

# Операционные усилители с «нулевым» температурным дрейфом

Дмитрий ИВАНОВ,  
к. т. н.  
di@efo.ru

В статье приведен сравнительный обзор лучших операционных усилителей класса Zero-Drift, выпускаемых ведущими мировыми производителями аналоговых интегральных микросхем — National Semiconductor, Analog Devices, Texas Instruments, Linear Technology и Maxim Integrated Products.

## Введение

Одним из важнейших параметров операционного усилителя является напряжение смещения (Offset Voltage) — дифференциальное входное напряжение, при котором выходное напряжение усилителя равно нулю. В большинстве практических приложений, а именно в тех, где операционный усилитель имеет гальваническую связь с источником входного сигнала, напряжение смещения становится причиной аддитивной погрешности усилителя, поскольку оно действует как паразитный сигнал, включенный последовательно с полезным сигналом [1, 2]. Другой не менее важный показатель качества операционного усилителя — это температурный дрейф напряжения смещения (Offset Voltage Drift): чувствительность напряжения смещения к температуре. Значение этого параметра позволяет оценить дополнительную аддитивную погрешность усилителя, обусловленную изменением температуры окружающей среды.

Цель данного обзора — сравнить лучшие операционные усилители ведущих мировых производителей по двум вышеупомянутым параметрам: напряжению смещения и его температурному дрейфу.

## Что такое Zero-Drift?

Первый интегральный операционный усилитель  $\mu$ A702 создан компанией Fairchild Semiconductor в 1964 году. Типовое значение

напряжения смещения этого усилителя было равно 0,5 мВ при температуре окружающей среды +25 °С, а средний температурный дрейф напряжения смещения не превышал 10 мкВ/°С при изменении температуры в пределах от -55 до +125 °С. На данный момент такие характеристики соответствуют операционным усилителям общего назначения. Классификация операционных усилителей по их фокусным параметрам, то есть разбиение на группы усилителей общего назначения (General Purpose), точных (Precision) усилителей, усилителей с низким энергопотреблением (Low Power), усилителей с низким уровнем шумов (Low Noise) и так далее, не является общепринятой, а у некоторых производителей вообще отсутствует. В данной статье автор придерживается классификации компании National Semiconductor [3].

За 45 лет развития аналоговой микроэлектроники достигнуты большие успехи как в области технологии производства интегральных микросхем, так и в области микросхемотехники. Что касается операционных усилителей, изменения коснулись всех без исключения характеристик этих микросхем, но в разной степени. Наибольшие успехи достигнуты в области совершенствования входных характеристик операционных усилителей, и, в первую очередь, это относится к снижению входных токов и напряжения смещения усилителей, а также температурных дрейфов этих параметров. За последние два года на рынке электронных компонентов появилось много интересных операционных усилителей, характеристики которых еще несколько лет назад трудно было вообразить. Например, компания National Semiconductor выпустила усилитель LMP7721, типовое значение входных токов которого равно 3 фА при +25 °С, что в 400 млн раз меньше, чем у  $\mu$ A702 [4]. Кроме того, в программе поставок всех ведущих производителей аналоговых интегральных микросхем появились

операционные усилители с «нулевым» (Zero-Drift), а точнее — очень низким температурным дрейфом. В этих усилителях используется встроенная автоматическая коррекция напряжения смещения, благодаря чему удается снизить как само напряжение смещения, так и его температурный и временной дрейф, а также подавить фликкершум усилителя [5, 6]. Общая идея метода автоматической коррекции дрейфа усилителя заключается в запоминании напряжения смещения на конденсаторе с последующим вычитанием этого напряжения из выходного сигнала. Конкретная реализация метода у каждого производителя своя, вследствие чего усилители разных производителей отличаются друг от друга по своим характеристикам.

## Чей усилитель лучше?

В таблице 1 приведены параметры лучших операционных усилителей класса Zero-Drift, выпускаемых пятью ведущими мировыми производителями аналоговых интегральных микросхем — National Semiconductor (NSC), Analog Devices (ADI), Texas Instruments (TI), Linear Technology (LTC) и Maxim Integrated Products (MAX). При составлении таблицы в программе поставок каждого производителя [3, 7–10] сначала были выбраны усилители с наименьшим напряжением смещения, а из них — по 4 усилителя с наименьшим гарантированным производителем температурным дрейфом напряжения смещения. В результате получился список из 20 микросхем, в котором нет единоличного лидера одновременно по всем показателям.

