

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ АНАЛОГОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ: ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С УНИКАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ И ПАРАМЕТРАМИ

**Андрей Данилов**, к.т.н., старший научный сотрудник Института проблем управления РАН им. В.А.Трапезникова

**В третьей статье серии рассматривается интегральный ОУ с фиксацией входного уровня на неинвертирующем входе и микросхемы «промышленных» усилителей, обеспечивающие экстремально низкий порог чувствительности по напряжению.**

## ИОУ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПОРОГАМИ ОГРАНИЧЕНИЯ НА НЕИНВЕРТИРУЮЩЕМ ВХОДЕ

Прибор AD8036 [1] не является универсальным усилителем-ограничителем. Возможно, по этой причине компания Analog Devices зарегистрировала для него специальную торговую марку CLAMPIN. Мы проанализируем архитектуру и параметры AD8036 отдельно от «классических» ИОУ с ограничителем на выходе, которые были рассмотрены в предыдущем обзоре [2].

Упрощенная блок-схема широкополосного биполярного ИОУ типа AD8036/8037 приведена на рисунке 1, где  $V_H$  и  $V_L$  — выходы для подачи напряжений верхнего и нижнего уровней ограничения, соответственно. Несмотря на то, что AD8036 — усилитель с обратной связью по напряжению (VFB), номинал резистора обратной связи  $R_F$  является критическим для поддержания устойчивости прибора в режиме повторителя напряжения (коэффициент передачи  $K_{\Pi} = +1 \text{ В/В}$ )<sup>1</sup>, что не характерно для приборов такого типа. Оптимальным значением является  $R_F = 140 \text{ Ом}$ .

Блок A1 — дифференциальный усилитель напряжения с однофазным выходом (малосигнальная полоса пропускания 240 МГц, скорость нарастания 1200 В/мкс), A2 — выходной буферный усилитель с единичным усилением. Очевидно, что дифференциальные входы A1 не равноценны из-за наличия входного повторителя и схемы коммутации (см. рис. 1) в цепи неинвертирующего входа, а пороги ограничения на выходе A2 зависят от коэффициента передачи.

Ограничение входного сигнала работает следующим образом.

Компараторы  $C_H$  и  $C_L$  верхнего и нижнего порогов, соответственно, отслеживают разность напряжений между установленными порогами ограничения  $V_H$  и  $V_L$  и напряжением на неинвертирующем входе усилителя  $+V_{IN}$ . Выходные сигналы компараторов через дешифратор D управляют коммутатором S1 согласно таблице состояний (см. рис. 1). При выходе сигнала на входе  $+V_{IN}$  за установленные пределы коммутатор переключается в положение B или C; в остальных случаях ключ S1 находится в положении A.

В описании прибора упоминается, что компараторы имеют ту же полосу пропускания (240 МГц), что и усилитель A1. На мой взгляд, время задержки «связки» компаратор-коммутатор в такой схеме должно быть существенно меньше суммарного времени задержки усилителей A1 и A2, охваченных отрицательной обратной связью (ООС) через резистор  $R_F$ , чтобы дополнительно не разба-

лансировать динамику входов ИОУ в окрестности порогов ограничения, т.е.  $|V_H|, |V_L| \pm 50 \text{ мВ}$ . Поскольку компараторы должны иметь гистерезис, фактические пороги переключения S1 при входе в режим «ограничения» и выходе из него будут различаться. Повторитель напряжения в канале A ( $+V_{IN}$ ) необходим для изоляции тока коммутационной помехи и сопротивления ключа S1 от источника сигнала. Однако шумовое напряжение и смещение входного повторителя суммируются (как независимые величины) с аналогичными характеристиками усилительного блока A1. Поэтому в спецификации на ИОУ типа AD8036/8037 приводится напряжение смещения только для инвертирующего входа.

