

Операционные усилители — проблема выбора

Геннадий ШТРАПЕНИН,
к. ф.-м. н.
gshtrapenin@usurt.ru

Интегральные операционные усилители (ОУ), история развития которых насчитывает почти 50 лет, в настоящее время и, видимо, еще довольно долго будут широко использоваться в качестве базовых элементов для создания различных аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. Однако, несмотря на колоссальный технологический прогресс в области производства интегральных микросхем (ИМС), сделать ОУ с параметрами, близкими к идеальным [1], не представляется возможным. В связи с этим разработчики микросхем вынуждены идти на компромисс, отдавая предпочтение в каждом конкретном случае нескольким ключевым параметрам. Как следствие, выпускаемые интегральные ОУ подразделяются на классы, ориентированные на применение в определенных устройствах. В статье на примере приобретающих популярность в России интегральных операционных усилителей и компараторов фирмы STMicroelectronics показано, как, используя техническую документацию (datasheet), подобрать определенный тип операционного усилителя для решения поставленной задачи.

Большинство современных интегральных ОУ выполняются по схеме прямого усиления с дифференциальными входами и рассчитаны на симметричное двуполярное или однополярное питание. Кроме двух входов, выхода и выводов питания, ОУ может также иметь выводы для балансировки, коррекции, программирования (задания определенных параметров величиной управляющего тока) и др.

В идеальном случае ОУ должен иметь бесконечный коэффициент усиления по напряжению, бесконечно большое входное и бесконечно малое выходное сопротивление, бесконечно большую амплитуду выходного сигнала, бесконечно большой диапазон усиливаемых частот и отсутствие шумов. Параметры ОУ не должны зависеть от внешних факторов, напряжения питания и температуры. При соблюдении этих условий передаточная характеристика ОУ, охватывающего отрицательной обратной связью (ООС), точно соответствует передаточной характеристике цепи ООС и не зависит от параметров самого усилителя.

Реальные ОУ имеют характеристики, отличающиеся от идеальных, что является поводом для их классификации по областям и особенностям применения. Реальный ОУ — это компромисс различных требований с достижением наилучших свойств по одному или нескольким параметрам, каковыми могут быть минимизация напряжения смещения и входных токов, достижение максимальной полосы усиливаемых частот и скорости нарастания выходного напряжения, уменьшение потребляемого тока

и питающего напряжения и др. Параметры ОУ можно разделить на несколько групп — входные, выходные, усилительные, частотные, энергетические, шумовые и др. [1].

Наряду с эксплуатационными параметрами, определяющими номинальный температурный режим работы ОУ, параметры входных и выходных цепей и требования к источникам питания, весьма важными являются предельно допустимые (Absolute Maximum Ratings, AMR) значения ряда параметров, превышение которых может привести к выходу микросхемы из строя. Ниже приведена сложившаяся в настоящее время классификация ОУ по сочетанию различных параметров, отражающая их предпочтительное использование в том или ином классе устройств.

Также выпускаются операционные усилители, параметры которых специально оптимизированы для применения в аппаратуре определенного назначения — медицинской, автомобильной, в звуковых устройствах и т. д. Отметим, что параметры ОУ в значительной степени определяются их схемотехникой и используемой полупроводниковой технологией — на биполярных транзисторах (bipolar), полевых транзисторах с *p-n*-переходом (JFET), комплементарных МОП-структурах (CMOS) и сочетанием на одном кристалле комплементарных пар биполярных и полевых транзисторов (BiCMOS).

1. Усилители общего применения: коэффициент усиления — до 100 дБ, напряжение смещения — более 1 мВ, частота единичного усиления — до 10 МГц.

2. Маломощные: ток потребления — менее 3,5 мА.

3. Микромощные: ток потребления — менее 50 мкА.

4. Низковольтные: напряжение питания — менее 3 В.

5. Прецизионные: коэффициент усиления — более 100 дБ, напряжение смещения — менее 1 мВ.

6. Быстродействующие: частота единичного усиления — более 50 МГц.

7. Малошумящие: напряжение шумов — менее 10 нВ/√Гц.

8. Мощные: выходной ток — более 100 мА.

9. С выходным/входным напряжением, близким к напряжению питания.

Это разделение, по понятным причинам, не является строгим: ОУ может быть одновременно низковольтным, быстродействующим, малошумящим, с выходным напряжением, близким к напряжению питания, и т. п. Кроме того, ОУ одного типа выпускаются в различных корпусах, по два, три или четыре усилителя в одном корпусе (многоканальные), а также в исполнениях, предназначенных для использования в определенном классе устройств: для общего применения (С), для промышленного применения (I, E) и для специального, читай — военного применения (М). Они отличаются по ряду параметров, в частности по диапазону рабочих температур:

• С — 0...+70 °С;

• I — -40...+85 °С;

• E — -40...+125 °С;

• М — -55...+125 °С.

