

Операционные усилители с нулевым дрейфом

Печатается с разрешения Analog Devices, Inc (<http://www.analog.com>)

Реза Могими (США)

Перевод Андрея Данилова

В статье описаны методы построения и структурные схемы ИС усилителей с периодической компенсацией дрейфа и модуляцией/демодуляцией сигнала. Обсуждаются преимущества и недостатки таких усилителей. Приведены характеристики популярных ИОУ, реализованных по этим схемам.

Что такое усилители с нулевым дрейфом?

Усилители с нулевым дрейфом динамически корректируют своё напряжение смещения и придают другую форму своей спектральной плотности шума. Два широко используемых типа – усилители с периодической компенсацией дрейфа (ПКД) и со стабилизацией прерыванием (модуляцией-демодуляцией, МДМ) – достигают смещений нановольтового уровня и чрезвычайно низких дрейфов напряжения смещения от времени и температуры. Шум усилителей типа $1/f$ также наблюдается как ошибка по постоянному току, поскольку удаляется с тем же успехом. Усилители с нулевым дрейфом дают много преимуществ разработчикам, поскольку температурный дрейф и шум $1/f$, всегда являющиеся источником помех в системе, в противном случае весьма трудны для удаления. Кроме того, усилители с нулевым дрейфом имеют высокие разомкнутые усиления, ослабление пульсаций источника питания (КВНИП) и синфазного сигнала (КОСС) по сравнению с обычными усилителями; их общая выходная погрешность меньше, чем погрешность, получаемая стандартным прецизионным усилителем в аналогичной конфигурации.

Что такое хорошие приложения для усилителей с нулевым дрейфом?

Усилители с нулевым дрейфом используются в системах с ожидаемым временем эксплуатации более 10 лет и в сигнальных трактах, где применяются большие коэффициенты передачи (более 100 В/В) к сигналам низкого уровня и частоты (менее 100 Гц). Примеры использования можно найти в прецизионных весах, медицинском оборудовании, прецизионном измерительном оборудовании, а также в датчиках инфракрасных, мостовых и термоэлектрических интерфейсов.

Как работает периодическая компенсация дрейфа?

Усилители с ПКД, такие как AD8538, AD8638, AD8551 и AD8571, обычно корректируют входное смещение за две фазы тактовой частоты. Во время фазы А ключи, маркированные ϕA , замкнуты, тогда как ключи, маркированные ϕB , разомкнуты, как показано на рисунке 1. Напряжение смещения усилителя обнуления (nulling) измеряется и сохраняется на конденсаторе C_{M1} .

Во время фазы В ключи, маркированные ϕB , замкнуты, тогда как ключи, маркированные ϕA , разомкнуты, как показано на рисунке 2. Напряжение смещения основного (main) усилителя измеряется

и сохраняется на конденсаторе C_{M2} , пока напряжение, сохранённое на конденсаторе C_{M1} , подстраивает смещение усилителя обнуления. Затем общее смещение прикладывается к основному усилителю во время обработки входного сигнала.

Функция выборки и хранения превращает ПКД-усилители в дискретные системы, делая их склонными к эффектам наложения спектров и возвратного шума. На низких частотах шум изменяется медленно, поэтому вычитание двух последовательных выборок шума приводит к реальной компенсации. На высоких частотах эта корреляция уменьшается, и продукты вычитания погрешностей, обусловленных широкополосными составляющими, возвращаются в полосу пропускания. Таким образом, ПКД-усилители имеют больший шум в полосе пропускания, чем стандартные ОУ. Для снижения низкочастотного шума частота выборки должна быть увеличена, но это приводит к дополнительной инъекции заряда. Сигнальный тракт содержит только основной усилитель, поэтому можно получить относительно широкую полосу единичного усиления.

Как работает прерыватель?

