

## ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С НУЛЕВЫМ ДРЕЙФОМ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ

В статье дано краткое описание принципов построения усилителей с нулевым дрейфом напряжения смещения, проведено сравнение характеристик лучших моделей ведущих мировых производителей таких интегральных схем.



В. Макаренко

Одним из важнейших параметров, характеризующих точность 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] дается другое определение напряжения смещения – напряжение на выходе ОУ при условии, что входное дифференциальное напряжение равно нулю.

Напряжение смещения является одним из основных источников погрешностей, 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, построенных на биполярных транзисторах, или напряжений затвор-исток в ОУ с полевыми транзисторами на входах. Кроме того,  $U_{см}$  зависит от схемы включения, величины и разности входных токов усилителя.

Напряжение смещения на входе усилителя удобно представить в виде эквивалентного источника напряжения  $U_{см}$  [4], включенного последовательно с источником входного сигнала  $U_{вх}$  (рис. 1).

Чтобы входные токи не создавали напряжение смещения, необходимо выполнить условие  $R_3 = R_1 \parallel R_2$ . Тогда дифференциальное входное напряжение при  $U_{вх} = 0$  будет равно  $U_{вх,диф} = I_{вх1} (R_1 \parallel R_2) - I_{вх2} \cdot R_3 = 0$ , если  $I_{вх1} = I_{вх2}$ . Однако входные токи усилителей неодинако-

### OPERATIONAL AMPLIFIERS WITH ZERO-DRIFT OF THE BIAS VOLTAGE

**Abstract** – In article the short description of principles of construction of amplifiers with zero-drift of a bias voltage is given, comparison of characteristics of the best models of leading world manufacturers of such integrated circuits is performed.

V. Makarenko

вы и их разность (input offset current) может быть сопоставима по величине с  $I_{вх}$ . Например, для операционного усилителя AD620, выпускаемого компанией Analog Devices, типовое значение входного тока 2 нА, а типовое значение разности входных токов равно 1 нА. К тому же, величина разности входных токов зависит от температуры.

Однако это еще не все факторы, влияющие на величину напряжения смещения. Менее известные причины, также вызывающие появление напряжения смещения и его дрейф, хорошо описаны в [5].

Одна из них – дрейф напряжения  $U_{см}$ , вызванный прогревом усилителя. Этот фактор проявляется при быстром изменении температуры кристалла и приводит к тому, что  $U_{см}$  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 темпера-

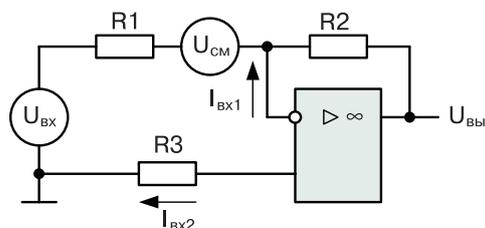


Рис. 1. Инвертирующий усилитель с эквивалентным источником напряжения смещения

туры окружающей среды. В первом случае мощность, рассеиваемая на выходе ОУ, вызывает быстрый нагрев кристалла и тепло передается на его вход. Больше всего разница температур между разными частями кристалла проявляется в парных транзисторах дифференциального входного каскада, где она приводит к нарушению баланса дрейфа  $U_{см}$ .

Второй фактор обусловлен влиянием параметров входного сигнала. В [5] 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 величину  $U_{см}$  проявляется при ее меньших значениях. В инвертирующих усилителях это явление проявляется в значительно меньшей степени.

Зависимость величины напряжения смещения от амплитуды и частоты входного сигнала объясняется разницей в скорости нарастания для разнополярных входных сигналов, детектируемыми свойствами  $pn$ -переходов транзисторов и наличием паразитных емкостей во входном каскаде [5].

Величина  $U_{см}$  составляет 0.1...5 мВ для усилителей общего назначения с биполярными транзисторами на входе и 0.5...20 мВ – с полевыми. Путем лазерной подгонки удастся уменьшить смещение нуля до 10 мкВ для усилителей первого типа, как в ОУ МАХ400М, и до 100 мкВ (ОРА627В) – для второго [6]. Дальнейшее снижение 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 его автоматической компенсации.

