

Полностью дифференциальные операционные усилители

Георгий Волович (г. Челябинск)

В статье рассмотрена схемотехника полностью дифференциальных операционных усилителей (ОУ), даны основные соотношения, устанавливающие связь между входными и выходными сигналами, представлены некоторые схемы включения и приведены сравнительные характеристики полностью дифференциальных ОУ.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Полностью дифференциальными (ПД) называют ОУ, имеющие дифференциальные (парафазные) входы и дифференциальные выходы. Идея таких ОУ не нова: первый коммерческий ламповый ОУ типа К2-У, использовавшийся для усиления сигнала два двойных электровакуумных триода, имел дифференциальные входы и выходы. Однако в эпоху ламп при уровне входных и выходных сигналов ± 100 В это никакого преимущества не давало, поэтому практически все последующие модели универсальных ОУ выпускались с несимметричным (однофазным) выходом. Число пассивных элементов, входящих во внешние цепи ПД ОУ примерно вдвое больше, чем требуется для аналогичной схемы на ОУ с одиночным выходом.

Спустя 30 лет разработчики пришли к выводу, что ПД ОУ – в некоторых приложениях – могут иметь преимущество перед ИОУ с однофазным выходом. (В цифровой технике полностью дифференциальные системы применяются уже давно.) В последние годы в связи со снижением питающих напряжений аналоговых и аналого-цифровых устройств и повышением их быстродействия существенно воз-

росли требования к помехозащищённости линий передачи аналоговых сигналов. Появились скоростные АЦП с дифференциальными входами, для подключения которых к обычным ОУ использовались трансформаторы, обладающие рядом недостатков. Всё это стимулировало разработку новых моделей ПД ОУ.

Однако усилители с дифференциальными выходами могут иметь более широкое применение, чем замена согласующих трансформаторов. Дифференциальные электрические цепи лучше защищены от внешних электромагнитных помех, чем несимметричные. При прокладке этих линий в непосредственной близости друг от друга помеха, наводимая на обе линии, будет проявляться как синфазный сигнал, который эффективно подавляет ПД ОУ. Кроме того, снижается уровень помех по цепям питания.

СХЕМОТЕХНИКА ПД ОУ

Полностью дифференциальный операционный усилитель по схемотехнике напоминает стандартный операционный усилитель. На рисунке 1 показана упрощённая версия ПД ОУ [1]. Транзисторы VT_1 и VT_2 – дифференциальная входная пара. В стан-

дартном ОУ выходной ток первого каскада отвечает только от одной коллекторной цепи и используется для преобразования в выходное напряжение несимметричного каскада. В ПД ОУ (см. рис. 1) коллекторы входных транзисторов нагружены на эмиттеры транзисторов VT_3 и VT_4 , потенциал базы которых фиксирован (каскадное включение). Транзисторы VT_5 и VT_6 образуют динамическую нагрузку входного каскада, имеющую очень высокое динамическое сопротивление, за счёт чего обеспечивается большой коэффициент усиления напряжения одним каскадом. Выходные напряжения каскада через буферные повторители соединяются с дифференциальными выходами усилителя $OUT+$ и $OUT-$.

В первом приближении можно считать, что синфазное напряжение входов $IN+$ и $IN-$ (UIC) не вызывает изменений коллекторных токов транзисторов. Усилитель Y устанавливает коллекторные токи транзисторов VT_5 и VT_6 так, чтобы минимизировать разность между синфазным выходным напряжением U_{OC} и напряжением на выводе $U_{CФ}$. Два комплементарных усилительных канала используют один и тот же входной дифференциальный усилительный каскад, их характеристики хорошо согласованы, и схема поддерживает их рабочие точки близко друг к другу. Поэтому искажения дифференциального сигнала, вносимые парафазными усилителями, как правило, симметричны. Это при определённых условиях обеспечивает снижение уровня чётных гармоник.