Самое низкое типовое значение напряжения смещения при температуре +25 °С (0,1 мкВ) имеют усилители MAX4238 и MAX4239, созданные компанией Maxim Integrated Products. Совсем немного уступают им микросхемы National Semiconductor LMP2015 и LMP2016, у которых типовое напряжение смещения всего на 20% больше. В принципе, таким раз-



Таблица 1. Входные параметры операционных усилителей класса Zero-Drift ( $V_S = 5\text{ В}$ ,  $V_{CM} = V_S/2$ ,  $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )

Тип микросхемы	Производитель	Количество каналов	$V_{OS}$ (тип.), мкВ	$V_{OS}$ (макс.), мкВ	$TCV_{OS}$ (тип.), нВ/ $^\circ\text{C}$	$TCV_{OS}$ (макс.), нВ/ $^\circ\text{C}$
LMP2021	NSC	1	0,4	$\pm 5$	4	$\pm 20$
LMP2022	NSC	2	0,4	$\pm 5$	4	$\pm 20$
LMP2015	NSC	1	0,12	$\pm 5$	15	$\pm 50$
LMP2016	NSC	2	0,12	$\pm 5$	15	$\pm 50$
AD8628	ADI	1	1	$\pm 5$	2	$\pm 20$
AD8629	ADI	2	1	$\pm 5$	2	$\pm 20$
AD8630	ADI	4	1	$\pm 5$	2	$\pm 20$
AD8551	ADI	1	1	$\pm 5$	5	$\pm 40$
TLC2652A	TI	1	0,5	$\pm 1$	3	$\pm 30$
TLC2652	TI	1	0,6	$\pm 3$	3	$\pm 30$
OPA734	TI	1	1	$\pm 5$	10	$\pm 50$
OPA2734	TI	2	1	$\pm 5$	10	$\pm 50$
LTC1050	LTC	1	0,5	$\pm 5$	10	$\pm 50$
LTC1051	LTC	2	0,5	$\pm 5$	10	$\pm 50$
LTC1053	LTC	4	0,5	$\pm 5$	10	$\pm 50$
LTC1150	LTC	1	0,5	$\pm 10$	10	$\pm 50$
MAX4238	MAX	1	0,1	$\pm 2$	10	н/н
MAX4239	MAX	1	0,1	$\pm 2$	10	н/н
MAX4236A	MAX	1	5	$\pm 20$	600	$\pm 2000$
MAX4237A	MAX	1	5	$\pm 20$	600	$\pm 2000$

**Примечание:**  $V_S$  — напряжение питания микросхемы,  $T_A$  — температура окружающей среды,  $V_{CM}$  — синфазное входное напряжение,  $V_{OS}$ (тип.) — типовое напряжение смещения,  $V_{OS}$ (макс.) — максимальное гарантированное напряжение смещения,  $TCV_{OS}$ (тип.) — типовой температурный дрейф напряжения смещения,  $TCV_{OS}$ (макс.) — максимальный гарантированный температурный дрейф напряжения смещения, н/н — параметр не нормируется производителем.

личием значений типовых статистических параметров вообще можно пренебречь.

Минимальное гарантированное напряжение смещения при температуре  $+25\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 1\text{ мкВ}$ ) имеет усилитель Texas Instruments TLC2652A, но это справедливо при двухполярном питании ( $\pm 5\text{ В}$ ) и только для микросхем с суффиксами «С» и «I», имеющих рабочие температурные диапазоны от  $0$  до  $+70\text{ }^\circ\text{C}$  и от  $-40$  до  $+85\text{ }^\circ\text{C}$  соответственно. Для микросхем других температурных групп гарантированное напряжение смещения примерно в 3 раза больше [8]. Второе место по этому показателю с результатом  $\pm 2\text{ мкВ}$  занимают усилители MAX4238 и MAX4239.

Типовой температурный дрейф напряжения смещения меньше всего у микросхем Analog Devices — AD8628, AD8629 и AD8630 ( $2\text{ нВ}/^\circ\text{C}$ ). На втором месте идут TLC2652 и TLC2652A ( $3\text{ нВ}/^\circ\text{C}$ ) и на третьем — микросхемы National Semiconductor LMP2021 и LMP2022 ( $4\text{ нВ}/^\circ\text{C}$ ).

Самый же низкий гарантированный температурный дрейф напряжения смещения (последний столбец табл. 1) имеют микросхемы LMP2021 и LMP2022, разработанные компанией National Semiconductor, и микросхемы Analog Devices — AD8628, AD8629 и AD8630. Средний температурный дрейф этих операционных усилителей в рабочем температурном диапазоне от  $-40$  до  $+125\text{ }^\circ\text{C}$  не превышает  $20\text{ нВ}/^\circ\text{C}$ .

