

# Усилители с автоматической коррекцией нуля: без мистики – Часть 1

**Они действительно подавляют  
смещение, дрейф и шум вида 1/f.  
Как они работают?  
Есть ли у них недостатки?**

Эрик Нолан

## ВВЕДЕНИЕ

Когда заходит речь об усилителях с автокоррекцией нуля (усилителях со стабилизацией прерыванием, т.н. chopper), то неизбежно встает вопрос: как же они на самом деле работают? Помимо любопытства по поводу их внутреннего устройства у многих инженеров, возможно, возникает следующий вопрос: "Их точность по постоянному току впечатляет, но с какими странностями в их поведении я могу столкнуться при использовании этих усилителей в своей схеме, и как мне избежать проблем?" В данной статье (Часть 1) мы попытаемся ответить на оба данных вопроса. В части 2 будут приведены некоторые распространенные схемы применения этих усилителей в качестве иллюстрации значительных преимуществ, а также некоторых недостатков этих компонентов.

## Усилители с автокоррекцией нуля – как они работают?

Первый усилитель с прерыванием (chopper) был создан более 50 лет назад с целью победить дрейф усилителей постоянного тока; в нем сигнал постоянного тока преобразовывался в переменный сигнал. В первоначальном варианте применялось преобразование сигнала с помощью электронных ключей с последующей синхронной демодуляцией для восстановления сигнала постоянного тока на выходе. Эти усилители имели очень ограниченную полосу пропускания и требовали последующей фильтрации сигнала для подавления значительных выбросов напряжения, вызванных работой схемы переключения.

В современных усилителях со стабилизацией прерыванием проблема ограничения полосы пропускания решена за счет того, что прерыватель используется для стабилизации обычного широкополосного усилителя, через который и проходит усиливаемый сигнал\*. Первые усилители со стабилизацией прерыванием были разработаны

так, что могли работать только в инвертирующем включении, так как выход стабилизирующего усилителя был подключен напрямую к неинвертирующему входу широкополосного дифференциального усилителя. В современных микросхемах усилителей со стабилизацией прерыванием автоматическая установка нуля производится с помощью двухкаскадной или более сложной схемы. Их отличие заключается в том, что сигнал стабилизирующего усилителя подается на широкополосный основной усилитель через дополнительный вход "установки нуля", а не через один из дифференциальных входов. Сигнал высокой частоты минует каскад установки нуля за счет прямого подключения к основному усилителю или за счет использования связи вперед, обеспечивающей стабильное нулевое смещение на входе в широком диапазоне частот.

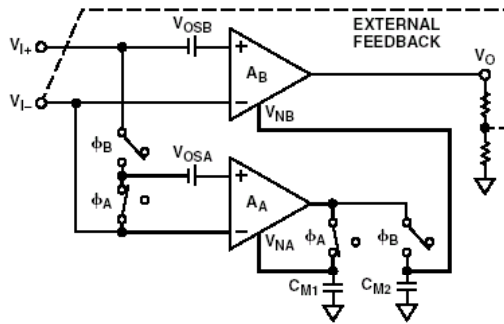
Таким образом, эта технология обеспечивает стабильность по постоянному току и хорошие частотные характеристики, причем возможно включение усилителя как в инвертирующей, так и в неинвертирующей конфигурации. Однако в таком усилителе на качество сигнала может повлиять цифровой шум переключения, поэтому на высокой частоте его преимущества могут быть утрачены. В таком усилителе также возникают интермодуляционные искажения (IMD), которые проявляются в виде побочных частотных составляющих с частотами, равными сумме и разности частот сигнала переключения и усиливаемого сигнала. Более подробно об этих аспектах будет рассказано ниже.

## Принцип работы усилителя с автокоррекцией нуля

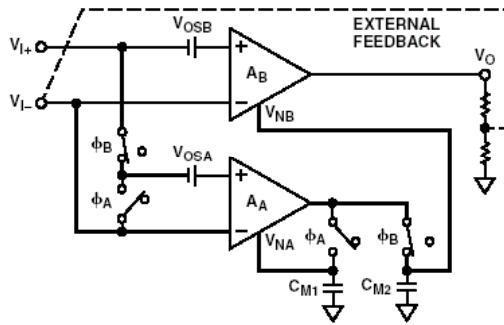
Усилитель с автокоррекцией нуля обычно работает в две фазы, как показано на рис. 1а и 1б. Упрощенная схема состоит из усилителя автоподстройки нуля ( $A_A$ ), основного (широкополосного) усилителя ( $A_B$ ), конденсаторов, на которых сохраняется значение напряжения ( $C_{M1}$  и  $C_{M2}$ ) и переключателей входов/конденсаторов. Весь усилитель показан в стандартном включении с коэффициентом усиления больше единицы.

