

Вячеслав Гавриков (г. Смоленск)

С ТЕХНОЛОГИЕЙ AUTO ZERO: НОВЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ



Наряду с аналогово-цифровым преобразователем, усилитель является важным звеном измерительной цепочки. **Maxim Integrated** предлагает новые **прецизионные усилители**, построенные с использованием технологии «Auto Zero», усилители с автоматической калибровкой при включении, прецизионные усилители с расширенным диапазоном питающих напряжений.

Измерение физических величин является широко распространенной задачей. Роль первичных преобразователей физических величин выполняют датчики. Например, резистивные датчики температуры преобразуют температуру в удобную для электрических измерений величину — сопротивление.

Существует огромное количество датчиков — давления, температуры, освещенности — каждый из которых имеет свои особенности и области применения. Помимо непосредственно измерительной техники датчики используются в медицинской аппаратуре, промышленности (управление механизмами и двигателями), телекоммуникациях (ВОЛС), автомобилестроении.

Аналоговая техника замещается цифровой. Однако в любой цифровой измерительной технике есть аналоговая часть. Анализ погрешностей измерительного тракта является отправной точкой создания измерительных устройств.

Анализ погрешностей в сигнальной цепочке измерительного тракта

Измерительный тракт современной системы обработки сигналов включает в себя ряд звеньев (рисунок 1). Исходный сигнал, снимаемый с датчика (или датчиков), поступает на усилитель через мультиплексор или напрямую. Главная задача усилителя — нормирование/усиление сигнала до оптимального для АЦП уровня. АЦП оцифровывает сигнал в соответствии с уровнем напряжения источника опорного напряжения (ИОН). Далее сигнал проходит цифровую обработку в вычислительном модуле (процессор, микроконтроллер).

К сожалению, ни одно из звеньев измерительной цепи не является идеальным и вносит погрешность в результат

измерения. При этом погрешность имеет постоянную и шумовую составляющие.

Источником постоянной составляющей погрешности являются параметры, которые не зависят от времени либо имеют слабую временную зависимость. Так например, термосопротивление имеет начальный разброс точности номинала; усилитель имеет разброс коэффициента усиления за счет разброса номиналов пассивных компонентов и др; ИОН имеет ограниченную точность начальной установки напряжения; АЦП имеет погрешность смещения нуля, может иметь погрешность линейности и т.д.

Кроме того, большинство погрешностей постоянной составляющей все же имеют временную зависимость (например, номиналы пассивных компонентов «уплывают» со временем) и температурную зависимость, что значительно усложняет задачу измерений. Ведь проведя калибровку прибора для одной температурной точки, можно легко выйти за рамки точности при другой температуре. То же можно сказать и про время, со временем приборы теряют точность, и требуют периодической поверки.

Помимо постоянной составляющей, каждое звено вносит собственный шум в полезный сигнал. Одним из основных узлов, определяющих точность измерения, является усилитель. С одной сто-

роны погрешности датчиков, усиленные и преобразованные, с другой — погрешности усилителя оказывают дополнительное влияние на полезный сигнал, поступающий на АЦП.

Критерии выбора ОУ для прецизионных измерений

В настоящее время усилители, как правило, строятся на базе интегральных ОУ. К сожалению, идеального ОУ не существует. Зато существует огромное количество операционных усилителей для различных приложений и с различными характеристиками. Поэтому выбор может стать трудоемким монотонным процессом изучения документации на компоненты от множества компаний-производителей. Для облегчения труда инженеров-разработчиков измерительной аппаратуры лидеры электронной промышленности особо выделяют в своей номенклатуре прецизионные ОУ.

Основным критерием, которому должен удовлетворять прецизионный ОУ, является обеспечение требуемой точности измерений. Чтобы выбрать ОУ, в первую очередь необходимо оценить параметры, непосредственно влияющие на погрешность выходного сигнала.