Чтобы определить фаворита в группе операционных усилителей с «нулевым» температурным дрейфом, сравним между собой другие характеристики лучших усилителей

National Semiconductor и Analog Device (табл. 2). Сравнение показывает, что усилители AD8628/AD8629/AD8630 имеют более высокий (на 1 дБ) коэффициент ослабления синфазного сигнала и более низкий, чем

Таблица 2. Типовые значения параметров лучших операционных усилителей класса Zero-Drift ( $V_S = 5\text{ В}$ ,  $V_{CM} = V_S/2$ ,  $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )

Параметр	LMP2021 LMP2022	AD8628 AD8629 AD8630
Входной ток, пА	$\pm 25$	$\pm 30$
Плотность шума на частоте 1 кГц, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	11 (при $K = 1000$ )	22
Полоса пропускания, МГц	5	2,5
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	2,6	1,0
Коэффициент усиления, дБ	160	145
Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ	139	140
Коэффициент ослабления электромагнитных помех (400 МГц), дБ	58	н/н
Коэффициент ослабления электромагнитных помех (900 МГц), дБ	64	н/н
Коэффициент ослабления электромагнитных помех (1800 МГц), дБ	72	н/н
Коэффициент ослабления электромагнитных помех (2400 МГц), дБ	82	н/н
Рабочее напряжение питания, В	2,2–5,5	2,7–5,0
Максимальное допустимое напряжение питания, В	6,0	6,0
Потребляемый ток (на один усилитель), мА	1,1	0,85
Рабочий температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	$-40...+125$	$-40...+125$
Внешние конденсаторы	нет	нет

**Примечание:**  $V_S$  — напряжение питания микросхемы,  $T_A$  — температура окружающей среды,  $V_{CM}$  — синфазное входное напряжение,  $K$  — коэффициент усиления с обратной связью, н/н — параметр не нормируется.

у LMP2021/LMP2022, ток потребления на один канал ( $0,85\text{ мА}$ ). Кроме того, у Analog Devices есть микросхема AD8630 с четырьмя усилителями в одном корпусе, не имеющая аналогов в программе поставок National Semiconductor.

Усилители LMP2021/LMP2022 по сравнению с AD8628/AD8629/AD8630 имеют более низкие входные токи ( $\pm 25\text{ пА}$ ), в 2 раза более низкую плотность шума ( $11\text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ), в 2 раза более широкую полосу пропускания ( $5\text{ МГц}$ ), более высокий коэффициент усиления ( $160\text{ дБ}$ ), в 2,6 раза более высокую скорость нарастания выходного напряжения ( $2,6\text{ В/мкс}$ ) и более низкое допустимое рабочее напряжение питания ( $2,2\text{ В}$ ). Кроме того, усилители LMP2021/LMP2022 обладают высокой помехоустойчивостью и имеют нормированные коэффициенты подавления помех на частотах  $400$ ,  $900$ ,  $1800$  и  $2400\text{ МГц}$ . Таким образом, эти операционные усилители способны подавлять помехи, создаваемые мобильными телефонами, а также другими беспроводными устройствами, в которых используются технологии Bluetooth и Wi-Fi.

## Заключение

На начало 2009 года лучшими по совокупности параметров операционными усилителями с «нулевым» температурным дрейфом являются микросхемы LMP2021 и LMP2022 компании National Semiconductor. Благодаря своим высоким техническим характеристикам, они могут найти применение при построении прецизионных инструментальных усилителей, для усиления выходных сигналов термоэлектрических измерительных преобразователей, в переносных приборах с батарейным питанием.

## Литература

- Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1980.
- Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. / Пер. с нем. Т. 1. М.: Додэка-XXI, 2008.
- Справочно-информационный портал компании National Semiconductor по операционным усилителям.  
<http://www.national.com/appinfo/amplifiers>
- Иванов Д. Как сделать «идеальный» операционный усилитель, или О том, как бывает полезно помнить закон Ома // Компоненты и технологии. 2008. № 6.
- Нолан Э. Усилители с автоматической коррекцией нуля: без мистики. Часть 1.  
<http://www.analog.com.ru/Public/AZA1.pdf>
- Нолан Э., Могими Р. Усилители с автоматической коррекцией нуля: без мистики. Часть 2.  
<http://www.analog.com.ru/Public/AZA2.pdf>
- [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [www.linear.com](http://www.linear.com)
- [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)