

# УСИЛИТЕЛИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НУЛЯ ОТ RENESAS ELECTRONICS

ПО МАТЕРИАЛАМ КОМПАНИИ RENESAS

В статье подробно рассматривается усилитель ISL28134 с автоматической установкой нуля. Приводятся расчетные соотношения и схемы применения. Подобные усилители являются отличным выбором для трактов усиления, в которых требуется высокое усиление сигналов датчиков.

## УСИЛИТЕЛЬ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ОБНУЛЕНИЕМ

Многие усилители сигналов датчиков предназначены для нормирования очень низких входных сигналов. Усиление сигнала до высокого уровня требует, чтобы путь прохождения сигнала имел крайне малое напряжение смещения и его низкий дрейф по времени и температуре, а также высокую точность усиления. Для соблюдения этих требований при использовании стандартных линейных компонентов требуется автоматическая калибровка на системном уровне и многоступенчатые усилители. Однако это усложняет проектирование аппаратного и программного обеспечения, увеличивает стоимость проектирования и срок вывода новых изделий на рынок.

Альтернативой такому подходу является использование компонентов с низким смещением и дрейфом, а также с высоким коэффициентом усиления (КУ) разомкнутой цепи ( $A_{OL}$ ) для обеспечения высокой точности КУ. Усилителем с несомненно наиболее высоким  $A_{OL}$  и наименьшим смещением является усилитель с автоматическим обнулением, например ISL28134 от Renesas (см. рис. 1). Этот усилитель обеспечивает высокую точность по постоянному току благодаря непрерывно работающему механизму калибровки, реализованному внутрисхемно. При типовых значениях входного смещения 0,2 мкВ и дрейфа смещения по температуре 0,5 нВ/°С усилитель ISL28134 удовлетворяет даже самым высоким требованиям к точности по постоянному току.

В этой статье поясняется методика калибровки с автоматическим обнулением, и сравнивается спектр шумов ISL28134 со спектром шумов стандартного КМОП операционного усилителя. Завершается статья четырьмя примерами применения, демонстрирующими использование ISL28134 в качестве усилителя для термопары, а также в качестве калиброванного усилителя при использовании для постоянного

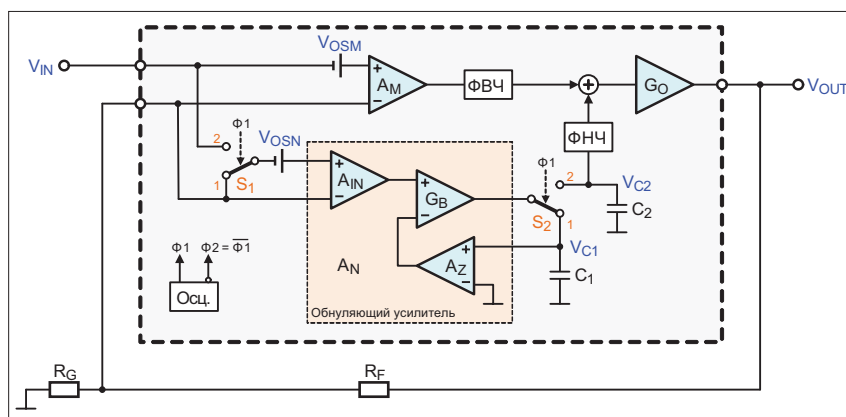


Рис. 1. ISL28134: фаза автоматического обнуления

тока и широкополосного усилителя переменного тока.

На рисунке 1 показана принципиальная схема усилителя с автоматическим обнулением. В ней основной широкополосный усилитель ( $A_M$ ) корректируется по смещению параллельным обнуляющим усилителем ( $A_N$ ). Коррекция смещения всего усилителя происходит в одном цикле тактовой частоты автоматического обнуления ( $f_{AZ}$ ), который разделен на два режима работы: фазы автоматического обнуления и усиления.