Другим достоинством ПД ОУ является увеличенный в два раза динамический диапазон выходного сигнала по сравнению со стандартным ОУ, с тем же размахом выходного напряжения. Действительно, если напряжение на выходе $OUT+$ составляет $U_m \sin \omega t$ относительно общей точки, то на выходе $OUT-$ будет напряжение $-U_m \sin \omega t$. В таком случае дифференциальное выходное напряжение (см. рис. 2) $U_{OD} = U_{OUT+} - U_{OUT-} = 2U_m \sin \omega t$. Наконец,

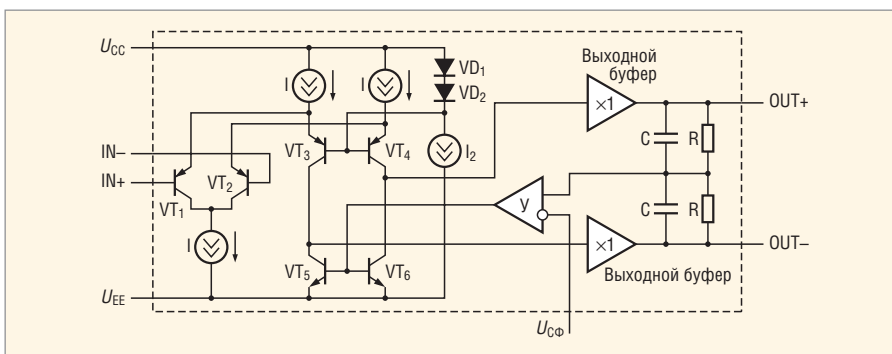


Рис. 1. Упрощённая схема ПД ОУ

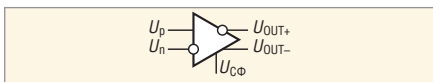


Рис. 2. Обозначения выводов ПД ОУ

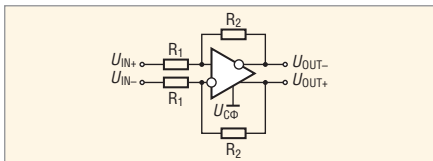


Рис. 3. Основная схема включения ПД ОУ

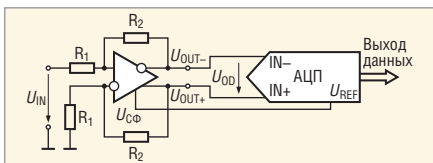


Рис. 4. Схема драйвера АЦП с дифференциальными входами

если необходимо инвертировать выходной сигнал ПД ОУ, то достаточно поменять местами выходы усилителя.

Другими уравнениями, описывающими ПД ОУ, являются:

$$U_{ID} = U_p - U_n;$$

$$U_{OD} = KU_{ID};$$

$$(U_{OUT+} + U_{OUT-})/2 = U_{CM}.$$

Для подавления синфазного входного сигнала в ПД ОУ отрицательная обратная связь от обоих выходов к обоим входам должна быть симметричной. Две части ПД ОУ образуют два идентичных инвертирующих усилителя, поэтому при построении схемы следует использовать топологию инвертирующего ОУ. Несимметрия цепей обратной связи снижает КОСС усилителя. Например, разбаланс коэффициентов передачи цепей обратной связи в 0,1% приводит к снижению КОСС до 60 дБ. В таблице 1 приведены значения коэффициентов усиления дифференциальных и синфазных сигналов идеального ПД ОУ при симметричных цепях обратной связи.

ПРИМЕНЕНИЕ ПД ОУ

Основная схема включения полностью дифференциального усилителя при двухполярном питании представлена на рисунке 3. Для этой схемы справедливо соотношение:

$$U_{OD} = -U_{ID} \frac{R_2}{R_1}.$$

Входное сопротивление $R_{IN} = 2R_1$.

Одно из основных применений ПД ОУ – управление дифференциальными

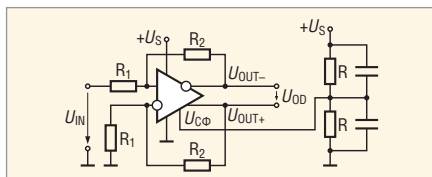


Рис. 5. Схема драйвера дифференциальной линии

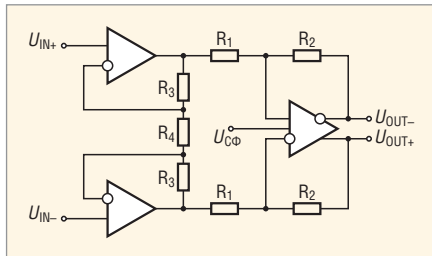


Рис. 6. Схема полностью дифференциального измерительного усилителя

ми входами аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Скоростные АЦП часто содержат на кристалле источник опорного напряжения U_{REF} . Как правило, такие АЦП имеют однополярное питание. В этом случае синфазное входное напряжение U_{CM} ОУ должно быть равно U_{REF} . Схема включения АЦП с входным драйвером на ПД ОУ, который, в свою очередь, принимает сигнал от несимметричного источника, приведена на рисунке 4. Напряжение между дифференциальными входами АЦП составляет:

$$U_{OD} = -U_{IN} \frac{R_2}{R_1}.$$

Входное сопротивление равно $2R_1$.

