

# Калибровка сегментов в конвейерных АЦП

В.Б. Лифшиц, Ю.В. Агрич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, [lvb@alphachip.ru](mailto:lvb@alphachip.ru)

**Аннотация** — Рассмотрены источники ошибок в конвейерных АЦП. Предложены метод и алгоритм калибровки ошибок сегментов. Эффективность калибровки подтверждена результатами моделирования и измерения экспериментальных образцов.

**Ключевые слова** — АЦП, ЦАП, УВХ, коррекция, калибровка, Flash, RSD, INL, DNL, LSB.

## I. ВВЕДЕНИЕ

По мере развития современных субмикронных процессов и повышения разрядности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) всё большее значение имеет калибровка таких погрешностей, как рассогласование идентичных элементов, не устраняемых схмотехническими методами.

В работах [1], [2] рассматривается конвейерный АЦП, включающий:

- 4 разрядный входной flash-каскад;
- классический конвейер из  $1\frac{1}{2}$ -разрядных RSD (Redundant Signed Digit) каскадов [3];
- 2 разрядный выходной flash-каскад.

На рис. 1 приведена архитектура 12 разрядного АЦП. Особенностью архитектуры является кратное снижение диапазона аналогового сигнала во всём тракте обработки после входного flash-каскада.

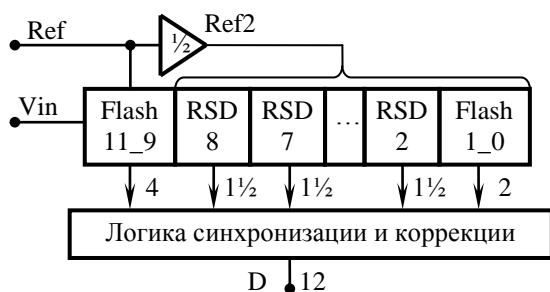


Рис. 1. Архитектура 12 разрядного АЦП

На рис. 2 приведена структура flash-каскада. Он выполняет выборку входного сигнала, формирование разности напряжений входного сигнала и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и усиление. Здесь уменьшается диапазон аналогового сигнала.

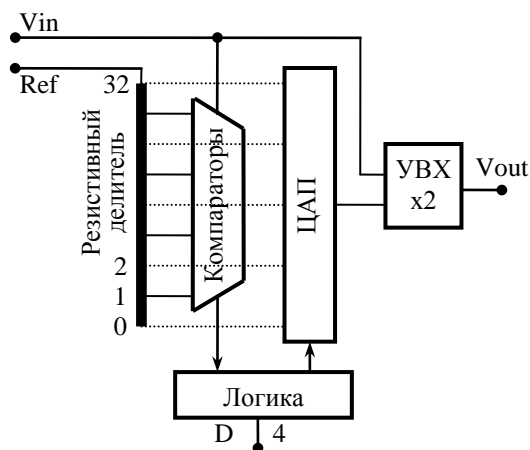


Рис. 2. Структура flash каскада

Преимуществами рассматриваемой архитектуры являются:

- возможность использования быстродействующих низковольтных p-канальных транзисторов во всём тракте обработки аналогового сигнала;
- снятие ограничения по входному диапазону сигнала вплоть до диапазона питания;
- значительное снижение потребляемой мощности при сохранении разрядности и быстродействия.

К недостаткам следует отнести:

- необходимость формирования в АЦП уменьшенного вторичного опорного напряжения Ref2;
- необходимость калибровки связанных с этим ошибок.

В [1], [2] приведено описание способа калибровки Ref2 и смещения нуля АЦП, а также необходимых для этого аппаратных ресурсов на кристалле. К последним относятся:

- дополнительные ключи во входном flash-каскаде, позволяющие подключить оба входа устройства выборки и хранения (УВХ) к отводам резистивного делителя (рис. 3);
- ЦАП калибровки смещения ЦАП1 (рис. 3);
- два дополнительных компаратора в конвейере, сравнивающих последнюю остаточную разность с положительным и отрицательным Ref2 (рис. 4);
- ЦАП калибровки вторичного опорного напряжения ЦАП2 (рис. 4);

- логика управления калибровкой (на рис. 4 совмещена с логикой синхронизации и коррекции).

