

КАК ВЫБРАТЬ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С НУЛЕВЫМ ДРЕЙФОМ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ

В статье приведена краткая информация о принципах построения усилителей с нулевым дрейфом напряжения смещения, проведено сравнение характеристик лучших моделей таких интегральных схем, выпускаемых компанией Analog Devices. Даны рекомендации по оценке параметров ОУ с нулевым дрейфом с помощью моделирования в программе NI Multisim.

В. Макаренко

Одним из важнейших параметров, характеризующих точностные параметры операционных усилителей является входное напряжение смещения (напряжение смещения нуля). Это входное дифференциальное напряжение, при котором выходное напряжение ОУ равно нулю [1, 2]. Хотя в [3, 4] дается другое определение напряжения смещения – напряжение на выходе ОУ при условии, что входное дифференциальное напряжение равно нулю.

Напряжение смещения является одним из наиболее существенных источников ошибок, которые следует учитывать при разработке прецизионных усилительных схем. Величина $U_{см}$ (в англоязычной литературе V_{off} или чаще V_{os}) определяется в основном разбросом напряжений переходов эмиттер-база входных транзисторов дифференциального каскада в усилителях на биполярных транзисторах или напряжений затвор-исток в ОУ с полевыми транзисторами на входах. Кроме того, $U_{см}$ зависит от схемы включения, величины входных токов и разности входных токов усилителя.

Напряжение смещения, формируемое во входных цепях усилителя, удобно представить в виде эквивалентного источника напряжения $U_{см}$ [5], включенного последовательно с источником входного сигнала $U_{вх}$ (рис. 1).

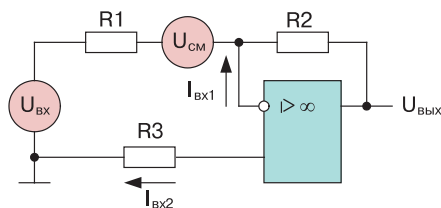


Рис. 1. Инвертирующий усилитель с эквивалентным источником напряжения смещения

HOW TO CHOOSE AN OPERATIONAL AMPLIFIER WITH ZERO DISPLACEMENT VOLTAGE DRIFT

The article provides brief information on the principles of constructing amplifiers with zero drift of bias voltage, compares the characteristics of the best models of such integrated circuits, manufactured by Analog Devices. Recommendations are given on estimating the parameters of an op amp with zero drift using simulation in the NI Multisim program.

V. Makarenko

Чтобы входные токи не создавали напряжение смещения, необходимо выполнение условия $R_3 = R_1 \parallel R_2$. Тогда дифференциальное входное напряжение при $U_{вх} = 0$ будет равно:

$$U_{вх,диф.} = I_{вх1} (R_1 \parallel R_2) - I_{вх2} R_3 = 0,$$

если $I_{вх1} = I_{вх2}$.

Однако входные токи усилителей (Input Offset Current) неодинаковы и их разность может быть сопоставима по величине с $I_{вх}$. Например, для операционного усилителя ADA4528 [7], выпускаемого компанией Analog Devices, типовое значение входного тока 220 нА, а типовое значение разности входных токов равно 440 нА. К тому же величина входных токов зависит от температуры (Bias Current vs Temperature), а так как они неодинаковы, то и разность входных токов зависит от температуры в еще большей степени.

Однако это еще не все факторы, влияющие на величину напряжения смещения. Менее известные причины, вызывающие появление напряжения смещения и его дрейф, описаны ниже.

Одна из них – это дрейф напряжения, вызванный прогревом усилителя. Этот фактор проявляется при быстром изменении температуры кристалла и приводит к тому, что напряжение $U_{см}$ становится больше, чем при медленном изменении температуры на такую же величину. Это явление связано с возникновением термических градиентов внутри подложки ИС как при включении питания или переключении нагрузки, так и при быстром изменении температуры окружающей среды. В первом случае мощность, рассеиваемая на выходе ОУ, вызывает быстрый нагрев кристалла и тепло передается на его вход. Наибольшее влияние разницы температур в разных частях кристалла

проявляется в парных транзисторах дифференциального входного каскада, что приводит к разбалансировке входных токов.

Второй фактор обусловлен влиянием параметров входного сигнала. В [6] приведены экспериментально измеренные зависимости напряжения смещения от амплитуды и частоты входного сигнала для одного из типов ОУ, выполненного на биполярных транзисторах. При использовании ОУ в неинвертирующем усилителе с ростом частоты входного сигнала напряжение смещения возрастает. Причем при увеличении амплитуды входного сигнала влияние частоты на $U_{см}$ проявляется при ее меньших значениях. В инвертирующих усилителях это явление проявляется в значительно меньшей степени.

Такие зависимости объясняются различием скорости нарастания для разнополярных входных сигналов, детектирующими свойствами рп-переходов транзисторов и наличием паразитных емкостей во входном каскаде.