Отметим также, что при разработке современных операционных усилителей, как и дру-

Таблица. Основные параметры операционных усилителей STMicroelectronics

Тип	Корпус	Диапазон температур	Напряжение питания (размах) V_{cc} , В		Потребляемый ток на один канал I_{cc} , мА	Выходной ток I_{out} , мА	Входной ток I_{in} , пА	Напряжение смещения V_{os} , мкВ	Температурный дрейф напряжения смещения ΔV_{os} , мкВ/°С	Коэффициент усиления A_{v} , дБ	Коэффициент ослабления синфазного сигнала CMRR, дБ	Коэффициент подавления нестабильности напряжения питания SMR, дБ	Синфазное входное напряжение V_{in} , В		Частота единичного усиления f_u , МГц	Скорость нарастания выходного напряжения SR, В/мкс	Спектральная плотность шума еп, нВ/√Гц	Примечание
			min	max									min	max				
LM2902/4	DIP, SO, TSSOP, QFN	E	3	33	0,35	40	20000	2000	7	100	80	110	$-V_{cc}-0,3$	$+V_{cc}-1$	1,3	4	40	Стандартный биполярный
TS27M2/4*	DIP, SO, TSSOP	E	3	18	0,15	30	0,001	1000	2	94	80	80	$-V_{cc}-0,3$	$+V_{cc}$	1,0	0,6	38	Стандартный CMOS
TS512/4	DIP, SO	I, E	6	36	0,50	24	50000	500	2	100	90	—	$-V_{cc}$	$+V_{cc}$	3	1,5	10	Прецизионный биполярный
TSV731/2/4	MiniSO, DFN, QFN, TSSOP	E	1,5	5,5	0,06	10	0,001	50	0,5	105	94	90	$-V_{cc}-0,2$	$+V_{cc}+0,2$	0,9	0	35	Прецизионный CMOS
TSZ121/2/4	SOT23, DFN, QFN, MiniSO	E	1,8	5,5	0,028	8	0,5	1	0,01	135	122	—	$-V_{cc}-0,2$	$+V_{cc}+0,2$	0,3	0,2	40	Ультрапрецизионный Zero Drift
TS971/2/4	SOT23, SO, DFN	E	2,7	10	2	100	200	1000	5	80	85	70	$-V_{cc}-0,3$	$+V_{cc}+0,3$	12	4	4	Ультраточные шумы и искажения
TSX921	SOT23	E	4	16	3	21	0,01	5000**	2	110	80	—	$-V_{cc}-0,2$	$+V_{cc}+0,2$	9	17	15	CMOS RRIO
TSX9291	SOT23	E	4	16	2,9	21	0,01	5000**	2	110	80	—	$-V_{cc}-0,2$	$+V_{cc}+0,2$	15	27	15	То же, нескорректированный
TSH81/2/4	SOT23, SO, TSSOP	I	4,4	12	8,2	55	6000	1100	3	84	97	75	$-V_{cc}$	$+V_{cc}-1$	65	105	11	VFA, RRO, THD = 0,1%
TSH350	SOT23, SO	I	4,5	5,5	4,1	200	12/1***	1000	0,9	270****	60	80	$-V_{cc}+1,5$	$+V_{cc}-1,5$	550	940	1,5	CFA, THD = 0,1%
TSC101/A/B/C	SOT23	E	4	24	0,3	26	5000	700	3	26/34/40	105	105	$-0,3$	60	0,5	0,9	—	Токоизмерительный
TSC103	SO, TSSOP	E	2,7	5,5	0,3	26	10000	1000**	5	26–40 пер.	105	95	2,9	70	0,7	0,6	40	То же, с низковольтным питанием
TS881/2/4	MiniSO, DFN, QFN, TSSOP	E	1,1	5,5	0,0003	1,5	0,001	1000	3	—	78	80	$-V_{cc}-0,2$	$+V_{cc}+0,2$	—	5,0*****	—	RRI микроомный компаратор
TS331/2/4	MiniSO, DFN, QFN, TSSOP	E	1,6	5,5	0,022	22	25	500	4,5	—	75	79	$-V_{cc}-0,3$	$+V_{cc}+0,3$	—	0,21*****	—	RRI-компаратор
TS3011	SOT23, SC70	E	2,2	5,5	0,5	62	0,001	400	10	—	75	79	$-V_{cc}-0,3$	$+V_{cc}+0,3$	—	0,01*****	—	RRI скоростной компаратор

Примечания. * Выпускается в трех модификациях, отличающихся токопотреблением и частотными параметрами. ** Максимальное значение. *** Неинвертирующий/инвертирующий, мкА. **** Трансимпеданс, кОм. ***** Время переключения, мкс.

