

## Операционные усилители: основные технические решения

*Операционный усилитель — вероятно, самый распространенный тип усилительных устройств. Первоначальное его назначение — решение систем дифференциальных уравнений на аналоговых электронных моделях. Такие уравнения представлялись в операторной форме, и за предназначенными для их решения усилителями закрепилось название “операционные”. Сейчас ОУ используются в устройствах для решения самого широкого круга задач измерений, управления, обработки и передачи информации, и это привело к разделению ОУ на группы, существенно отличающиеся по параметрам и используемым техническим решениям. Данная статья представляет собой обзор основных технических решений ОУ. Цель статьи — помочь разработчикам радиоэлектронной аппаратуры в выборе ОУ, наилучшим образом соответствующих решаемой задаче. Обзору основных технических решений ОУ посвящена данная статья.*

### Общие характеристики основных групп ОУ. Технологии изготовления

В литературе по аналоговой вычислительной технике и электронике часто даются неполные и не совсем корректные определения ОУ. Лучшим определением ОУ представляется следующее:

*Идеальными операционными усилителями называются усилители, передаточная функция которых определяется только цепью внешней обратной связи, которой он охвачен.*

Из этого следует, что идеальный ОУ должен иметь следующие параметры:

- бесконечные входной импеданс, усиление, подавление синфазного сигнала по дифференциальным входам, полосу пропускания (начиная от постоянного тока) и выходной ток;

- нулевые и смещение по постоянному входному напряжению, входной ток, шумы и искажения.

Реальные ОУ приближаются к идеальным в той или иной мере. В разработку и производство ОУ в мире ежегодно вкладываются десятки миллионов долларов, в основном компаниями США, которые лидируют в этой отрасли. Отечественные изделия довольно точно повторяют технические решения американских аналогов. Это позволяет использовать информацию и рекомендации по применению, разработанные для них.

Количество производителей ОУ исчисляется десятками, а количество их типов, существенно отличающихся друг от друга, насчитывает сотни. Оптимальный выбор типа ОУ в значительной степени влияет на конечный результат разработки. Число типов ОУ не дает возможности представить на бумаге сводную таблицу их параметров ОУ в удобном для пользования виде. Поэтому многие компании широко используют базы данных на компакт-дисках и в Интернете, где представлены описания (data sheet), содержащие упрощенные схемы ОУ, схемы их включения, кривые

и таблицы параметров. Для ориентации в этом море информации необходимо располагать некоторыми сведениями о принципах построения и параметрах ОУ. Обзор сознательно ограничен распространенными техническими решениями. Интересные, но достаточно редкие ОУ, например усилитель Нортон или, позволяющий работать с входными напряжениями много выше питания, Over-the-Top, патентованный Linear Technology, здесь не рассматриваются. Актуальность такого обзора связана также с тем, что книги на русском языке, посвященные или достаточно подробно описывающие ОУ, были написаны порядка 20 лет назад и не отражают их современного состояния.

### 1. Сравнительные характеристики ОУ, изготовленных по различным технологиям

Первые монолитные интегральные ОУ были разработаны Р. Уидларом и серийно выпускались компанией Fairchild Semiconductor Corporation с начала 60-х годов. Основой послужила технология биполярных p-n-p транзисторов. Транзисторы p-n-p имели низкие коэффициент усиления и быстродействие, вследствие чего применялись только во внутренних источниках тока и цепях сдвига уровней.

Вторым шагом было освоение комплементарной биполярной технологии — СВ (Complementary Bipolar), при которой параметры p-n-p транзисторов приблизились к параметрам n-p-n транзисторов. Эта технология и сегодня широко используется при изготовлении прецизионных ОУ, особенно если необходимо сочетать высокую точность с высоким быстродействием. Приборы характеризуются самым малым смещением по входному напряжению, низким напряжением шума, достаточно широкой полосой пропускания и хорошими выходными характеристиками. К недостаткам относятся относительно низкий входной импеданс, относительно боль-

шой ток шумов, высокое потребление.

