

Современные модели интегральных операционных усилителей

Георгий Волович (г. Челябинск)

В статье дан обзор моделей операционных усилителей (ОУ), производство которых начато ведущими фирмами мира в последние годы. Приведена классификация и сравнение характеристик ряда моделей современных ОУ.

Интегральные ОУ давно уже стали основными элементами, «кирпичиками» аналоговых электронных устройств. Начиная от первого интегрального ОУ $\mu A702$ (1963 г.), в мире разработаны и производятся многие сотни моделей интегральных ОУ, параметры которых порой значительно различаются.

Параметры, характеризующие качество ОУ, можно разделить на четыре группы: точностные, динамические, эксплуатационные и параметры, характеризующие усиление сигналов переменного тока.

Точностные параметры

К точностным параметрам относятся: дифференциальный коэффициент усиления по напряжению K_U , коэффициент ослабления синфазного сигнала КОСС, напряжение смещения нуля $U_{см}$, входной ток $I_{вх}$, разность входных токов по инвертирующему и неинвертирующему входам I_p , коэффициент подавления нестабильности питания $K_{п.п}$, коэффициенты температурных дрейфов перечисленных параметров, временные дрейфы, а также шумовые параметры. К точностным параметрам иногда относят также входное дифференциальное и синфазное сопротивление и выходное сопротивление ОУ. Отличие точностных параметров от идеальных проявляется в том, что при постоянных напряжениях на входах выходное напряжение ОУ отличается от расчётного. Для удобства сопоставления погрешность обычно приводят ко входу ОУ.

Динамические параметры ОУ

Параметры, характеризующие быстродействие ОУ, можно разделить на две группы: параметры для малого

и большого сигналов. К первой группе динамических параметров относятся: полоса пропускания $f_{п}$, частота единичного усиления f_T (или произведение усиления на полосу пропускания (GBP)) и время установления t_y . Эти параметры называются малосигнальными, т.к. они измеряются в линейном режиме работы каскадов ОУ ($\Delta U_{вых} \leq 0,2$ В). Ко второй группе относятся скорость нарастания выходного напряжения ρ и мощностная полоса пропускания f_p . Эти параметры измеряются при большом выходном сигнале ОУ (более 2 В).

Параметры, характеризующие усиление сигналов переменного тока

Эти характеристики имеют особое значение для аудиоусилителей и скоростных ОУ, применяемых чаще всего в системах телекоммуникаций.

Отношение сигнал/шум (SNR) – это отношение среднеквадратического значения входного сигнала к среднеквадратическому значению шума, который определяется как сумма всех остальных спектральных компонент, включая гармоники, но исключая постоянную составляющую. Измеряется для входного сигнала с уровнем на 1 дБ ниже полной шкалы.

Отношение сигнал/(шум + искажения) (SINAD) по смыслу мало отличается от рассмотренного выше отношения сигнал/шум (SNR) за исключением добавленных искажений – важных при конструировании аудио- и радиотехники. Сигнал – это среднеквадратическое значение основной гармоники. Шум + искажения – это среднеквадратическое значение суммы всех остальных компонент, кроме основной гармоники и постоянной составляющей.

Суммарный коэффициент гармоник (THD) – это отношение среднеквадратического значения суммы гармоник к среднеквадратическому значению основной гармоники, выраженное в дБ. Определяется по формуле:

$$THD = 10 \log \left(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_i^2 \right) / V_1^2,$$

где V_1 – среднеквадратическое значение основной гармоники, а $V_2 \dots V_i$ – среднеквадратические значения гармоник от второй до i . Обычно $i = 6$ или 9. Изготовители ОУ часто приводят данные по относительным уровням (в дБ) второй и третьей гармоник на нескольких частотах.

Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR) – это выраженная в децибелах разность между среднеквадратическими значениями основной составляющей входного сигнала и максимальной паразитной составляющей (максимальной гармоникой или шумовой компонентой).

Интермодуляционные искажения (IMD). Когда на вход усилителя подаётся сигнал, представляющий собой сумму двух синусоид с разными частотами, f_a и f_b , то вследствие нелинейности переходной характеристики ОУ в выходном сигнале будут присутствовать составляющие с суммарными и разностными частотами $m f_a \pm n f_b$, где $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Интермодуляционными членами называются те, для которых ни m , ни n не равны нулю. Например, члены второго порядка – это $(f_a + f_b)$ и $(f_a - f_b)$, а члены третьего порядка – это $(2f_a + f_b)$, $(2f_a - f_b)$, $(f_a + 2f_b)$ и $(f_a - 2f_b)$. Если ОУ тестируется с использованием международного стандарта CCIF, то на его вход подаются две синусоиды с частотами вблизи верхней граничной частоты входного сигнала. В этом случае частоты членов 2-го и 3-го порядка существенно различаются. Члены 2-го порядка обычно значительно отстоят по частоте от входных синусоид, тогда как частоты членов 3-го порядка обычно близки

к входным частотам. Вследствие этого члены 2-го и 3-го порядка в спецификациях указываются отдельно. Наиболее важны члены третьего порядка. IMD вычисляется аналогично THD и равно отношению среднеквадратических значений суммы отдельных интермодуляционных искажений к среднеквадратическому значению основной гармоники, выраженному в децибелах.

Коэффициент подавления двутонных интермодуляционных искажений. Это отношение мощности одного из двух входных сигналов к мощности максимальной интермодуляционной компоненты 3-го порядка.

Эксплуатационные параметры ОУ

Эксплуатационные параметры ОУ определяют допустимые режимы работы его входных и выходных цепей и требования к источникам питания, а также температурный диапазон работы усилителя. Ограничения эксплуатационных параметров обусловлены конечными значениями пробивных напряжений и допустимыми токами через транзисторы, а также особенностями схемотехники ОУ. К основным эксплуатационным параметрам относятся: номинальное значение питающего напряжения $U_{п}$; допустимый диапазон питающих напряжений; ток, потребляемый усилителем без нагрузки от источника, $I_{пот}$; максимальный выходной ток $I_{вых.макс}$; максимальное и минимальное значения выходного напряжения при номинальном питании; максимально допустимые значения синфазных и дифференциальных входных напряжений.