Величина $U_{см}$ составляет 0.1...5 мВ для усилителей общего назначения с биполярными и 0.5...20 мВ с полевыми транзисторами на входе. Путем лазерной подгонки удается уменьшить смещение нуля до 10 мкВ у первого типа усилителей, как у ОУ MAX400M, и до 100 мкВ (OPA627B) у второго [4]. Дальнейшее снижение напряжения смещения нуля достигается применением цепей внешней балансировки или схем автоматической компенсации смещения нуля. Ручная балансировка усложняет изготовление и эксплуатацию электронных устройств, поэтому в тех случаях, когда требуется очень малое смещение, применяют различные системы автоматической компенсации.

Лучшими характеристиками обладают усилители с периодической компенсацией дрейфа нуля [4] (в англоязычной литературе такие ОУ обычно называют auto-zero amplifiers) и усилители со стабилизацией прерыванием – Chopping Amplifiers. Хотя многие авторы не разделяют эти два вида усилителей и называют их усилителями с прерываниями, например, как дано в [4]. Примером усилителей с компенсацией дрейфа могут быть ИС AD8538, AD8638, AD8551 и AD8571, а со стабилизацией прерыванием – ADA4051, выпускаемые компанией Analog Devices [7]. В усилителе AD8628 используется оба метода уменьшения напряжения смещения – компенсация и стабилизация прерыванием.

Такие усилители, предназначенные для усиления слабых сигналов различных датчиков, выпускаются многими ведущими производителями ин-

тегральных схем. Их усредненные типовые характеристики для лучших моделей приведены ниже:

- входное напряжение смещения < 100 мкВ
- дрейф входного напряжения смещения не более 1 мкВ/°С
- входной ток < 2 нА
- разность входных токов < 2 нА
- коэффициент передачи по постоянному току при разомкнутой петле ОС > 1 000 000
- частота единичного усиления от 500 кГц до 5 МГц
- низкочастотный шум вида $1/f$ в полосе 0.1... 10 Гц < 1 мкВ (п-п)
- спектральная плотность шума, приведенного ко входу < 10 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
- коэффициент ослабления синфазного сигнала > 100 дБ
- возможность работы с одним источником питания
- малая рассеиваемая мощность.

На рис. 2 приведена упрощенная схема инвертирующего ОУ с периодической компенсацией дрейфа, в состав которого входит основной А1 и вспомогательный А2 усилители с коэффициентами усиления $K1$ и $K2$ и напряжениями смещения нуля $U_{см1}$ и $U_{см2}$, соответственно, два ключа S1 и S2, два запоминающих конденсатора C1 и C2, генератор импульсов ГИ, управляющий работой ключей. Усилители, входящие в состав схемы, обычно выполняются по КМОП-технологии и потому обладают довольно значительным смещением нуля.

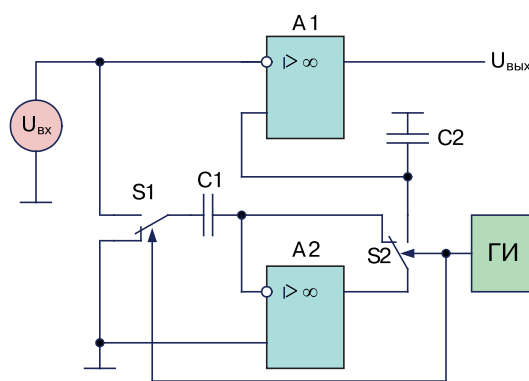


Рис. 2. Упрощенная схема усилителя с периодической компенсацией дрейфа

Период прерывания состоит из двух частей. В первой части периода оба ключа находятся в исходном положении, как показано на схеме. Усилитель А1 усиливает сигнал как обычный ОУ, а усилитель А2 отключен от входа и охвачен 100% отри-

цательной обратной связью. При этом конденсатор С1 заряжается до значения напряжения смещения нуля усилителя А2. Во второй части периода оба ключа переключаются в противоположное положение. При условии $U_{вх} = 0$ (речь идет о дрейфе нуля) напряжения на входе и выходе усилителя А2 не меняются, что равносильно тому, как если бы смещение нуля А2 было равно $U_{см2}/K_2$. Усилители при этом положении ключей включены последовательно, поэтому смещение нуля всего ОУ, приведенное к инвертирующему входу А1, равно:

$$(U_{см1} + U_{см2})/K_2,$$

а общее усиление $K = K_1 K_2$.

Как правило, в виде ИС реализуются дифференциальные ОУ. На рис. 3 приведена схема ОУ с периодической компенсацией дрейфа, наиболее часто применяемая на практике [4, 7]. Такая схема используется, например, в ИС AD8538. Ее отличие от предыдущей схемы (рис. 2) состоит в том, что оба усилителя А1 и А2 имеют вспомогательные инвертирующие входы IN1 и IN2, предназначенные для компенсации напряжения смещения. Усилители имеют практически тождественные характеристики.