Входное напряжение смещения (Input Offset Voltage). Является наиболее важным параметром для прецизионных ОУ. Как правило, прецизионные схемы используются для измерения очень малых величин. Например, для мостовых датчиков давления величина выходного напряжения составляет — десятки мВ. Очевидно, что напряжение смещения на уровне

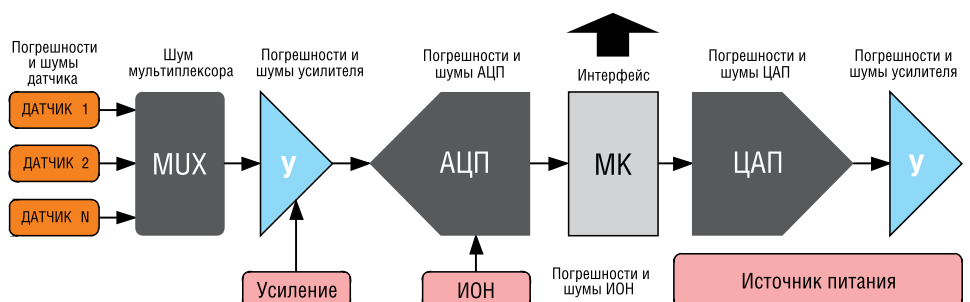


Рис. 1. Погрешности схемы измерительного тракта

десятков мкВ даст очень большую погрешность измерения.

Рассмотрим пример. Система измеряет показания мостового датчика давления с выходным напряжением 20 мВ. Сигнал датчика усиливает ОУ с входным напряжением смещения $U_{см} = 50$ мкВ.

Коэффициент усиления при нормировании для АЦП с опорным напряжением 3 В: $3 \text{ В} / 0,02 \text{ В} = 150$.

Ошибка от напряжения смещения на выходе усилителя: $50 \text{ мкВ} \times 150 = 7,5 \text{ мВ}$. Что соответствует точности всего лишь 8-бит АЦП ($1\text{LSB} = 3\text{В} / 2^8 = 11 \text{ мВ}$).

Очевидно, что такая погрешность недопустима. Поэтому уменьшение влияния напряжения смещения является одной из главных задач.

Стоит отметить, что величина напряжения смещения имеет температурную и временную стабильность.

Температурный дрейф напряжения смещения – ТКС (TC Vos). Измеряется, как правило, в $\text{нВ}/^\circ\text{C}$. При компенсации напряжения смещения в одной температурной точке, например подстроечным резистором, мы не получим точного результата при другой температуре. Кроме того, данная зависимость имеет нелинейный характер, что вносит дополнительную сложность. Стоит особое внимание уделить данному параметру в случае, если диапазон рабочих температур достаточно широкий (например, промышленная или военная электроника).

Не сложно посчитать, что для температурного диапазона $0 \dots 25^\circ\text{C}$ наличие

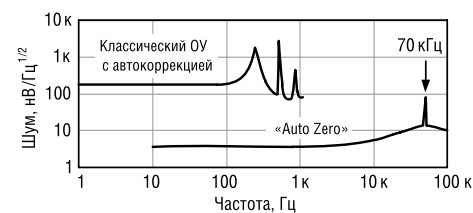


Рис. 2. Типовая зависимость «шум/частота» ОУ с «AutoZero»

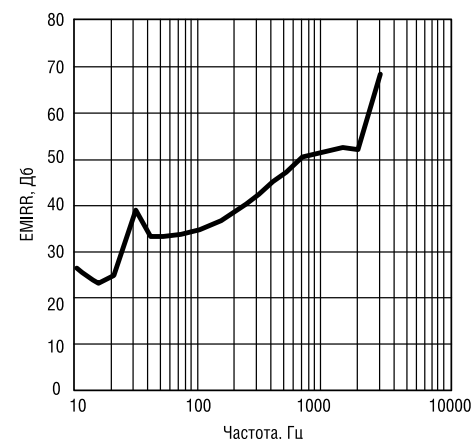


Рис. 3. График подавления электромагнитных помех

дрейфа в $1 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ может привести к погрешности в 25 мкВ, что для предыдущего примера сравнимо с величиной начального напряжения смещения ($U_{см} = 50$ мкВ).

В дополнение к температурному дрейфу напряжения смещения имеет место его изменение в течение времени. Это явление называется **долговременная стабильность** и измеряется в $\text{мкВ}/1000$ часов.