Рисунок 3 показывает блок-схему МДМ-усилителя ADA4051, которая использует местную петлю обратной связи для автоматической коррекции. Основной сигнальный тракт содержит входную схему прерывателя CHOP1, усилитель тока, управляемый напряжением (ИТУН) G_m1 , выходную схему прерывателя CHOP2 и ИТУН G_m2 . Прерыватели CHOP1 и CHOP2 модулируют первоначальное смещение и шум $1/f$

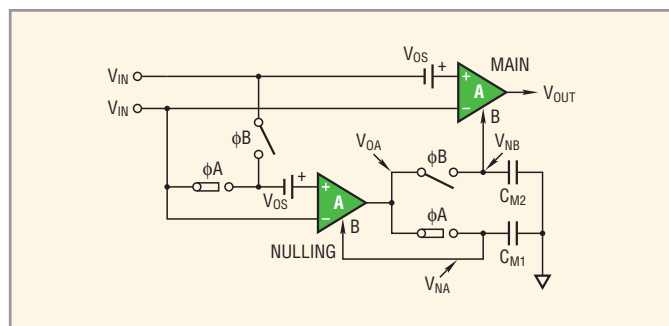


Рис. 1. Фаза А усилителя с ПКД: фаза обнуления

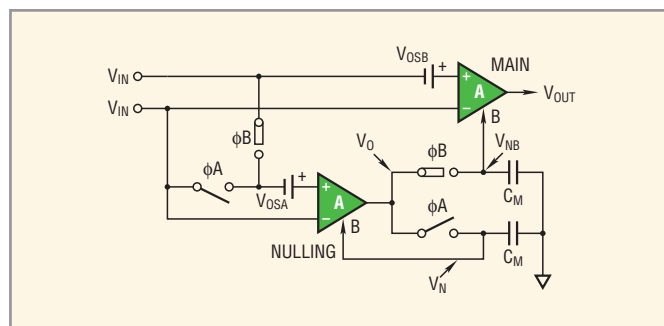


Рис. 2. Фаза В усилителя с ПКД: фаза компенсации смещения

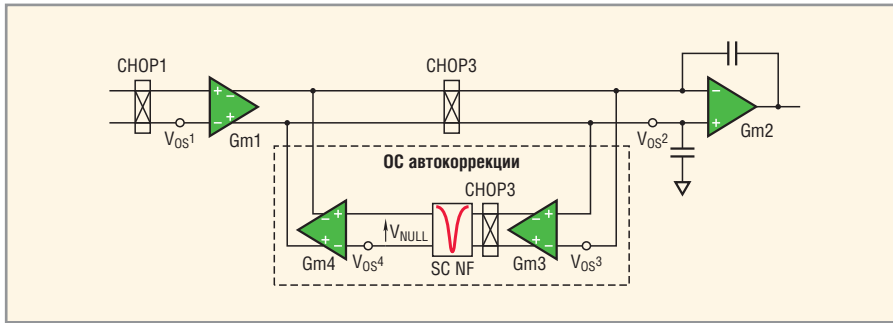


Рис. 3. Схема с прерыванием, использованная в ADA4051

Петля ОС автокоррекции устраняет первоначальное смещение Gm1 с меньшими пульсациями