Время восстановления усилителя после двукратной перегрузки по неинвертирующему входу составляет 1,5 нс. В режиме «ограничения» возрастают входные токи опорных входов  $V_H$  и  $V_L$ , поэтому желательно использовать низкоомные источники пороговых напряжений для поддержания заявленной изготовителем точности ограничения ( $\pm 30 \text{ мВ}$  при  $K_{\Pi} = +1 \text{ В/В}$ ). Максимальное «рас-

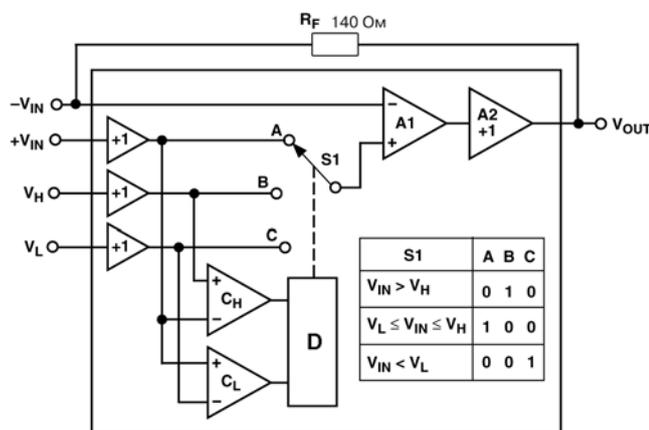


Рис. 1. Блок-схема ИС усилителя AD8036/8037

<sup>1</sup> AD8037 скорректирован для  $K_{\Pi} > 2 \text{ В/В}$

стояние» между порогами ограничения не должно превышать 6,3 В при напряжении питания усилителя  $\pm 5$  В. Остальные параметры AD8036/8037 являются типовыми для биполярных приборов с таким быстродействием.

Разнообразие возможных схем применения AD8036/8037 не так велико, как для усилителей с ограничением на выходе. Однако отсутствие заметной деградации линейности вплоть до «окрестности» порогового напряжения  $\pm 50$  мВ  $\times K_{\text{П}}$  на выходе и более резкая (в сравнении с конкурентами) характеристика ограничения в какой-то мере компенсируют принципиальные недостатки данного прибора.

### «ПРОМЫШЛЕННЫЕ» УСИЛИТЕЛИ

Основное назначение так называемых промышленных (industrial) усилителей — измерительная и геофизическая аппаратура. Обычно такие усилители применяются для нормализации сигналов сверхмалых напряжений (десятки нановольт) в полосе частот от постоянного тока до нескольких килогерц с целью дальнейшей обработки и преобразования в цифровую форму. При решении таких задач необходимо усиливать сигналы датчиков (термопар, динамометров, термоэлементов, геофинов и т.п.) на 50...100 дБ. Фактически эти «промышленные» ИОУ, которые не содержат прецизионных резисторов на кристалле, являются элементной базой измерительных усилителей [3].

Интегральные ОУ, выполненные по биполярной технологии, могут обеспечить требуемый порог чувствительности по напряжению при спектральной плотности шума 2...3 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , но не на постоянном токе, а примерно от 3...10 Гц (ниже проявляется фликер-

шум), и только с очень низкоомными датчиками (в том числе из-за большого входного тока). Стандартные ИОУ на КМОП-транзисторах в лучшем случае имеют в 4–6 раз большую спектральную плотность напряжения шума на средних частотах (более 5 кГц) при частоте среза фликер-шума 1...2 кГц. Шумовые параметры биполярных ИОУ с входными каскадами на полевых транзисторах с р-п-переходом находятся где-то посередине [4].

Коэффициент усиления современного, достаточно широкополосного (20 МГц) биполярного ИОУ с разомкнутой петлей обратной связи не превышает 140 дБ на постоянном токе. Таким образом, петлевое усиление (loop gain) при  $K_{\text{П}} = 1000$  В/В или 60 дБ составит  $140 - 60 = 80$  дБ, а полоса пропускания — примерно 20 кГц. Чтобы реализовать в «геофизической» полосе рабочих частот 0...2 кГц погрешность и линейность на уровне 1–3%, необходимо обеспечить как минимум на 10 дБ большее петлевое усиление<sup>2</sup> в звуковой полосе, что затруднительно без формирования определенного вида АЧХ разомкнутого усилителя, т.е. ИОУ должен иметь специальные выводы для подключения внешних цепей частотной коррекции.

Кроме того, температурный дрейф входного каскада на биполярных транзисторах пропорционален «технологическому» напряжению смещения, т.е. определяется фактическим различием геометрии транзисторов, наличием и симметрией примесей и т.п. Поэтому, даже если скомпенсировать внешними средствами напряжение смещения в статике, его температурный и временной дрейф останутся на том же уровне. Лучшие образцы биполярных

ИОУ обеспечивают напряжение смещения 50...100 мкВ и температурный дрейф 1...3 мкВ/°С.