Следующим шагом стало добавление к комплементарной биполярной технологии процесса изготовления на той же подложке полевых транзисторов с изоляцией затвора переходом — JFET (Junction Field Effect Transistor). Эта технология — CBFET (Complementary Bipolar Field Effect Transistor) или BiFET (Bipolar Field Effect Transistor) – позволила получить высокие входные импедансы, малые входные токи, низкий ток шума при хороших выходных характеристиках на относительно низких частотах. Приборы, изготавливаемые по этой технологии, проигрывают СВ приборам в смещении по входному напряжению, полосе пропускания и скорости нарастания, кроме того, у них выше входное напряжение шума и потребление.

Аналоговые схемы, изготовленные по комплементарной технологии металл-оксид-полупроводник CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), имели преимущества только по очень малому уровню входных и шумовых токов и дешевизне и были хуже по таким параметрам, как смещение по входному напряжению, дрейф и напряжение шумов. Значительный прогресс, достигнутый в этой технологии, приблизил их параметры к приборам, выполненным по технологии CBFET или BiFET. Сейчас они имеют самые низкие входные токи и самые высокие входные импедансы и при заданном напряжении питания — самые высокие входные и выходные напряжения, самое низкое потребление. Недостатки: малая полоса пропускания, скорость нарастания и выходной ток.

Процесс, именуемый как CBMOS (Complementary Bipolar Metal-Oxide-Semiconductor), или BiMOS (Bipolar Metal-Oxide-Semiconductor), объединив СВ и CMOS процессы, позволил получить приборы с хорошей линейностью и малым потреблением. Особенно полезным оказалось применение выходных CMOS каскадов для получения выходного напряжения с размахом от одной шины питания до другой (rail-to-rail).

Кроме основных вариантов технологических процессов для достижения высоких результатов по каким-либо параметрам, ведущие компании-производители используют собственные патентованные технологии.

Например, Analog Devices использует процесс диэлектрической изоляции XFCB (eXtra Fast Complementary Bipolar) для получения быстродействующих биполярных приборов.

National Semiconductor усовершенствовала BiCMOS процесс с субмикронными кремниевыми затворами для получения очень экономичных высокочастотных MOS приборов.

Процесс с ионной имплантацией LINC MOS (Lithium-Ion Implantation Complementary Bipolar Metal-Oxide-Semiconductor) от Texas Instruments,

позволяет получить MOS ОУ с очень малыми смещениями по напряжению.

Объявленная в декабре 1999 г. компанией Motorola MOS технология на основе нового класса окислов Per-AHV-skites с диэлектрической проницаемостью на порядок выше, чем у обычного SiO<sub>2</sub>, позволяет получать MOS-транзисторы со значительно меньшими размерами и потреблением, чем выпускаемые серийно.

Как правило, в одном приборе не удается добиться самых высоких показателей по всем параметрам. Поэтому при выборе ОУ следует обратить внимание на то, какими из характеристик производителю пришлось пожертвовать для улучшения других.

В настоящее время аналоговые интегральные схемы, к которым относятся рассматриваемые приборы, выпускаются в десятках разнообразных корпусов. От конструкции и материалов корпуса зависят надежность и метрологические характеристики прибора. Появившиеся первыми металлокерамические корпуса все еще являются самыми надежными, особенно для работы в широком диапазоне температур, но они существенно дороже других. Технологический прогресс позволил изготавливать корпуса приборов из полимерных материалов практически для всех условий эксплуатации. Распространению подобных корпусов особенно способствует рост потребности в малогабаритных приборах для поверхностного монтажа. Новым шагом в миниатюризации стало освоение National Semiconductor новой технологии сверхминиатюрных корпусов с шариковыми выводами — BGA (Ball Grid Array). Тщательный подбор материалов позволил минимизировать количество технологических операций. После выполнения основной части процесса на пластину наносят второй слой пассивации с окнами под контактные площадки, на которые расплавляют шарики припоя, формируя выводы для монтажа чипа методом переворнутого кристалла. Обратная сторона защищается эпоксидным компаундом, после чего пластина разделяется на отдельные кристаллы обычным способом. Используя такую технологию, удалось изготовить сдвоенные ОУ с размерами 1,45x1,45 мм, удовлетворяющие требованиям по герметизации и устанавливаемые на печатные платы стандартным автоматическим оборудованием для поверхностного монтажа. В изготовленные по такой технологии новые корпуса SC70-5 с размерами 2x2 и 1x1 мм, переводятся различные типы операционных усилителей, компараторы стабилизаторы, таймеры, АЦП и датчики температуры.