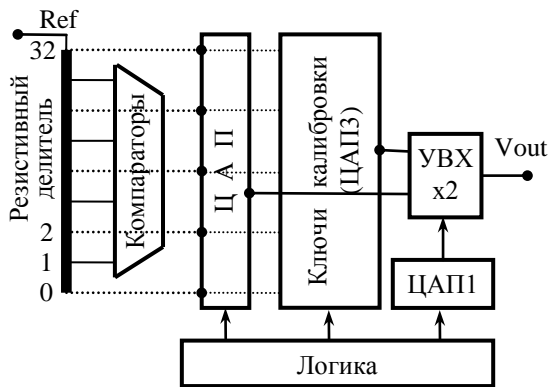


Рис. 3. Ресурсы калибровки flash каскада

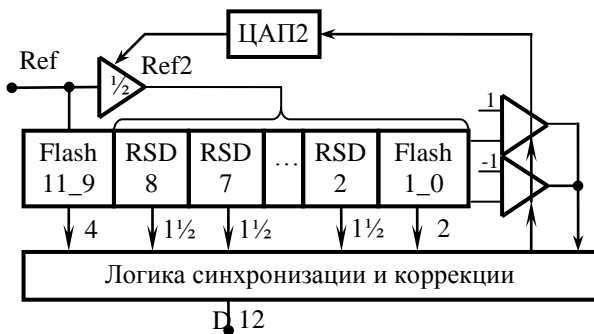


Рис. 4. Ресурсы калибровки конвейера

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [5] приведён анализ основных источников ошибок, присущих рассматриваемой архитектуре. К ним относятся:

- 1) рассогласование резисторов делителя входного flash-каскада;
- 2) рассогласование конденсаторов в УВХ;
- 3) смещение нуля усилителей flash и RSD каскадов;
- 4) смещение нуля усилителя буфера Ref2;
- 5) смещение нуля компараторов flash и RSD каскадов;
- 6) рассогласование конденсаторов в RSD.

Ошибки 3 эффективно устраняются калибровкой смещения нуля АЦП.

Ошибки 2 и 4 устраняются калибровкой Ref2. При этом в качестве эталонного напряжения используется напряжение на одном из сегментов резистивного делителя входного flash каскада. Здесь и далее под сегментом понимается пара резисторов между чётными отводами делителя, подключенными к ЦАП (рис. 2). Для устранения влияния случайных отклонений номиналов резисторов и краевых эффектов на границе делителя на результаты калибровки необходимо выбрать представительный набор сегментов делителя и усреднить результаты калибровки по этому набору. В простейшем случае набор сегментов должен

включать крайние и центральные по подключению и по топологии сегменты. Таким образом, при калибровке Ref2 происходит усреднение ошибок 1.

Ошибки 5 обрабатываются известной [3] схемой коррекции в ходе нормальной работы АЦП и не требуют калибровки. Однако такие ошибки необходимо рассматривать при моделировании калибровки, так как смещение нуля компаратора, выходящее за допустимые пределы коррекции, приводит к ошибке калибровки и в конечном итоге всего АЦП.

Ошибки 6 не устраняются, но их учёт необходим при моделировании калибровки.

Анализ воспроизводимости резисторов в современных 0.18 мкм процессах показывает, что случайные отклонения напряжений сегментов не превысят одного младшего разряда (Least Significant Bit - LSB) 12 разрядного АЦП. В этом случае усреднение по сегментам оправдано только для повышения точности калибровки. Однако при повышении разрядности АЦП до 14 или 16 ошибка сегментов с большой вероятностью превысит 1 LSB. В этом случае актуальной становится задача вычисления поправки для каждого сегмента.

Для решения поставленной задачи необходимо незначительно расширить аппаратные ресурсы калибровки и существенно развить логику калибровки.

В частности, необходимы дополнительные ключи, соединяющие верхний вход УВХ на рис. 3 с **каждым** чётным отводом делителя. По сути, эти ключи образуют дополнительный ЦАП3, основанный на том же делителе, что и ЦАП.

При современных возможностях синтеза логики значительное усложнение калибровки не вызывает сомнений и в данной работе не рассматривается.

Одной из проблем рассматриваемой калибровки сегментов является несогласованность веса разрядов АЦП и ЦАП2 (рис. 4). Последний имеет токовый выход, масштаб которого не связан с напряжением опоры АЦП.

## III. КАЛИБРОВКА СЕГМЕНТОВ

### A. Исходные обозначения

- $N$  - разрядность АЦП, на рис. 1  $N = 12$ ;
- $M$  - разрядность flash каскада, на рис. 1  $M = 4$ ;
- $V_{R2} = 1$  - идеальное напряжение источника Ref2;
- $\delta_R$  - ошибка вторичного опорного источника;
- $i = 1 \div 2^M$  - номер сегмента
- $V_{Si} = 1 + \delta_i$  - напряжение на каждом сегменте делителя,  $\delta_i$  - случайная ошибка сегмента.