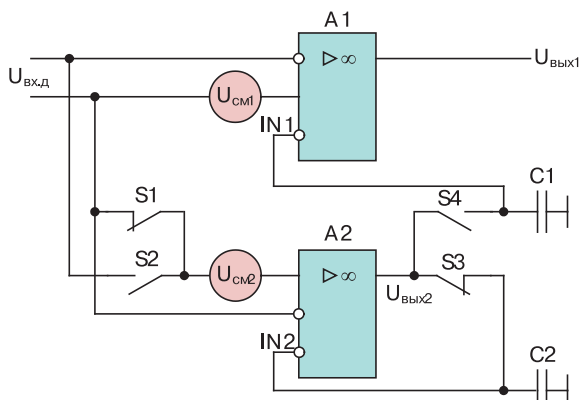


Рис. 3. Схема усилителя с периодической компенсацией дрейфа, используемая в ИС

Цикл работы схемы состоит из двух фаз, повторяющихся с периодом $T_ц$, – фазы автокоррекции нуля и фазы усиления.

Фаза автокоррекции нуля. Ключи S1 и S3 замкнуты, S2 и S4 – разомкнуты. Вход IN2 усилителя коррекции нуля А2 замкнут с выходом усилителя и подключен к запоминающему конденсатору С2.

Напряжение на выходе А2 равно:

$$U_{вых2}(t) = K_2 U_{см2}(t) - G_2 U_{вых2}(t),$$

где K – коэффициент усиления усилителя по основному входу, G – коэффициент усиления усилителя по вспомогательному входу IN.

Откуда следует:

$$U_{вых2}(t) = \frac{K_2 U_{см2}(t)}{1 + G_2}.$$

Фаза усиления. Ключи S1 и S3 разомкнуты, S2 и S4 – замкнуты. Входы усилителя коррекции нуля А2 подключены к дифференциальному входу всего усилителя (U_вх,д), а его выход соединен со вспомогательным входом основного усилителя А1. В этом случае:

$$U_{вых2}(t) = K_2 [U_{см2}(t) + U_{вх,д}(t)] - G_2 U_{C2}(t),$$

где $U_{C2}(t)$ – напряжение на конденсаторе С2, которое равно:

$$U_{C2}(t) = U_{вых2}(t - T_ц / 2).$$

Напряжение на конденсаторе С2 в фазе усиления практически совпадает с выходным напряжением усилителя А2 в фазе автокоррекции. С учетом этого обстоятельства выходное напряжение вспомогательного усилителя может быть записано следующим образом:

$$U_{вых2}(t) = K_2 [U_{вых2}(t) + U_{вх,д}(t)] - \frac{K_2 G_2 U_{см2}(t - T_ц / 2)}{1 + G_2}.$$

Учитывая, что $U_{см}$ изменяется медленно, можно считать его постоянным на протяжении одного цикла $T_ц$. Тогда выходное напряжение вспомогательного усилителя можно записать в виде:

$$U_{вых2}(t) = K_2 \left[\frac{U_{см2}}{1 + G_2} + U_{вх,д}(t) \right],$$

а выражение для напряжения на выходе первого ОУ будет иметь вид:

$$U_{вых1}(t) = K_1 [U_{см1} + U_{вх,д}(t)] + G_1 U_{C1}(t).$$

С учетом того, что $U_{C1}(t) = U_{вых2}(t)$, выражение для $U_{вых1}$ примет вид:

$$U_{вых1}(t) = K_1 [U_{см1} + U_{вх,д}(t)] + G_1 K_2 [U_{вх,д}(t) + U_{см2} / (1 + G_2)].$$

Если выполняется условие $K_1 = K_2 \gg 1$ и $G_1 = G_2 \gg 1$, то $G_1 K_2 \gg K_1$ и приближенно напряжение на выходе основного усилителя может быть записано выражением:

$$U_{вых1}(t) = K_2 G_1 U_{вх,д}(t) + K_2 (U_{см1} + U_{см2}).$$

Таким образом, вес составляющей $(U_{см1} + U_{см2})$ в выходном напряжении в G_1 раз меньше по сравнению

нию со входным дифференциальным напряжением $U_{вх.д.}$

Усилители со стабилизацией прерыванием.

На рис. 4 приведена упрощенная функциональная схема усилителя ADA4051 [7], а на рис. 5 – полная функциональная схема. В этом усилителе стабилизация напряжения смещения осуществляется с использованием прерывателей. Примерно по такой же схеме построены усилители Cirrus Logic’s CS3003/04/13/14 [9].

