

# АЦП И ЦАП ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

ЮРИЙ ПОЛЕГЕНКО, инженер

*В статье рассматриваются требования современных приложений к аналого-цифровым и цифроаналоговым преобразователям на примере систем для визуализации изображений, а также роль в высокоточных системах сбора данных источников опорного напряжения и проблемы их выбора.*

## АЦП В ПРИЛОЖЕНИЯХ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Визуализация изображений используется повсеместно. Например, к медицинским приложениям по визуализации относятся магниторезонансная томография, ультразвуковое сканирование и рентгенологическое оборудование. Аппаратные средства визуализации работают с высокоточными данными, объемы которых возрастают по мере подключения устройств и систем друг к другу. Точность данных зависит от входного каскада, в который поступает сигнал с датчиков, и от возможности минимизировать обусловленную шумом нестабильность, прежде чем полученный сигнал станет цифровым.

Проблема неустойчивости изображения отчасти вызвана использованием АЦП последовательного приближения (SAR) с дифференциальным входным сигналом. Этот преобразователь должен обладать высокой точностью, но если входной сигнал нестабилен из-за шума, на выходе АЦП тоже окажется помеха. Необходимо, чтобы ширина полосы аналогового шума системы и операци-

онного усилителя (ОУ) соответствовали полосе АЦП последовательного приближения.

Сначала мы обсудим, как правильно подбирается комплементарный ОУ и высокоточный АЦП последовательного приближения. Далее мы покажем, как объединить два этих устройства, чтобы обеспечить 16-бит отношение сигнала к шуму (С/Ш) и малый коэффициент нелинейных искажений (КНИ). Для наглядности при обсуждении мы воспользуемся примерами из медицинской техники и АЦП компании Analog Devices.

## ТРЕБОВАНИЯ К МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Очевидно, что от корректно полученного результата медицинского обследования зависит способность врача верно оценить состояние здоровья пациента и верно назначить лечение. Высокоэффективное медицинское оборудование обеспечивает высокое качество изображения и полученных результатов. Надежная аппаратура с высокой чувствительностью позволяет быстрее

проводить диагностику, исключив необходимость в повторных испытаниях.

На компонентном уровне усилители, АЦП, их реализация в аппаратуре определяет суммарный уровень чувствительности и качества изображения. В системах визуализации применяются 16-бит АЦП, обеспечивающие требуемое разрешение выходного сигнала. При этом типовое значение С/Ш превышает 96 дБ, а суммарный КНИ – менее –107,5.

В идеальном случае показатель С/Ш у АЦП последовательного приближения при синусоидальном сигнале полной шкалы определяется в виде  $6,02n + 1,76$  дБ, где  $n$  – количество бит преобразователя. КНИ представляет собой отношение среднеквадратичной суммы высших (начиная со второй) гармоник выходного сигнала к амплитуде идеального (без высших гармоник) входного сигнала.

Требуемые рабочие характеристики достигаются с помощью ОУ ADA4945-1ACPZ-R2 от Analog Devices и АЦП последовательного приближения AD4003BCPZ-RL7 этой же компании (см. рис. 1). ADA4945-1ACPZ-R2 – малошумящий полностью дифференциальный высокоскоростной операционный усилитель с единичным усилением, который обеспечивает эффективное управление аналого-цифровыми преобразователями последовательного приближения с большим разрешением. Усилитель работает в широком диапазоне напряжения питания 3–10 В. У этого ОУ – низкое напряжение смещения, а шум составляет  $1,8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при 100 кГц. AD4003BCPZ-RL7 – 18-бит АЦП с частотой выборки 2 Мвыб/с и дифференциальным входом. Типовое значение С/Ш составляет 100,5 дБ, КНИ = –123 дБ, а интегральная нелинейность (INL) =  $\pm 1,0$  младшего значащего разряда (МЗР).

## АНАЛИЗ ШУМА СИСТЕМЫ

Главная цель проектирования рассматриваемой высокоточной медицин-

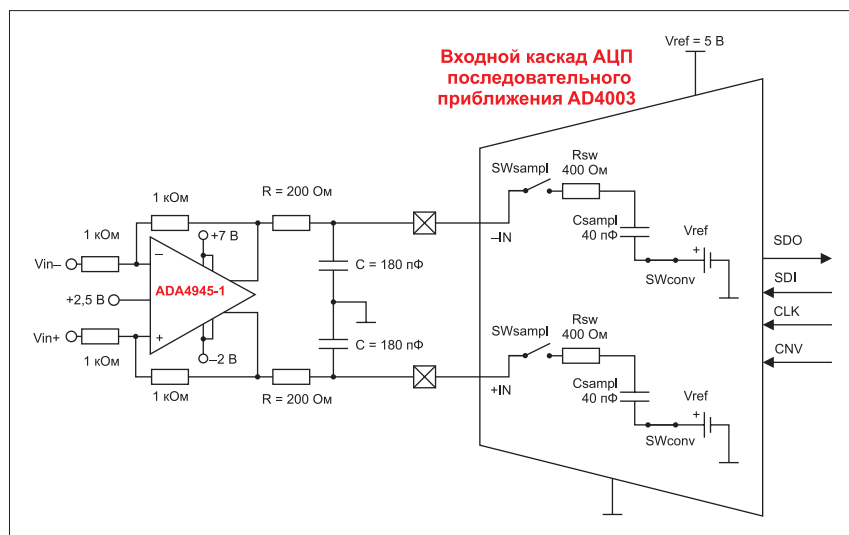


Рис. 1. Упрощенная схема сбора данных для построения изображений на основе ОУ ADA4945-1ACPZ-R2 и АЦП последовательного приближения AD4003BCPZ-RL7 от Analog Devices