Для преодоления технологических ограничений были разработаны структурные методы и схемотехнические решения, применяемые в ИОУ с периодической компенсацией дрейфа (ПКД, auto zeroing) и модуляцией/демодуляцией (МДМ, chopping). Принцип действия ОУ-МДМ заключается в модуляции сигнала постоянного тока, его усилении (в виде сигнала переменного тока) на частоте гораздо выше частоты среза фликер-шума и последующей демодуляции с НЧ-фильтрацией, тогда как ОУ-ПКД большую часть времени работает как обычный усилитель постоянного тока, но регулярно «отвлекается» на измерение и компенсацию собственного напряжения смещения. К счастью, и те, и другие усилители хорошо реализуются по КМОП-технологии и могут обеспечить низкий шумовой ток.

На практике ОУ-МДМ очень редко реализуют в «чистом» виде, а усилительный тракт МДМ используют в виде параллельного низкочастотного канала, который непрерывно компенсирует дрейф напряжения смещения и фликер-шум основного широкополосного усилителя (т.н. схема Гольдберга). Поэтому в общем случае ИОУ-МДМ может обеспечить меньшее значение напряжения шума в полосе 0,1...10 Гц, чем ИОУ-ПКД.

Приборы серии CS30xx компании Cirrus Logic [5], строго говоря, являются операционными усилителями с преобразованием сигнала. Однако их уникальные параметры позволили изготовителю отнести их к «промышленным» усилителям<sup>3</sup>. Основные характеристики микросхем CS30xx приведены в таблице 1.

Таблица 1. Типовые параметры КМОП-усилителей серии CS30xx компании Cirrus Logic

Модель	Число каналов	Коэффициент усиления без ООС, дБ	Частота модуляции, кГц	Напряжение смещения, мкВ	Дрейф напряжения смещения, нВ/°С	Спектральная плотность напряжения шума, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте, Гц	Размах напряжения шума, нВ, в полосе 0,1...10 Гц	Произведение усиления на полосу пропускания, МГц	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	Входной ток, пА	Напряжение питания, В	Ток потребления, мА, на канал	
3001	1	300	180	10	10	6/0,5	125	4	5	100	2,7...6,7	2,1	
3002	2	300	180			6/0,5	125	4	5	100	2,7...6,7	1,8	
3003	1	150	150			17/1	350	2	0,25	170	2,7...5,5	1,0	
3004	2	150	150			17/1	350	2	0,25	170	2,7...5,5	1,0	
3011	1	300	180			12/0,5	250	2	2	50	2,7...6,7	0,9	
3012	2	300	180			12/0,5	250	2	2	50	2,7...6,7	0,85	
3013	1	135	125			50	22/0,5	460	1	0,25	170	2,7...5,5	0,5
3014	2	135	125				22/0,5	460	1	0,25	170	2,7...5,5	0,5

<sup>2</sup> Подразумевается модуль погрешности; для обеспечения векторной погрешности 1–3% требования к петлевому усилению значительно возрастают.

<sup>3</sup> Это расширительное определение используется фирмой Cirrus Logic на интернет-странице [www.cirrus.com](http://www.cirrus.com).

Первый параметр, который обращает на себя внимание — разомкнутый коэффициент усиления — 300 дБ или  $10^{15}$  В/В, который указан для половины приборов серии CS30xx. Такое усиление на постоянном токе иногда реализуют в многокристальных, гибридных или модульных ОУ; монолитные усилители, выполненные по схожей КМОП-технологии, например, LTC1250 (ПКД) фирмы Linear Technology [6], демонстрирует более скромные значения в 125...170 дБ.

На рисунке 2 приведена упрощенная блок-схема ИОУ типа CS3001 (на самом деле, усилитель имеет дифференциальный канал МДМ), а на рисунке 3 — АЧХ и ФЧХ разомкнутого усилителя. Фактически, ИОУ имеет четыре каскада усиления напряжения (А1—А4) и выходной усилитель А5. Это позволяет получить требуемое усиление при использовании КМОП-транзисторов, крутизна преобразования которых значительно меньше, чем у биполярных транзисторов сравнимого быстродействия [4].

Такой многокаскадный усилитель дает столь большой набег фазы ( $400^\circ$  на 1 кГц), что его необходимо компенсировать параллельными высокочастотными каналами усиления (т.н. схема Бакерфилда). В результате уже на частоте 100 кГц сдвиг фазы уменьшается до  $100^\circ$ , и усилитель можно охватить довольно глубокой общей ООС ( $K_{\Pi} = 30...50$  В/В) без риска возникновения неустойчивости в условиях реальной емкостной нагрузки.