Лучшие характеристики имеют усилители с периодической компенсацией дрейфа смещения нуля [6] (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

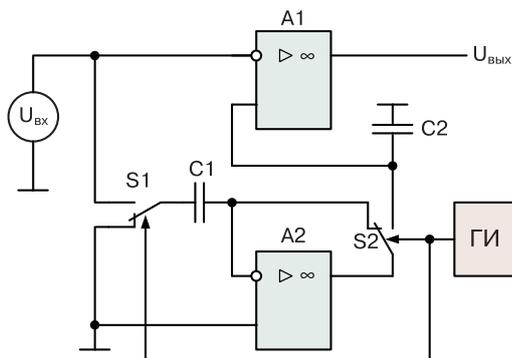
усилителями с прерываниями, например, [6]. Примером усилителей с компенсацией дрейфа могут быть ИС AD8538, AD8638, AD8551 и AD8571, а со стабилизацией прерыванием – ADA4051, выпускаемые компанией Analog Devices (*Примечание. Перевод статьи [7] помещен в этом же номере ЭКИС на стр. 10-13*). В усилителе AD8628 используются оба метода уменьшения напряжения смещения – его компенсации и стабилизации прерыванием.

Такие усилители, предназначенные для усиления слабых сигналов различных датчиков, выпускаются многими ведущими производителями интегральных схем. Усредненные типовые характеристики лучших моделей усилителей:

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

На рис. 2 приведена упрощенная схема инвертирующего ОУ с периодической компенсацией дрейфа смещения, в состав которого входит основной А1 и вспомогательный А2 усилители с коэффициентами усиления  $K_1$  и  $K_2$  и напряжениями смещения нуля  $U_{см1}$  и  $U_{см2}$ , соответственно, два ключа S1 и S2, два запоминающих конденсатора C1 и C2, генератор периодических импульсов ГИ, управляющий работой ключей. Усилители, входящие в состав схемы, обычно выполняются по КМОП-технологии и потому имеют довольно значительное смещение нуля.

Период прерывания состоит из двух частей. В первой части периода оба ключа находятся в исходном положении, как показано на схеме.



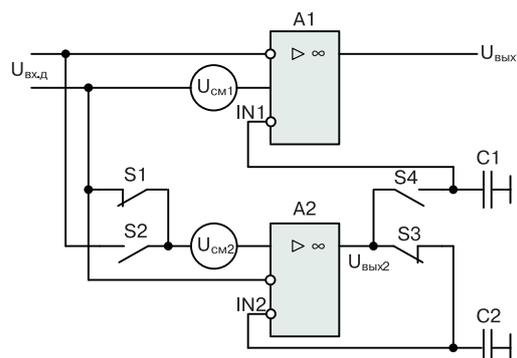
**Рис. 2. Упрощенная схема усилителя с периодической компенсацией дрейфа смещения**

Усилитель A1 усиливает сигнал как обычный ОУ, а усилитель A2 отключен от входа и охвачен 100% отрицательной обратной связью. При этом конденсатор C1 заряжается до значения напряжения смещения нуля усилителя A2. Во второй части периода оба ключа переключаются в другое положение. Если  $U_{вх} = 0$  (речь идет о дрейфе смещения нуля), напряжение на входе и выходе усилителя A2 не меняется, это равносильно тому, что смещение нуля усилителя A2 равно  $U_{см2}/K_2$ . Усилители при этом положении ключей включены последовательно, поэтому смещение нуля всего ОУ, приведенное к инвертирующему входу усилителя A1, равно  $(U_{см1} + U_{см2})/K_2$ , а общее усиление  $K=K_1K_2$ .

Как правило, ОУ реализуются по схеме дифференциального усилителя. На рис. 3 приведена схема ОУ с периодической компенсацией дрейфа смещения, наиболее часто применяемая на практике [6, 7]. Такая схема используется, например, в ИС AD8538. Ее отличие от предыдущей схемы (рис. 2) состоит в том, что оба усилителя A1 и A2 имеют вспомогательные инвертирующие входы IN1 и IN2, предназначенные для компенсации напряжения смещения. Усилители A1 и A2 имеют практически тождественные характеристики.