Во время *Фазы А* (рис. 1а), фазы установки нуля вспомогательного усилителя, входной сигнал подается только на основной усилитель ( $A_B$ ); на вход установки нуля основного усилителя подается напряжение, сохраненное на конденсаторе  $C_{M2}$ ; усилитель автоподстройки нуля ( $A_A$ ) измеряет свое собственное смещение, сохраняя значение корректирующего напряжения на  $C_{M1}$ . Во время *фазы В* усилитель автоподстройки нуля имеет нулевое значение напряжения смещения, так как оно скорректировано за счет напряжения, сохранившегося на  $C_{M1}$ . Этот усилитель ( $A_A$ ) усиливает напряжение смещения на входе основного усилителя и подает корректирующий сигнал на вход установки нуля основного усилителя и на конденсатор  $C_{M2}$ .

\*Edwin Goldberg and Jules Lehmann, U. S. Patent 2,684,999: Stabilized dc amplifier.



а. Фаза А: Усилитель автоподстройки нуля корректирует свое собственное смещение



б. Фаза В: усилитель автоподстройки нуля корректирует смещение основного усилителя.

Рис. 1. Две фазы работы усилителя с автоподстройкой нуля

Оба усилителя представляют собой операционные усилители с дифференциальными входами и с дополнительным входом подстройки смещения (рис. 2).

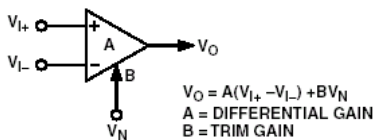


Рис. 2. Операционный усилитель с подстройкой смещения

Во время фазы компенсации смещения усилителя  $A_A$  (Фаза 1 на рис. 1а) входы усилителя автоподстройки нуля замкнуты накоротко друг с другом и на инвертирующий вход всей схемы (т.е. на вход  $A_A$  подается только синфазное напряжение). Усилитель  $A_A$  компенсирует свое собственное напряжение смещения за счет обратной связи с выхода на вывод компенсации, какая бы величина компенсирующего напряжения не требовалась; при этом произведение компенсирующего напряжения и коэффициента усиления сигнала коррекции приблизительно равно напряжению смещения ( $V_{OS}$ ) усилителя  $A_A$ . Компенсирующее напряжение одновременно сохраняется на конденсаторе  $C_{M1}$ . Тем временем основной усилитель работает как обычный операционный усилитель. Его напряжение смещения компенсировано за счет напряжения коррекции, хранящегося на конденсаторе  $C_{M2}$ .

Во время фазы коррекции основного усилителя (Фаза В – рис. 1б) входы усилителя автоподстройки нуля подключаются ко входам основного усилителя.

Конденсатор  $C_{M1}$  теперь поддерживает соответствующее напряжение на выводе компенсации усилителя автоподстройки нуля  $A_A$ , так что усилитель имеет нулевое значение напряжения сдвига.

Дифференциальный входной сигнал усиливается усилителем автоподстройки нуля ( $A_A$ ) и далее усиливается схемой компенсации напряжения смещения основного усилителя. Этот же сигнал усиливается напрямую основным усилителем ( $A_B$ ). Обратная связь операционного усилителя будет способствовать тому, чтобы на выходе усилителя  $A_A$  установилось напряжение компенсации, при котором дифференциальное напряжение на входе основного усилителя ( $A_B$ ) было близко к нулю. Выходной сигнал усилителя  $A_A$ , кроме того, сохраняется на конденсаторе  $C_{M2}$ , который будет обеспечивать поддержание соответствующее напряжение на входе компенсации основного усилителя  $A_B$  во время следующей фазы А.

Общий коэффициент усиления на постоянном токе с разомкнутой петлей обратной связи всего усилителя приблизительно равен произведению коэффициента усиления вспомогательного усилителя  $A_A$  на коэффициент усиления по входу установки нуля основного усилителя. Значение напряжения смещения для всей схемы приблизительно равно сумме напряжений смещения основного и вспомогательного усилителей, деленной на коэффициент усиления по входу установки нуля основного усилителя. Высокий коэффициент усиления по входу установки нуля основного усилителя дает в результате малое значение напряжения смещения всего усилителя.

Когда опять наступает фаза А цикла, постоянное смещение на входе основного усилителя по-прежнему корректируется за счет напряжения, сохраненного на конденсаторе  $C_{M2}$ . Цикл периодически повторяется с частотой, определяемой внутренним тактовым генератором и логическими схемами. Для более подробной информации о принципах работы усилителей с автокоррекцией нуля обращайтесь к техническим описаниям ИС AD8551, AD8552, AD8554 или AD857х.