гих интегральных микросхем, наблюдается тенденция к уменьшению габаритов и все большему использованию корпусов для поверхностного монтажа. Широко распространенные ранее корпуса DIP и TSSOP заменяются на значительно меньшие SOT-23, DFN, QFN и др.

Устройства на операционных усилителях можно условно разделить на два класса: линейные — собственно различные усилители, в том числе и измерительные, аналоговые вычислительные схемы, преобразователи импеданса, активные фильтры и т. п., и нелинейные — аналоговые компараторы, умножители напряжения, логарифмирующие усилители, прецизионные выпрямители, генераторы сигналов и др. При этом в зависимости от класса устройств и конкретной задачи определяющими при выборе типа микросхемы будут те или иные группы параметров, упомянутые в начале статьи.

В любом случае максимально (минимально) возможные значения напряжения и тока, действующих в разрабатываемом устройстве, не должны выходить за пределы соответствующих параметров используемого операционного усилителя. Это, прежде всего, напряжение питания V_{cc} , а также синфазное V_{icm} и дифференциальное V_{id} входные напряжения. Как правило, современные ОУ имеют встроенную защиту от превышения максимального значения выходного тока, в связи с чем в документации приводится минимально допустимое значение сопротивления нагрузки R_L и ток короткого замыкания выхода на общий провод питания I_o .

В экстремальных условиях эксплуатации становятся важными диапазон рабочих температур T_{oper} , максимальная температура перехода T_j , превышение которой в длительных режимах эксплуатации не допускается в принципе, так как при этом полупроводниковый p-n-переход теряет свои свойства, и тепловое сопротивление переход — окружающая среда R_{thja} измеряемое в °С/Вт и характеризующее степень теплоотдачи от полупроводникового кристалла микросхемы в окружающую среду.

В процессе монтажа и эксплуатации полупроводниковых приборов возникает проблема защиты ИМС от электростатического

напряжения (Electrostatic Discharge, ESD). При наличии в ОУ схемы внутренней защиты от ESD нормируется его максимально допустимая величина в различных конфигурациях, обычно в пределах 2 кВ.

В классе линейных устройств наиболее распространены и востребованы различные масштабные усилители постоянного и переменного тока со сравнительно небольшим (единицы-десятки) коэффициентом усиления по напряжению. Все они строятся на основе типовой схемы, изображенной на рис. 1.

В зависимости от выбора внешних элементов и способа подключения входного сигнала усилитель может быть неинвертирующим, инвертирующим, дифференциальным или буферным повторителем. В последнем случае (V_1 — общий провод, $V_2 = U_{вх}$, Z_G и Z_2 отсутствуют, $Z_1 = Z_F = 0$) входное сопротивление определяется исключительно параметрами самого операционного усилителя. Рассмотрим это на примере широко распространенного четырехканального ОУ LM2902, выполненного по биполярной технологии, и TS27M4 — CMOS ОУ, специально предназначенного для применения в схемах