Входной шум ОУ (Input Voltage Noise) определяется для двух частотных диапазонов. Низкочастотный шум ($1/f$ фликкер-шум) ($0,1 \dots 10$ Гц) измеряется в $\text{нВ}_{\text{п-п}}$. Широкополосный шум (нормируется, как правило, для 1 кГц), измеряется в $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Разделение на частотные диапазоны позволяет разработчику различать широкополосный шум, который может быть отфильтрован при помощи фильтров, и низкочастотный, который отфильтровать практически невозможно.

Коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи (Open-Loop Gain) имеет конечное значение, что приводит к возникновению ошибки усиления в схемах с обратной связью. Коэффициент усиления должен иметь как можно большее значение, в этом случае ошибка усиления будет минимальной.

Входной ток ОУ (Input Bias Current). Данный параметр имеет важное значение для схем измерения сигналов высокоимпедансных датчиков. Например, сверхчувствительные фотодиоды при сумеречном освещении могут генерировать токи всего лишь в несколько нА, очевидно, что входной ток ОУ не может превышать данной величины. Величина входного тока сильно зависит от технологии реализации входного каскада ОУ. Для ОУ со входным каскадом на полевых транзисторах величины входных токов могут быть порядка нескольких фА, при этом, однако, имеется сильнейшая температурная зависимость.

Температурный дрейф входного тока. Тип зависимости определяется структурой входного каскада. Каскад, выполненный по биполярной технологии, менее подвержен влиянию температуры. Каскад, выполненный по КМОП технологии, имеет малое значение входного тока, но может удваиваться каждые 10°C .

Ток смещения ОУ (Input Offset Current). Величины входных токов инвертирующего и неинвертирующего входов не равны. По большому счету, именно это отличие в величине втекающих токов и создает погрешность, а не непосредственно втекающий ток. Равенство входного импеданса на входах ОУ приводит к уменьшению влияния входного тока ОУ. Это происходит вслед-

ствие того, что выходное напряжение, формируемое током, втекающим в неинвертирующий вход ОУ, компенсируется выходным напряжением, формируемым током инвертирующего входа.

При реализации конкретного устройства помимо критерия точности к ОУ могут применяться и другие требования. Широкое распространение портативных измерительных приборов выдвигает требования компактности, пониженного напряжения питания и низкой потребляемой мощности. Для промышленных и военных приложений критичным может оказаться фактор защищенности ОУ от электромагнитных и статических помех и возможность работы при повышенных питающих напряжениях.

Как было указано выше, наиболее сильное влияние на точность измерений оказывает напряжение смещения. Элементарные схемы компенсации (такие, как подстроечные резисторы) дают компенсацию только в одной температурной точке из-за температурного дрейфа. Температурный дрейф, к тому же, имеет нелинейный характер, что затрудняет его учет при измерениях. Кроме того, имеет место влияние низкочастотного $1/f$ шума, от которого практически невозможно избавиться.

Одной из прорывных технологий, позволивших значительно увеличить точность ОУ, стала технология автокоррекции нуля (периодической компенсации дрейфа нуля). ОУ с такой технологией называются ОУ, стабилизированными прерыванием.

Однако данная технология обладает рядом недостатков. Во-первых, переключения сопровождалось значительными выбросами напряжений высоким уровнем собственных шумов в области частоты коммутации, что значительно ухудшало шумовые характеристики. Это приводило к необходимости использования внешних фильтров. Кроме того, диапазон рабочих частот оказывался ограниченным величиной собственных коммутаций. Диапазон питающих напряжений также был достаточно мал.

Новое семейство прецизионных ОУ, стабилизированных прерыванием по технологии «AutoZero»

По сравнению с классической схемой ОУ, стабилизированных прерыванием, ОУ с «AutoZero» имеют значительно меньший уровень шумов от переключений. На зависимости «шум/частота» на частоте переключения схемы (около 70 кГц) имеется всего один пик (рисунок 2). Однако так как это более высокочастотный шум по сравнению с классической реализацией схемы с автоподстройкой, то избавиться от него значительно проще.