## Характеристики усилителя с автокоррекцией нуля

Теперь, когда мы в целом представляем, как работает этот усилитель, рассмотрим его свойства в сравнении с "обычным" усилителем. Прежде всего запомните, что распространенный миф о небольшой ширине полосы частот усилителей с автоподстройкой нуля – это вздор: ширина полосы частот усилителя не связана с частотой работы схемы коррекции. Хотя частота работы схемы коррекции обычно составляет сотни или тысячи Гц, произведение усиления на полосу пропускания и частота единичного усиления большинства современных усилителей с автокоррекцией нуля составляет 1 – 3 МГц или даже больше.

Данный усилитель обладает многочисленными преимуществами, которые обеспечивает его

конфигурация: коэффициент усиления по постоянному току с разомкнутой петлей обратной связи, равный произведению коэффициентов усиления двух усилителей, очень велик, обычно более  $10^7$ , или 140 dB. Напряжение смещения на входе очень мало по причине высокого коэффициента усиления по входу установки нуля основного усилителя. Типичное значение напряжения смещения для усилителя с автокоррекцией нуля – порядка одного микровольта. Низкое значение напряжения смещения также влияет на сопутствующие параметры: коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMR) на постоянном токе и коэффициент подавления влияния напряжения питания (PSR), которые обычно превышают 140 dB. Так как напряжение смещения постоянно корректируется, временной дрейф напряжения смещения чрезвычайно мал, порядка 40 – 50 нВ в месяц. То же самое относится и к температурному дрейфу. Температурный коэффициент напряжения смещения хорошо спроектированного усилителя составляет всего несколько нановольт на градус Цельсия.

Менее очевидное следствие особого устройства усилителя – это его способность подавлять шум вида  $1/f$ . В "обычных" усилителях плотность напряжения шума, приведенного ко входу, возрастает экспоненциально при понижении частоты ниже некоторого "порогового" значения частоты, которое находится в диапазоне от единиц до нескольких сотен Гц. Этот низкочастотный шум с точки зрения схемы коррекции напряжения смещения выглядит как погрешность напряжения смещения. Процесс автоматической коррекции смещения становится более эффективным на частотах, близких к постоянному току. В результате действия схемы коррекции смещения спектр низкочастотного шума становится горизонтальным вплоть до постоянного тока, т.е. устраняется шум вида  $1/f$ . Отсутствие шума вида  $1/f$  может быть огромным преимуществом в низкочастотных устройствах измерения сигнала, где обычны большие временные интервалы между отсчетами.

Так как входы этих усилителей выполнены по МОП-технологии, то ток смещения, равно как и шумовой ток, чрезвычайно малы. Однако по этой же причине производительность по широкополосному шуму напряжения весьма умеренная. Входы МОП обычно отличаются повышенным шумом напряжения, особенно если сравнивать их с прецизионными операционными усилителями, изготовленными по биполярной технологии, в которых применена крупноразмерная топология входных цепей (для того, чтобы повысить точность совпадения параметров); такие ОУ зачастую имеют большие входные токи. Операционные усилители AD855x фирмы Analog Devices обладают приблизительно в два раза меньшим уровнем шума по сравнению с основными аналогами конкурентов. Тем не менее имеются возможности для дальнейшего улучшения, и многие производители (и в том числе ADI) заявили

о своих планах по выпуску в будущем усилителей с автоподстройкой нуля с меньшим уровнем шума.

Во время работы электронных ключей в ИС происходит заряд конденсаторов. За счет этого, а также за счет других эффектов, связанных с переключением, возникают импульсные шумы на частоте внутреннего тактового генератора и ее гармониках. Эти шумы велики по сравнению с собственным широкополосным шумом усилителя; они могут быть источником погрешности, если попадают в полосу интересующего нас сигнала. Хуже того, эти помехи могут привести к интермодуляционным искажениям сигнала, в результате чего в выходном сигнале появятся составляющие на частотах, равных сумме и разности частот сигнала и схемы компенсации. Если вы знакомы с теорией аналого-цифрового преобразования, то данное явление очень похоже на наложение спектров (aliasing) входного сигнала и тактового генератора. На практике небольшая разница в коэффициентах усиления усилителя в различные фазы компенсации смещения приводит к тому, что коэффициент усиления при замкнутой цепи обратной связи изменяется на небольшую величину с частотой тактового генератора. Величина интермодуляционных искажений (IMD) зависит от этой небольшой разницы в коэффициенте усиления, и не имеет прямого отношения к шуму, вызываемому работой тактового генератора. Интермодуляционные (IMD) и гармонические искажения имеют величину обычно от  $-100$  dB до  $-130$  dB по отношению к полезному сигналу при замкнутой цепи обратной связи. Ниже вы увидите, что несложные схемотехнические решения позволяют уменьшить влияние как IMD, так и шума тактового генератора, если они находятся вне рабочей полосы.