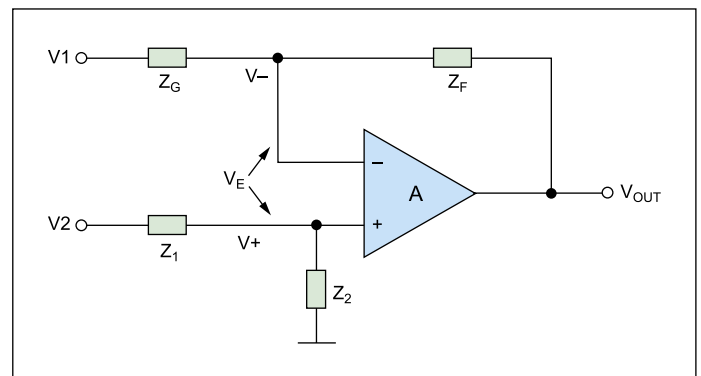


Рис. 1. Типовая схема масштабного усилителя на ОУ

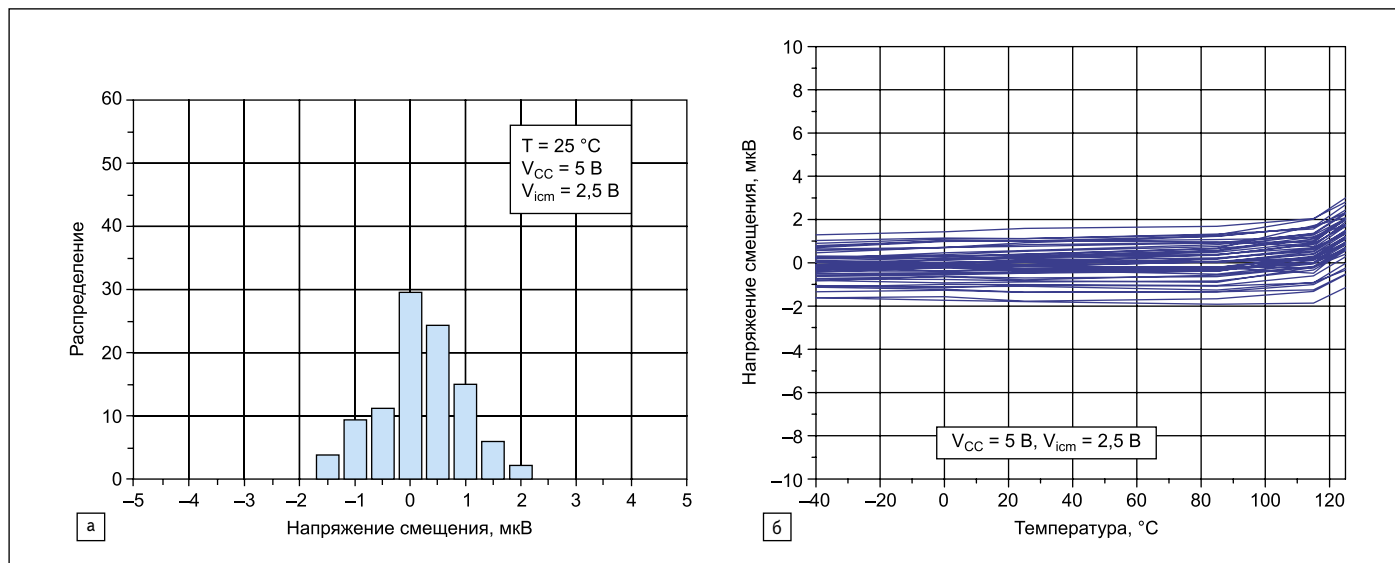


Рис. 2. Распределение величин напряжения смещения (а) и зависимость напряжения смещения от температуры (б) ОУ TSZ121/2/4 при напряжении питания 5 В и синфазном входном напряжении 2,5 В

с большим входным сопротивлением. При прочих сравнительно схожих параметрах, приведенных в таблице, типовое значение входного тока I_{ib} , определяющее входное сопротивление усилителя, составляет 20 нА для ОУ LM2902 и всего 1 пА для TS27M4. В то же время следует отметить, что разброс величин входного тока и его температурная зависимость для ОУ, выполненных по технологии CMOS, обычно заметно больше, чем у аналогичных ОУ на биполярных транзисторах.

Когда необходимо выделить и усилить слабый сигнал на фоне сильных помех, применяют дифференциальные (разностные) усилители ($V1, V2$ — входной сигнал, $Z_G = Z1, Z_F = Z2$). В идеальном операционном усилителе при выполнении этих условий помеха создает на входах ОУ синфазные сигналы равной величины, которые успешно подавляются. В реальных условиях выбор ОУ для дифференциальных усилителей требует учета нескольких параметров, а именно величины напряжения смещения V_{io} , его температурного дрейфа ΔV_{io} , коэффициентов подавления синфазных сигналов (Common Mode Rejection Ratio, CMR) и ослабления влияния источника питания (Supply Voltage Rejection Ratio, SVR). Для примера рассмотрим соответствующие параметры для четырехканального ОУ TS514, позиционируемого фирмой как прецизионный вариант упомянутого выше ОУ LM2902. Очевидно, применение ОУ TS514 в схемах, где необходимо подавление синфазных сигналов, будет более эффективным, чем использование стандартных операционных усилителей.

При тензометрических измерениях для обеспечения высокой точности ОУ должен эффективно подавлять синфазные помехи и, кроме того, иметь высокое входное сопротивление, необходимое для согласования усилителя с высокоомными тензодатчиками.

В этом случае применяются прецизионные усилители на полевых транзисторах, например TSV711/2/4 и TSV731/2/4 (последняя цифра в обозначении соответствует числу усилителей в одном корпусе), выполненные по технологии CMOS, с типовым значением входного тока и напряжения смещения 1 пА и 50 мкВ соответственно. Следует иметь в виду, что в таблице приведены усредненные параметры ОУ, в то время как в фирменной технической документации, как правило, подробно указываются условия их определения (напряжение питания, температура, входные сигналы, сопротивление нагрузки и пр.).

Новейшие операционные усилители STMicroelectronics TSZ121/2/4 с входным и выходным напряжением, близким к напряжению питания RRIO (Rail to Rail Input/Output), с автоматической компенсацией дрейфа нуля благодаря весьма малому значению напряжения смещения 1 мкВ и его температурного дрейфа 10 нВ/°C получили название «усилители с нулевым дрейфом». Эти усилители относятся к группе микромощных (ток потребления — 28 мкА) и отличаются от аналогичных изделий других производителей большим диапазоном усиливаемых частот (частота единичного усиления $F_u = 300$ кГц). На рис. 2 приведены графики распределения величин напряжения смещения ОУ TSZ121/2/4 и зависимость напряжения смещения от температуры при напряжении питания 5 В и синфазном входном напряжении 2,5 В.