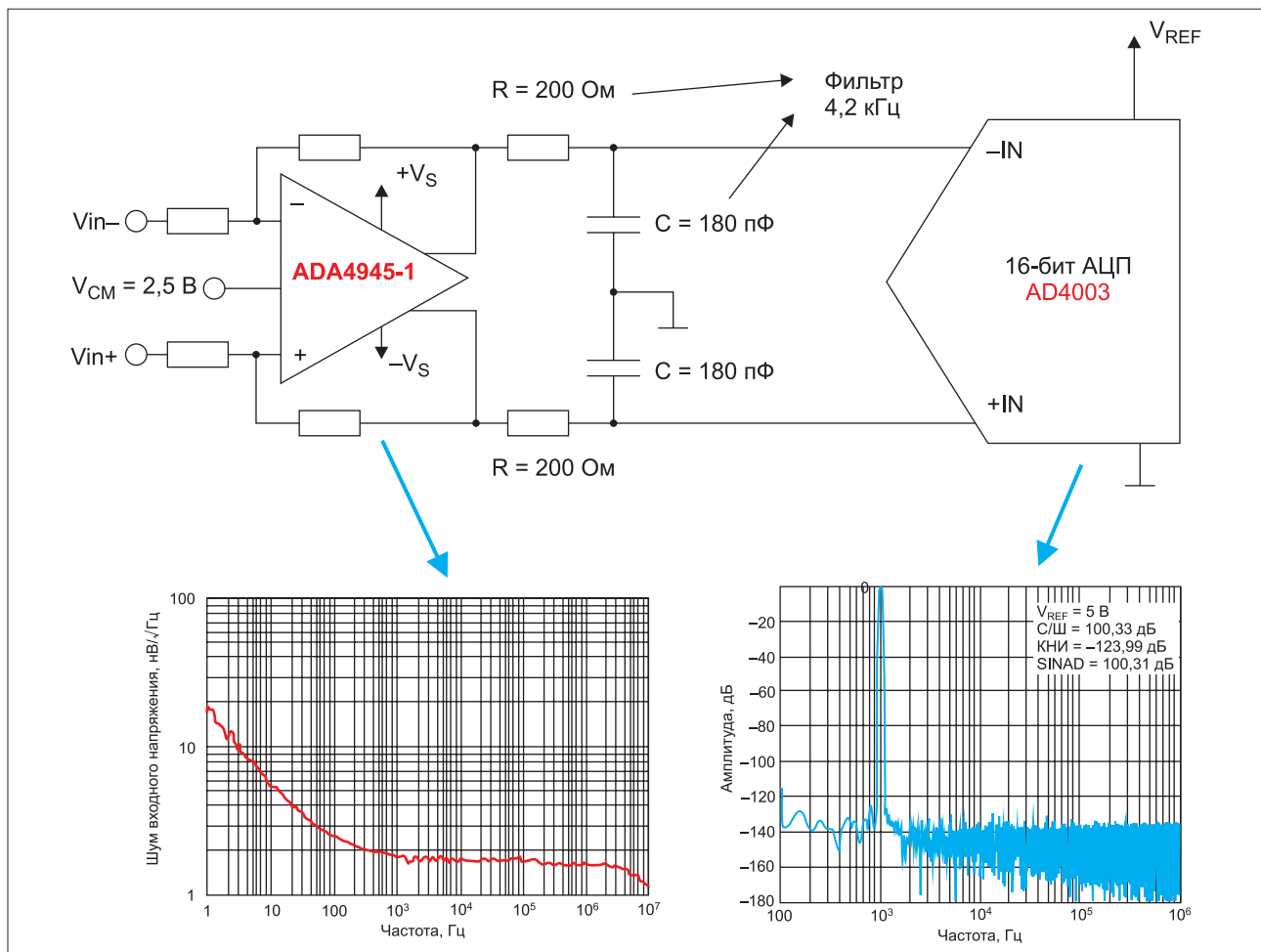


Рис. 2. Для измерения шума в аналоговой области используется время и частота, а в цифровой области – децибелы

ской техники состоит в обеспечении высокого отношения С/Ш. Чтобы его увеличить, следует выбрать малозумящие компоненты, а также повысить полный размах амплитуды сигнала (см. рис. 2).

На рисунке 1 напряжение источника питания усилителя ADA4945-1 находится в достаточно широком диапазоне, чтобы обеспечить требуемый полный размах выходного сигнала 5 В для АЦП AD4003. Чтобы правильно выбрать соответствующие компоненты, следует определить суммарную величину мощности шума в сигнальной цепи.

Заметим, что у графиков на рисунке 2 – разные единицы измерения. В аналоговой области шум измеряется в единицах  $\text{В}/\sqrt{\text{Гц}}$ , а в частотной – в  $\text{дБ}$ .

### Шум ОУ

В аналоговой области единицами измерения шума также являются среднеквадратичные значения (СКЗ) вольт, используемые для определения статистического среднего в заданной ширине полосы. Например, шум дифференциального входного напряжения АЦП ADA4945-1 составляет  $5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при частоте 5 Гц и  $1,8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при 100 кГц (см. рис. 3).

Нам требуется получить статистическое среднее значение с учетом двух

участков шума на рисунке 3. Приведенное ко входу СКЗ фликер-шума определяется уравнением (1):

$$v_{f1:f2}(\text{СКЗ}) = C \sqrt{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}, \quad (1)$$

где  $C$  – плотность шума усилителя на частоте 1 Гц, а  $f_1$  и  $f_2$  определяют

ширину полосы фликер-шума. Как правило,  $f_1 = 0,1 \text{ Гц}$ .

Для значений  $f_1 = 0,1 \text{ Гц}$ ;  $f_2 = 1 \text{ кГц}$  и  $C = 19 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  СКЗ шума усилителя ADA4945-1 в области  $1/f$  составляет  $57,66 \text{ нВ}$ .

Приведенный к входу широкополосный шум усилителя ADA4945-1 рассчитывается с помощью уравнения (2):

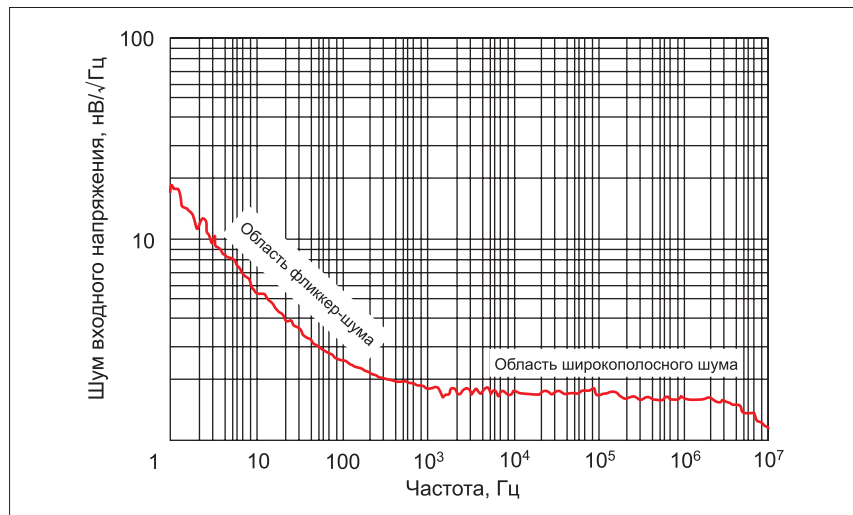


Рис. 3. График зависимости шума входного напряжения от частоты усилителя ADA4945-1 с участками фликер-шума ( $1/f$ ) и широкополосного шума

$$V_{\text{широкопол.}}(\text{СКЗ}) = e_n \cdot \sqrt{\text{ШП} \cdot \pi / 2}, \quad (2)$$

где  $e_n$  – известный шум на заданной частоте в широкополосной области усилителя, а ШП – ширина полосы этого участка.