Классификация ОУ

В настоящее время в мире изготавливаются сотни наименований интегральных ОУ. Всё это многообразие можно разделить на группы, объединённые общей технологией и схемотехникой, близкими точностными, динамическими или эксплуатационными параметрами, причём эти группы могут пересекаться, т.е. содержать общие элементы.

С точки зрения внутренней схемотехники, ОУ можно разделить на биполярные, биполярно-полевые и КМОП (на комплементарных полевых транзисторах с изолированным

затвором). В биполярно-полевых ОУ полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом или МОП-транзисторы обычно используются в качестве входных в дифференциальном входном каскаде. За счёт этого достигается высокое входное сопротивление и малые входные токи.

Используя перечисленные выше параметры в качестве классификационных признаков, можно условно разбить выпускаемые в настоящее время модели ОУ на следующие группы:

- общего назначения;
- прецизионные (в том числе малошумящие);
- быстродействующие;
- мощные (в том числе высоковольтные);
- микромощные.

ОУ общего назначения

Как следует из названия, для этой группы ОУ характерны посредственные показатели по всем группам параметров: $K_U < 10^5$, $U_{см} > 0,1$ мВ, $f_T < 5$ МГц, поэтому они в основном применяются в тех изделиях, где одним из важнейших требований является низкая цена.

Характерным представителем современных ОУ общего назначения является TS321 фирмы Texas Instruments. Этот усилитель выполнен по классической схеме, происходящей от схемы ОУ $\mu A741$, разработанной Д. Фуллагаром ещё в 1968 г. Поэтому интересно сравнить параметры (типичные значения) TS321 и ОУ $\mu A741$, выпускаемого этой же фирмой. Важнейшие параметры этих ОУ приведены в табл. 1.

Из сравнения видно, что у новейшей модели расширен диапазон питающих напряжений в сторону понижения, снижены смещение нуля, входные токи, и в особенности – их разность. При заметном снижении потребляемого тока мощность выходного каскада возросла.

Близкие характеристики имеют выпускаемые фирмой National Semiconductor двухканальный LM2904 и четырёхканальный LM2902. Ещё один пример – недорогой низковольтный AD8515 фирмы Analog Devices, имеющий полный размах (rail-to-rail) входа и выхода (RRIO) и лучшие динамические характеристики (GBP = 5 МГц). Для этой группы ОУ характерной является низкая це-

на (менее 0,3 долл. при оптовых поставках).

Прецизионные ОУ

К прецизионным обычно относят ОУ, имеющие $K_U > 10^5$, $U_{см} < 0,1$ мВ и низкие входные токи (менее 10 нА), причём наиболее важным требованием является низкое смещение нуля. Величина $U_{см}$ определяется в основном разбросом напряжений эмиттерно-базовых переходов входных транзисторов дифференциального каскада в усилителях на биполярных транзисторах или напряжений затвор-исток в ОУ с полевыми транзисторами на входах. Эта величина составляет 0,1...5 мВ для усилителей общего назначения с биполярными и 0,5...20 мВ с полевыми транзисторами на входе. В настоящее время используются два способа снижения начального смещения нуля:

- а) балансировка ОУ в процессе производства;
- б) применение схем автоматической компенсации смещения нуля.

ОУ с технологической балансировкой

Балансировка осуществляется либо путём лазерной подгонки на открытом кристалле, либо цифровой настройкой (*DigitTrim*) в конце технологического цикла.

Из новых моделей ОУ с лазерной подгонкой следует отметить семейство OPx177 фирмы Analog Devices. Эта модель продолжает линию OP07, OP77 и OP177. В целом наблюдается общая тенденция проектирования современных интегральных микросхем – понижение питающего напряжения. Некоторые фирмы, например

Таблица 1. Сравнение параметров ОУ TS321 и ОУ $\mu A741$

Параметры	TS321	$\mu A741$
Напряжение питания, В	$\pm(1,5...15)$	$\pm(3,5...18)$
K_U , В/мВ	100	200
$U_{см}$, мВ	0,5	6
$I_{вх}$, нА	20	80
$I_{р}$, нА	2	20
КОСС, дБ	85	90
GBP, МГц	0,8	1
ρ , В/мкс	0,4	0,5
$I_{пот}$, мА	0,6	2,8
Выходной ток короткого замыкания, мА	40	25

Linear Technology, выпускают преимущественно ОУ на напряжение до 6 В. Модификации этих моделей, допускающие питание до 11 В, имеют в наименовании суффикс HV (высоковольтные). В этом случае ОРх177 можно условно отнести к «высоковольтным» ОУ, т.к. диапазон его напряжений питания составляет $\pm(2,5...15)$ В. К достоинствам этого ОУ можно отнести также малый ток потребления (0,5 мА) и низкий уровень шума (8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$). Типичное значение смещения нуля этого усилителя составляет 15 мкВ. Другой пример «высоковольтного» прецизионного ОУ – AD8675, рабочий диапазон питающих напряжений которого – $\pm(5...18)$ В. Однако, в отличие от ОРх177, он обладает полным размахом выхода (RRO) и меньшим уровнем шума (2,8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$). Типичное значение смещения нуля – 10 мкВ.

Прекрасными характеристиками обладает сдвоенный ОУ LTC6078 фирмы Linear Technology. Выполненный на основе КМОП-схемотехники, он имеет типовое значение смещения нуля 7 мкВ (максимальное – 25 мкВ) при очень низких входных токах (типично 0,2 пА, максимально – 1 пА), что делает предпочтительным его применение для прецизионного преобразования сигналов высокоимпедансных датчиков, таких как фотодиоды, пьезоакселерометры, микроэлектродные датчики и т.д. Низкое потребление (54 мкА на усилитель) в сочетании с наличием вывода для отключения (Shutdown), а также низкое напряжение питания (2,7...5,5 В) и полные размахи входа и выхода обеспечивают его эффективное применение в системах с батарейным питанием. Для усилителя с таким низким потреблением LTC6078 имеет сравнительно невысокий уровень шума (16 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$), однако его динамические характеристики ($\text{GBP} = 750$ кГц, $\rho = 0,05$ В/мкс) посредственны.