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 смещения нуля A2 со-



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

единен с выходом усилителя и подключен к запоминающему конденсатору C2. Напряжение на выходе усилителя A2 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

$$U_{вых2}(t) = \frac{K_{2см2} U(t)}{1 + G_2}.$$

**Фаза усиления.** Ключи S1 и S3 разомкнуты, S2 и S4 – замкнуты. Входы усилителя коррекции нуля A2 подключены к дифференциальному входу всего усилителя ( $U_{вх.д}$ ), а его выход соединен со вспомогательным входом основного усилителя A1. 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 C2, равное  $U_{C2}(t) = U_{вых2}(t - T_{ц}/2)$ .

Напряжение на конденсаторе C2 в фазе усиления практически совпадает с выходным напряжением усилителя A2 в фазе автокоррекции. С учетом этого выходное напряжение вспомогательного усилителя может быть представлено выражением

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

Учитывая то, что  $U_{см}$  изменяется медленно, можно считать его постоянным на протяжении одного цикла. Тогда выходное напряжение вспомогательного усилителя можно представить 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  $U_{вых1}(t)$  примет вид

$$U_{вых1}(t) = K_1 [U_{см1} + U_{вх.д}(t)] + G_1 K_2.$$

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 выражено следующей формулой

$$U_{вых1}(t) = K_1 G_1 U_{вх.д}(t) + K_2 (U_{см1} + U_{см2}).$$

Таким образом, вес составляющей  $(U_{см1} + U_{см2})$  в выходном напряжении в  $G_1$  раз меньше составляющей входного дифференциального напряжения  $U_{вх.д}$ .

Одним из первых ОУ с периодической компенсацией дрейфа был усилитель 1CL7650 фирмы Intersil (США). Частота внутреннего генератора синхроимпульсов, управляющих ключами, составляет примерно 200 Гц. Типовая емкость двух внешних конденсаторов хранения 0.1 мкФ. 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 [6].

Усилители со стабилизацией прерыванием. В [7] приведена функциональная схема усилителя ADA4051 (рис. 4), в котором стабилизация напряжения смещения осуществляется с использованием прерывателей. Примерно по такой же схеме построены усилители Cirrus Logic's CS3003/04/13/14 [8].

Входной сигнал через прерыватель 1, попеременно переключающий входы усилителя, поступает на усилитель тока, управляемый напряжением (А1). Так как влияние первого каскада усилителя на суммарную величину и дрейф напряжения смещения является определяющим, он охвачен обратной связью для автоматической коррекции напряжения смещения. Цепь обратной связи состоит из двух усилителей тока, управляемых напряжением (А3 и А4), третьего прерывателя и режекторного фильтра (РФ) на коммутируемых конденсаторах, центральная частота которого равна частоте переключения прерывателей 1...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 в процессе диффузии носителей заряда в транзисторах и преобладающего в обла-

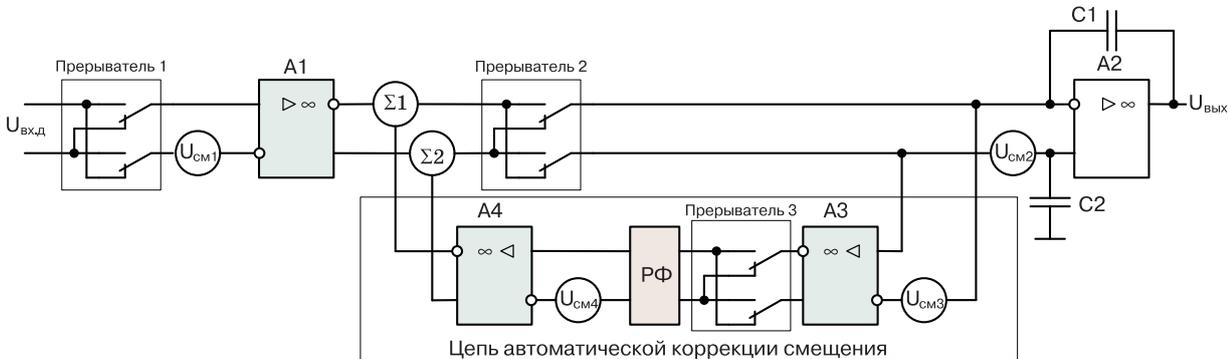


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема усилителя ADA4051 со стабилизацией напряжения смещения прерыванием

сти инфранизких частот, входы и выходы входного дифференциального каскада меняются местами с частотой коммутации прерывателей. В результате полярность напряжения шума входных транзисторов периодически меняется (при этом спектр шума переносится в более высокочастотную область), а полярность сигнала остается неизменной. В результате размах напряжения шума в полосе 0.1...10 Гц не превышает 2 мкВ.