Генератор (OSC), генерирующий частоту  $f_{AZ}$ , запускает фазу автоматического обнуления путем переключения обоих переключателей

в положение 1. Входы обнуляющего усилителя, состоящего из ряда каскадов, закорачивают между собой, а выход подключается к конденсатору  $C_1$ . В такой конфигурации  $A_N$  измеряет собственное входное напряжение смещения и сохраняет его на  $C_1$ . Математически напряжение на  $C_1$  можно выразить как  $V_{C1} = G_B (A_{IN} V_{OSN} - A_Z V_{C1})$  и путем простой перестановки представить его как уравнение (1):

$$V_{C1} = V_{OSN} \frac{G_B A_{IN}}{1 + G_B A_Z} \quad (1)$$

В фазе усиления OSC переводит оба переключателя в положение 2

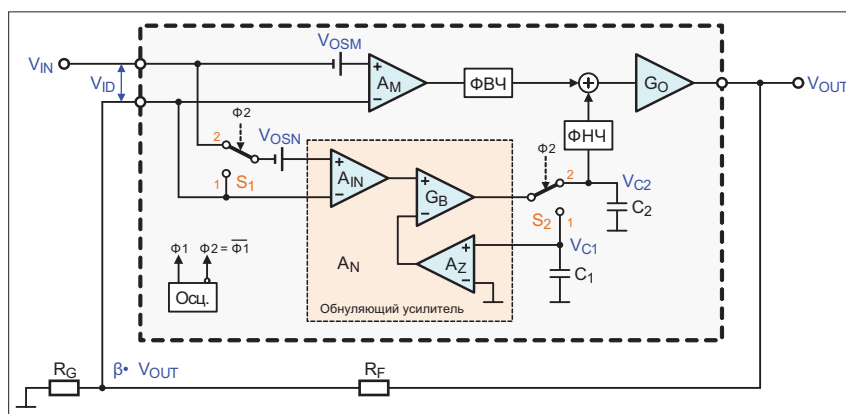


Рис. 2. ISL28134: фаза усиления

(см. рис. 2). В этой конфигурации  $A_N$  усиливает  $V_{C1}$  на множитель  $A_Z$ , вычитает его из усиленного дифференциального входного сигнала ( $A_{IN}(V_{OSN} + V_{ID})$ ) и заряжает конденсатор  $C_2$  на усиленную разницу до  $V_{C2} = G_B [A_{IN}(V_{OSN} + V_{ID}) - A_Z V_{C1}]$ . Заменяя  $V_{C1}$  уравнением (1) и решая его для  $V_{C2}$ , получаем уравнение (2):

$$V_{C2} = G_B A_{IN} V_{ID} + V_{OSN} \frac{G_B A_{IN}}{1 + G_B A_Z}. \quad (2)$$

В то же время, основной усилитель усиливает напряжение на своем дифференциальном входе, чтобы на выходе получилось напряжение  $A_M(V_{ID} + V_{OSN})$ . Сумма обоих напряжений затем усиливается каскадом выходного усиления ( $G_O$ ) для формирования конечного выходного напряжения:

Заменяя  $V_{C2}$  уравнением (2), получаем уравнение (3):

$$V_{OUT} = G_O (G_B A_{IN} + A_M) V_{ID} + G_O A_M V_{OSM} + \frac{G_O G_B A_{IN}}{1 + G_B A_Z} V_{OSN}. \quad (3)$$

Оптимизируя архитектуру автоматического обнуления так, чтобы  $A_M = A_{IN}$  и на всех этапах усиление было намного больше 1, упрощаем уравнение (3):

$$V_{OUT} = G_O A_{IN} G_B V_{ID} + G_O A_M V_{OSM} + \frac{G_O A_{IN}}{A_Z} V_{OSN}.$$

Далее, вынося за скобки коэффициент усиления  $G_O A_{IN} G_B$  напряжения  $V_{ID}$  в полученном уравнении, представим  $V_{OUT}$  в виде уравнения типового усилителя (4):

$$V_{OUT} = G_O A_{IN} G_B \left( V_{ID} + \frac{V_{OSM} + V_{OSN}/A_Z}{G_B} \right). \quad (4)$$