Близкими параметрами обладает AD8603, у которого подгонка смещения нуля осуществляется без лазера запатентованным способом, который фирма не разглашает. Типичные значения параметров этого ОУ: $U_{\text{см}} = 12$ мкВ, $I_{\text{вх}} = 0,2$ пА, напряжение питания 1,8...5,5 В при токе потребления 40 мкА. При этом максимальный ток нагрузки составляет 80 мА.

Фирма Maxim выпускает два ОУ с подобными точностными парамет-

рами – компенсированный MAX4236 и декомпенсированный MAX4237. За счёт применения входного КМОП-каскада типичное значение входных токов – 1 пА. Типичное значение смещения нуля – 5 мкВ, максимальное – 20 мкВ. Ток потребления больше, чем у рассмотренных выше моделей, – 0,45 мА, но зато выше и быстродействие – $\text{GBP} = 1,7$ МГц у MAX4236 и 7,5 МГц – у MAX4237 (при коэффициенте усиления с обратной связью K не менее 5).

Ещё один пример ОУ такого типа – LMP7701 фирмы National Semiconductor. Этот ОУ имеет более широкий диапазон питающих напряжений (2,7...12 В), большой входной ток – 10 пА и более высокое быстродействие ($\text{GBP} = 2,5$ МГц, $\rho = 0,9$ В/мкс) при токе потребления 0,7 мА.

Альтернативой лазерной подгонке смещения нуля является цифровая настройка. В 1999 г. фирма Analog Devices начала выпускать семейство прецизионных усилителей AD8601/2/4, так называемых DigiTrim с цифровой подгонкой смещения нуля. На кристалле усилителя встроена цифровая часть, содержащая нечто вроде упрощённых ЦАП. После изготовления микросхемы осуществляется цифровая подгонка при низких и высоких уровнях синфазного входного напряжения, затем по специальному выводу программируется встроенная память путём пережигания перемычек. Этот способ настройки оказывается дешевле, чем лазерная подгонка элементов на открытом кристалле. Более совершенная модель этой фирмы – одно-/двух-/четырёхканальный КМОП ОУ AD8615/6/8 – обладает типичными смещением нуля 23 мкВ, входным током 0,2 пА при низком уровне шума (8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$) и хороших динамических характеристиках ($\text{GBP} = 24$ МГц, $\rho = 12$ В/мкс).

Одна из последних моделей ОУ этого типа AD8661 имеет типичное смещение нуля 30 мкВ и входные токи 0,3 пА. Диапазон напряжения питания 5...16 В при полном размахе выхода. Оптовая цена этого усилителя – 0,78 долл.

ОУ с автоматической установкой нуля

Радикально улучшить точностные свойства ОУ при усилении сигналов постоянного тока позволяет приме-

нение схем автоматической компенсации смещения нуля. В ранних моделях ОУ широко применялась система компенсации смещения нуля по системе модулятор – усилитель переменного тока – демодулятор (МДМ). В настоящее время эта система практически не применяется из-за плохих частотных свойств и высокого уровня помех. Кроме того, для реализации канала МДМ требуется много внешних элементов.

Лучшими характеристиками обладают усилители с периодической компенсацией дрейфа. В переводной литературе такие ОУ обычно называют усилителями с автоматической установкой нуля (auto-zero amplifier (AZA)). Принцип действия AZ-усилителей описан, например, в книге [1, с. 39]. Такие ОУ выпускаются более 20 лет, вначале с использованием внешних конденсаторов хранения, а в последние годы – с конденсаторами на кристалле. Старые модели, такие как ICL7650, MAX432 и др., работали с относительно низкими частотами переключения (200...300 Гц), что порождало появление коммутационного шума и комбинационных гармоник в низкочастотной области, важной для применения усилителей этого класса. Современные модели имеют более высокие частоты переключения, причём в некоторых моделях ОУ алгоритм задания периода переключения имеет сложный, часто стохастический характер, что позволяет снизить уровень комбинационных гармоник и коммутационного шума и очистить от этих компонентов довольно широкую область. Для иллюстрации на рис. 1а представлен график спектральной плотности шума ОУ MAX432, а на рис. 1б – аналогичный график более современной модели ОУ LMP2011/2. Система автоматической установки нуля переносит низкочастотный шум усилителя в область высоких частот, поэтому AZ-усилители не имеют фликкер-шума типа $1/f$, характерного для других ОУ.

Усилитель LMP2011/2 имеет следующие типичные значения параметров: $U_{\text{см}} = 0,12$ мкВ, температурный дрейф – 0,015 мкВ/°С, $I_{\text{вх}} = 3$ пА, шум в полосе частот 0...10 Гц – 0,85 мкВ от пика до пика (п–п).