Входной сигнал через прерыватель 1, осуществляющий поочередное переключение входов усилителя, поступает на усилитель тока, управляемый напряжением A1. Так как влияние первого каскада усилителя на суммарную величину и дрейф напряжения смещения максимально, он охвачен обратной связью для автоматической коррекции напряжения смещения. Цепь обратной связи состоит из двух усилителей тока, управляемых напряжением (A3 и A4), третьего прерывателя и режекторного фильтра (РФ) на коммутируемых конденсаторах, центральная частота которого равна частоте переключения прерывателей 1, 2 и 3. Напряжение обратной связи снимается с выхода второго прерывателя.

Первый и второй прерыватели выполняют функции импульсных модуляторов и осуществляют перенос спектра входного сигнала в область более высоких частот. Частота коммутации прерывателей в ИС ADA4051 равна 40 кГц. Для уменьшения фликкер-шума (или как его еще называют 1/f-шума), возникающего из-за случайных колебаний процесса диффузии в транзисторах и преобладающего в области инфранизких частот, входы и выходы входного дифференциального каскада меняются местами с частотой коммутации прерывателей. В результате полярность шума входных транзисторов периодически меняется (при этом спектр шума пере-

носится в более высокочастотную область), а полярность сигнала остается неизменной. В результате размах напряжения шума в полосе 0.1...10 Гц не превышает 2 мкВ (п-п).

Смещение нуля и его дрейф снижаются цепью обратной связи. Второй прерыватель модулирует напряжение смещения, а третий осуществляет его демодуляцию. Режекторный фильтр подавляет составляющие спектра с частотой коммутации прерывателей и на его выходе формируется напряжение равное величине смещения на выходе A1. Это напряжение усиливается усилителем A4 и вычитается из выходного напряжения A1 с помощью первого и второго сумматоров.

Полная функциональная схема ОУ ADA4051 приведена на рис. 5.

Одним из первых ОУ с периодической компенсацией дрейфа был усилитель 1CL7650 фирмы Intersil (США). Смещение нуля при комнатной температуре не превышает 5 мкВ. Поскольку усилитель выполнен по КМОП-технологии, его входные токи составляют менее 10 пА. Недостатком этого усилителя, как и большинства других усилителей с периодической компенсацией дрейфа, является значительный шум, вызванный, в первую очередь, инжекцией заряда при коммутации МОП-ключей схемы компенсации нуля [4].

Для усилителей с периодической компенсацией дрейфа характерно значительно меньшее значение шумовой составляющей вида 1/f в области очень низких частот. ОУ этого типа (в целом более шумные) генерируют меньший шум, чем малошумящие прецизионные ОУ без компенсации дрейфа. Например, ОУ AD707 имеет в полосе частот 0.1...10 Гц напряжение шума от пика до пика 0.24 мкВ (п-п), а ОУ AD8571 с периодической компенсацией дрейфа в той же полосе – 1.04 мкВ (п-п). Но уже в полосе

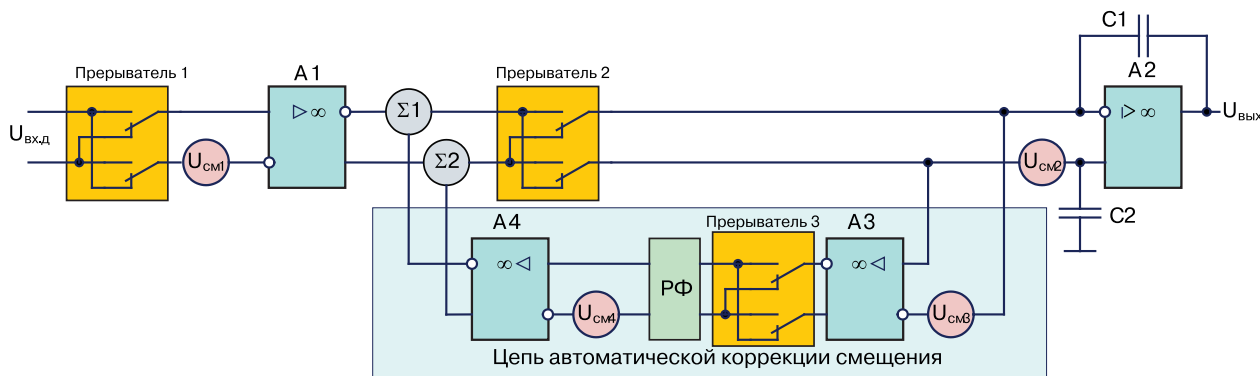


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема усилителя ADA4051 со стабилизацией напряжения смещения прерыванием