Рассмотрим ситуацию, когда минимизация напряжения смещения может иметь решающее значение. Требуется спроектировать масштабный усилитель с коэффициентом усиления $K = 10$ для подачи сигнала на вход 12-разрядного АЦП с максимальным входным напряжением 4 В. Разрешение АЦП составляет $4/2^{12} \approx 1$ мВ. Если применить в уси-

лителе ранее рассмотренный прецизионный ОУ TSV7344 с максимальным значением напряжения смещения $V_{io} = 500$ мкВ, ошибка, обусловленная сдвигом нуля, составит 5 мВ, или более пяти единиц младшего разряда АЦП, что совершенно неприемлемо. В то же время использование в этом усилителе ОУ TSZ121/2/4 с максимальным значением $V_{io} = 5$ мкВ дает сдвиг нуля не более 50 мкВ, что значительно меньше разрешения АЦП.

При разработке усилителей слабых сигналов, а также усилителей для аудиотехники становятся значимыми шумовые и динамические параметры ОУ — e_n , спектральная плотность напряжения шума, приведенного к входу, измеряемая в нВ/√Гц; суммарный коэффициент нелинейных искажений (Total Harmonic Distortion, THD), измеряемый в процентах; скорость нарастания выходного напряжения (Slew Rate, SR) — В/мкс и частота единичного усиления F_u . (Используют также произведение коэффициента усиления на полосу пропускания — Gain Bandwidth Product (GBP)). Последние два параметра являются определяющими для высокочастотных усилителей, выбор ОУ для которых будет подробно рассмотрен далее.

Оптимальные параметры для построения предварительных каскадов усилителей для аудиотехники сочетает операционный усилитель TS971/2/4, отличающийся очень малыми уровнями шума ($e_n = 4$ нВ/√Гц) и нелинейных искажений (THD = 0,003%). Зависимость спектральной плотности шумов и коэффициента нелинейных искажений от частоты для ОУ TS971/2/4 при напряжении питания 5 В приведена на рис. 3.

Устойчивость работы схем на операционных усилителях с отрицательной обратной связью и, в частности, отсутствие паразитного самовозбуждения в широком диапазоне частот и коэффициентов усиления вплоть до еди-

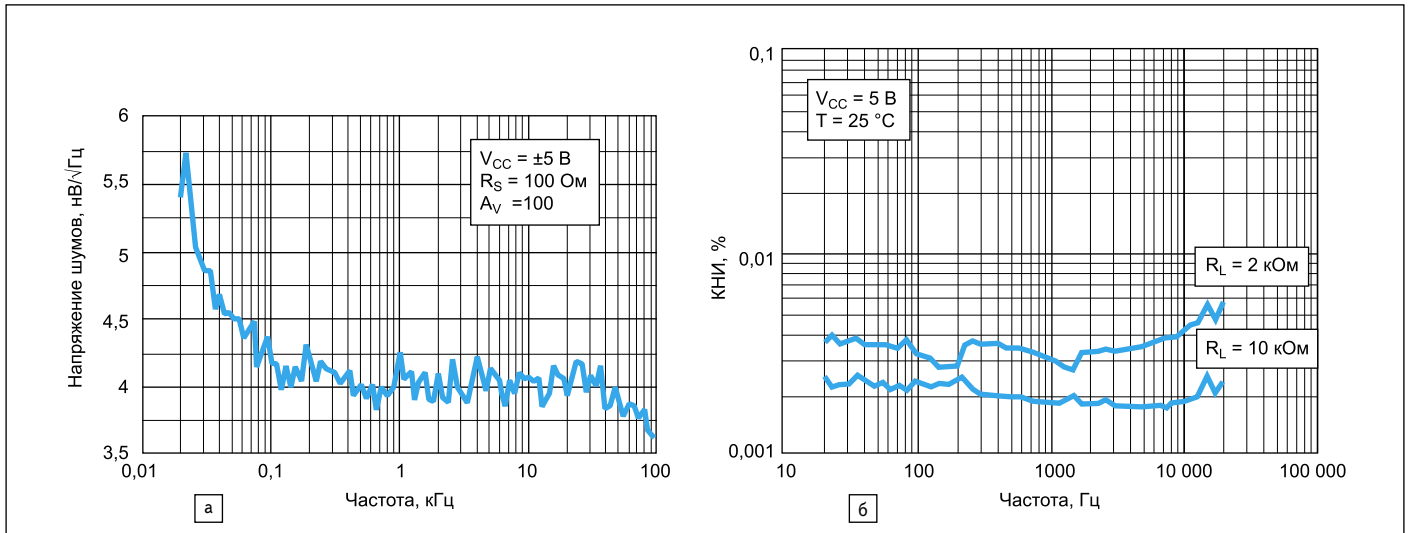


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности шумов (а) и коэффициента нелинейных искажений от частоты (б) ОУ TS971/2/4 при напряжении питания 5 В