Linear Technology выпускает ОУ LTC2054, работающий с частотой переключения 1 кГц. Этот ОУ имеет следующие типичные параметры: $U_{\text{см}} =$

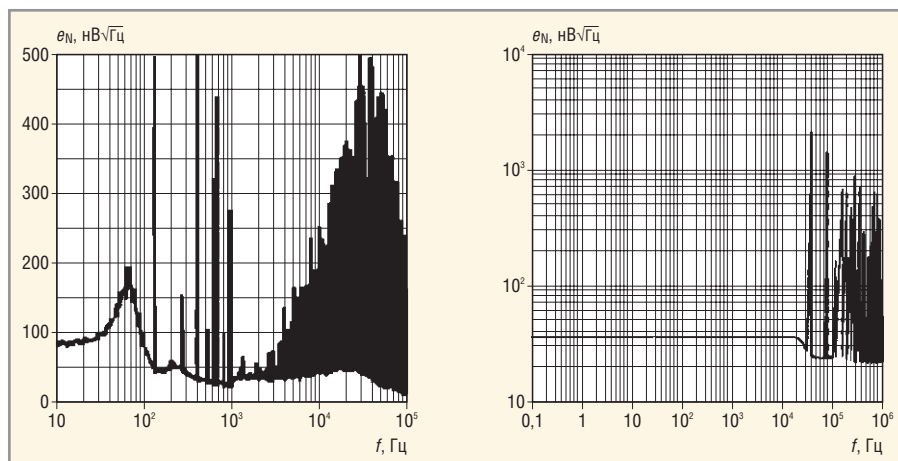


Рис. 1. Графики спектральной плотности напряжения шума, приведённого ко входу ОУ МАХ432 (а) и LMP2011/2 (б)

= 0,5 мкВ, температурный дрейф – 0,02 мкВ/°С, $I_{\text{вх}} = 1$ пА, шум в полосе частот 0...10 Гц – 1,6 мкВ (п–п). Достоинством этого прибора является экономичность. Он потребляет ток всего 0,17 мА (другие аналогичные ОУ – около 1 мА).

Прекрасными точностными характеристиками обладает недорогой (0,95 долл.) AD8628, широко представленный на российском рынке. При частоте переключения 15 кГц он имеет рекордно малые значения шума в полосе частот 0...10 Гц – 0,5 мкВ (п–п) и температурного дрейфа $U_{\text{см}}$ (типично – 2 нВ/°С, что даёт основание фирме-изготовителю называть его усилителем с нулевым дрейфом).

Фирма Maxim выпускает интересное семейство ОУ МАХ4238/9, частота переключения которых стохастически изменяется в пределах от 10 до 15 кГц. Это, в частности, позволяет получить рекордно низкое значение смещения нуля (типично 0,1 мкВ) при сравнительно низком уровне шума (в полосе частот 0...10 Гц – 1,5 мкВ (п–п)) и высоком быстродействии (GBP декомпенсированного МАХ4239 равна 6,5 МГц при $K > 10$). По данным фирмы, эти усилители содержат 821 транзистор.

Быстродействующие ОУ

К быстродействующим ОУ в настоящее время можно отнести усилители с $\text{GBP} > 20$ МГц. При этом выпускаемые модели можно условно разбить на две группы:

- ОУ с умеренным быстродействием и высокими точностными параметрами;

- ОУ с высоким быстродействием и посредственными точностными параметрами.

ОУ первой группы предназначены для применения в широкополосных предусилителях для фотодиодов и ультразвуковых датчиков, широкополосных составных усилителях. Из усилителей этой группы одним из наиболее точных является упомянутый выше AD8615. А вот AD8067, хотя и несколько проигрывает ему по точности (типично $U_{\text{см}} = 200$ мкВ, $I_{\text{вх}} = 1$ пА, $K_U = 900$ В/мВ), зато значительно превосходит по быстродействию ($\text{GBP} = 200$ МГц, $\rho = 640$ В/мкс). Этот усилитель устойчив при $K > 8$ и обладает полным размахом выхода при широком диапазоне напряжения питания 5...24 В.

Фирма Texas Instruments выпускает быстродействующий ОУ THS4601 для двуполярного питания $\pm(5...15)$ В. Располагая неплохими точностными параметрами (типично $U_{\text{см}} = 1$ мВ, $I_{\text{вх}} = 30$ пА, $K_U = 200$ В/мВ), он характеризуется также высоким быстродействием ($\text{GBP} = 180$ МГц, $\rho = 100$ В/мкс). В отличие от предыдущей модели, он устойчив при любом коэффициенте усиления вплоть до единицы.

Ещё более высокими динамическими характеристиками при неплохой точности обладает LMH6624. При типичных $U_{\text{см}} = 100$ мкВ, $K_U = 20$ В/мВ его динамические характеристики ($\text{GBP} = 1,5$ ГГц, $\rho = 400$ В/мкс) являются рекордными для ОУ этой группы. Входные токи великоваты (13 мкА), но малая разность токов (типично 100 нА) позволяет путём правильного выбора номиналов резисторов обратной связи уменьшить смещение нуля, обусловленное вход-

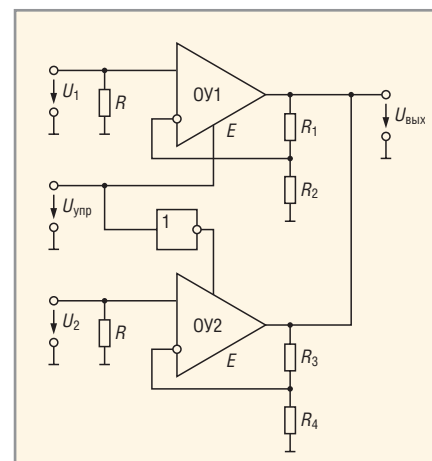


Рис. 2. Схема переключателя высокочастотных сигналов на ОУ

ными токами. Усилитель может питаться от источников 5...12 В, в том числе однополярных, отдавая в нагрузку до 100 мА. Минимальный коэффициент усиления – 10. Изготовитель рекомендует использовать его в том числе и в профессиональных аудиосистемах. LMH6624 имеет прекрасные шумовые характеристики: спектральная плотность шума на частоте 1 МГц составляет всего 0,92 нВ/ЦГц.

Быстродействующие ОУ второй группы применяются в оборудовании высокочастотных линий связи, в качестве драйверов для скоростных АЦП, выходных буферов скоростных ЦАП высокого разрешения, в том числе входящих в состав генераторов сигналов произвольной формы, а также в качестве видеоключей. С точки зрения схемотехники, такие ОУ делятся на две группы: ОУ с обратной связью по напряжению (ОСН-усилители) и ОУ с обратной связью по току (ОСТ-усилители). Одним из важнейших достоинств ОСН-усилителей является большая свобода выбора цепей обратной связи, а преимущество ОСТ-усилителей состоит в больших скоростях нарастания выходного напряжения и, как следствие, меньших искажениях сигналов большой амплитуды. Детально особенности ОСТ-усилителей изложены, например, в книге [1, с. 164].