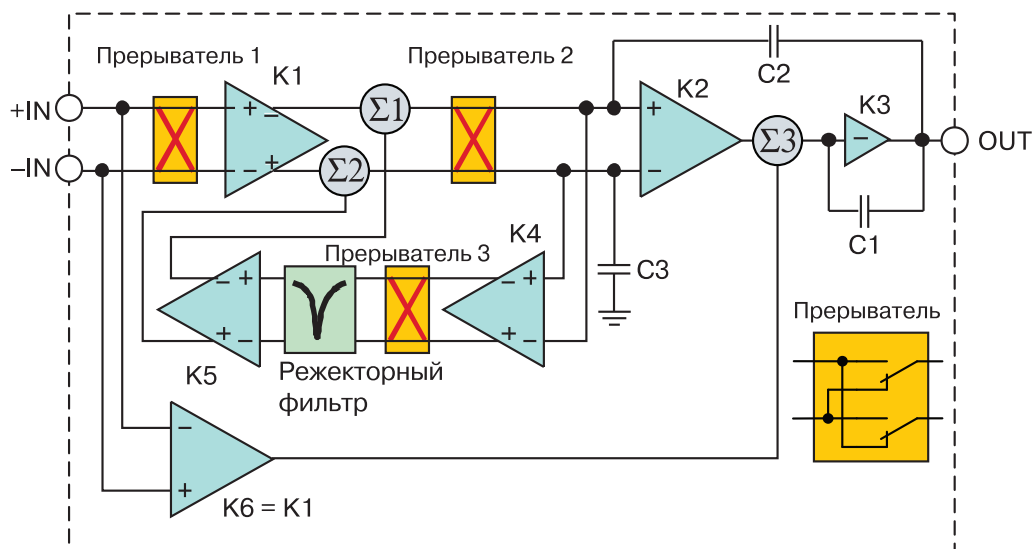


Рис. 5. Функциональная схема ОУ ADA4051

0.0001...0.01 Гц напряжение шума ОУ AD8571 составляет всего 33 нВ (п-п) по сравнению с 118 нВ (п-п) у усилителя AD707.

При использовании усилителей с периодической компенсацией дрейфа нуля и со стабилизацией прерыванием следует учесть, что верхняя рабочая частота f_b входного сигнала в соответствии с теоремой Котельникова должна быть ниже половины частоты коммутации f_k конденсаторов или прерывателей. Для уменьшения погрешностей преобразования желательно, чтобы $f_b \ll f_k$.

В 1999 году фирма Analog Devices начала выпускать семейство прецизионных усилителей AD8601/2/4 с другим способом коррекции смещения нуля. На кристалле усилителя встроена цифровая часть, включающая упрощенные цифро-аналоговые преобразователи. После изготовления микросхемы осуществляется цифровая подгонка при низких и высоких уровнях синфазного входного напряжения, затем по специальному выводу программируется встроенная память путем пережигания перемычек. Этот способ настройки оказывается дешевле, чем лазерная подгонка элементов на открытом кристалле. Такие ОУ при очень низкой цене обладают начальным смещением нуля не более 300 мкВ, типичным температурным дрейфом 2 мкВ/°С и частотой единичного усиления 8 МГц [4].

В настоящее время многие ведущие производители ИС выпускают усилители с нулевым дрейфом, параметры которых оптимизированы для различных применений. Например, обладая минимальным напряжением шумов, усилитель может иметь сравнительно большое напряжение смещения и на-

оборот. Чтобы сопоставить параметры усилителей, выпускаемых компанией Analog Devices, в табл. 1 приведены характеристики усилителей с нулевым дрейфом [10].

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о том, что минимальное напряжение смещения и минимальный дрейф обеспечивает усилитель ADA4528 – 2.5 мкВ и 15 нВ/°С, соответственно. Если выбирать усилитель по минимуму шумов, то по этому параметру ADA4528 также вне конкуренции – 5.9 нВ/√Гц. В [10] приведено больше параметров усилителей с нулевым дрейфом. Например, напряжение шума в диапазоне частот от 0.1 до 10 Гц. Поэтому целесообразно осуществлять предварительный выбор усилителя, пользуясь полной таблицей данных.

А вот достаточно ли данных, приведенных в табл. 1, для выбора усилителя, работающего в широком диапазоне частот? На это вопрос поможет ответить моделирование работы усилителей в программе NI Multisim.

Для измерения напряжения смещения в [5] рекомендуется схема, приведенная на рис. 6. Там же приведены данные испытаний прецизионного усилителя OP177 [11].

При испытаниях OP177 были получены следующие параметры [5]: $U_{см} = 10$ мкВ, дрейф напряжения смещения в диапазоне температур -50...125 °С не более 0.1 мкВ/°С. Результаты испытаний OP177 на температурную стабильность (для сопоставления с данными [5]) при моделировании в NI Multisim приведены на рис. 7.