## 2. Классификация ОУ

Поскольку количество выпускаемых ОУ очень велико, сложилось их определенное разделение на группы по параметрам и определяемым задачами, для которых они были разработаны. Грани-

цы между группами нечеткие, поскольку определяются разными специалистами по несколько различным критериям, и эти границы меняются со временем в связи с развитием технологий и изменением номенклатуры выпускаемых приборов. Приводимые ниже оценки и классификация ориентировочны, они соответствуют сегодняшнему состоянию технологии и со временем могут измениться.

### ОУ общего назначения

К ним относятся дешевые ОУ со смещением по входному току 5...25 мВ, входным током до 5...10 мкА, полосой пропускания 0,3...50 МГц и напряжением питания ±5...15 В, выходным током ±2...30 мА. Жесткие требования по дрейфу, шумам и линейности отсутствуют. Они находят самое широкое применение в схемах формирования сигналов, согласования уровней, измерительных устройств, автоматики, а также связи.

ОУ общего назначения выполняются обычно по BiCOM, BiFET и CMOS технологиям.

### Прецизионные ОУ

К прецизионным можно отнести ОУ, имеющие смещение по входному току менее 1 мВ с тепловым дрейфом менее 10 мкВ/°С, входным током до 1 мкА с тепловым дрейфом до 30 нА/°С, коэффициентом усиления более 100000, спектральной плотностью шумов на 1 кГц по напряжению до 100 нВ/√Гц и тока 20 пА/√Гц, удвоенной амплитудой шумов в полосе 0,1...10 Гц до 5 мкВ по напряжению и 50 пА по току. Они находят самое широкое применение в схемах измерительных устройств, источников прецизионных сигналов, а также систем управления.

### Быстродействующие ОУ

В настоящее время к этой группе относят ОУ с полосой пропускания при единичном усилении (частотой среза) более 50 МГц и скоростью нарастания выходного сигнала более 100 В/мкс. Хотя основные функции быстродействующих ОУ те же, что у других групп, они существенно отличаются как по области применения, так и по предъявляемым к ним требованиям. Лучше всего для таких применений подходит биполярная комплементарная технология (BiCOM), по которой изготавливается большинство быстродействующих ОУ. Транзисторы, производимые по этой технологии, имеют граничную частоту усиления порядка нескольких гигагерц.

К основным областям применения быстродействующих ОУ относятся:

- коммуникации, включая телевидение и сотовую телефонию, устройства формирования и обработки изображений — сканеры, копировальные установки, медицинские сканирующие системы, радиолокационные системы, лазерная техника;

- видео и мультимедиа, включая видеокамеры, мониторы, распределительные системы, согласующие устройства;
- измерительная техника, включая системы сбора данных, осциллографию, анализаторы спектра, испытательное оборудование.

Первый классификационный параметр быстродействующих ОУ — полоса пропускания по уровню выходного сигнала —3 дБ. Следующий параметр — скорость нарастания, показывающая, насколько быстро может следовать выходное напряжение за изменением входного. Далее — время установления показывающее, через какое время после приложения ступенчатого входного сигнала выходное напряжение установится относительно конечного значения с погрешностью не более установленной. В справочных данных приводится время установления до 0,1 или 0,01%. Этот параметр особенно важен для систем, использующих временные выборки, например АЦП. Для большинства приложений существенно, чтобы ОУ вносил минимальные искажения в форму сигнала. Одним из источников искажений являются частотные зависимости, определяемые как отклонение усиления от постоянной величины — дифференциальная ошибка по амплитуде и отклонение от линейного закона изменения фазового сдвига от частоты — дифференциальная ошибка по фазе. Другой важной причиной искажений является зависимость коэффициента передачи от амплитуды сигнала, то есть нелинейность.