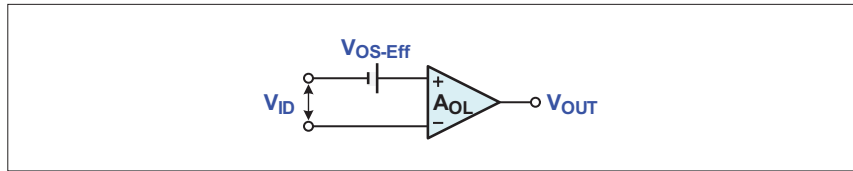


Рис. 3. Типовой усилитель с эффективным смещением

Уравнение (5) для типового усилителя на рисунке 3:

$$V_{OUT} = A_{OL} (V_{ID} + V_{OS-EFF}), \quad (5)$$

где  $A_{OL}$  – коэффициент усиления разомкнутой цепи усилителя, а  $V_{OS-EFF}$  – его эффективное напряжение смещения.

Сравнение уравнений (4) и (5) показывает, что эффективное усиление разомкнутой цепи усилителя с автоматическим обнулением представляет собой  $A_{OL} = G_O A_{IN} G_B$ , а его эффективное смещение определяется следующим образом:

$$V_{OS-EFF} = \frac{V_{OSM} + V_{OSN}/A_Z}{G_B}.$$

Таким образом, напряжение смещения главного усилителя уменьшается в  $G_B$  раз, а смещение обнуляющего усилителя – в  $G_B A_Z$  раз. Если мы принимаем коэффициенты усиления разомкнутой цепи различных каскадов усиления в районе 10000 или выше, становится очевидным, что даже собственное напряжение смещения в несколько милливольт для всего усилителя с автоматическим обнулением понижается до эффективного входного напряжения смещения, равного микровольтам.

#### ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Конструкции усилителей на рисунках 1–2 представляют собой фильтр низких частот (ФНЧ), прозрачный для процесса автоматического обнуления, но с необходимостью фильтра-

ции высокочастотных составляющих, создаваемых процессом переключения при автоматическом обнулении. Поскольку усилитель с автоматическим обнулением представляет собой систему с дискретизацией отсчетов, процесс дискретизации генерирует частоты, состоящие из суммы и разницы частот входного сигнала ( $f_{IN}$ ) и тактовой частоты автоматического обнуления ( $f_{AZ}$ ).

На рисунке 4 представлен процесс подавления шумов с демонстрацией эффектов дискретизации в полосе частот. Дискретизация входного сигнала представляет собой модуляцию; при этом  $f_{AZ}$  выступает в качестве несущей частоты, а  $V_{IN}$  (или  $f_{IN}$ ) – в качестве модулирующего сигнала. Оба переключателя  $S_1$  и  $S_2$  заменены модуляторами  $M_1$  и  $M_2$ .  $V_{M1}(f)$  на рисунке 4 показывает, что первая модуляция  $V_{IN}$  приводит к появлению боковых полос  $f_{IN}$  на обеих сторонах нечетных гармоник  $f_{AZ}$ .

Амплитуды боковых полос понижаются согласно функции  $1/n$ , где  $n$  – порядок гармоники. Шум  $1/f$  от  $A_N$ , присутствующий в основной полосе частот, добавляется к модулированному входящему сигналу после первой стадии модуляции (см.  $V_{AN}(f)$ ). Комбинированный сигнал усиливается  $A_N$  и подается в демодулятор  $M_2$ . Шум  $1/f$ , проходя первую демодуляцию через  $M_2$ , добавляет боковые полосы по обеим сторонам нечетных гармоник  $f_{AZ}$ . Однако для уже модулированного входного сигнала ( $V_{M1}$ )  $M_2$  представляет собой 2-ю стадию модуляции.