По аналогичной схеме выполнен драйвер дифференциальной линии связи (см. рис. 5). Синфазное выходное напряжение при однополярном питании обычно получают с делителя. При этом надо иметь в виду, что входное сопротивление вывода $U_{CФ}$ сравнительно велико, но не бесконечно. Например, для ИОУ типа AD8132 оно равно 50 кОм, для AD8138 – 200 кОм.

Схема полностью дифференциального измерительного усилителя приведена на рисунке 6. Использование двух ИОУ с несимметричным выходом обеспечивает высокое входное сопротивление. Коэффициент усиления этой схемы описывается выражением:

$$K = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_3}{R_4} \right).$$

Фильтры на ОУ ПД

Фильтры выполняются в основном аналогично фильтрам на обычных

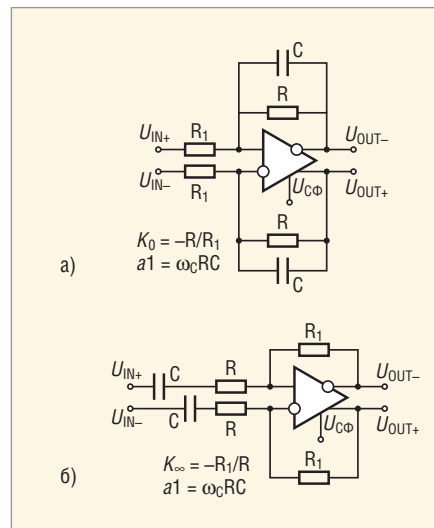


Рис. 7. Схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) первого порядка на ПД ОУ

ОУ. Используются схемы первого и второго порядка с инвертирующим включением ОУ. В частности, на рисунке 7 приведены схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) первого порядка, а на рисунке 8 представлены схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) второго порядка.

В принципе схема биквадратного фильтра [2] позволяет реализовать на ПД ОУ все основные типы фильтров: НЧ, ВЧ, избирательные и режекторные. Однако ФВЧ и режекторные фильтры требуют дополнительного ОУ, поэтому применение биквадратной схемы для них не оптимально. ФНЧ и избирательные фильтры, в отличие от обычной схемы [3], можно реализовать всего на двух ИОУ (см. рис. 9). Для этой схемы справедливы следующие уравнения:

$$U_{ID} = \left(U_{OD} \frac{1}{R_4} - U_{ID} \frac{1}{R_1} \right) \frac{R_2}{1 + sC_1 R_2};$$

$$U_{OD} = -U_{ID} \frac{1}{sC_2 R_3}. \quad (1)$$

Найдём из этих уравнений отношение U_{1D}/U_{ID} . Полагая $s = \omega_p S$, получим:

$$W_{11\Phi}(S) = \frac{U_{1D}}{U_{ID}} = -\frac{R_4}{R_1} \times \frac{R_3 C_2 \varphi S}{1 + \omega_p s C_2 R_3 R_4 / R_2 + \omega_p^2 S^2 C_1 C_2 R_3 R_4}. \quad (2)$$

Таблица 1. Коэффициенты усиления дифференциальных и синфазных сигналов

Вход	UOD	UOC
U_{IND}	R_2/R_1	0
U_{INC}	0	0
$U_{CФ}$	0	1

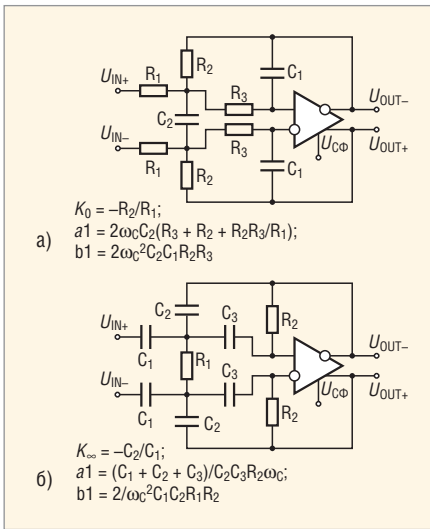


Рис. 8. Схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) второго порядка на ПД ОУ