При  $e_n = 1,8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , ШП = 1 кГц...4,42 МГц (между ОУ и АЦП установлен RC-фильтр с  $R = 200 \text{ Ом}$ ,  $C = 180 \text{ пФ}$ ) СКЗ шума в рассматриваемой области составляет 4,74 мкВ.

Суммарная мощность шума в любой системе равна квадратному корню из суммы квадратов мощности шума отдельных составляющих. Суммарный приведенный к входу шум усилителя определяется уравнением (3):

$$C/\text{Ш}_{\text{ОУ}} = 20 \lg \left( \frac{V_{\text{ВЫХ\_ДИАП}}/\sqrt{2}}{V_{\text{СУМ\_ОУ}}} \right). \quad (3)$$

При коэффициенте усиления равном 1 суммарный приведенный к выходу шум от ADA4451 составляет 4,74 мкВ (СКЗ).

Для расчета в аналоговой области с помощью уравнений (1–3) используются единицы напряжения и частоты. Преобразование аналогового напряжения в децибелы осуществляется с помощью уравнения (4):

$$V_{\text{СУМ\_ОУ}} = КУ \cdot \sqrt{v_{f_1:f_2}^2 + v_{\text{широкопол.}}^2}, \quad (4)$$

где КУ – коэффициент усиления;  $v_{f_1:f_2}$  – диапазон входного напряжения АЦП.

При  $v_{f_1:f_2} = 9,5 \text{ В}$  приведенное к выходу значение С/Ш усилителя ADA4451–2 равно 123 дБ.

#### Искажения в усилителе

Усилитель ADA4945–1 изготовлен с использованием комплементарного биполярного SiGe-процесса собственной разработки компании Analog Devices, благодаря чему обеспечивается малый уровень искажений. При входном диапазоне напряжения  $-V_s \dots (V_s - 1,3 \text{ В})$  искажение на второй гармонике (HD2) равно –133 дБ относительно несущей (дБн). Значения HD2 и HD3 равны –140 дБн при 1 кГц. На 100 кГц HD2 = –133 дБн, а HD3 = –116 дБн.

#### Шум АЦП последовательного приближения

Расчет входного приведенного шума усилителя выполняется с учетом двух значений частоты – 1 Гц и 100 кГц. Величину С/Ш АЦП в единицах дБ можно получить из БПФ.

Идеальное значение С/Ш АЦП последовательного приближения равно  $6,02n + 1,76 \text{ дБ}$ , где  $n$  – число битов пре-

образователя. Поскольку разрешение АЦП ADA4003 составляет 18 бит, идеальное значение для этого устройства равно 110 дБ. Однако, как мы убедимся далее, его фактическое значение С/Ш = 100,3 дБ.

Частотный диапазон измерения БПФ АЦП составляет  $0 - f_{\text{ВЫБ}}/2$ , где  $f_{\text{ВЫБ}}$  – частота выборки преобразователя (см. рис. 4).

На этом рисунке самая большая амплитуда (А) – у входного сигнала преобразователя. Линия В определяет выходной шум от преобразователя с учетом шума дискретизации и собственных компонентов. Вторая амплитуда (С) соответствует гармонике HD5 – максимальному искажению величиной около –128 дБ. Все остальные искажения на частотах, кратных частоте входного сигнала (А), учитываются при определении суммарного значения КНИ.

#### Комбинация С/Ш и КНИ определяет показатель SINAD

Мерой качества сигнала является SINAD – сумма С/Ш и искажений (SINAD, или SNR+D). С этой целью применяется также показатель КНИ + шум. SINAD рассчитывается как комбинация С/Ш и КНИ, или отношение среднеквадратичной амплитуды основного входного сигнала к СКЗ всех других спектральных компонентов ниже значения  $f_{\text{ВЫБ}}/2$  (исключая нулевую частоту). Теоретически, минимальное значение SINAD равно идеальному значению С/Ш, или,  $0,2n + 1,76 \text{ дБ}$  для АЦП последовательного приближения и конвейерного типа.

SINAD рассчитывается в единицах дБн, если абсолютная мощность основ-

ного сигнала используется в качестве эталонного значения, или в децибелах полной шкалы (dBFS), если мощность основного сигнала экстраполируется на весь диапазон измерений преобразователя.

SINAD – важный параметр в приложениях с использованием цифровых осциллографов, регистраторов сигналов, а также в схемах обработки геофизических данных изображений радаров, сонаров, анализаторов спектра, в видеотелекоммуникационных системах и широкополосных цифровых приемниках.

Однако вернемся к системным требованиям при использовании 16-бит АЦП. При таком разрешении величина С/Ш превышает 98 дБ, а КНИ меньше 107,5. Посмотрим, каким окажется показатель качества после сложения всех значений С/Ш, КНИ усилителя и погрешностей АЦП последовательного приближения. Суммарный шум системы определяется с помощью уравнения (5):

$$C/\text{Ш}_{\text{СИСТ.}} = 20 \lg \sqrt{10^{-C/\text{Ш}_{\text{ОУ}}/10} + 10^{-C/\text{Ш}_{\text{АЦП}}/10}}. \quad (5)$$

В уравнении (5) нельзя складывать два среднеквадратичных значения в единицах дБ. Значения С/Ш, соответствующие усилителю и АЦП, преобразуются в линейное отношение, после чего складываются, а затем преобразуются в единицы дБ.

Сумма искажений усилителя и АЦП определяет совокупное искажение системы согласно уравнению (6):

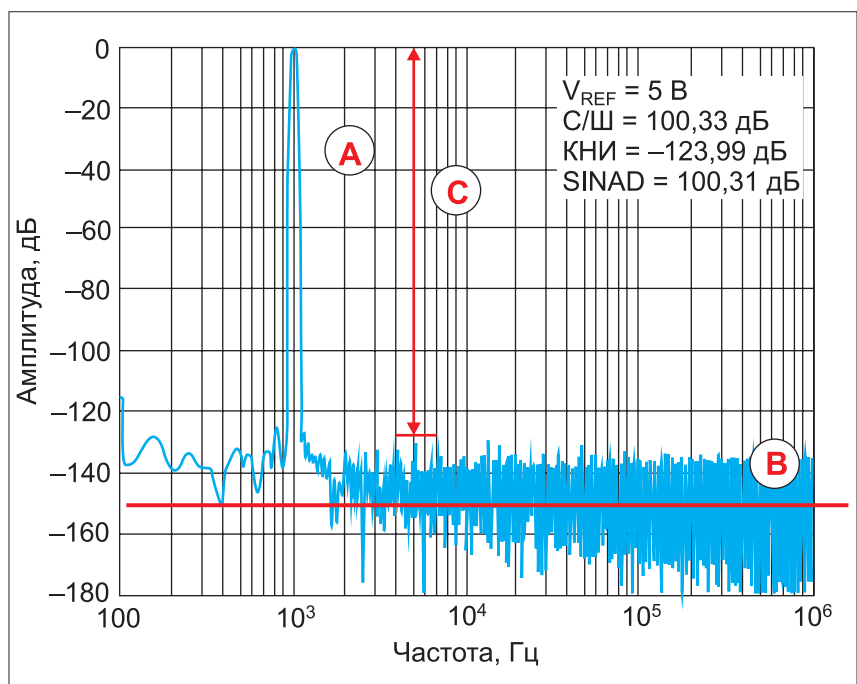


Рис. 4. БПФ сигнала усилителя ADA4003 используется для расчета значений С/Ш и КНИ АЦП