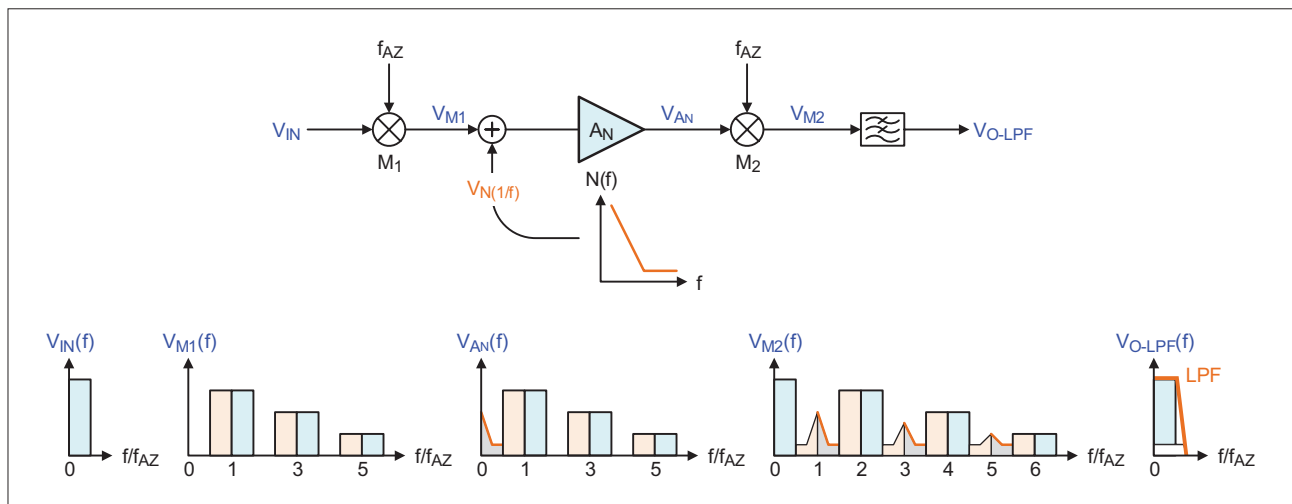


Рис. 4. Автоматическое обнуление в полосе частот

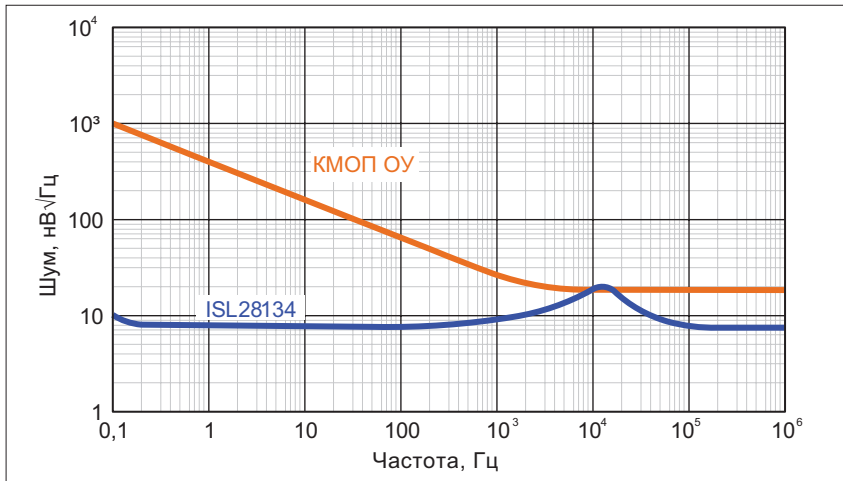


Рис. 5. Спектральная плотность шума

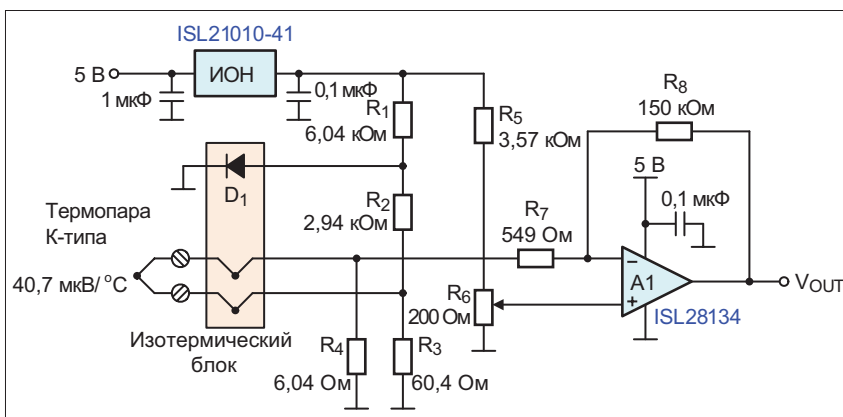


Рис. 6. Измерение температуры с помощью термопары

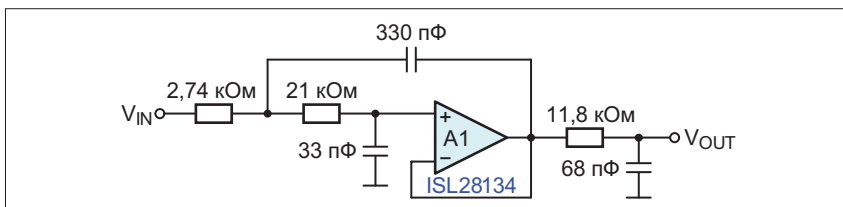


Рис. 7. Фильтр низких частот 3-го порядка 200 кГц

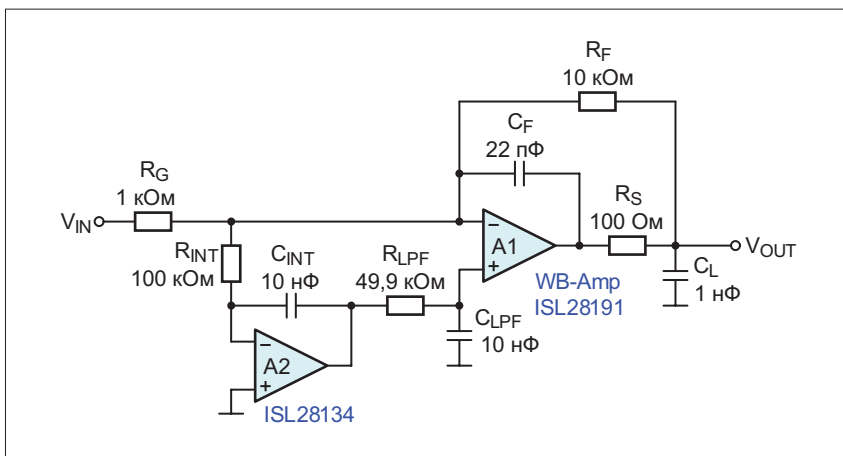


Рис. 8. Автоматически обнуляемый широкополосный усилитель

На этой стадии  $f_{in}$  преобразуется в еще более высокие частоты, создавая боковые полосы вокруг четных гармоник  $f_{AZ}$ , а также вокруг нулевой точки. Таким образом, входной сигнал вновь

возникает в основной полосе частот. Следовательно, 2-я модуляция представляет собой демодуляцию  $f_{in}$ . Применение фильтра нижних частот более высокого порядка, чей резкий спад

ограничивает основную полосу частот до частот значительно ниже  $f_{AZ}$ , также очень сильно уменьшает шум.

На рисунке 5 показан график спектральной плотности шума усилителя ISL28134 и прецизионного КМОП операционного усилителя. Шум является, по сути, белым по всему диапазону частот за исключением узкополосных шумов в районе 10 кГц.

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

#### Усилитель термопары

Цепь измерения температуры на рисунке 6 является примером низкочастотного приложения, которое позволяет включать ISL28134 прямо в цепь прохождения сигнала. Прецизионное опорное напряжение (ISL21010-41) обеспечивает питание моста напряжением 4,096 В. Прямое напряжение диода  $D_1$  имеет отрицательный температурный коэффициент  $-2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$  и обеспечивает компенсацию холодного спая при помощи резисторной цепи  $R_1-R_3$ .

Коррекция нуля для определенной минимальной температуры достигается при помощи  $R_6$ , в то время как  $R_7$  и  $R_8$  определяют усиление выходного усилителя. Этот усилитель с одним питающим напряжением обеспечивает усиление разомкнутой цепи 174 дБ и точность 16 бит или выше при высоком усилении в низковольтных приложениях. Автоматическое обнуление удаляет шумы  $1/f$ , обеспечивает типовые значения входного смещения  $0,2 \text{ мкВ}$  и дрейф напряжения смещения по температуре  $0,5 \text{ нВ}/^\circ\text{C}$ . Таким образом, усилители с автоматическим обнулением идеально подходят для прецизионных приложений с однополярным питанием, где обязательным требованием является высокая точность, низкое смещение и малый шум.