Компания Maxim Integrated выпустила новую линейку ОУ стабили-

Таблица 1. Прецизионные ОУ с автокоррекцией нуля

Наименование	Число ОУ в корпусе	Питание, В	Ток потребления (типовой), мкА	Напряжение смещения (макс), мкВ	CMRR, дБ	PSRR, дБ	Входной ток (макс), нА	Плотность шума входного напряжения, нВ/√Гц	Плотность шума входного тока, нВ/√Гц
MAX44250	1	2,7...20	1220	9	140	145	1,4	5,9	0,6
MAX44251	2		1150	6			1,3		
MAX44252	4		1150	6			1,3		
MAX44244	1	2,7...36	90	7,5	130	148	0,3	50	0,1
MAX44245	4			7,5					
MAX44248	2			7,5					
MAX44246	2			420					

Таблица 2. Новые прецизионные ОУ от Maxim Integrated

Наименование	Число ОУ в корпусе	Питание, В	Ток потребления (типовой), мкА	Напряжение смещения (макс), мкВ	CMRR, дБ	PSRR, дБ	Входной ток (макс), нА	Плотность шума входного напряжения, нВ/√Гц	Плотность шума входного тока, нВ/√Гц
MAX44260	1	1,7...5,5	750	50	90	95	0,0005	12,7	0,0012
MAX44261	1		750						
MAX44263	2		650						

рованных прерыванием с технологией «AutoZero» (таблица 1).

Новые семейства ОУ, стабилизированных прерыванием с технологией «AutoZero», сочетают превосходные метрологические характеристики и широкий диапазон рабочих частот. Стоит отметить, что кроме этого, в них реализованы дополнительные уникальные технологии Maxim Integrated.

Maxim Integrated уделила особое внимание дополнительной защите от помех. Структура усилителей содержит интегрированный фильтр электромагнитных помех (EMI-фильтр). В итоге помимо того, что благодаря «AutoZero» устранен низкочастотный шум, значительно уменьшается и высокочастотный шум (рисунок 3).

Уделено особое внимание питанию микросхем. Все ОУ имеют расширенный диапазон питающих напряжений. Минимальное напряжение питания составляет всего 2,7 В (или ±1,35 В), что важно для устройств с батарейным питанием. В то же время верхняя граница напряжения питания составляет 36 В (или ±18 В), что может быть удобным при реализации промышленной автоматики.

Широкий выбор корпусных исполнений позволяет выбрать подходящий по габаритам ОУ, в том числе для портативных приложений.

Семейство **MAX44250/51/52** — новые прецизионные ОУ, обладающие всеми отличительными чертами усилителей с технологией «AutoZero»: сверхнизкое

значение напряжения смещения (не более 6 мкВ при 23°C), температурный дрейф ограничивается практически не измеряемой величиной 19 нВ/°С. Шумовые характеристики также на высоте. Величина шума — 123 нВ_{п-п} (0,1 Гц < f < 10 Гц), а плотность шума составляет 5,9 нВ/√Гц.

Еще одной особенностью MAX44250/51/52 является расширенный диапазон питающих напряжений: однополярное от 2,7 до 20 В и биполярное от ±1,35 до ±10 В.

Данное семейство отлично подходит для нормирования и усиления сигналов тензометрических датчиков, датчиков давления в различной медицинской и измерительной аппаратуре.

Микросхемы имеют различное корпусное исполнение, в том числе миниатюрное SOT23-5.

MAX44246 представляет собой двоярный прецизионный усилитель, выполненный в восьмивыводных корпусах uMax или SOIC. Величина напряжения смещения для данного усилителя не превышает 5 мкВ, а температурный дрейф ограничен 20 нВ/°С. Низкочастотные шумы составляют 117 нВ_{п-п} (0,1 Гц < f < 10 Гц), а плотность шума на частоте 1 кГц — 9 нВ/√Гц.

Имея отличные характеристики, MAX44246 способен работать с напряжениями питания от 2,7 до 36 В. (в том числе при биполярном питании от ±1,35 до ±18 В).