$$\text{КНИ}_{\text{СИСТ.}} = 20 \lg \sqrt{10^{\frac{\text{КНИ}_{\text{ОУ}}}{10}} + 10^{\frac{\text{КНИ}_{\text{АЦП}}}{10}}} \quad (6)$$

Величина SINAD определяется уравнением (7):

$$\text{SINAD}_{\text{СИСТ}} = -20 \lg \sqrt{10^{-\frac{\text{С/Ш}_{\text{СИСТ.}}}{10}} + 10^{\frac{\text{КНИ}_{\text{СИСТ.}}}{10}}} \quad (7)$$

Измеренные значения С/Ш и КНИ для комбинации усилителя ADA1945-1 и АЦП AD4003 на частотах сигнала 1 и 100 кГц отвечают требуемым значениям >98 дБ и КНИ < -107,5 (см. табл.). Из таблицы видно, что при 100 кГц АЦП еще способен работать с разрешением 16 бит, а значения С/Ш и КНИ начинают ухудшаться.

Итак, совместное использование полностью дифференциального усилителя и 18-бит АЦП последовательного приближения позволяет реализовать высокоточную 16-бит схему для систем магнитной резонансной томографии, ультразвуковых сканеров и рентгенологического оборудования. Устройства ADA4945-1 и AD4003 вполне хорошо подходят для использования в медицинском измерительном оборудовании в качестве компонентов, обеспечивающих малый шум и малые искажения.

### ИОН ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ

Роль источников опорного напряжения (ИОН), используемых АЦП и ЦАП для оценки аналоговых входных и выходных сигналов, иногда недооценивается, и напрасно – ИОН помогает с высокой точностью осуществлять преобразование сигналов и данных, но только в тех случаях, если он правильно выбран и корректно применяется.

Мы кратко рассмотрим схему и характеристики ИОН, а также опишем процесс выбора источника напряжения на примере устройств серии ADR43x от Analog Devices. Мы увидим, как применяются эти компоненты, позволяя раскрыть полный потенциал АЦП, ЦАП и проектируемой системы.

### РОЛЬ ИОН

По сути, источник опорного напряжения представляет собой устройство с шиной питания, общим (заземляющим выводом) и выводом для высокоточного напряжения (см. рис. 5). Если ИОН подобран некорректно или неправильно используется, выходной сигнал преобразователя становится недостоверным.

После выбора подходящего ИОН с учетом номинального выходного напряжения, требуемой точности и допусков, а также других параметров необходимо воспользоваться этим

Таблица. Значения шума при совместном использовании усилителя ADA4945-1 и АЦП AD4003 по схеме на рисунке 1

Частота сигнала, кГц	Уровень сигнала, В (пик-пик)	С/Ш, дБ	КНИ, дБ	SINAD, дБ
1	9,5	98,5	-123,5	98,5
10	9,5	98,3	-117,0	98,2
100	9,1	96,3	-98,6	94,3

источником так, чтобы его параметры полностью отвечали требованиям приложения. Сигнал напряжения ИОН является тем эталоном, по которому АЦП оцифровывает входное напряжение. В случае с ЦАП стабильное и надежное напряжение источника позволяет преобразователю генерировать аналоговое выходное напряжение, полностью соответствующее входному цифровому коду.

### ВЫБОР ИОН

Наиболее часто для построения твердотельных ИОН применяются три технологии: стабилитрон с углубленным переходом, стабильный транзисторный источник опорного напряжения  $V_{BE}$  и конфигурация XFET от Analog Devices, в которой два полевых транзистора JFET с управляющим *p-n*-переходом (JFET) работают в паре.

Выходные напряжения ИОН должны соответствовать разрешению преобразователей и отвечать требованиям системы. Например, многие ИОН выпускаются в виде семейства устройств с выходными напряжениями 2,048; 2,5; 3,0; 4,096 и 5,0 В. Устройства с выходным напряжением 2,048 и 4,096 В хорошо соответствуют разрешению преобразователей: например, ИОН с выходным напряжением 4,096 В, используемым 12-бит преобразователем, составляет 1 мВ на МЗР.

Точность исходного ИОН определяется либо в процентах, либо в единицах мВ. В некоторых приложениях она изменяется в широких пределах. Как правило, обеспечить и поддерживать более высокую точность – сложная задача; у типовых источников опорного напряжения максимальная погрешность составляет ±0,1% с учетом всех условий эксплуатации. Однако применение современного техпроцесса и соответствующей топологии позволило улучшить это значение. Например, исходная погрешность XFET ИОН ADR434 с выходным напряжением 4,096 В равна ±5 мВ (с суффиксом А) и ±1,5 мВ (с суффиксом В).

Во многих приложениях величина абсолютной точности не так важна, как стабильность ИОН и его стабильность при долгосрочной эксплуатации. Например, такие требования бывают у систем с последующей коррекцией оцифрованных данных или в случаях, когда абсолютное значение точности играет меньшую роль, чем сравнительные результаты и их изменения, которые зависят от стабильности ИОН. Таким образом, при выборе источника опорного напряжения необходимо установить, насколько величина абсолютной точности важна по сравнению с его стабильностью и как ее поддержать.

Еще до этапа проектирования при анализе фактора стабильности следует установить, на какой период времени она требуется. Например, одно дело – обеспечить стабильность ИОН в системе сбора данных в процессе небольшого эксперимента, другое – стабильность при долгосрочном сборе информации.

### ВНЕШНИЕ И ВНУТРЕННИЕ ИОН

На этапе проектирования следует решить также вопрос о том, какой ИОН лучше выбрать – внутренний (собственный) или внешний. Например, АЦП AD7605-4BSTZ выпускается с собственным источником опорного напряжения, благодаря чему экономится занимаемое место на печатной плате и используется меньше внешних компонентов (см. рис. 6). Более того, техническое описание предоставляет полную информацию о точности встроенного в АЦП ИОН, поскольку параметры источника отчасти определяют характеристики самой микросхемы преобразователя.