#### Активный фильтр низких частот

Фильтр низких частот 3-го порядка на рисунке 7 имеет частоту среза 200 кГц, что в два раза превышает тактовую частоту автоматического обнуления. Шумы от наложения спектров и интермодуляционные шумы сильно ослабляются, что позволяет входному сигналу работать во всей ширине полосы усиления. Кроме того, выход усилителя обеспечивает электропитание с полным размахом напряжения, благодаря чему достигается высокое отношение «сигнал/шум» при низких напряжениях питания.

#### Широкополосный усилитель

В широкополосных приложениях с шириной полосы в десятки МГц

ISL28134 обеспечивает широкополосному усилителю точность в области постоянного тока. На рисунке 8 показана требуемая конфигурация в виде составной схемы усилителя.

ISL28134 работает как интегрирующий элемент в цепи смещения широкополосного усилителя. Путь прохождения сигнала, как обычно, проходит от напряжения  $V_{IN}$  через  $R_G$  и  $R_F$  до  $V_{OUT}$ . Интегрирующий элемент имеет две функции. При низких частотах он обеспечивает высокое усиление контура подавления смещения, уменьшая входное смещение до входного смещения усилителя с автоматическим обнулением. При высоких частотах коэффициент усиления замкнутой цепи интегрирующего элемента быстро понижается благодаря большой постоянной времени ( $R_{INT}C_{INT}$ ), что предотвращает передачу сигнала на неинвертирующий вход широкополосного усилителя.

Поскольку входной шум усилителя усиливается неинвертирующим усилителем цепи обратной связи интегрирующего элемента, при высоких частотах ISL28134 работает в качестве повторителя напряжения ( $K_U = 1$ ), передавая его входной шум в широкополосный усилитель. Для устранения этого шума на выход ISL28134 устанавливаются ФНЧ ( $R_{LPF}$ ,  $C_{LPF}$ ) с низкой частотой среза.

В этом приложении A1 работает на большую емкостную нагрузку ( $C_L$ ), взаимодействующую с выходным импедансом A1 ( $R_O$ ). Для сохранения стабильности применяется резистор  $R_S$  для разделения  $C_L$  и A1. Выход ( $V_{OUT}$ ) результирующего ФНЧ имеет срез  $-3$  дБ при  $f_{-3дБ} = 1/[2\pi(R_O + R_S)C_L]$ . Однако фазовая коррекция из-за  $R_S$  работает только при низких частотах. Для высокочастотной стабильности реализуют 2-й контур обратной связи с использованием  $C_F$ , который компенсирует отставание по фазе ФНЧ на выходе A1. Значения  $R_S$  и  $C_F$  рассчитываются следующим образом:

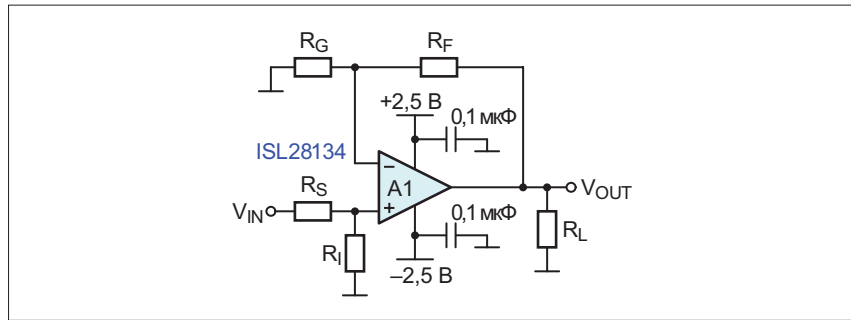


Рис. 9. Условие  $R_S || R_I = R_F || R_G$  приводит к снижению входного напряжения смещения из-за токов смещения

$$R_S = R_O \cdot \frac{R_F}{R_G}$$

и

$$C_F = C_L \left( \frac{R_O + R_S}{R_F} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_G}{R_F} \right).$$