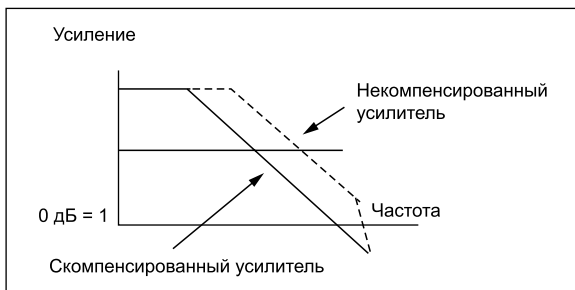


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики скорректированного и нескорректированного операционного усилителя

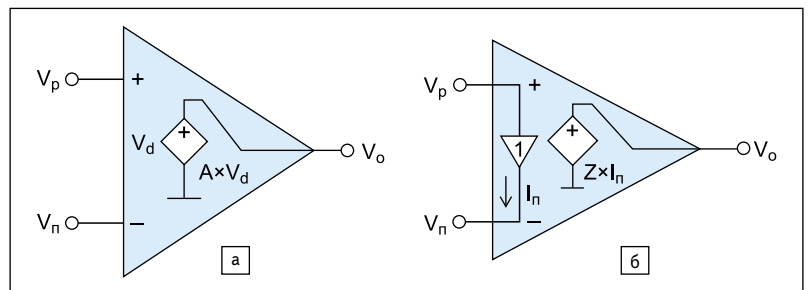


Рис. 5. Структурные схемы операционных усилителей: а) с обратной связью по напряжению VFA; б) с токовой обратной связью CFA

ничного обычно обеспечивается встроенной в ОУ схемой полной частотной коррекции АЧХ со спадом 20 дБ на декаду. При этом произведение коэффициента усиления на полосу пропускания усилителя GBP будет постоянной величиной, в результате чего при больших коэффициентах усиления диапазон усиливаемых частот неизбежно сужается. Расширить полосу частот усилителя на ОУ при больших коэффициентах усиления можно путем применения операционных усилителей с внешней коррекцией, как показано на рис. 4.

Последние разработки STMicroelectronics — семейства ОУ TSX5, TSX6 и TSX9 — включают как скорректированные, так и нескорректированные операционные усилители, предназначенные для применения в широком классе устройств, работающих в диапазоне частот до 20 МГц. Скорректированный ОУ TSX921 с Rail-to-Rail входом и выходом отличается низким уровнем шумов и нелинейных искажений в полосе частот 10 МГц. Его нескорректированная версия ОУ TSX9291 устойчиво работает при коэффициентах усиления больше +2 на частоте до 15 МГц.

Для усиления и обработки видеосигналов высокой четкости, а также для высокоскоростных линий связи и т. п. требуются быстродействующие операционные уси-

лители со специфическими параметрами. Расчет показывает, что если для усилителя телевизионного видеосигнала с разрешением 640×480 и кадровой частотой 50 Гц необходима скорость нарастания выходного напряжения и частота единичного усиления 105 В/мкс и 25 МГц соответственно, то при разрешении 1600×1200 и частоте кадров 85 Гц эти параметры составляют уже 950 В/мкс и 240 МГц.

В последнее время в схемотехнике быстродействующих ОУ определились два направления. Первое из них — это операционные усилители с обратной связью по напряжению (Voltage Feedback Amplifier, VFA), построенные по традиционной структурной схеме, изображенной на рис. 5а. Она включает входной усилитель с дифференциальным входом, имеющий гигантское входное сопротивление и, соответственно, малые входные токи как неинвертирующего (+), так и инвертирующего (-) входа. Основным передаточным параметром этого ОУ — коэффициент усиления по напряжению:

$$A = V_o / V_{дб}$$

где V_o — выходное напряжение; $V_{дб}$ — дифференциальное входное напряжение.

Второе направление в схемотехнике быстродействующих ОУ — усилитель с токовой

обратной связью (Current Feedback Amplifier, CFA) [3]. Структурная схема ОУ CFA приведена на рис. 5б и состоит из буферного усилителя 1 с единичным коэффициентом усиления и выходным током I_n с большим входным и малым выходным сопротивлением, включенного между неинвертирующим и инвертирующим входами, и преобразователя «ток → напряжение» с коэффициентом передачи $Z = V_o / I_n$, имеющим размерность сопротивления и называемым трансимпеданс, в связи с чем такие ОУ называют трансимпедансными.