Поскольку внутренний источник опорного напряжения может не обеспечивать требуемых характеристик, большинство преобразователей работает с внешним ИОН. Заметим, что преобразователи, параметры которых в большой мере определяются специфическими требованиями малобюджетных прило-

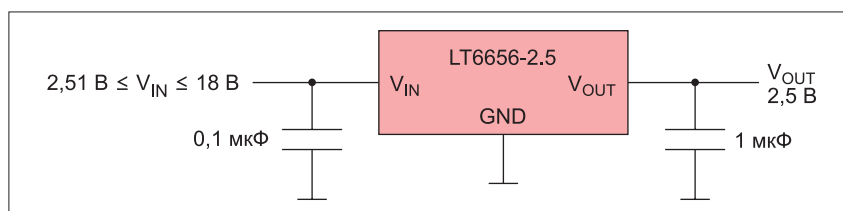


Рис. 5. Базовая схема ИОН LT6656AIS6-2.5 от компании Analog Devices

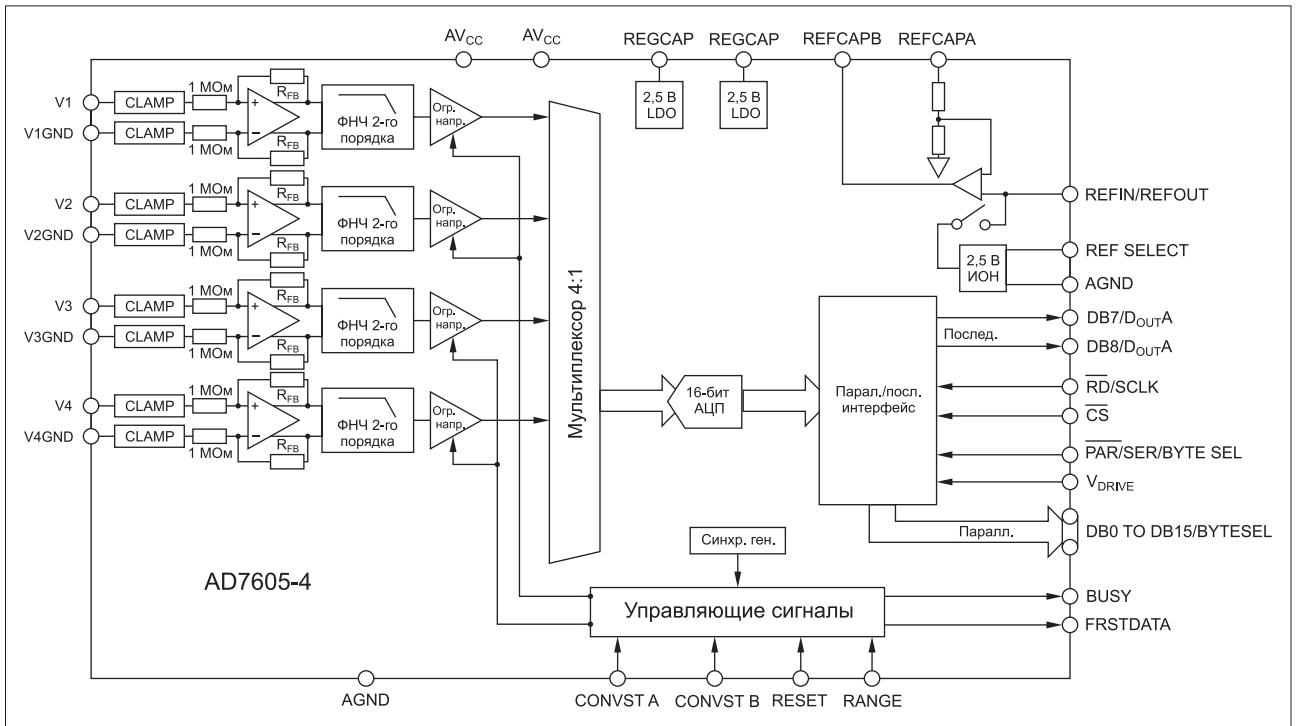


Рис. 6. Многие АЦП, в т.ч. 16-бит AD7605-4BSTZ, оснащены собственным ИОН

жений, могут оснащаться собственными источниками опорного напряжения, что исключает необходимость во внешнем ИОН. Как бы то ни было, считается, что использование любого внешнего ИОН лучше, чем внутреннего, т.к. параметры собственного источника отвечают только требованиям соответствующего преобразователя.

Имеется еще одна причина сделать выбор в пользу внешнего ИОН, даже если внутренний источник является вполне подходящим. В тех схемах, где используется больше одной ИС преобразователя, отдельные внутренние источники опорного напряжения могут различаться друг от друга. В результате появляются расхождения, которые усложняют корреляцию данных и вызывают непоправимые ошибки.

Исходя из этих соображений, рекомендуется в случае высокопроизводительных систем с несколькими преобразователями применять один совместно используемый внешний ИОН. При этом, однако, возникают некоторые опасения, касающиеся способности этого источника работать с несколькими преобразователями без ухудшения исходных параметров.

#### ПОДДЕРЖАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ИОН

Разработчикам необходимо не только знать значения исходной погрешности ИОН и допусков, но и решить проблемы, связанные с поддержанием рабочих параметров в разрешенных пределах. Рассмотрим подробнее эти проблемы.

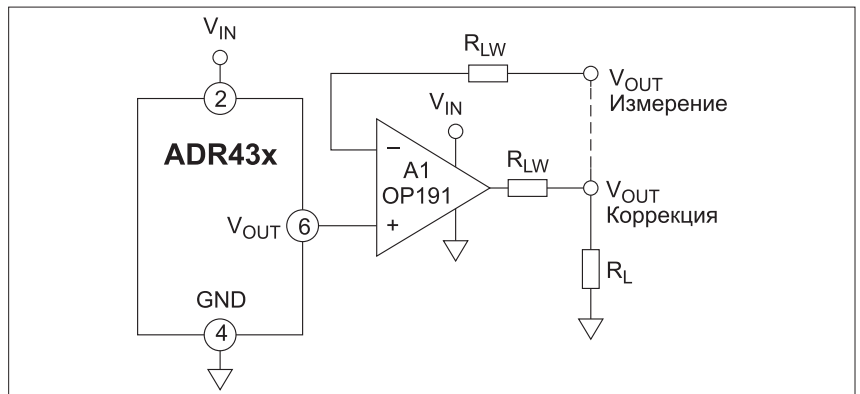


Рис. 7. Устройства серии ADR43x можно использовать в конфигурации схемы Кельвина с помощью внешнего ИОН