Смещение нуля и его дрейф снижаются введением цепи 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 усилителя А1. Это напряжение усиливается усилителем А4 и вычитается из выходного напряжения усилителя А1 с помощью первого и второго сумматоров.

Для подавления мешающих составляющих спектра, сформированных в процессе модуляции/демодуляции входного сигнала, используется ФНЧ на коммутируемых конденсаторах, элементами которого являются С1, С2 и второй прерыватель.

Для усилителей с периодической компенсацией дрейфа характерно отсутствие шумовой составляющей вида  $1/f$ . Как следствие, в области сверхнизких частот ОУ этого типа (в целом имеющих более высокий уровень шумов) генерируют меньший уровень шума, 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, а ОУ AD8571 с периодической компенсацией дрейфа в той же полосе – 1.04 мкВ (п-п). Но уже в полосе 0.0001...0.01 Гц напряжение шума ОУ AD8571 составляет всего 33 нВ (п-п), в то время как для ОУ AD707 оно равно 118 нВ (п-п).

При использовании усилителей с периодической компенсацией дрейфа смещения нуля и со стабилизацией прерыванием следует учесть, что верхняя рабочая частота  $f_{\text{в}}$  входного сигнала в соответствии с теоремой Котельникова должна быть меньше  $f_{\text{к}}/2$ , где  $f_{\text{к}}$  – частота коммутации конденсаторов или прерывателей. Для уменьшения погрешностей преобразования желательно, чтобы  $f_{\text{в}} \ll f_{\text{к}}$ .

В 1999 году компания Analog Devices начала выпуск семейства прецизионных усилителей AD8601/2/4 с другим способом коррекции смещения нуля. На кристалл усилителя встроен цифровой блок, включающий упрощенные цифро-аналоговые преобразователи. После изготовления микросхемы осуществляется цифровая подгонка при низких и высоких уровнях синфазного входного напряжения, затем по специальному выводу путем пережигания перемычек программируется встроенная память. Этот способ настройки более экономичен, чем лазерная подгонка элементов на открытом кристалле. Такие ОУ при очень низкой цене имеют начальное смещение нуля не более 300 мкВ, типовой температурный дрейф 2 мкВ/°С и частоту единичного усиления 8 МГц [6].

В настоящее время многие ведущие производители ИС выпускают специализированные усилители с нулевым дрейфом, параметры которых оптимизированы для различных применений. Например, при минимальном напряжении шумов усилитель может иметь сравнительно большое напряжение смещения и наоборот. Чтобы сопоставить параметры, в таблице приведены характеристики усилителей, отобранных по минимальной величине напряжения смещения среди ИС разных производителей.

В таблице приведены худшие значения напряжения смещения, дрейфа напряжения смещения, напряжения шума и спектральной плотности шума, а значения остальных параметров – типовые.

Анализ данных таблицы [7...12] позволяет сделать вывод о том, что минимальное напряжение смещения обеспечивает усилитель ICL76503 компании Intersil, а минимальный дрейф напряжения смещения – AD8628/AD8629/AD8630 – одно-, двух- и четырехканальный усилитель, соответственно. Если выбирать усилитель по минимуму шумов, то по этому параметру вне конкуренции усилитель CS3001 (Cirrus Logic), который превосходит своих конкурентов не менее чем в три раза. К тому же, этот усилитель, предназначенный для геодезической аппаратуры, имеет коэффициент усиления в режиме большого сигнала 300 дБ.