При включении трансимпедансных ОУ с отрицательной обратной связью по схеме неинвертирующего усилителя (на рис. 1: V_1 — общий провод, $V_2 = U_{бк}$; $Z_1 = 0$; Z_2 отсутствует) через инвертирующий вход ОУ протекает ток ошибки I_n , пропорциональный входному напряжению на неинвертирующем входе. Через резистор обратной связи Z_f , соединяющий выход усилителя и инвертирующий вход, происходит компенсация тока ошибки с тем, чтобы результирующий ток через инвертирующий вход стремился к нулю. Таким образом, в трансимпедансных ОУ, так же как и в обычных, отрицательная обратная связь компенсирует погрешность усилителя: для обычного ОУ это дифференциальное напряжение между входами $V_{дб}$, а для трансимпедансного — ток ошибки I_n .

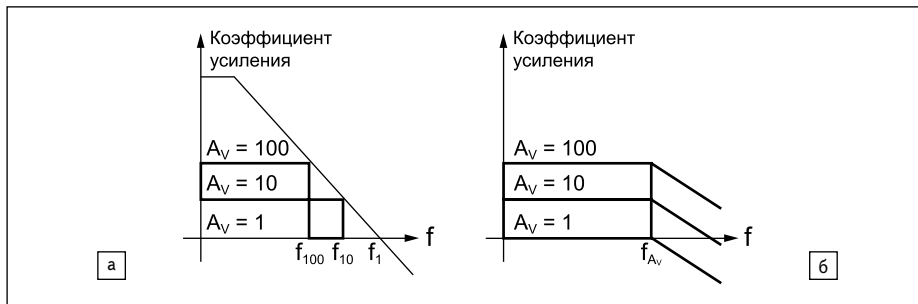


Рис. 6. АЧХ усилителей при разных коэффициентах усиления по напряжению на ОУ: а) VFA; б) CFA

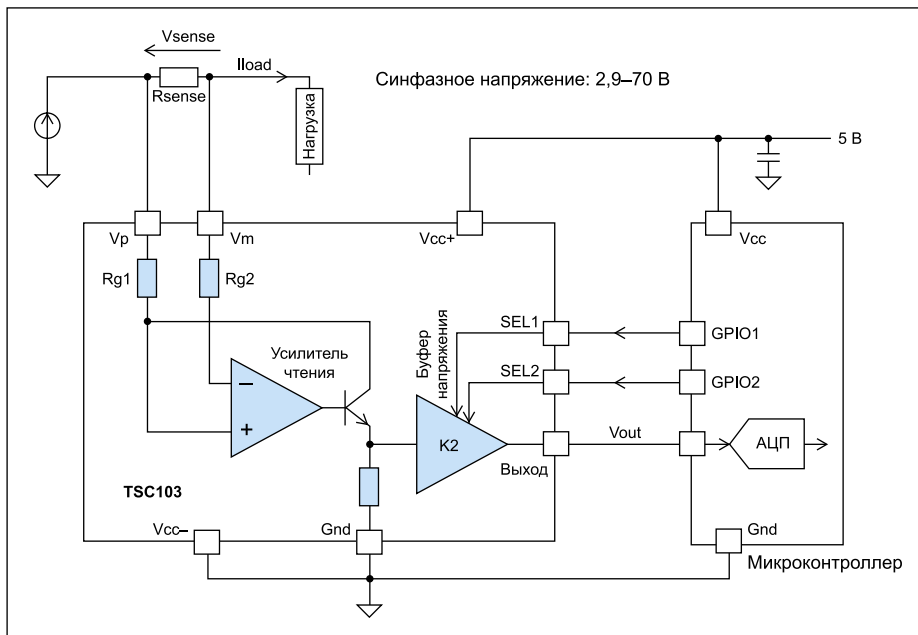


Рис. 7. Схема измерения тока при включении резистивного датчика в высокопотенциальную цепь использованием специализированного ОУ TSC103

Главное отличие усилителей CFA по сравнению с усилителями VFA состоит в том, что подбором в определенных пределах сопротивлений резисторов обратной связи Z_G и Z_F можно получить, как показано на рис. 6, весьма широкую полосу усиливаемых частот, практически не зависящую от коэффициента усиления. Таким образом, усилители с ООС на ОУ CFA при одинаковом коэффициенте усиления по напряжению получают более широкополосными, чем усилители на ОУ VFA.

Сравним параметры типовых высокоскоростных операционных усилителей STMicroelectronics VFA TSH81/2/4 и CFA TSH350 (таблица). Видно, что ОУ TSH350 по скорости нарастания выходного напряжения и полосе усиливаемых частот удовлетворяет требованиям к усилителям видеосигналов высокой четкости и может быть с успехом использован в современной видеотехнике. Оба операционных усилителя оптимизированы для работы с сопротивлением нагрузки 150 Ом и отличаются чрезвычайно малыми уровнями шумов и нелинейных искажений.