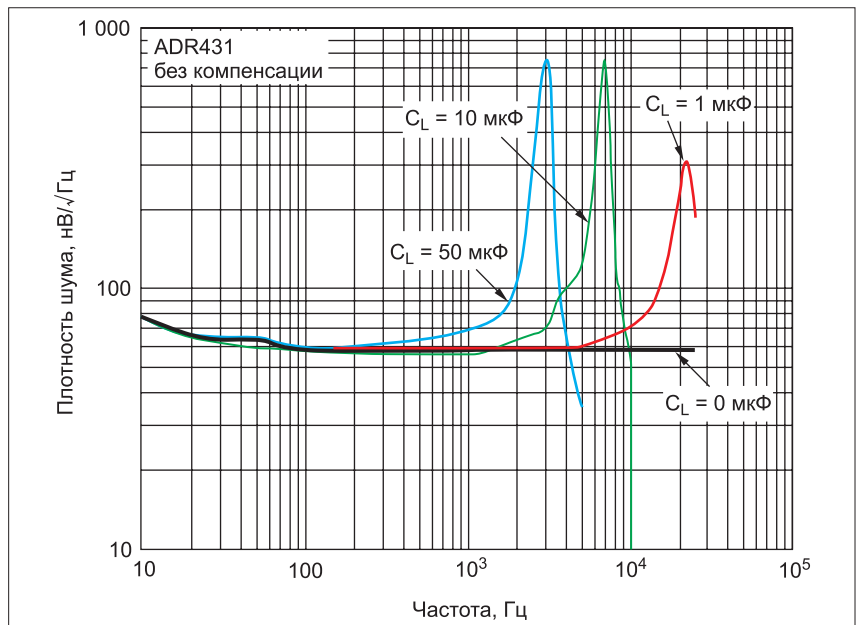


Рис. 8. Зависимость плотности шума источника опорного напряжения ADR431BRZ-REEL7 от частоты при разных емкостных нагрузках

## 1. Проблемы с топологией, включая падение напряжения и шум

Как и в случае с любым чувствительным аналоговым сигналом, даже если на выходе ИОН статическое напряжение, падение напряжения между выходом ИОН и преобразователем может быть достаточно велико и влиять на погрешность. Хотя в большинстве случаев у источников опорного напряжения ток нагрузки мал (порядка десятков мА), даже небольшой ток величиной 10 мА, прошедший через сопротивление 100 Ом, приводит к падению напряжения 1 мВ, что приводит к значительной ошибке.

Серия ИОН ADR43x работает без таких ошибок за счет использования сопротивления в управляющем контуре внешнего ОУ в конфигурации подключения по схеме Кельвина (см. рис. 7). Усилитель измеряет напряжение на нагрузке, а управляющий контур побуждает выходное напряжение компенсировать ошибку в монтаже, обеспечив, таким образом, корректное значение напряжения на нагрузке.

Внешний шум может также влиять на напряжение ИОН со стороны преобразователя, что обусловлено шумом нагрузки, помехами на земляной шине и шумом от плохо развязанных шин питания. Кроме того, у источников опорного напряжения имеется собственный низкочастотный (в диапазоне 0,1–10 Гц) и высокочастотный (10 Гц...25 кГц) шум. У высококачественных ИОН, например ADR43x, шумовое напряжение на низких частотах не превышает 3,5 мкВ (пик-пик), а шумовое ВЧ-напряжение достигает 200 мкВ в диапазоне 10 Гц...10 кГц.

Спектральная плотность шума устройства ADR431BRZ-REEL7 показана на рисунке 8. При разных емкостных нагрузках она примерно одинакова на частоте 1 кГц, затем начинает возрастать. При нулевой емкостной нагрузке эта характеристика остается плоской.

Наиболее действенный способ уменьшить шум способ заключается в установке простого RC-фильтра. Однако во многих ИОН применяются выходные усилители, которые становятся неустойчивыми при больших емкостных нагрузках. По этой причине установка конденсатора емкостью в несколько мкФ на выходе усилителя может создать новые проблемы, если ИОН не защищен от них. ИОН ADR43x допускает подключение RC-фильтра, если величина ВЧ-шума все еще превосходит требования конкретного проекта (см. рис. 9).

У источника опорного напряжения ADR43x имеется внешний вывод, который обеспечивает доступ к внутреннему узлу компенсации. Этот вывод допускает установку RC-цепи в критическую точку схемы (см. рис. 10).

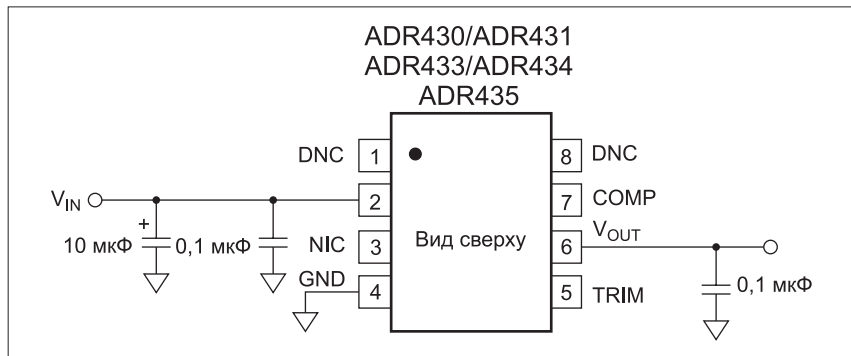


Рис. 9. Для использования ИОН ADR43x требуется всего лишь несколько внешних пассивных компонентов – два конденсатора на входе и один – на выходе

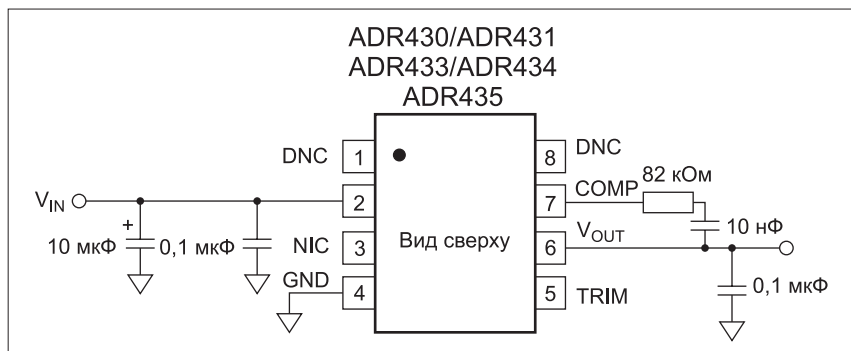


Рис. 10. ИОН ADR43x оснащен выводом 7, который можно использовать для компенсации внутреннего ОУ