Особенностью MAX44246 является малое потребление. Ток потребления со-

ставляет всего 0,55 мА на канал, что позволяет применять его не только в стационарных измерительных приборах, но и в портативных с батарейным питанием.

MAX44244/5/8 — семейство малопотребляющих прецизионных ОУ. Главной его особенностью является низкий ток потребления — всего 90 мкА.

Низкое потребление и миниатюрность корпусов (MAX44244 доступен в корпусе SOT23-5) делают данное семейство подходящим для портативной измерительной техники, прецизионного измерения веса, интерфейсов с токовой петлей.

Прецизионные ОУ от Maxim Integrated

Помимо ОУ с технологией «AutoZero» Maxim Integrated предлагает семейство усилителей **MAX44260/1/3**, главной особенностью которого является автоматическая калибровка при включении питания (таблица 2). При подаче питающего напряжения интегрированная в ОУ схема сброса по питанию (POR) удерживает входы и выходы в высокоимпедансном состоянии в течение 10 мс. За это время внутренняя схема коррекции калибрует ОУ. Такая техника позволяет получить напряжение смещения нуля около 50 мкВ.

MAX44260 имеет дополнительный вход SHDN, позволяющий перевести ОУ в режим пониженного потребления (менее 1 мкА). Выходы и входы

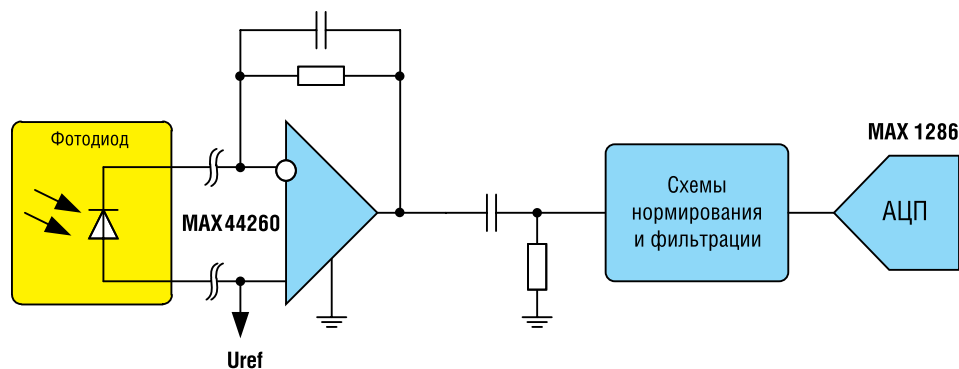


Рис. 4. Трансимпедансный усилитель на основе MAX44260

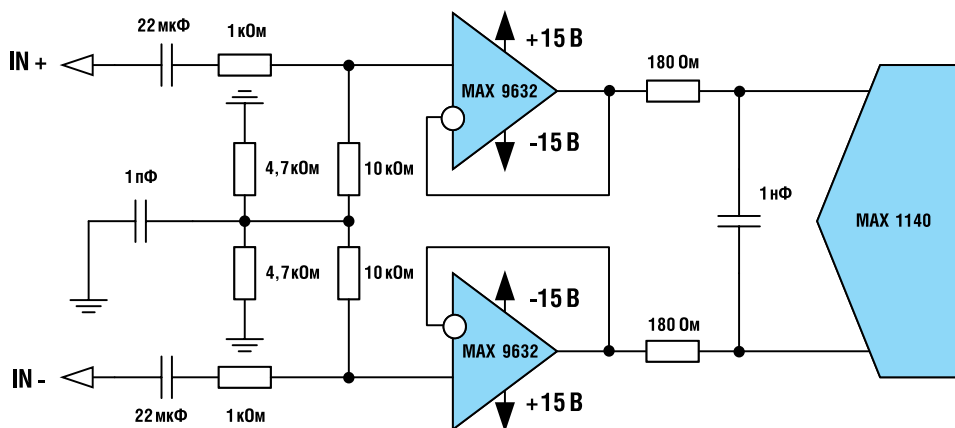


Рис. 5. Типовая схема включения MAX9632

ОУ при этом находятся в высокоимпедансном состоянии, благодаря этому возможно каскадирование ОУ, что избавляет от необходимости использовать мультиплексоры. При выходе из данного режима калибровка не производится, что позволяет достичь времени пробуждения не более 30 мкс.