Таблица 1. Параметры усилителей с нулевым дрейфом компании Analog Devices

Наименование	Напряжение смещения (Vos max), мкВ	Дрейф напряжения смещения (Vos TC max), нВ/°С	Спектральная плотность шума, нВ/√Гц	Частота единичного усиления (GBP typ), МГц	Напряжение питания, В
LTC2050HV	3	30	–	3	2.7...11
ADA4528-2	2.5	15	5.9	3.4	2.2...5.5
ADA4638-1	4.5	800	66	1.5	4.5...30
ADA4528-1	2.5	15	5.9	3.4	2.2...5.5
ADA4051-1	17	100	95	0.125	1.8...5.5
ADA4051-2	15	100	95	0.125	1.8...5.5
AD8639	9	60	60	1.5	4.5...16
AD8638	9	60	60	1.5	4.5...16
AD8539	15	100	52	0.43	2.7...5
AD8538	13	100	50	0.43	2.7...5
AD8630	5	20	22	2.5	2.7...5.5
LTC2055	3	30	–	0.5	2.7...6
LTC2054	3	30	–	0.5	2.7...6
LTC2050	3	30	–	3	2.7...6
LTC2052	3	30	–	3	2.7...6
LTC2051	3	30	–	3	2.7...6
AD8551	5	40	42	1.5	2.7...5
AD8552	5	40	42	1.5	2.7...5
AD8554	5	40	42	1.5	2.7...5
AD8571	5	40	51	1.5	2.7...5.5
AD8572	5	40	51	1.5	2.7...5.5
AD8574	5	40	51	1.5	2.7...5.5
LTC1152	10	100	100	0.7	3...14
LTC1250	10	50	15	1.5	4.75...18
LTC1047	10	50	–	0.2	4.75...16
LTC1151	5	50	–	2	4.75...36
LTC1049	10	100	80	0.8	4.75...18
LTC1150	10	50	–	2.5	4.75...32
LTC1051	5	50	70	2.5	4.75...16.5
LTC1053	5	50	70	2.5	4.75...16.5
LTC1050	5	50	90	2.5	4.75...18
LTC1052	5	50	30	1.2	4.75...18

Как следует из полученных при моделировании результатов, напряжение смещения составило 3.99 мВ, а дрейф напряжения смещения в диапазоне температур -50...125 °С – 2.3 мкВ, что эквивалентно величине 0.013 мкВ/°С. Большая величина напряжения смещения объясняется отсутствием резистора балансировки (входы балансировки напряжения смещения BAL1 и BAL2 не подключены). Это связа-

но с тем, что в spice-моделях ОУ не предусмотрена возможность балансировки.

Сравнивая результаты моделирования с данными, приведенными в [5], можно сделать вывод о том, что дрейф напряжения смещения ОУ OP177 по результатам моделирования намного меньше. Но для сравнения различных усилителей важна не абсолютная величина дрейфа, а различие величины

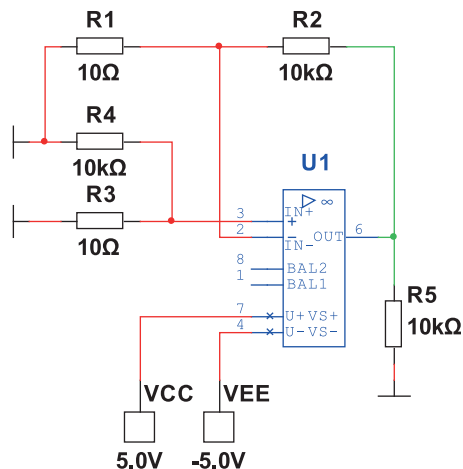


Рис. 6. Рекомендуемая модель для измерения напряжения смещения

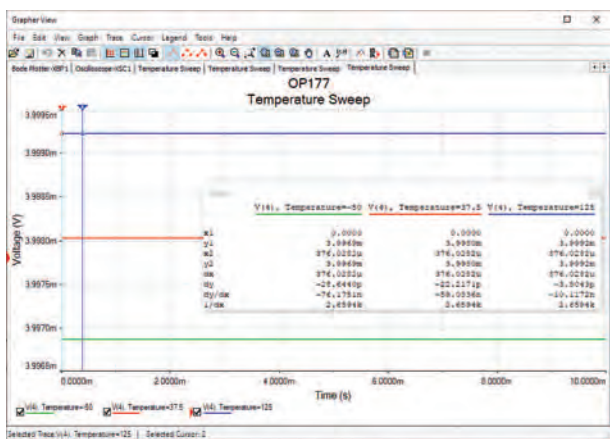


Рис. 7. Результаты температурных испытаний ОУ OP177 в NI Multisim

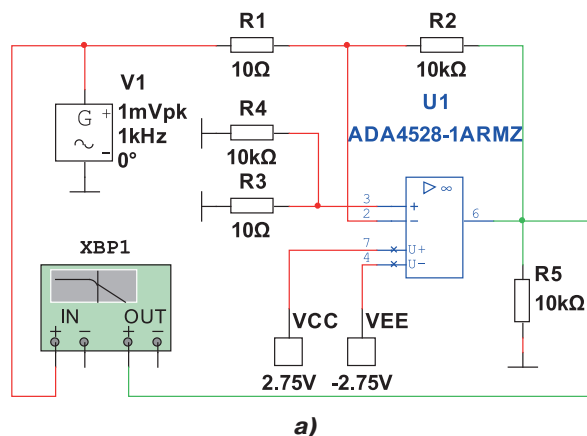
дрейфа этих ОУ.