Значительная часть моделей скоростных ОУ имеет выводы для отключения питания, обозначаемые Shutdown или Disable, что позволяет использовать их в качестве ключей для переключения высокочастотных сигналов. Обычные КМОП-ключи на частотах в десятки и сотни мегагерц

вносят значительные нелинейные и частотные искажения, ослабляют передаваемые сигналы. Схема коммутатора 2×1 на ОУ приведена на рис. 2. Два скоростных ОУ соединены выходами, но это не приводит к конфликту, т.к. один из них выключен управляющим сигналом низкого уровня, поданным на вывод «Е». При этом его выходное сопротивление имеет значительно большую величину, чем выходное сопротивление включенного ОУ. Например, полное выходное сопротивление включенного ОУ ADA4899-1 при $K=1$ на частоте 1 МГц равно 0,07 Ом, а выключенного – 15 кОм. На частоте 10 МГц эти же величины составляют, соответственно, 0,7 Ом и 1,8 кОм.

Фирма Maxim выпускает *ОСН-усилитель* MAX4267, обладающий $GBP = 1,5$ ГГц и $\rho = 900$ В/мкс. Его линейность при усилении высокочастотных сигналов характеризуется относительным уровнем второй гармоники –87 дБ на частоте 10 МГц. Этот ОУ устойчив при $K \geq 5$, имеет сравнительно большой коэффициент усиления (типично $K_U = 50$ В/мВ) и работает от напряжения 4,5...8 В. Более новая модель этой же фирмы MAX4450 отличается умеренными динамическими характеристиками ($GBP = 210$ МГц, $\rho = 485$ В/мкс, относительный уровень второй гармоники –60 дБ на частоте 10 МГц при $K = 1$), но имеет полный размах выхода при диапазоне питания 4,5...11 В и выпу-

скается в сверхминиатюрном корпусе SC70-5.

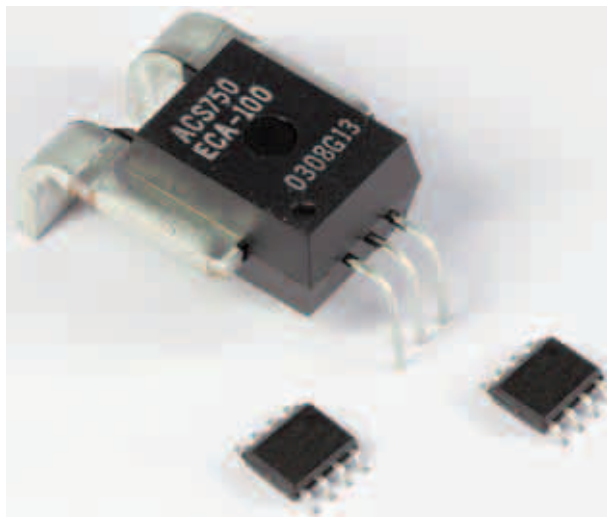
Полностью компенсированный ОУ THS4271/5 фирмы Texas Instruments отличается высокими динамическими характеристиками ($GBP = 400$ МГц, $\rho = 1000$ В/мкс, относительный уровень второй гармоники –96 дБ на частоте 10 МГц), а также низким уровнем шума (3 нВ/ $\sqrt{Гц}$). Диапазон питающих напряжений 5...15 В. Коэффициент усиления типично 5 В/мВ.

Уже упоминавшийся ADA4899-1 фирмы Analog Devices имеет ещё более низкий уровень шума – 1 нВ/ $\sqrt{Гц}$, но худшие динамические характеристики: $GBP = 400$ МГц, $\rho = 310$ В/мкс. Этот ОУ обладает неплохими точно-

Таблица 2. Основные параметры ОУ общего применения, прецизионных и микроощных ОУ

Наименование ОУ	Напряжение питания, В	Коэффициент усиления, В/мВ	КОСС, дБ	$U_{см}$, мкВ	Входной ток, нА	Разность входных токов, нА	GBR, МГц	Скорость нарастания, В/мкс	Ток потребления, мА	Максимальный выходной ток, мА	$e_{ш}$, нВ/ $\sqrt{Гц}$	Примечание
ОУ общего применения												
TS321	±(1,5...15)	100	85	500	20	2	0,8	0,4	0,6	40	50	–
LM2904	±(1,5...16)	100	85	2000	45	3	1,2	0,2	0,5	40	–	Двухканальный
AD8515	1,8...5	400	50	1000	0,002	0,001	5	2,7	0,3	20	22	RRIO
AD8591	2,5...6	30	47	5000	0,005	0,001	3	5	0,75	250	30	Есть вывод Shutdown
OPA363	1,8...5,5	100	90	500	0,001	0,001	7	5	0,65	20	17	Есть двух- и четырёхканальные
Прецизионные ОУ												
OP1177	±(2,5...15)	2000	126	15	0,5	0,2	1,3	0,7	0,5	10	8	Есть двух- и четырёхканальные
AD8675	±(5...18)	2000	130	10	0,5	0,1	10	2,5	2,3	20	2,8	RRO
LTC6078	2,5...5,5	3000	110	7	0,0002	0,0001	0,75	0,05	0,054	8	18	Сдвоенный
AD8603	1,8...5	1000	100	12	0,0002	0,0001	0,4	0,1	0,04	80	25	RRIO
MAX4237	2,4...5,5	2000	102	5	0,001	0,001	7,5	1,3	0,35	10	14	$K > 5$
LMP7701	2,7...12	5000	138	37	0,0002	40 фА	2,5	1,1	0,8	80	9	RRIO
AD8615	2,7...5,5	1500	100	23	0,0002	0,0001	24	12	1,7	150	10	Есть двух- и четырёхканальные
AD8661	5...16	420	110	30	0,0003	0,0002	4	3,5	1,2	140	12	–
LMP2011	2,7...5,5	3000	130	0,12	–0,003	0,006	3	4	0,9	12	35	Есть двухканальный
LTC2054HV	2,7...12	5600	130	0,5	0,003	0,006	0,5	0,5	0,175	4	–	Шум 1...6 мкВ (п–п), 0...10 Гц
AD8628	2,7...5,5	18 000	140	1	0,03	0,05	2,5	1	0,85	30	22	Шум 0,5 мкВ (п–п), 0...10 Гц
MAX4239	2,7...5,5	30 000	140	0,1	0,001	0,002	6,5	1,6	0,6	20	–	$K > 10$
Микроощные ОУ												
LT1672	2,2...36	500	106	150	0,25	0,02	0,012	0,005	0,0015	1	185	$K > 5$
OPA336	2,3...5,5	560	90	60	0,001	0,001	0,1	0,03	0,02	4	40	Есть двух- и четырёхканальные
MAX4464	1,8...5,5	1000	95	500	0,2	0,012	0,04	0,02	600 нА	10	150	$K > 5$
MAX4289	1...5,5	300	110	200	5	0,5	0,017	0,006	0,01	18	–	Самый низковольтный ОУ
MAX4036	1,4...3,6	240	76	200	0,001	0,0003	0,004	0,004	800 нА	10	500	Есть двухканальный
LPV511	2,7...12	300	115	200	0,11	0,001	0,027	0,008	880 нА	0,5	320	RRIO
OP281	2,7...12	13	95	1500	3	0,1	0,095	0,025	0,003	1	75	Есть двухканальный