Широкое распространение светодиодных источников света потребовало от раз-

работчиков создания эффективных источников питания с токовым выходом, одним из основных элементов которых являются резистивные датчики тока. Существуют два основных метода включения резистивных датчиков — в цепь общего провода или в высокопотенциальную цепь. В первом случае датчик включается между нагрузкой и отрицательным выводом источника питания, во втором — между положительным выводом источника питания и нагрузкой. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. Преимуществом первого является возможность использования для усиления сигнала датчика обычных прецизионных ОУ, однако из-за того, что включение датчика в цепь общего «земляного» провода вызывает появление напряжения между «землей» самого устройства и общим «земляным» проводником, в измеряемый сигнал вносятся значительные шумы, и точность измерений получается весьма низкой [4].

Измерения по второму методу отвечают требованиям точности и безопасности, но при этом необходимы специализированные операционные усилители, отлича-

ющиеся большим значением максимально допустимого синфазного напряжения при минимальном напряжении смещения и его дрейфа и возможностью работы при низком однополярном напряжении питания. Параметры ОУ STMicroelectronics для усиления сигналов датчиков тока приведены в таблице. Усилители работают без отрицательной обратной связи и имеют фиксированный коэффициент усиления (для TSC101 — три значения для модификаций A/B/C соответственно, для TSC103 — регулируемый путем подачи управляющих напряжений на специальные выводы SEL1 и SEL2). Типовая схема включения ОУ TSC103 с однополярным питанием приведена на рис. 7. Следует отметить, что этот усилитель может работать и при двуполярном напряжении питания ± 5 В в диапазоне синфазных входных напряжений от $-2,1$ до $+65$ В.

Еще один распространенный тип специализированных ОУ — аналоговые компараторы. По сути, это высококачественные быстродействующие операционные усилители с логическим выходом, выполненным по двухтактной схеме на биполярных или полевых транзисторах либо по схеме с открытым коллектором (ОК) или открытым стоком (ОС). Компараторы, так же как и обычные ОУ, подразделяются на ИМС общего применения, микро- и маломощные, скоростные и т. д. Большинство компараторов рассчитаны на работу с однополярным питанием и легко сопрягаются с цифровыми устройствами ТТЛ и КМОП. Основным динамическим параметром компаратора является время переключения — временной интервал от момента подачи входного напряжения до момента, когда напряжение на выходе компаратора достигает противоположного логического уровня. Время переключения зависит от дифференциального входного напряжения и состоит из двух частей — времени задержки и времени нарастания (спада) напряжения на логическом выходе.

Важно понимать характерные особенности компараторов по сравнению с обычными операционными усилителями [1]:

- В схемах с компараторами почти никогда не используют отрицательную обратную связь из-за неизбежного самовозбуждения устройства.
- Значения напряжения на входах компаратора различаются.
- Входное сопротивление компаратора относительно невелико и зависит от уровней входных сигналов.
- Выходное сопротивление компаратора сравнительно велико и зависит от уровней выходного напряжения.

Компараторы нашли широкое применение в схемах детекторов нуля, различных генераторах сигналов, аналого-цифровых преобразователях, схемах широтно-импульсных модуляторов и т. п. В списке продукции компании STMicroelectronics есть несколько десят-

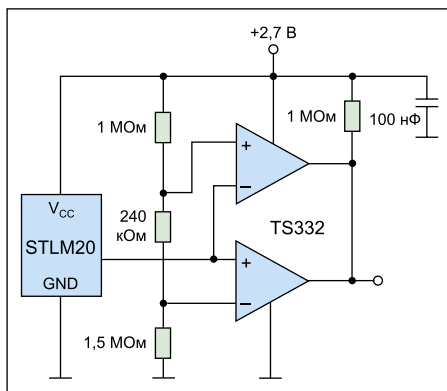


Рис. 8. Схема контроля температуры на сдвоенном компараторе TS332

ков компараторов различных типов, параметры некоторых из них приведены в таблице.

На рис. 8 представлена схема устройства контроля температуры на сдвоенном компараторе TS332. В качестве термочувствительного элемента используется микроощный трехвыводный термодатчик STLM20 производства STMicroelectronics. Резисторы задают параметры температурного «окна», выходы компараторов с открытым коллектором соединены по схеме «монтажное ИЛИ», выходное напряжение подается на схему управления нагревателем.

Широкая номенклатура и невысокая стоимость интегральных операционных усилителей и компараторов STMicroelectronics делают их весьма привлекательными для разработчи-

ков РЭА. Более подробную техническую информацию можно найти на сайте [5].

Литература

1. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: «Додэка-XXI», 2005.
2. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. М.: «Додэка-XXI», 2011.
3. Штрапенин Г. Л. Быстродействующие операционные усилители фирмы National Semiconductor // Chip News — Инженерная микроэлектроника. 2003. № 10.
4. Блэк Б. Усилители датчиков тока для разных приложений // Электронные компоненты. 2011. № 2.
5. www.st.com