Усилители с нулевым дрейфом находят широкое применение для построения прецизион-

**Сравнительные характеристики усилителей с нулевым напряжением смещения**

Тип	$U_{\text{пит.}}$ , В		Rail-to-rail вход/выход	$f_v$ , МГц	$V_n$ , В/мкс	$U_{\text{см. макс.}}$ , мкВ	Дрейф $U_{\text{см.}}$ , мкВ/°С	КОСС, дБ	КПП <sup>1</sup> , дБ	$K_v$ <sup>2</sup> , ДБ	$S_{\text{ш}}$ <sup>3</sup> , нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	$U_{\text{ш}}$ <sup>4</sup> , мкВ (п-п) 0.1...10 Гц	$I_{\text{потр}}$ <sup>5</sup> , мА	Производитель
	мин.	макс.												
AD8628/29/30	2.7	5.5	+/+	2.5	1	5	0.002	120	130	125	22	0.5	1.1	Analog Devices
ADA4051-1/-2	1.8	5.5	+/+	0.115	0.04	15	0.02	125	125	130	95	1.96	0.017	Analog Devices
CS3001	2.7	6.7	-/+	4	5	10	0.05	120	136	300	6	0.125	2.1	Cirrus Logic
ICL76503	4.5	16	-	2	2.5	$\pm 1$	0.02	140	140	130	*	2	3	Intersil
LTC2055	2.7	6	-/+	0.5	0.5	3	0.03	130	130	140	85	1.6	0.15	Linear Technology
MAX9617	1.8	5.5	+/+	1.5	0.7	10	0.12	135	135	138	42	0.42	0.059	Maxim
TLC2652AC	$\pm 1.9$	$\pm 8$	-	1.9	1.8	2.35	0.03	140	135	150	140	2.8	2.5	Texas Instruments
LMP2021	2.2	5.5	-/+	5	2.5	$\pm 5$	$\pm 0.02$	141	130	150	11	0.26	1.1	National Semiconductor

<sup>1</sup> Коэффициент подавления нестабильности питания (PSRR).

<sup>2</sup> Коэффициент усиления в режиме большого сигнала (Avol).

<sup>3</sup> Спектральная плотность шума, приведенного ко входу (Noise @ 1 kHz).

<sup>4</sup> Размах напряжения шума в диапазоне частот 0.1...1 Гц, приведенный ко входу.

<sup>5</sup> Значение тока потребления приведено для одного канала усилителя.

\* Для усилителя ICL76503 производитель вместо  $S_{\text{ш}}$  приводит в data sheet значение спектральной плотности шумового тока 0.01 нА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ .

ных усилителей, используемых для усиления сигналов различных датчиков в медицинской, геодезической и контрольной аппаратуре. При использовании таких усилителей в малогабаритной переносной аппаратуре весьма существенным является потребление энергии и по этому параметру наилучшими являются усилители ADA4051-1 и MAX9617. По совокупности параметров наилучшими усилителями с нулевым дрейфом напряжения смещения являются AD8628 (Analog Devices), CS3001 (Cirrus Logic) и LMP2021 (National Semiconductor).

### ЛИТЕРАТУРА

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

2. ГОСТ 19480-89 (ДСТУ 2306-93). Микросхемы интегральные. Термины и определения.

3. Рутковски Дж. Интегральные операционные усилители: Справочное руководство. – М.: Мир, 1978. – 324 с.

4. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. По материалам семинара "Practical design techniques for sensor signal conditioning". – [http://sensoru.narod.ru/literature/24Methody\\_prakt\\_modelirov.pdf](http://sensoru.narod.ru/literature/24Methody_prakt_modelirov.pdf).

5. Алексеенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.

6. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом ДОДЭКА, 2005. – 528 с.

7. [http://www.analog.com/library/analog-dialogue/archives/44-03/zero\\_drift.pdf](http://www.analog.com/library/analog-dialogue/archives/44-03/zero_drift.pdf).

8. [http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS3001-02\\_F9.pdf](http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS3001-02_F9.pdf).

9. <http://www.intersil.com/data/fn/fn2920.pdf>.

10. <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/20545fc.pdf>.

11. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9617-MAX9620.pdf>.

12. <http://www.ti.com/lit/gpn/tlc2652a>.