Датчики тока на эффекте Холла



ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Диапазон измеряемых токов $\pm(5...200)$ А
- Сверхнизкое сопротивление токовой шины
- Хорошая линейность
- Полоса частот до 50 кГц
- Промышленный диапазон температур $-40... +85$ °С
- Напряжение изоляции до 3 кВ

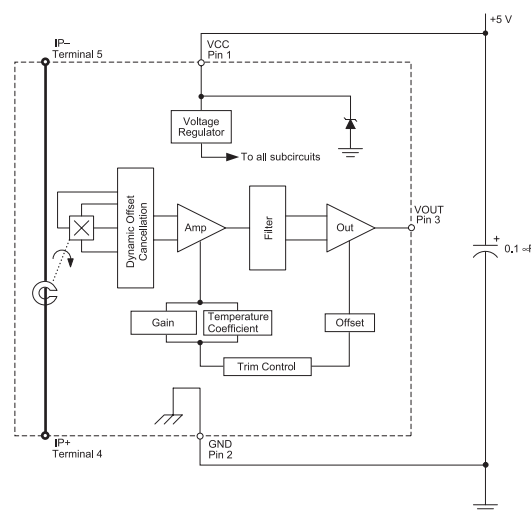
Области применения

- Источники вторичного электропитания
- Корректоры коэффициента мощности
- Автоэлектроника
- Системы промышленной автоматике
- Бытовая электроника

Параметры датчиков тока Allegro

Наименование	Диапазон измеряемых токов (А)	Чувствительность (мВ/А)	Полоса рабочих частот (кГц)	Корпус
ACS704-005	± 5	133	50	
ACS704-015	± 15	100		
ACS752-050	± 50	40		
ACS752-100	± 100	20	35	
ACS754-050	± 50	40		
ACS754-100	± 100	20		
ACS754-130	± 130	14,2		
ACS754-150	± 150	13,3		
ACS754-200	± 200	10		

Конструкция датчиков тока Allegro



Функциональная схема датчиков тока

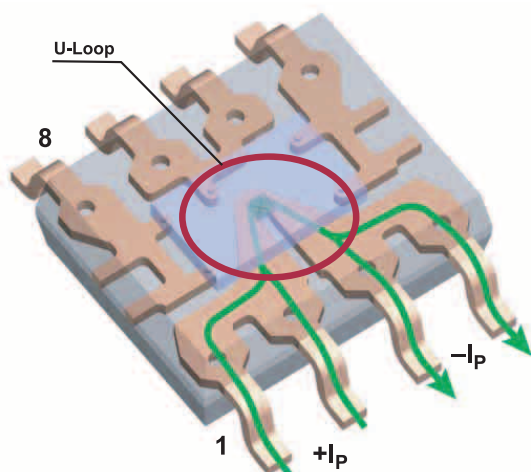
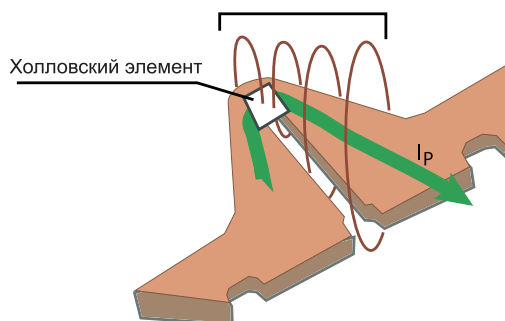


Схема протекания тока в датчике ACS704 и конструкция токовой шины

Магнитный поток, порождаемый протекающим в шине током



Протекающий по шине ток порождает магнитное поле, силовые линии которого ортогональны проводнику. Силовые линии, перпендикулярные плоскости поверхности элемента Холла, вызывают Холловскую ЭДС.

Конструкция токовой шины и элемент Холла в датчике ACS704

ственными характеристиками (типичные значения $K_U = 22$ В/мВ, $U_{CM} = 35$ мкВ, $I_{BX} = 100$ нА).