Быстродействующие системы чаще всего работают с низкоомными источниками сигнала, например, длинными линиями передачи, имеющими согласующие резисторы 50 или 75 Ом. При этом входной импеданс ОУ играет второстепенную роль. Многие такие системы работают на переменной напряжении, когда смещение и дрейф по постоянному току не критичны.

### Экономичные ОУ с возможностью однополярного питания

Последние годы растет интерес к ОУ, которые, в отличие от традиционных двухполярных, используют однополярный источник питания, причем, все чаще, низковольтный. Их распространение связано с применением узлов, совместно использующих аналоговые и дискретные устройства, и устройств с батарейным питанием.

Переход на однополярное питание позволяет производителям снизить стоимость изделий. Нередко при батарейном питании экономичность — главный параметр. От некоторых устройств требуется непрерывная работа без замены или зарядки батарей в течение очень длительного времени, достигающего нескольких лет. Поэтому разраба-

тываются схемы с очень малым потреблением.

Важной характеристикой технологического уровня является отношение полосы пропускания при единичном усилении ( $f_u$ ) к току покоя. По данным Analog Devices [4] для ее ОУ это отношение составляет около 1 МГц/мА для технологии BiFET, 10 МГц/мА — для СВ и 100 МГц/мА — для новейшей высокоскоростной биполярной технологии с использованием диэлектрической изоляции XFCB (eXtra Fast Complementary Bipolar). По сообщениям National Semiconductor [5], благодаря использованию усовершенствованного BiCMOS процесса с субмикронными кремниевыми затворами, ОУ типа LPV321 при полосе частот до 150 МГц потребляют ток 9 мкА, то есть это отношение может достигать порядка 1500 МГц/мА. Наиболее экономичными являются относительно низкочастотные CMOS приборы. Например, экономичные ОУ NJU7006 и компаратор NJU7116 производства NJR (New Japan Radio Corp.) [6] при напряжении питания от 1,8 В потребляют ток 3 мкА (типовое значение).

Однако, переход к однополярному низковольтному питанию связан с рядом трудностей, которые перед принятием решения необходимо внимательно взвесить. Эта группа ОУ чаще всего использует биполярную комплементарную технологию (BiCOM) или один из вариантов CMOS. При низковольтном

питании уменьшается рабочий диапазон сигнала, который может составить 2,5 и даже 1 В. Относительное значение погрешностей при этом увеличивается во столько раз, во сколько уменьшается шкала. Это приводит к повышению требований к абсолютным значениям сдвига по постоянному напряжению, дрейфа и шумов. Тем не менее, современные приборы даже при одновольтовой шкале способны обеспечить 12-разрядную точность.

Обычно при низковольтном однополярном питании необходимо как можно более полно использовать напряжение питания. Лучше всего, чтобы входное и выходное напряжения имели возможность изменяться от напряжения одной шины питания (обычно земли) до другой шины питания (обычно положительный вывод источника питания). Это обозначается термином rail-to-rail. Реальные ОУ, обозначаемые этим термином, отвечают такому определению лишь в некотором приближении.

**Мощные ОУ**

К этой группе обычно относят ОУ с выходным током более 100 мА при выходном напряжении не менее ±10 В. Основные области их применения — источники питания, выходные каскады источников сигналов, управление исполнительными механизмами следящих систем, а также питание низкоомных линий передачи высокочастотных сигналов.