В отличие от MAX44260 в ОУ MAX44261 возможно проведение калибровки без выключения питания. Для этого предназначен дополнительный управляющий вход CAL.

Микросхема MAX44263 имеет два ОУ в одном корпусе.

Общей особенностью всех трех микросхем является отсутствие переходных искажений при переходе через 0 (при переключении входных транзисторов). Это достигается наличием внутреннего преобразователя (*charge pump*). Выходное напряжение этого преобразователя превышает напряжение питания на 1 В и используется для питания входного каскада.

Помимо малого напряжения смещения, MAX44260/1/3 отличаются низким уровнем собственных шумов. Шум входного напряжения составляет 12,7 нВ/√Гц, шум входного тока 1,2 фА/√Гц. При этом частота единичного усиления составляет 15 МГц. Низкие шумы и большая частота единичного усиления позволяют применять данное

семейство в составе трансимпедансных усилителей (рисунок 4).

Стоит отметить, что семейство MAX44260/1/3 идеально подходит для портативных устройств с батарейным питанием (ноутбуки, плееры), так как имеет низкое потребление и малое напряжение питания. Типовой питающий ток каждого усилителя составляет 700 мкА. При этом MAX44260 в спящем режиме потребляет всего 1 мкА. Уровень напряжения питания составляет 1,8 В (при температуре от -40 до 125°C), а при температуре от 0 до 70°C всего 1,7 В.

Прецизионный, высокоскоростной, малощумящий ОУ для широкого круга задач

Кроме ОУ, стабилизированных прерыванием, и ОУ с возможностью калибровки Maxim Integrated выпускает MAX9632 – прецизионный малощумящий ОУ с широким диапазоном питающих напряжений, сочетающий в себе уникальные метрологические характеристики, отличное быстродействие, защиту от электростатики и лучшие в своем классе значения CMRR, THD, PSSR.

MAX9632 имеет напряжение смещения нуля не более 125 мкВ (при 25°C) и температурный дрейф не более 0,5 мкВ/°C. Шум входного напря-

жения составляет всего 0,94 нВ/√Гц. При этом ширина пропускания составляет 55 МГц.

Второй особенностью усилителя является улучшенная защита от электростатических разрядов. Микросхема выдерживает 8 кВ (Human Body Model – HBM) и 1 кВ (Charge Device Model – CDM).

Данный ОУ обладает широким диапазоном питающих напряжений 4,5...36 В (в том числе ±18 В).

MAX9632, обладая уникальными метрологическими характеристиками и высоким быстродействием, идеально подходит для совместной работы с высокоскоростными дельта-сигма АЦП. Такие АЦП требуют ОУ с низким значением собственных шумов для достижения соотношения сигнал-шум (SNR) большего, чем 100 дБ. В приведенной схеме (рисунок 5) АЦП MAX1140 достигает соотношения SNR 117 дБ при частоте 1000 измерений в секунду.

Основными областями применения данного ОУ являются прецизионная измерительная техника, высокоскоростные системы управления и контроля, системы релейной защиты, медицинская техника и т.д.

Заключение

Компания Maxim Integrated предлагает свои решения для построения прецизионных измерительных схем. Семейства прецизионных ОУ с «Auto Zero» обладают напряжением смещения, не превышающим 10 мкВ. Кроме того, они имеют интегрированный ЕМI-фильтр и отличаются расширенным диапазоном питающих напряжений. Помимо семейств с автокоррекцией, представлено семейство MAX44260/1/3 с калибровкой при включении. После калибровки напряжение смещения не превышает 50 мкВ. Прецизионный ОУ MAX9632 сочетает в себе быстродействие, защиту от статики и широкий диапазон питающих напряжений.

Литература

1. Maurizio Gavardoni, Application Note 4179 Autozero Noise Filtering Improves Instrumentation Amplifier Output. Maxim Integrated, 2009.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
3. Документация на представленные ОУ. Официальный сайт www.maximintegrated.com.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: analog.vesti@compel.ru