Один из лучших ОУ в этой группе – AD8099. Обладая очень низким шумом (0,95 нВ/ЦГц) и малыми искажениями (относительный уровень второй гармоники –92 дБ на частоте 10 МГц при $K = 2$), этот усилитель имеет также высокие динамические характеристики ($GBP = 3,8$ ГГц, $\rho = 1350$ В/мкс при $K = 10$). Диапазон питающих напряжений 5...12 В при токе потребления 15 мА. Недостаток этого ОУ: при $K < 15$ требуются внешние цепи частотной коррекции.

Частотные свойства ОСТ-усилителей обычно характеризуют полосой пропускания на уровне –3 дБ при заданном коэффициенте усиления с включенной обратной связью. Примером современного сверхскоростного ОСТ-усилителя может служить LMH6703 фирмы National Semiconductor. Он обладает полосой 1,2 ГГц

при $K = 2$ и $\rho = 4500$ В/мкс. Относительный уровень второй гармоники –75 дБ на частоте 10 МГц при $K = 2$. LMH6703 оснащён выводом Shutdown, причём время включения и выключения составляет всего 10 нс (у большинства скоростных ОУ – примерно в 10 раз больше). Этот усилитель имеет низкий уровень шума –2,3 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и работает от источников $\pm(4...6)$ В.

Усилитель AD8011 располагает несколько худшими динамическими характеристиками (полоса 300 МГц при $K = 1$ и $\rho = 2000$ В/мкс), но зато он самый экономичный в своем классе (ток потребления 1 мА при напряжении 5...12 В). Ещё один ОСТ-усилитель этой же фирмы, AD8000, потребляя ток 12 мА, имеет полосу пропускания 1,5 ГГц при $K = 1$ и $\rho = 4100$ В/мкс. Модель в корпусе LFCSP создаёт вторую гармонику на частоте 10 МГц на уровне –85 дБ при питании ± 5 В.

Рекордной скоростью нарастания среди усилителей этой группы обладает THS3201 фирмы Texas Instruments – 10 500 В/мкс. Его полоса пропускания – 1,8 ГГц при $K = 1$.

Мощные и высоковольтные ОУ

К мощным ОУ сегодня можно отнести усилители с выходным током более 500 мА (п–п), а к высоковольтным – с выходным напряжением более 50 В (п–п). Мощными можно также считать ОУ, отдающие в нагрузку мощность свыше 1 Вт. Лидирующее положение на рынке мощных и высоковольтных ОУ последние годы занимает фирма Apex Microtechnology. На сегодня самым высоковольтным ОУ является гибридный PA89A этой фирмы, допускающий напряжение питания до ± 600 В. Из новых разработок Apex можно обратить внимание на гибридный PA52 с напряжением питания до ± 200 В и выходным током до ± 40 А (пиковое значение ± 80 А).

Таблица 3. Основные параметры мощных и быстродействующих ОУ

Наименование ОУ	Напряжение питания, В	K_U , В/мВ (Z_T , МОм)	КОСС, дБ	U_{CM} , мВ	Входной ток, нА	Вторая гармоника на частоте 10 МГц (ТНД), дБ	GBP (полоса на уровне –3 дБ), МГц	Скорость нарастания, В/мкс	Ток потребления, мА	Макс. вых. ток, А	$e_{ш}$, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	Примечание
Мощные ОУ												
PA52A	$\pm(3...100)$	130	100	2	0,01	–	3	50	30	40	—	Мощность 400 Вт
PA240	$\pm(50...175)$	63	94	25	0,05	–	3	30	2,2	0,06	—	Мощность 14 Вт, монолитный
MP108A	$\pm(15...100)$	63	92	1	0,07	–	10	170	50	12	—	Мощность 100 Вт
LM675	$\pm(8...30)$	30	90	1	200	–	5,5	8	18	3	—	Мощность 30 Вт, $K > 10$
OPA567	2,7...5,5	2000	100	0,5	0,001	–	1,2	1,2	9	2	12	Температурная защита
LT1970	5...36	150	105	0,2	160	–	3,6	1,6	7	0,5	15	Настраиваемое ограничение тока
Быстродействующие ОУ												
ОСН-усилители												
AD8655	2,7...5,5	300	100	0,05	0,01	(–103 дБ, 1 кГц)	28	11	3,7	0,22	2,7	RRIO
AD8067	5...24	1000	106	0,2	0,0006	–70	–54	640	6,5	0,03	6,6	$K \geq 6$
THS4601	$\pm(5...15)$	180	110	1	0,05	–45	–400	100	10	0,05	5,4	–
LMH6624	5...12	10	95	0,1	13 000	–63	–200	400	12	0,1	0,92	$K > 10$
ADA4899-1	4,5...12	22	130	0,035	6000	–80	–535	310	14,7	0,06	1	Режим Disable
MAX4267	4,5...8	50	85	1	3500	–87	–300	900	28	0,045	8	$K \geq 5$
MAX4450	4,5...11	1	95	4	6500	–60	–210	485	6,5	0,05	10	RRIO
THS4271	5...15	5,6	72	5	6000	–96	–1400	1000	22	0,08	3	–
AD8099	5...12	20	105	0,1	6000	–92	–700	1350	15	0,04	0,95	$K \geq 2$
ОСТ-усилители												
LMH6703	$\pm(4...6)$	–	47	1,5	7000	–75	–1200	4500	11	0,09	2,3	Режим Disable
AD8011	5...12 В	–1,3	57	2	5000	–68	–300	2000	1	0,03	2	–
AD8000	4,5...12 В	–0,89	54	1	5000	–85	–1500	4100	12	0,1	1,6	Режим Disable
THS3201	$\pm(3,3...7,5)$	–0,3	71	0,7	14 000	–77	–1800	10500	14	0,1	1,65	–

Усилитель допускает рассеяние мощности до 400 Вт. У этого ОУ неплохие динамические характеристики ($GBP = 3 \text{ МГц}$, $\rho = 50 \text{ В/мкс}$), но мощностная полоса пропускания невелика – всего 90 кГц.