Использование схемы с параллельными каналами также позволило реализовать очень большое разомкнутое усиление на частоте 2 кГц (примерно 150 дБ), что обеспечивает достаточное петлевое усиление в «геофизической» полосе частот даже при  $K_{\Pi} > 50$  дБ, и скорость нарастания выходного напряжения 5 В/мкс. На частоте 1 кГц при  $K_{\Pi} = 30$  дБ усилитель CS3001 обеспечивает погрешность линейности, эквивалентную разрешению 20-разрядного АЦП.

Очень высокая частота модуляции (180 кГц), использованная в CS3001, позволяет обойтись встроенными конденсаторами фильтра на выходе демодулятора и в значительной мере обеспечить выдающиеся параметры спектральной плотности напряжения шума и быстрого дрейфа, приведенные на рисунке 4. Следует отметить, что на частоте примерно 2 кГц канал МДМ отключается, и спектральная плотность напряжения шума начинает возрастать со скоростью 20 дБ/декаду. Поэтому в системе сбора данных

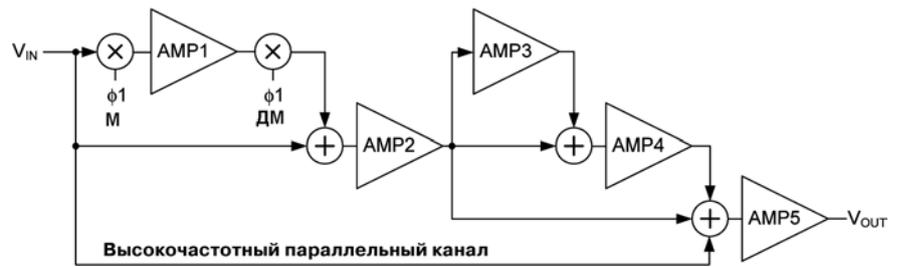


Рис. 2. Блок-схема ИС усилителя CS3001

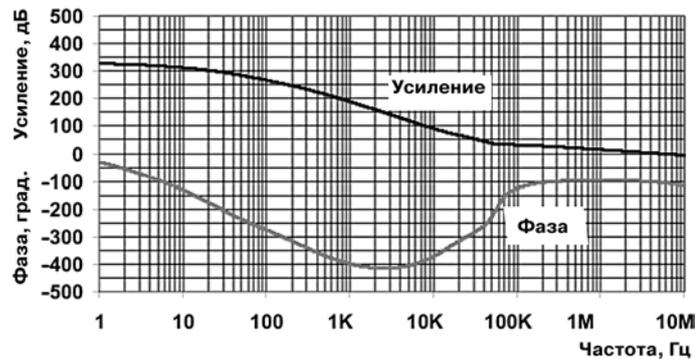


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ разомкнутого усилителя CS3001

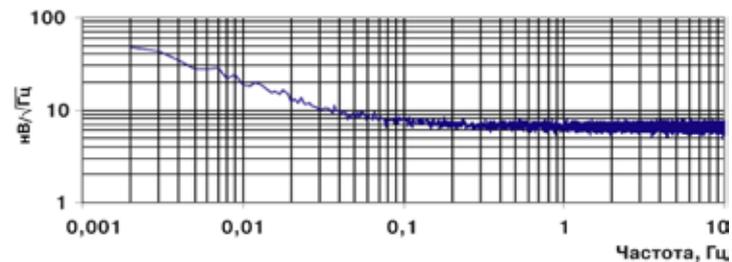


Рис. 4. График спектральной плотности напряжения шума усилителя CS3001: частота среза фликер-шума составляет 0,08 Гц

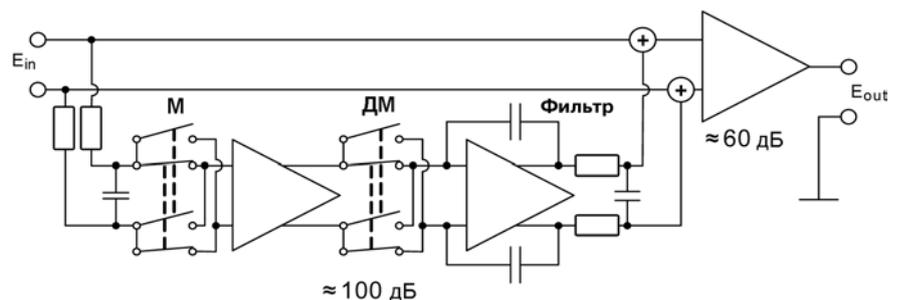


Рис. 5. Упрощенная принципиальная схема ИС усилителя CS3003

необходимо предусмотреть соответствующий аналоговый или цифровой ФНЧ для ослабления внеполосного шума.

