенный к прецизионному источнику усилитель с автоподстройкой нуля со свойственными ему чрезвычайно малыми значениями напряжения смещения и дрейфа и высокой нагрузочной способностью, при использовании активной обратной связи, может обеспечить эффективное решение этих проблем.

Выше приведены только некоторые идеи с целью показать широкие возможности для применения усилителей с автокоррекцией нуля. Почти во всех схемах, работающих при малой величине входного сигнала и имеющих большой динамический диапазон при умеренной ширине полосы частот, характеристики могут быть улучшены при использовании усилителей с автоподстройкой нуля. Системы, которые прошли однократную калибровку и теперь должны обеспечивать заданную точность в течение продолжительного времени без дополнительного обслуживания, тоже выигрывают при использовании усилителей с автокоррекцией нуля. Во многих устройствах, где требуется точное совпадение характеристик каналов по постоянному току, тоже возможно применение усилителей с автокоррекцией нуля. Ошибка по постоянному току такого обладающего большим коэффициентом усиления усилителя настолько мала, что применение во многоканальном устройстве многоканальной ИС или же применение отдельной одноканальной ИС для каждого канала незначительно скажется на разбросе параметров каналов. Для точных низкочастотных входных каскадов переменного тока лучше использовать многоканальные микросхемы (с двумя или четырьмя усилителями в корпусе).