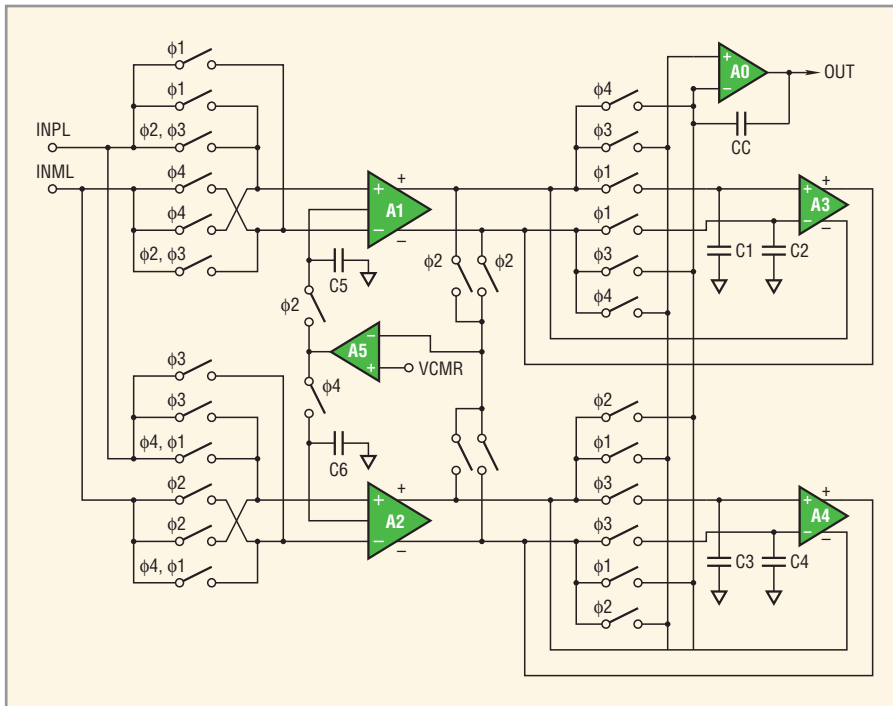


Рис. 4. Усилитель AD8628 сочетает методы ПКД и МДМ для обеспечения более широкой полосы пропускания

от Gm1 вплоть до частоты работы прерывателей. ИТУН Gm3 измеряет модулированную пульсацию на выходе прерывателя CHOP2. Схема прерывателя CHOP3 демодулирует пульсацию обратно в сигнал постоянного тока. Все три схемы прерывателей переключаются на частоте 40 кГц. Наконец, ИТУН Gm4 обнуляет постоянную составляющую на выходе Gm1, которая в противном случае появилась бы в качестве пульсации на общем выходе. Узкополосный режекторный фильтр

на переключаемых конденсаторах (SCNF) избирательно подавляет на общем выходе нежелательную пульсацию, связанную со смещением, без помех для полезного входного сигнала. Он синхронизирован с тактовой частотой прерывателей, чтобы как можно лучше отфильтровать модулированные составляющие.

Можно объединить эти два метода?

Это именно то, что сделано в новой серии усилителей от Analog Devices. Усилитель с нулевым дрейфом AD8628, показанный на рисунке 4, использует и ПКД, и МДМ для ослабления энергии на частоте модуляции, в то же время поддерживая очень низкий шум на более низких частотах. Этот комбинированный метод позволяет расширить полосу пропускания по сравнению с полосой, возможной при использовании стандартных усилителей с нулевым дрейфом.

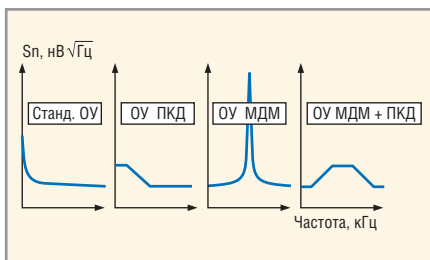


Рис. 5. Типичный шум различных топологий усилителей в зависимости от частоты

КАКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЧИТЫВАЮТСЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УСИЛИТЕЛЕЙ С НУЛЕВЫМ ДРЕЙФОМ?

Усилители с нулевым дрейфом являются комбинированными усилителями, которые используют цифровую схемотехнику для динамической коррекции аналоговых погрешностей смещения. Инжекция заряда, прямое прохождение тактовой частоты, интермодуляционные искажения и увеличенное время восстановления, обусловленные процессом цифрового переключения, могут создавать проблемы в неудачно сконструированных аналоговых схемах. Амплитуда прямого прохождения тактовой частоты возрастает с увеличением коэффициента передачи или сопротивления источника; добавление фильтра на выходе или использование меньшего сопротивления на неинвертирующем входе ослабит этот эффект. Кроме того, выходная пульсация усилителей с нулевым дрейфом увеличивается, когда входная частота приближается к частоте прерывания.

ЧТО ПРОИСХОДИТ С СИГНАЛАМИ НА ЧАСТОТАХ, ПРЕВЫШАЮЩИХ ВНУТРЕНнюю ТАКТОВую ЧАСТОТУ?

Сигналы с частотами, превышающими частоту ПКД, могут быть усилены. Быстродействие усилителя с нулевым дрейфом зависит от произведения усиления на полосу пропускания, которая определяется основным усилителем, а не усилителем обнуления; частота ПКД даёт ориентир, когда начнут проявляться искажения от переключения.

СУЩЕСТВУЮТ КАКИЕ-НИБУДЬ РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ ПКД И МДМ?