Чаще всего это относительно низкочастотные приборы с полосой частот в несколько сотен килогерц, напряжениями питания до ±150 В и выходным током 1...20 А. ОУ для линий передачи высокочастотных сигналов имеют значительно более широкую полосу пропускания, но напряжение питания и верхний предел выходного тока ниже. Мощные ОУ обычно изготавливаются по BiCOM или BiFET технологии.

В табл. 1 представлены характеристики некоторых типов распространенных ОУ, относящихся к различным группам, от различных производителей.

Валерий Авербух  
valaverb@mtu-net.ru

**Литература**

1. Д. Е. Полонников. *Операционные усилители: принципы построения, теория, схемотехника.* — М., Энергоатомиздат, 1983.
2. И. Достал. *Операционные усилители.* — М, "Мир", 1982.
3. П. Хоровиц, У. Хилл. *Искусство схемотехники.* — М., "Мир", 1983.
4. W. Kester. *High Speed Operational Amplifier. High Speed Design Techniques, Analog Devices Inc., 1996.*
5. <http://www.national.com>
6. <http://www.njr.co.jp>

Продолжение следует

Таблица 1

Тип	Смещение по входу			Шумы на частоте 1кГц		Полоса К=1, МГц	Скор. нараст. сигнала, В/мкс	Время устан. до 0,1%, нс	Напряжение питания V <sub>S</sub> , В	Выход, В/мА	Усиление, дБ
	ΔU <sub>IN</sub> , мВ	dU <sub>IN</sub> /dT, МкВ/°С	I <sub>IN</sub> , нА	U <sub>N</sub> , нВ/√Гц	I <sub>N</sub> , пА/√Гц						
Общего применения, CMOS, дешевый, старой разработки, но широко применяемый											
КР140УД6 (Россия)	5	20	30	—	—	1	2,5	1700	±5...18	11/25 (V <sub>S</sub> ±15)	75
Общего применения, СВ											
AD817 (Analog Devices)	0,5	10	3300	15	1,5	30	250	70	±4...6	±3,8/50 (V <sub>S</sub> ±5) ±13,7/50 (V <sub>S</sub> ±5)	72
Общего применения, CMOS, дешевый											
TLC2252CD (Texas Instruments)	0,2	0,5	0,001	19	—	0,2	0,12	—	4,4...16	V <sub>S</sub>  -0,09/0,35	83
Быстрый, с обратной связью по напряжению, СВ											
AD8055 (Analog Devices)	3	6	400	6 (100 кГц)	0,001 (100 кГц)	300	1400	20	±4...6	±3,1/60 (V <sub>S</sub> ±5)	71
Быстрый, с обратной связью по току, BiFET											
AD8009 (Analog Devices)	2	4	50000	—	—	1000	5500	10	±2,5...18	±3,8/175	Транс-импеданс 250 кОм
Прецизионный, СВ, супербета											
MAX400M (Maxim)	±0,004	0,2	0,7	9,6	0,12	0,6	0,3	—	±3...18	±10 (V <sub>S</sub> ±15, 2 кОм)	120
Прецизионный, BiFET											
OPA129PB (Burr-Brown/Texas Instruments)	±0,5	±3	0,03 · 10 <sup>-3</sup>	17	0,0001	1	2,5	5000	±5...18	±13/10 (V <sub>S</sub> ±5)	120
Прецизионный, со стабилизацией прерывателем											
LT1051A (Linear Technology)	±0,5	±0,05	20 нА	1,3 в полосе 0...10 Гц	2,2 фА 10 Гц	2,5	4	—	±4,75...16	±4,85/0,5 (V <sub>S</sub> ±5)	160
Мало потребляющий, CMOS, Rail-to-Rail											
MAX406A (Maxim)	±0,25	2	0,0001	150	—	0,15	0,02	—	±2,5...10 1 мкА	V <sub>S</sub> -0,05/ +0,6; -0,2	80
Мощный, BiFET											
OPA512SM (Burr-Brown)	±1	±10	10	—	—	4	4	2000	±10...50	V <sub>S</sub> -7±35000	110