С ростом частоты преобразования, как правило, возрастает входной ток ОУ-МДМ и его шумовая составляющая, обусловленные паразитным зарядом переключения модулятора. Однако размах шумового тока CS3001 составляет всего 1,9 пА в полосе 0,1...10 Гц (при токе 100 пА), что свидетельствует о хорошо опти-

мизированной топологии модулятора. Для сравнения: входной ток ОУ-ПКД типа AD8628 [1] составляет 50 пА при частоте коммутации 15 кГц.

На рисунке 5 приведена упрощенная принципиальная схема усилителей CS3003/04/13/14, которая гораздо больше похожа на классическую схему Гольдберга, чем схема, показанная на рисунке 2. Дифференциальный низкочастотный канал МДМ обеспечивает большую часть общего разомкнутого усиления

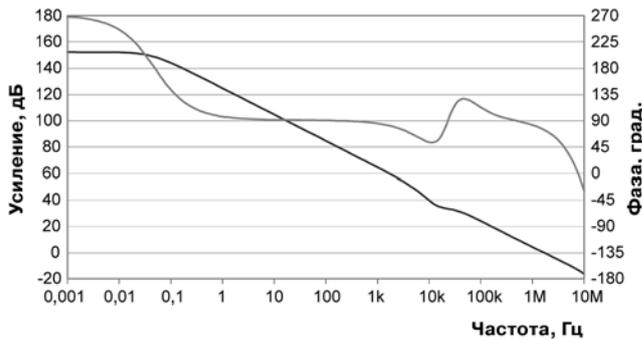


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ разомкнутого усилителя CS3003

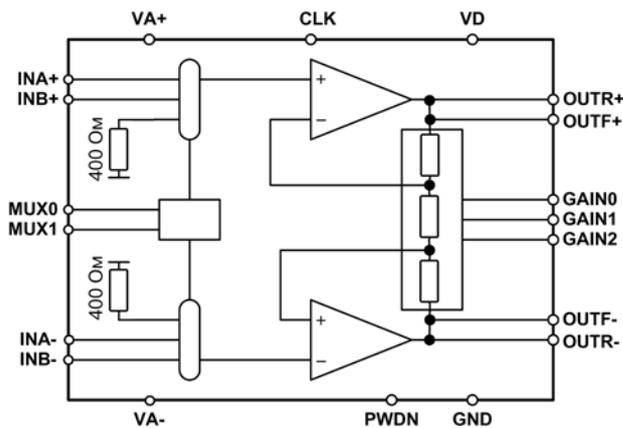


Рис. 7. Упрощенная схема измерительного усилителя CS3301

на постоянном токе (150...160) дБ и высокие статические и шумовые параметры (см. табл. 1). Область сопряжения двух каналов (когда канал МДМ отключается, а широкополосный канал включается) хорошо заметна в районе частоты 20 кГц на графиках АЧХ и ФЧХ разомкнутого усилителя CS3003/04/13/14, которые приведены на рисунке 6.

На базе ИОУ типа CS3002 разработан интегральный измерительный усилитель CS3301A, упрощенная схема которого показана на рисунке 7. Усилитель имеет два коммутируемых (посредством управляющих входов MAX0, MAX1) набора дифференциальных входов (А и В); третье положение коммутатора входов (внутренние резисторы по 400 Ом) предназначено для измерения напряжения смещения в цикле калибровки прибора. Напряжение смещения не превышает ±15 мкВ (0,1 мкВ/°С), входной ток 2 нА. Полоса пропускания составляет 0...2 кГц; коэффициент передачи выбирается управляющими сигналами на выводах GAIN0—GAIN2 из ряда 1; 2; 4; 8; 16 и 64 В/В (±1%). Усилитель CS3301A обеспечивает спектральную плотность напряжения

шума  $8,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  в полосе частот 0,1 Гц...2 кГц и размах напряжения шума 180 нВ в полосе 0,1...10 Гц. Уровень общих гармонических искажений не превышает -116 дБ на частоте 31 Гц при любом коэффициенте передачи из указанного ряда, а наихудшее значение погрешности линейности составляет 0,00025% на той же частоте, при полной шкале выходного дифференциального сигнала 5 В.