Для оценки параметров ОУ ADA4528, обладающего наилучшими параметрами в соответствии с таблицей [10], использована модель, приведенная на рис. 8. Так как допустимое напряжение питания этого усилителя не превышает 5.5 В, то напряжение источников питания было установлено на уровне ± 2.75 В.

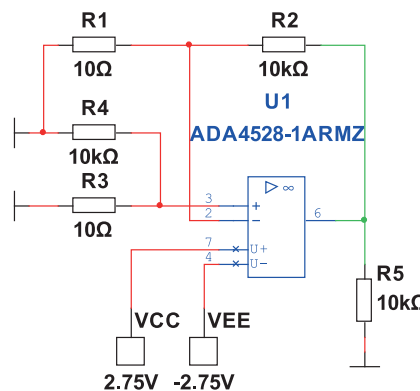
Измеренная с помощью Бод-плоттера, АЧХ инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления $K = 1000$ приведена на рис. 9.

Как следует из рис. 9, полоса пропускания усилителя составляет 4.45 кГц, что соответствует частоте единичного усиления 4.45 МГц ($f_1 = f_{-3дБ} \cdot K$ для усилителя с одним полюсом в передаточной функции) и хорошо коррелируется с данными [7].

Напряжение смещения в диапазоне температур -50...125 °С составило 2.785 мВ, а дрейф напряжения смещения – 90.5 мкВ, что соответствует значе-



а)



б)

Рис. 8. Модели для измерения АЧХ (а) и напряжения смещения (б) ОУ ADA4528-1

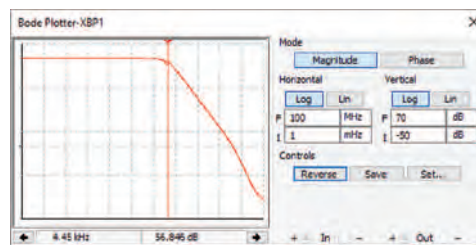


Рис. 9. АЧХ инвертирующего усилителя с $K = 1000$ на ОУ ADA4528-1

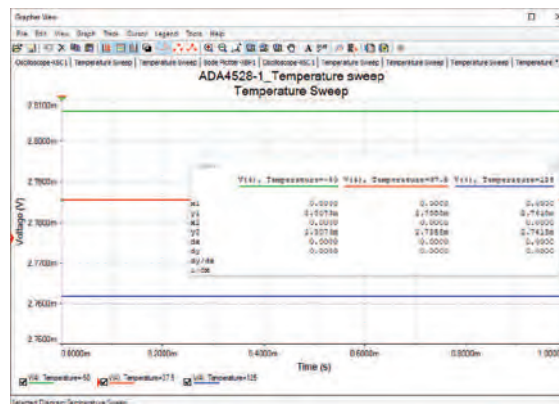


Рис. 10. Результаты температурных испытаний ОУ ADA4528-1 в NI Multisim

нию 0.52 мкВ/°С (рис. 10). В [7] указана величина дрейфа напряжения смещения 0.015 мкВ/°С.

Полученные результаты значительно отличаются от указанных в документации на ИМС, что свидетельствует о неверной методике измерений напряжения смещения, приведенной в [5]. В работе [12] показано, что минимальная погрешность измерения напряжения смещения реализуется при коэффициенте усиления инвертирующего усилителя равном единице. Поэтому в модели, приведенной на рис. 8б, все резисторы установлены равными 10 кОм.

Результаты измерения напряжения смещения при единичном коэффициенте усиления приведены на рис. 11 и в табл. 2. В таблице в колонку "Данные datasheet" внесены данные не из табл. 1, а из оригинальных документов производителя ИМС [7, 13, 14].

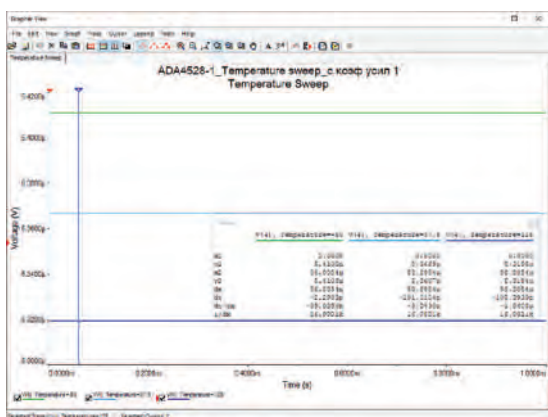


Рис. 11. Результаты температурных испытаний ОУ ADA4528-1 в NI Multisim при K=1

Первое, на что следует обратить внимание, расхождение данных табл. 1 и данных datasheet по ИМС AD8630. В табл. 1 для этой ИМС $U_{см} = 5$ мкВ, а дрейф напряжения смещения 20 нВ. Т.е. параметры сводной таблицы Analog Devices следует проверять по данным datasheet.