Гибридные усилители очень дороги, поэтому больший интерес для разработчиков представляют монолитные мощные и высоковольтные ОУ. Одна из последних моделей Apex Microtechnology – высоковольтный RA240, способный создать на нагрузке напряжение до $\pm 165 \text{ В}$ при токе до $\pm 60 \text{ мА}$ (пиковое значение $\pm 120 \text{ мА}$). Ток, потребляемый на холостом ходу, – 2,2 мА. Максимальная рассеиваемая мощность – 14 Вт. Коэффициент усиления – 63 В/мВ.

В связи с неудовлетворительным сбытом своих гибридных усилителей фирма Apex Microtechnology начала выпуск ОУ нового типа, так называемых Open Frame. Эта конструкция представляет собой ни что иное, как печатную плату, на которой установлены дискретные SMD-компоненты. Один из усилителей этого типа – MP108A – при напряжении питания $\pm 100 \text{ В}$ отдаёт в нагрузку ток до 10 А. Установленный на охладитель, он способен рассеять мощность до 100 Вт. Усилитель обладает неплохими точностными параметрами: типично $K_U = 63 \text{ В/мВ}$, $U_{CM} = 1 \text{ мВ}$, $I_{BX} = 70 \text{ пА}$ при небольшом шуме (примерно $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) и хорошем быстродействии ($GBP = 10 \text{ МГц}$, $\rho = 170 \text{ В/мкс}$, мощностная полоса составляет 300 кГц).

Из новых моделей усилителей этого класса можно отметить монолитный ОУ LM675 фирмы National Semiconductor, наследник знаменитого LM12. Его выходной ток может достигать 3 А при питании от источников $\pm(8...30) \text{ В}$. LM675 имеет неплохие точностные и динамические характеристики и изготавливается в пятивыводном корпусе TO-220. Максимальная рассеиваемая мощность – 30 Вт.

Ещё одна интересная модель – ОРА567 фирмы Texas Instruments. Это низковольтный ОУ (напряжение питания 2,7...5,5 В), который способен отдать в нагрузку ток до 2 А. Усилитель изготавливается в малогабаритном корпусе ($6 \times 6 \text{ мм}$), предназначенном для монтажа на поверхность. Другие особенности этого ОУ: полный размах входа и выхода, высокий $K_U = 2000 \text{ В/мВ}$ и низкий входной ток – 1 пА.

Фирма Linear Technology выпускает ОУ LT1970, обеспечивающий ток через нагрузку до $\pm 0,5 \text{ А}$ при напряжении питания 5...36 В. Этот усилитель защищён от перегрузок настраиваемым высокоточным ограничением втекающего и вытекающего токов и схемой выключения при перегреве. ОУ имеет неплохие точностные характеристики: $K_U = 150 \text{ В/мВ}$, $U_{CM} = 200 \text{ мкВ}$.

Микро мощные ОУ

К микро мощным в настоящее время следует относить ОУ, потребляющие от источника на холостом ходу ток не более 50 мкА. Для этих усилителей характерны плохие динамические характеристики и высокий уровень шума, в то время как точностные параметры могут быть высокими. Все микро мощные ОУ имеют полный размах выхода, а некоторые – также и входа. Микро мощные ОУ используются в таких системах с батарейным питанием, где не требуется высокое быстродействие или низкий уровень шума.

Примером прецизионного микро мощного ОУ может служить LT1672. Его точностные параметры: $K_U = 500 \text{ В/мВ}$, $U_{CM} = 150 \text{ мкВ}$, $I_{BX} = 250 \text{ пА}$. Ток, потребляемый без нагрузки, – 1,5 мкА, а максимальный ток нагрузки – всего 0,5 мА. Диапазон питающих напряжений 2,2...30 В. Этот усилитель, как и все микро мощные ОУ, обладает


низким быстродействием ($GBP = 12 \text{ кГц}$, $\rho = 0,005 \text{ В/мкс}$) и значительным уровнем шума – $185 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.


Ещё один микро мощный прецизионный ОУ – ОРА336 фирмы Texas Instruments – обладает прекрасными точностными параметрами: $K_U = 500 \text{ В/мВ}$, $U_{CM} = 60 \text{ мкВ}$, $I_{BX} = 1 \text{ пА}$. Этот усилитель потребляет всего 20 мкА от источника напряжением 2,3...5,5 В. Он способен отдать в нагрузку ток до 5 мА и является более быстродействующим, чем предыдущая модель ($GBP = 100 \text{ кГц}$, $\rho = 0,03 \text{ В/мкс}$).

Фирма Maxim является ведущей по микро мощным ОУ. Она производит довольно много моделей таких усилителей. Например, усилители MAX4464/70 имеют типичное потребление 0,6 мкА при $U_{II} = 1,8 \text{ В}$. Декомпенсированный MAX4464, устойчивый при $K \geq 5$, обладает $GBP = 40 \text{ кГц}$, что совсем неплохо для наноамперного ОУ. Усилитель MAX4289 способен работать от источника напряжением 1 В (один никель-металлогидридный аккумулятор), а ОУ MAX4036, потребляя на холостом ходу только 0,8 мкА, может отдать в нагрузку ток силой до 13 мА.


В табл. 2 и 3 приведены основные параметры ряда современных ОУ.


ЛИТЕРАТУРА

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Додэка-XXI, 2005. 

 www.platan.ru

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ОТ ВЕДУЩИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ






ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ, ИЗМЕРЕНИЯ,
УСИЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
СИГНАЛОВ

- ⤵ Аналоговые ключи и мультиплексы
- ⤵ Компараторы
- ⤵ Источники опорного напряжения
- ⤵ Операционные усилители
- ⤵ Аудио-, видеоусилители
- ⤵ Микросхемы для источников питания
- ⤵ Аналоговые фильтры

Поставляются бесплатные образцы продукции



Москва, ул. Ивана Франко, д. 40, стр. 2
Тел./факс: (495) 97-000-99

Почта: 121351, Москва, а/я 100
E-mail: platan@aha.ru