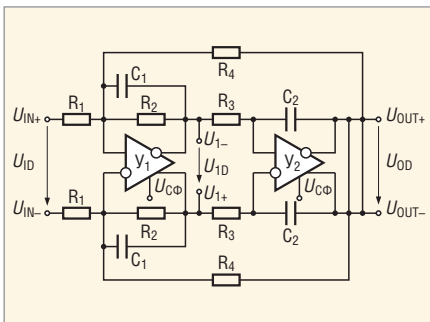


Рис. 9. Биквадратный фильтр на ПД ОУ

Выражение (2) представляет собой передаточную функцию полосового (избирательного) фильтра. Приравняв коэффициенты выражения (2) к коэффициентам передаточной функции полосового фильтра [3], по-

лучим формулы для расчета параметров фильтра:

$$\omega_p = 1 / \sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4};$$

$$Q = R_2 / \sqrt{C_1 / C_2 R_3 R_4};$$

$$K_p = -R_2 / R_1.$$

Подставив U_{ID} , найденное из соотношения (1), в (2), получим передаточную функцию, связывающую входное и выходное напряжения биквадратного фильтра:

$$W_{ПЧ}(S) = \frac{U_{OD}}{U_{ID}} = \frac{R_4}{R_1} \times \frac{1}{1 + \omega_c S C_2 R_3 R_4 / R_2 + \omega_c^2 S^2 C_1 C_2 R_3 R_4} \quad (3)$$

т.е. биквадратный фильтр можно использовать в качестве ФНЧ.

Сопоставляя (3) и передаточную функцию ФНЧ второго порядка [3], найдём параметры фильтра:

$$K_0 = R_4 / R_1;$$

$$a_1 = \omega_c C_2 R_3 R_4 / R_2;$$

$$b_1 = \omega_c^2 C_1 C_2 R_3 R_4.$$

Одним из преимуществ биквадратного фильтра перед схемой, приведённой на рис. 8а, является независимая регулировка усиления резистором R1.

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ПД ОУ

Как правило, полностью дифференциальные усилители работают в

симметричном режиме, при котором цепи обратной связи «верхней» и «нижней» половин усилителя идентичны. Тем не менее, определённый интерес представляет и несимметричное включение таких усилителей. Рассмотрим общий случай включения ПД ОУ (см. рис. 10а).

Если ОУ является идеальным, разность потенциалов между его входами равна нулю. Следовательно, для приращений переменных, справедливо уравнение:

$$\frac{\Delta U_{OUT-} R_{11} + \Delta U_{IN+} R_{12}}{R_{11} + R_{12}} = \frac{\Delta U_{OUT+} R_{21} + \Delta U_{IN-} R_{22}}{R_{21} + R_{22}} \quad (4)$$

Обозначим коэффициенты передачи звеньев обратной связи как:

$$\beta_1 = \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12}} \text{ и } \beta_2 = \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{22}}.$$

Тогда уравнение (4) можно переписать в следующем виде:

$$\Delta U_{OUT-} \beta_1 + \Delta U_{IN+} (1 - \beta_1) = \Delta U_{OUT+} \beta_2 + \Delta U_{IN-} (1 - \beta_2). \quad (5)$$

Рассмотрим практически важный случай, когда переменный сигнал подаётся на один из входов, например, IN+, а на второй вход подаётся постоянный потенциал. Тогда приращение напряжения U_{IN+} равно ΔU_{IN} , а напряжения U_{IN-} – нулю. Поскольку

Таблица 2. Основные характеристики полностью дифференциальных усилителей

Наименование ОУ	Напряжение питания, В	Коэффициент усиления K_V , В/мВ (Z_T , МОм)	КОСС, дБ	Напряжение смещения V_{OFF} , мВ	Входной ток, мкА	Вторая гармоника, дБ (на частоте, МГц)	Произведение усиления на полосу пропускания, МГц	Скорость нарастания, В/мкс	Ток потребления, мА	Максимальный выходной ток, мА	Напряжение шума e_n , нВ/Гц ^{0,5}	Примечание
AD8132	2,7...±5,5	-	70	1	3	-92 (10)	(350)	1200	10,7	70	8	-
AD8138	3...±5,5	-	77	1	3,5	-92 (10)	(320)	1150	20	95	5	-
AD8351	3...5,5	-	43	6	15	-95 (10)	(2200)	13000	28	-	2,7	Усиление устанавливается одним резистором
ADA4937-1	3,3...5	-	80	1	20	-106 (10)	(1900)	6000	39,5	-	2,2	-
ADA4938-1	5...±5	-	77	1	3,5	-112 (10)	(1500)	4700	40	95	2,2	-
THS4120	3,3	2	96	3	1,2 пА	-80 (1)	(100)	50	11	100	5,4	Режим Power-down
THS4130	5...±15	7	95	0,2	2	-86 (1)	(150)	52	14	85	1,3	Режим Power-down
THS4509	3...5	2,5	90	1	8	-104 (10)	3000	6600	38	96	1,9	$K \geq 2$
THS4520	3,3...5	400	84	0,25	6,5	-100 (1)	1200	570	14,2	105	2	Режим Power-down
LMH6552	5...12	(0,2)	80	-	60	-93 (10)	(1500)	3800	22,5	80	1,1	Режим Power-down
LMH6555	3,3	-	68	15	-	-62 (500)	(1200)	1300	120	-	3,8	Фиксированный $K = 5$
LTC6400-20	2,85...3,5	-	65	2	-	-97 (10)	(1800)	4500	90	20	2,1	Фиксированный $K = 10$
LT1994	2,4...12,6	100	85	2	18	-100 (1)	70	65	15	85	3	Встроенный делитель для $V_{CФ}$