Периодическая компенсация дрейфа использует взятие выборок для коррекции смещения, тогда как прерывание использует модуляцию и демодуляцию. Взятие выборок порождает шум, возвращающийся в полосу пропускания, поэтому ПКД-усилители имеют больший шум в полосе пропускания. Для подавления шума используется больше тока, поэтому такие приборы обычно рассеивают больше мощности. Усилители МДМ имеют низкочастотный шум, согласующийся с их белым шумом, но производят большое количество энергии на частоте моду-

Таблица 1. Сравнение методов ПКД и МДМ

ПКД	МДМ	МДМ + ПКД
Очень низкое напряжение смещения и его температурный дрейф	Очень низкое напряжение смещения и его температурный дрейф	Очень низкое напряжение смещения и его температурный дрейф
Выборка и хранение	Модуляция/демодуляция	Выборка и хранение, модуляция/демодуляция
Высокий низкочастотный шум из-за наложения спектров	Шум, аналогичный белому (отсутствует наложение спектров)	Комбинированный шум, профилированный по частоте
Более высокая потребляемая мощность	Более низкая потребляемая мощность	Более высокая потребляемая мощность
Широкая полоса пропускания	Узкая полоса пропускания	Самая широкая полоса пропускания
Самая низкая пульсация	Более высокая пульсация	Уровень пульсации ниже, чем у МДМ
Небольшая энергия на частоте ПКД	Большая энергия на частоте модуляции	Небольшая энергия на частоте ПКД

Таблица 2. Популярные усилители с нулевым дрейфом фирмы Analog Devices

Название компонента			Напряжение питания		От питания до питания		Полоса пропускания при мин. Кп, МГц	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	Максимальное напряжение смещения, мВ	Типичный дрейф напряжения смещения, мкВ/°С	Мин. КОСС, дБ	Мин. КВНИП, дБ	Минимальный коэффициент усиления без ООС, дБ	Спектральная плотность шума на частоте 1 кГц, нВ√Гц	Максимальный потребляемый ток на усилитель, мА	Топология
единичный	сдвоенный	счетверённый	минимальное	максимальное	вход	выход										
AD8628	AD8629	AD8630	2,7	5,5	•	•	2,5	1	5	0,002	120	115	125	22	1,1	ПКД-МДМ
AD8538	AD8539	–	2,7	5,5	•	•	0,43	0,4	13	0,03	115	105	115	50	0,18	ПКД
AD8638	AD8639	–	4,5	16	•	•	1,35	2,5	9	0,01	118	127	120	60	1,3	ПКД
AD8551	AD8552	AD8554	2,7	5,5	•	•	1,5	0,4	5	0,005	120	120	125	42	0,975	ПКД
AD8571	AD8572	AD8574	2,7	5,5	•	•	1,5	0,4	5	0,005	120	120	125	51	0,975	ПКД
ADA4051-1	ADA4051-2	–	1,8	5,5	•	•	0,115	0,04	15	0,02	105	110	106	95	0,017	МДМ

ляции и её гармониках. Возможно, потребуется фильтрация на выходе, поэтому эти усилители являются наиболее пригодными для низкочастотных применений. Типичные шумовые характеристики методов ПКД и МДМ показаны на рисунке 5, где S_n – спектральная плотность шума.

Когда следует использовать ПКД-усилители и МДМ-усилители?

Усилители МДМ являются хорошим выбором для маломощных, низкочастотных (менее 100 Гц) применений, тогда как ПКД-усилители лучше для широкополосных применений. Прибор AD8628, который сочетает методы ПКД и МДМ, является идеальным для применений, которые требуют низкого шума, отсутствия выбросов переключения и широкой полосы. Таблица 1 демонстрирует некоторые компромиссы обоих методов.

Какие из усилителей с нулевым дрейфом компании ADI являются популярными?

Таблица 2 показывает некоторые из усилителей с нулевым дрейфом, предлагаемых компанией ADI.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bridge-Type Sensor Measurements Are Enhanced by Auto-Zeroed Instrumentation Amplifiers. www.analog.com/library/analogdialogue/cd/vol38n2.pdf#page=6.

2. Demystifying Auto-Zero Amplifiers, www.analog.com/library/analogdialogue/cd/vol34n1.pdf.
3. MT-055 Tutorial, Chopper Stabilized (Auto-Zero) Precision Op Amps. www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-055.pdf. ©