Сравнивая результаты моделирования с данными производителя, можно сделать вывод о том, что

они достаточно близки и позволяют произвести сравнение характеристик ИМС.

Особняком в табл. 2 находится ИМС LTC2052, параметры модели которой в NI Multisim значительно отличаются от заявленных в datasheet. И это относится ко всем ИМС LTC, модели которых разрабатывались еще в то время, когда компания Linear Technology не объединилась с компанией Analog Devices. Аналогичное моделирование для ИМС, приведенных в табл. 2, проведено и в среде LTspice. Полученные результаты идентичны.

ВЫВОДЫ

При выборе операционного усилителя с нулевым дрейфом по сводной таблице параметров следует уточнять его параметры по данным datasheet.

Уточнить параметры ОУ в различных режимах работы можно при помощи моделирования разрабатываемых узлов в spice-симуляторах NI Multisim или LTspice.

В технической документации на большинство ИМС отсутствует зависимость входного тока смещения от температуры, хотя этот параметр оказывает значительное влияние на напряжение смещения. Моделирование позволяет оценить влияние различных факторов, в том числе и токов смещения, на напряжение смещения в широком диапазоне температур.

При моделировании следует учесть, что анализ АЧХ, ФЧХ, импульсной переходной характеристики дает очень близкие к практическим результаты. Но при температурном анализе ИМС с префиксом LTC дают идеальный результат, что обусловлено спецификой их моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.

Таблица 2. Сравнительные параметры ОУ, полученные при моделировании

Тип ОУ	Результат моделирования			Данные datasheet		
	Полоса пропускания, МГц	$U_{см}$, мкВ	Дрейф $U_{см}$, нВ/°С	Полоса пропускания, МГц	$U_{см}$, мкВ	Дрейф $U_{см}$, нВ/°С
ADA4528-1	3.3	5.37	5.7	4	2.5	15
LTC2052	4.24	165.7	0	3	3	30
AD8630	1.87	1.5	0.28	2	1	2

2. ГОСТ 19480-89 (ДСТУ 2306-93). Микросхемы интегральные. Термины и определения.
3. Дж. Рутковски. Интегральные операционные усилители: Справочное руководство. – М.: Мир, 1978. – 324 с.
4. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом ДОДЭКА, 2005. – 528 с.
5. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. По материалам семинара "Practical design techniques for sensor signal conditioning". – http://sensoru.narod.ru/literature/24Metody_prakt_modelirov.pdf.
6. Алексеенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.
7. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4528-1_4528-2.pdf.
8. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4051-1_4051-2.pdf.
9. https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Cirrus%20Logic%20PDFs/CS3001-02_F9.pdf.
10. <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11096#/>.
11. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP177.pdf>.
12. Труднов А.В. Расчет и измерение напряжения смещения операционного усилителя / <http://masters.donntu.org/2016/frt/korshak/library/art4/article4.htm>.
13. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/20512fd.pdf>.
14. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8628_8629_8630.pdf.

Интернет-магазин
VD MAIS
The Professional Distributor
catalog.vdmais.ua

ПОКУПАЙ КОМПОНЕНТЫ ОНЛАЙН

- для разработчиков и предпринимателей
- быстрое получение счета без ожидания
- поставки со склада в Киеве
- заказы на зарубежных складах
- специальные условия для дилеров

1. Зарегистрируйтесь в один клик
2. Внесите данные плательщика
3. Выберите товары
4. Мгновенно получите счет
5. Оплатите онлайн или через банк
6. Ожидайте доставку заказа




- электронные компоненты
- светодиоды и блоки питания
- кабели, разъемы, клеммы, реле
- паяльное оборудование и материалы
- измерительные приборы



Центральный офис:
03061 Киев, ул. М. Донца, 6
Тел.: (+38-044) 201-0202
Факс: (+38-044) 202-1110
E-mail: info@vdmais.ua

Региональные представительства:

<p>49006 Днепр пр. Пушкина, 55, оф. 504 тел./факс: (0562) 319-128</p>	<p>79058 Львов пр. В. Черновола, 67, оф. 319 тел./факс: (032) 245-5478</p>
<p>65005 Одесса ул. Головкинская, 36, оф. 20 тел./факс: (048)734-1954</p>	<p>69000 Запорожье бульвар Шевченко, 25, оф. 14 тел. (095) 274 6897</p>