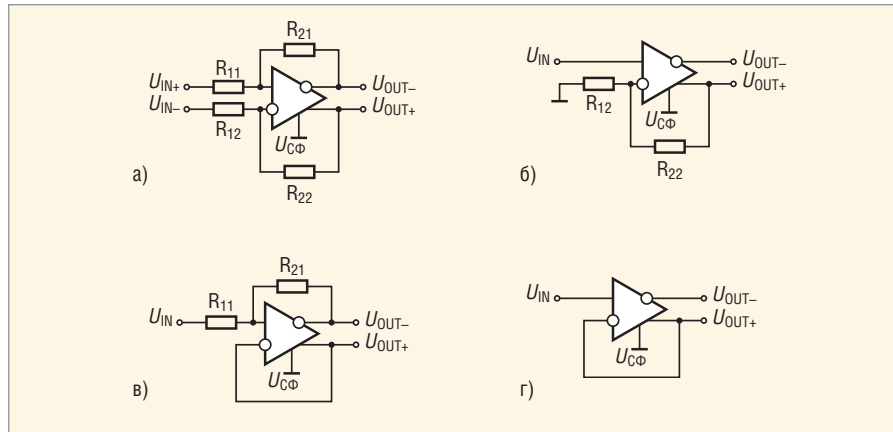


Рис. 10. Несимметричное включение ПД ОУ

$$\frac{U_{OUT+} + U_{OUT-}}{2} = U_{CM}$$

приращения выходных напряжений равны по величине и противоположны по знаку:

$$\Delta U_{OUT+} = -\Delta U_{OUT-} = \frac{\Delta U_{OUT}}{2}$$

Запишем уравнение (5) для приращений переменных:

$$-\frac{\Delta U_{OUT}}{2} \beta_1 + \Delta U_{IN} (1 - \beta_1) = \frac{\Delta U_{OUT}}{2} \beta_2$$

из которого следует формула для расчёта коэффициента передачи усилителя:

$$K = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta U_{IN}} = \frac{2(1 - \beta_1)}{\beta_1 + \beta_2} \quad (6)$$

Применим эту формулу для схемы, показанной на рис. 10б. Если $\beta_1 = 0$, из выражения (6) следует, что

$$K = \frac{2}{\beta_2}$$

В данном случае мы имеем драйвер дифференциальной линии связи с высоким входным сопротивлением.

В схеме, приведённой на рис. 10в, $\beta_2 = 1$. В этом случае:

$$K = \frac{2(1 - \beta_1)}{\beta_1 + 1}$$

Из последней формулы, в частности, следует, что при $\beta_2 = 1$ и $\beta_1 = 1$ (например, если $R_{21} = 0$) коэффициент передачи усилителя $K = 0$. Если же $\beta_2 = 1$ и $\beta_1 = 0$ (см. рис. 10г), мы получаем безрезисторную схему с высоким входным сопротивлением и $K = 2$.

Схемотехника применений ПД ОУ пока недостаточно развита и представляет много возможностей для творчества.

В таблице 2 приведены основные характеристики некоторых современных моделей ПД ОУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Karki J.* Fully differential amplifiers. Texas Instruments Incorporated. Analog Applications J. August 2000. PP. 38-41.
2. *Carter B.* A Differential Op-Amp Circuit Collection. Application report SLOA064. Texas Instruments. July 2001.
3. *Волович Г.И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. Додэка-XXI, 2005.