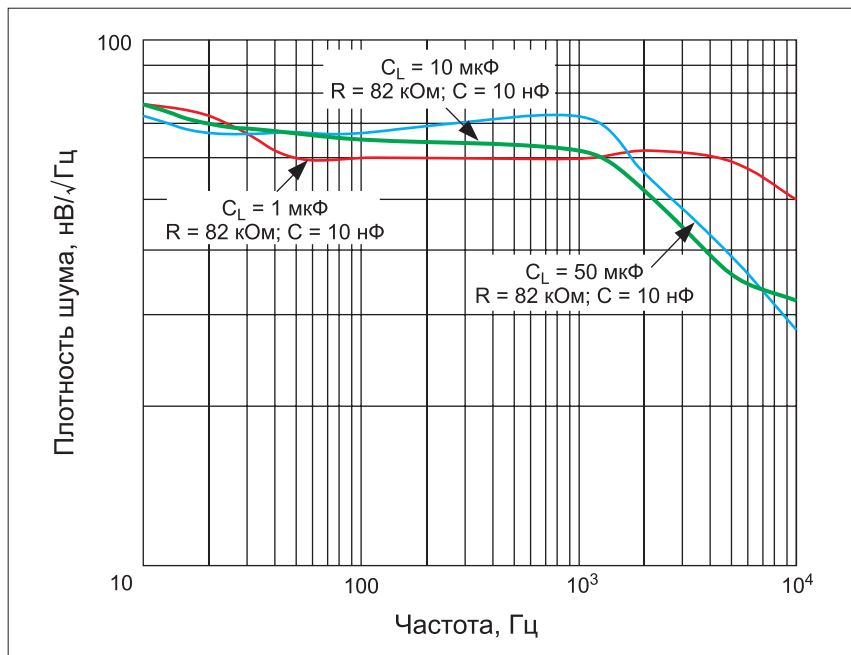


Рис. 11. ИОН ADR43x позволяет подобрать значения R и C, чтобы обеспечить требуемое подавление шума, не нарушив устойчивости выходного сигнала, что видно по частотной зависимости плотности шума для разных комбинаций RC-компонентов

Добавление RC-цепи позволяет компенсировать собственный ОУ и избежать возникновения неустойчивости. Значение емкости можно подобрать так, чтобы добиться приемлемого уровня шума (см. рис. 11).

## 2. Управление выходным напряжением, буферизация нагрузки и переходная характеристика

Большинство ИОН оснащено собственным буфером, который служит

источником вытекающего и втекающего токов до 5 или 10 мА. Источники опорного напряжения серии ADR43x во многих случаях исключают необходимость во внешнем буфере для повышения тока благодаря относительно большому вытекающему току 30 мА (ном.) и большому втекающему току –20 мА (ном.).

Кроме того, нагрузка на ИОН не всегда является постоянной – она меняется при переключениях АЦП или ЦАП. Буферизация сигнала

ИОН – не сложная задача. Если сигнал не буферизуется, требуется рассмотреть переходную характеристику источника. В некоторых случаях между ИОН и преобразователем необходим внешний буфер, чтобы обеспечить управление нагрузками в переходных процессах. Характеристики буфера требуется учитывать при анализе ошибок в работе приложения.

### 3. Кратковременная стабильность и температурный дрейф

Выходной сигнал ИОН со временем испытывает дрейф, пока не установится температура активных цепей и кристалла. Время установления при включении для большинства ИОН, как правило, зависит от емкостной нагрузки, но на ADR431 с малой нагрузкой эта емкость оказывает минимальное воздействие (см. рис. 12–13).

Технические описания определяют при заданной температуре исходную погрешность – она, как правило, отличается от величины погрешности при включении. Поскольку величина изменения выходного напряжения из-за температуры может легко превысить предельную величину погрешности системы, требуется исходить из соответствующего низкого значения дрейфа. Рабочие параметры семейства ADR43x указываются для работы в диапазоне  $-40...125^{\circ}\text{C}$ ; например, в случае использования ИОН ADR434A (4,096 В, исходная погрешность:  $\pm 5$  мВ) этот коэффициент равен  $10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ , а у других компонентов этого семейства –  $3 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ .

### 4. Долговременный дрейф, обусловленный старением, физической нагрузкой и корпусированием

Дрейф часто вносит солидный вклад в исходную погрешность. Рассмотрим приложение, в котором требуется источник опорного напряжения с суммарной погрешностью  $\pm 0,1\%$  в диапазоне рабочей температуры. В таком случае можно выбрать высококачественный ИОН с исходной погрешностью  $\pm 0,05\%$  и очень малым температурным коэффициентом  $\pm 5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ .

Поскольку в диапазоне  $25\text{--}125^{\circ}\text{C}$  дрейф, обусловленный температурным коэффициентом, составит  $5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C} \times 100^{\circ}\text{C} = 500 \text{ ppm}$  ( $0,05\%$ ), суммарная погрешность (исходная погрешность плюс погрешность из-за дрейфа) не превысит требуемой величины  $\pm 0,1\%$ . В некоторых современных приложениях источники опорного напряжения помещаются в печи с контролируемой температурой, как это делается с термостатированными генераторами частоты, но в боль-

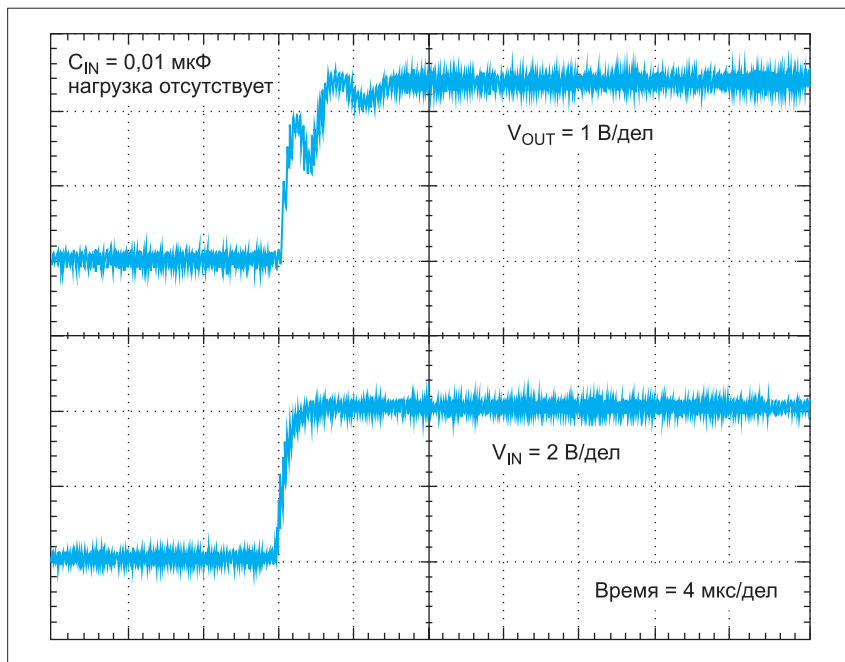


Рис. 12. Время установления при включении для ADR431 в отсутствие нагрузки составляет 8 мкс