#### Усилитель с высоким коэффициентом усиления

При проектировании усилителя с высоким коэффициентом усиления (см. рис. 9) необходимо поддерживать входной импеданс ниже определенного значения. Входной каскад усилителей с автоматическим обнулением (AZA) ведет себя не так, как входные каскады традиционных усилителей. В каскаде AZA используются переключатели на входе усилителя, которые непрерывно дискретизируют входной сигнал с частотой 100 кГц для понижения входного напряжения смещения до микровольт. Динамические характеристики переключателей вызывают инжекционные токи на входных цепях усилителя. Эти токи замыкаются по постоянному току на землю через сопротивления на входах усилителя. Таким образом, входные импедансы выше 10 кОм вызывают значительное увеличение токов смещения. Для сведения этого эффекта к минимуму рекомендуется, чтобы входное сопротивление не превышало 10 кОм.

Кроме того, следует выровнять входной импеданс между клеммами IN+ и IN- для сведения к минимуму входного

напряжения смещения, возникающего из-за тока смещения. Этот ток вызывает дополнительное входное напряжение смещения,  $I_{OS} \cdot R_{IN}$ .

Для усилителя с усилением 10000 В/В (80 дБ), использующего резистор 1 МОм в цепи обратной связи, общий входной ток смещения 500 пА генерирует дополнительное выходное напряжение смещения 0,5 мВ. При поддержании входного импеданса низким и сбалансированным по входам усилителя этот ток поддерживается на уровне ниже 100 пА, а связанное с ним смещение уменьшается до  $\leq 0,1$  мВ.

#### Выводы

Усилитель ISL28134 идеально подходит для усиления сигналов датчиков аналоговых входных устройств, включая датчики давления, температуры, медицинские датчики, тензометры и инерциальные датчики (акселерометры) с микровольтовыми уровнями сигналов. Микросхему ISL28134 можно использовать как стандартный усилитель с высокой стабильностью во всем промышленном диапазоне температуры  $-40 \dots 125^\circ\text{C}$ . На рисунке 10 показана структурная схема устройства, и перечислены его основные характеристики.  $\square$

Полный перечень сопутствующих документов см. на сайте Renesas [www.renesas.com](http://www.renesas.com).

Страница устройства ISL28134: [www.renesas.com/products/isl28134](http://www.renesas.com/products/isl28134)

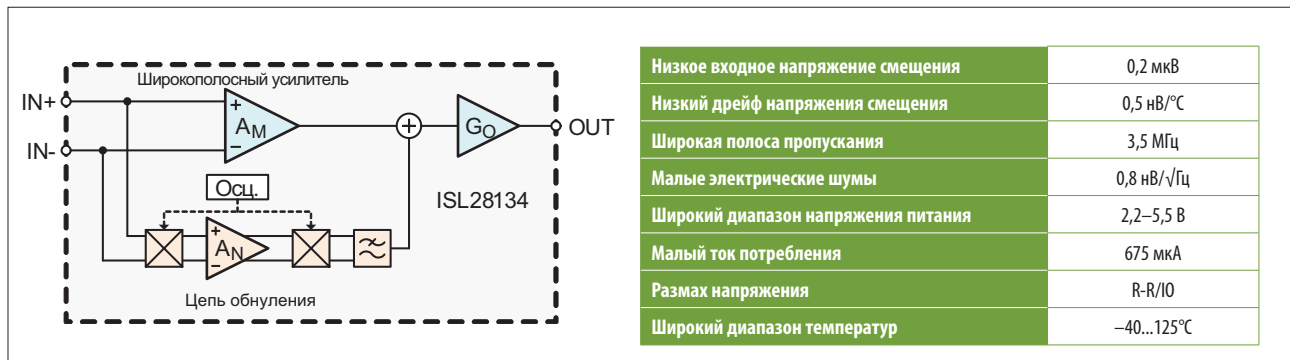


Рис. 10. ISL28134: структурная схема и ключевые характеристики

Низкое входное напряжение смещения	0,2 мкВ
Низкий дрейф напряжения смещения	0,5 нВ/°C
Широкая полоса пропускания	3,5 МГц
Малые электрические шумы	0,8 нВ/√Гц
Широкий диапазон напряжения питания	2,2–5,5 В
Малый ток потребления	675 мкА
Размах напряжения	R-R/10
Широкий диапазон температур	-40...125°C