В некоторых новых усилителях с автоподстройкой нуля, включая AD857x фирмы Analog Devices, применена новая схема тактового генератора, позволившая в значительной степени уменьшить вышеупомянутые недостатки усилителя. Микросхемы этого семейства позволяют избежать проблем, связанных с наличием единственной частоты тактового генератора за счет использования (патентованной) технологии тактирования с расширенным спектром, которая обеспечивает равномерный псевдослучайный шум схемы тактирования. Так как при этом отсутствуют одночастотные пики в спектре шума и "наложение" спектров, то эти усилители могут применяться при полосе сигнала, превышающей номинальную частоту работы тактового генератора, при этом сводя к минимуму шумы и помехи. Такие усилители в первую очередь полезны, если полоса частот сигнала превышает несколько кГц.

Некоторые новые модели усилителей работают при повышенной частоте работы схемы автоподстройки нуля; эта частота может быть выше, чем полоса частот полезного сигнала. Однако при этом значение напряжения смещения может несколько

увеличиться, также может увеличиться и входной ток (см. также ниже об инжекции заряда); все преимущества и недостатки должны быть тщательно взвешены. Особенное внимание, уделенное как схемотехнике, так и разводке платы, может способствовать уменьшению помех, связанных с работой схемы прерывания.

Как было сказано выше, практически во всех интегральных усилителях с автокоррекцией нуля входные каскады выполнены по МОП-технологии, поэтому они обладают очень малыми входными токами. Это очень хорошо для схем, где импеданс источника велик. Однако инжекция заряда приводит к некоторым нежелательным эффектам, связанным со входным током сдвига.

При низкой температуре ток утечки затворов и защитных входных диодов очень мал, таким образом во входном токе доминирует ток заряда емкости затворов входных транзисторов и емкости переключающих транзисторов. Заряд транзисторов инвертирующего и неинвертирующего входов происходит с разной полярностью, таким образом входные токи имеют противоположное направление. В результате получается, что *разница входных токов (ток смещения) больше, чем сами входные токи*. К счастью, входной ток, вызванный инжекцией заряда, очень мал, порядка 10–20 пА, и он довольно мало зависит от синфазного напряжения на входах.

Когда температура микросхемы повышается до 40–50°C, начинает доминировать ток утечки защитных диодов; и входной ток ОУ быстро повышается с ростом температуры (ток утечки диодов увеличивается приблизительно в два раза при повышении температуры на 10°C. Ток утечки имеет одну и ту же полярность на каждом входе, поэтому при повышенной температуре ток смещения становится меньше, чем входной ток. Входной ток в этом температурном диапазоне сильно зависит от входного синфазного напряжения, так как обратное напряжение на защитных диодах растет в соответствии с синфазным входным напряжением. В схеме, где защитные диоды подключены к обеим шинам питания, направление входного тока меняется, когда входное синфазное напряжение выходит за пределы напряжения источника питания.

Так как для заряда/разряда конденсаторов требуется время, многие усилители с автоподстройкой нуля довольно долго восстанавливаются после перехода выходного сигнала в режим насыщения (обычно этот параметр называется временем восстановления из режима насыщения). Это в первую очередь относится к схемам со внешними конденсаторами. Более новые разработки со внутренними конденсаторами восстанавливаются быстрее, но все равно на это требуются миллисекунды. Операционные усилители семейств AD855x и AD857x восстанавливаются еще быстрее – за время не более 100 мкс. Это также относится и ко времени входа в рабочий режим после включения питания.

Наконец, как следствие наличия достаточно сложных дополнительных схем, необходимых для коррекции напряжения смещения, схемы с автокоррекцией нуля характеризуются большим током потребления по сравнению с "обычными" усилителями при прочих равных параметрах (полосе частот, скорости нарастания выходного напряжения, шуме по напряжению и времени восстановления). Даже самым малопотребляющим усилителям с автокоррекцией для работы требуется ток в сотни микроампер; при этом они обладают весьма умеренными характеристиками: полоса частот 200 кГц, плотность шума около 150 нВ/√Гц на частоте 1 кГц. Для сравнения, некоторые стандартные ОУ, выполненные по КМОП или биполярной технологии, приблизительно при той же полосе частот и гораздо меньшем уровне шума, потребляют меньше 10 мкА.

### Применение.

Несмотря на все перечисленные выше отличия, в применении операционные усилители с автоподстройкой нуля не слишком отличаются от других ОУ. В продолжении (Часть 2) данной статьи будут рассмотрены особенности применения ОУ с автоподстройкой нуля и будут приведены примеры применения данных ОУ для измерения тока в токовых шунтах, в датчиках давления и других мостовых схемах, датчиках инфракрасного излучения и в схемах прецизионных источников опорного напряжения.