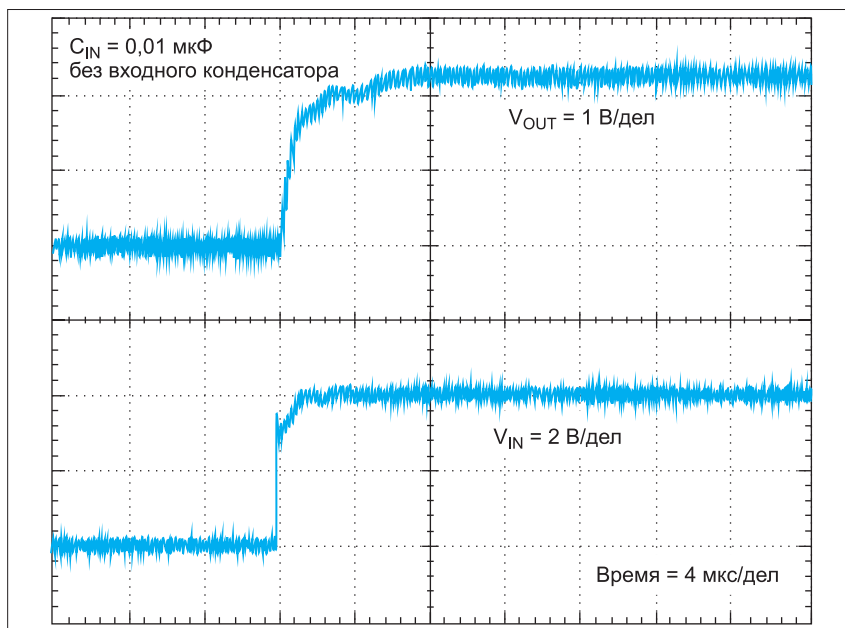


Рис. 13. С нагрузкой 0,01 мкФ время установления при включении для ADR431 по-прежнему равно 8 мкс

шинстве случаев это нежелательно и непрактично.

По мере уменьшения исходной погрешности исходный долговременный дрейф (LTD) становится все более важным фактором, влияющим на поддержание требуемой точности. Учет LTD – непростая задача для разработчика, поскольку этот параметр зависит также от особенностей техпроцессов и сценариев использования изделий, а не от тщательности проектирования и выбора подходящих компонентов. Нагрузка на корпус при сборке печатной платы – основная причина долговременного дрейфа. ИС в пластиковых корпусах незначительно меняют форму под воздействием высоких температур в про-

цессе пайки печатных плат, что, в свою очередь, оказывает влияние на кристалл ИОН.

В результате выходной сигнал источника опорного напряжения меняется, пока не вернется к нормальному значению в течение нескольких часов, дней или даже недель. Степень изменений зависит от топологии, корпуса устройства, других факторов и, как правило, составляет несколько десятков ppm. Поскольку кристалл ИОН и корпус «притираются» друг к другу в течение года, некоторые производители указывают значение дрейфа за этот период времени.

В большинстве технических описаний на ИОН указываются типовые

значения долговременного дрейфа после первых 1000 ч эксплуатации. Например, в техописании серии устройств ADR43x типовое значение LTD составляет 40 ppm; при этом отмечается, что дрейф в последующие 1000 ч значительно уменьшается.

Чтобы уменьшить обусловленный физической нагрузкой дрейф, плата с ИОН несколько раз подвергается термоциклированию в течение нескольких часов, благодаря чему устраняются внутренние напряжения. Еще одним решением рассматриваемой проблемы является использование ИОН в керамических корпусах, которые обладают большей устойчивостью, чем пластиковые, и деформируются в меньшей мере. Однако многие ИОН не выпускаются в таких корпусах. В то же время у ИОН самого последнего поколения, изготовленных в пластиковых корпусах, долговременный дрейф почти достигает значения LTD источников в керамических корпусах.

Наконец, нельзя игнорировать воздействие переходных процессов на ИОН со стороны собственной шины питания. На поддержание точности выходного сигнала влияют не только вариации нагрузки, но и отсутствие пульсаций на шине питания. Высококачественный ИОН хорошо справляется с осла-

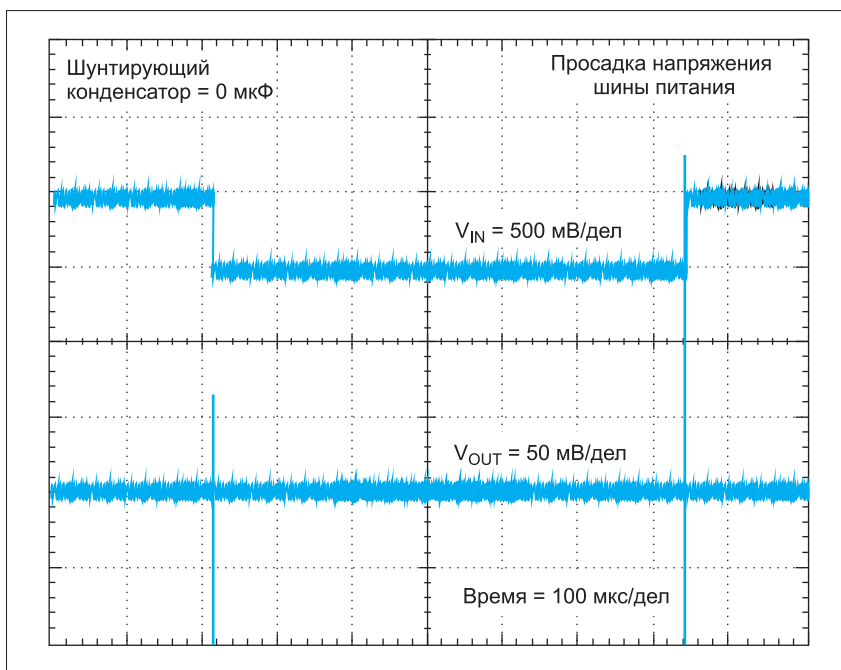


Рис. 14. Переходные процессы на шине питания ИОН могут отрицательно повлиять на его работу. Чтобы избежать этого, пульсации подавляются. Например, выходной сигнал ADR43x не меняется при просадке напряжения на шине питания величиной 500 мВ

блением пульсаций напряжения шины питания. У ADR431  $\Delta V_{OUT}/\Delta V_{IN}$  составляет 5 мВ/ppm (тип.), а максимальное значение – 20 мВ/ppm в диапазоне входного напряжения 7–18 В (см. рис. 14).  $\Rightarrow$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Analog Devices, AN-713, «The Effect of Long-Term Drift on Voltage References».
2. Analog Devices, Engineer Zone, «Trimming the ADR430».