Фирма Cirrus Logic предлагает набор конструкторской документации и программного обеспечения для эталонной конструкции CRD5376, реализующей 4-канальный ввод и обработку геофизических сигналов с использованием измерительных усилителей CS3301/3302 в качестве входных приборов для подключения геофонов и гидрофонов.

Основная задача конструктора, проектирующего устройство на базе промышленного усилителя, — *не ухудшить его параметры* в законченном коммерческом приборе. В рекомендациях по применению, выпускаемых изготовителями ИС, часто опущены (или упущены) некоторые соображения, без учета которых

потенциал уникальных усилителей не будет реализован.

Важнейшим требованием к конструкции платы усилительного модуля является однородность теплового поля во всем его объеме и отсутствие тепловых градиентов. Несмотря на то, что в большинстве корпусов современных ИС применяются медные выводы, соединения пайкой и металлические покрытия контактов часто образуют термические и гальванические пары, создающие разность потенциалов<sup>4</sup>. Даже спай проводников, выполненных из меди различных марок, может генерировать термоЭДС 1 мкВ/°С. Диэлектрики печатных плат, экранированные кабели и некоторые популярные разновидности конденсаторов могут генерировать паразитные токи при изменении влажности, температуры, давления и механических вибрациях; резисторы, кроме термоЭДС до нескольких сотен мкВ/°С, могут генерировать большое напряжение низкочастотного шума.

Эти эффекты — в совокупности, по отдельности или в любых сочетаниях — не проявляют себя в подавляющем большинстве усилительных схем. Проблемы начинаются, когда инженер-конструктор должен реализовать микровольтовый усилитель постоянного тока, адекватный техническим параметрам используемого ИОУ, в виде промышленного модуля, работающего в жестких полевых условиях (а не «ежика на проволочках» в стерильной лаборатории).

Большое внимание также следует уделять схемотехническим методам предотвращения перегрузки входов и выходов промышленных усилителей. Импульсная помеха на входе или короткое замыкание на выходе усилителя могут нарушить электрическую и тепловую симметрию КМОП-модулятора. Это приводит к значительному увеличению напряжения смещения и входного тока, которые иногда возвращаются к нормальным значениям несколько часов спустя, хотя работоспособность прибора восстанавливается через 50...100 мкс. Задача усложняется тем, что практически невозможно применить схемы подавления напряжения помехи, используемые в описанных выше усилителях-ограничителях, поскольку эти методы подразумевают прохождение больших токов через входные цепи.

Изменения синфазного напряжения, прилагаемого к дифференци-

<sup>4</sup> Например, пара золото-кремний генерирует термоЭДС величиной 300 мкВ/°С.

альным входам усилителя с преобразованием сигнала, также могут приводить к «перекосу» модулятора и возрастанию паразитного заряда переключения, со всеми вытекающими последствиями. Например, диапазон допустимого синфазного напряжения, где КОСС  $\geq 115$  дБ на постоянном токе, для прибора CS3001 составляет 0...3,75 В при напряжении питания 5 В, т.е. имеет значительную асимметрию относительно среднего значения 2,5 В. Для радикального решения проблемы

иногда применяют схему выделения синфазного сигнала, которая управляет «скользящим» напряжением питания промышленного ОУ. В качестве датчика синфазного напряжения можно использовать быстродействующий повторитель на КМОП-ИОУ с входным током до 10 пА, а точные пределы изменения синфазного напряжения установить при помощи AD8036.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. [www.analog.com](http://www.analog.com).

2. Данилов А.А. Специализированные аналоговые микросхемы: Усилители-ограничители//ЭК №9, 2007 с.34-39.

3. Данилов А.А. Интегральные измерительные усилители//ЭК№1, 2005, с.72-80.

4. Данилов А.А. Современные интегральные операционные усилители//ЭК №8 и №9, 2004.

5. Johnston Jerome. CS3001/2/11/12 and CS3003/4/13/14 Chopper-stabilized Operational Amplifiers. Cirrus Logic, Inc., DS770WP1, February 2007.

6. [www.linear.com](http://www.linear.com).