Представим реальное напряжение источника Ref2 как  $V_{R2} = 1 + \delta_R + P \cdot C_C$ , где  $P \cdot C_C$  - величина калибрующего воздействия ЦАП2, равная произведению

веса  $P$  одного разряда ЦАП2 на его входной код  $C_C$ . Будем рассматривать все каскады АЦП, кроме входного flash, как  $(N - M + 1)$  разрядный АЦП2. Обозначим через  $W$  половину его диапазона,  $W = 2^{N-M}$ .

#### В. Вывод выражения для калибровки сегментов

При калибровке для каждого сегмента повторяется процедура, состоящая из следующих действий:

- блок логики подаёт на ЦАП и ЦАП3 смежные коды (рис. 3) так, что на входах УВХ формируется разностное напряжение, равное напряжению одного сегмента;
- блок логики загружает в ЦАП2 калибровочный код (рис. 4);
- блок логики организует двоичный поиск такого калибровочного кода, чтобы выход АЦП2 удовлетворял определённому критерию.

Пусть критерием двоичного поиска является выходной код АЦП2  $(2^{N-M+1} - 1)$  (все единицы) и переключение верхнего по рис. 4 компаратора калибровки. В этом состоянии АЦП2 обрабатывает сигнал, точно равный его полной шкале:

$$2 \cdot W = (V_{Si} / (1 + \delta_R + P \cdot C_{Fi}) + 1) \cdot W, \quad (1)$$

где  $C_{Fi}$  - код калибровки ЦАП2, удовлетворяющий критерию двоичного поиска. Преобразуем его к виду:

$$C_{Fi} = (V_{Si} - 1 - \delta_R) / P \quad (2)$$

Усреднив по всем сегментам, получим:

$$\overline{C_{Fi}} = (\overline{V_{Si}} - 1 - \delta_R) / P \quad (3)$$

Так как сегменты составляют последовательный резистивный делитель, напряжение на нём точно равно  $V_{ref}$ , значит сумма ошибок всех сегментов равна нулю. Тогда  $\overline{V_{Si}} = 1$ , а выражение (3) примет вид:

$$\overline{C_{Fi}} = -\delta_R / P \quad (4)$$

Средняя величина  $\overline{C_{Fi}}$  представляет собой код ЦАП2, идеально калибрующий вторичный опорный источник Ref2, как если бы резистивный делитель был идеальным. Обозначим:

$$C_R = \overline{C_{Fi}} \quad (5)$$

Пусть теперь критерием двоичного поиска будет выходной код АЦП2  $(2^{N-M+1} - D)$ , где  $D \geq 1$  - небольшое натуральное число, лучше целая степень 2. Обозначим  $C_{Di}$  код ЦАП2, удовлетворяющий этому критерию. Такое состояние АЦП2 описывается выражением:

$$2 \cdot W - D = (V_{Si} / (1 + \delta_R + P \cdot C_{Di}) + 1) \cdot W$$

Преобразуем его к виду:

$$1 + \delta_R + P \cdot C_{Di} = V_{Si} \cdot W / (W - D)$$

Усреднив по всем сегментам, получим:

$$1 + \delta_R + P \cdot \overline{C_{Di}} = W / (W - D) \quad (6)$$

Подставив  $\delta_R$  из (4) в (6) и, принимая во внимание (5), получим вес  $P$  одного разряда ЦАП2, вычисленный по результатам калибровки всех сегментов:

$$P = D / (W - D) / (\overline{C_{Di}} - C_R) \quad (7)$$

Для вычисления калибровочных поправок сегментов необходимо определить вес  $Q$  младшего разряда АЦП2, выраженный в единицах одного разряда ЦАП2.

АЦП2 преобразует своё входное напряжение  $V_2$  в код:

$$D_2 = (V_2 / (1 + \delta_R + P \cdot C_C) + 1) \cdot W$$

С учётом малости величины  $P \cdot C_C$  по сравнению с 1, применим аппроксимацию  $1 / (1 + x) \approx (1 - x)$ . Учтём также, что при калибровке  $V_2 \approx 1$ , тогда

$$\begin{aligned} D_2 &= (V_2 \cdot (1 + \delta_R) + 1) \cdot W - (V_2 \cdot P \cdot W) \cdot C_C \\ &= Const - Q \cdot C_C, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $Q = P \cdot W$ . Величина  $Q$  и есть искомый вес младшего разряда АЦП2, выраженный в единицах одного разряда ЦАП2.

Теперь, зная вес  $Q$  и результаты калибровки  $C_{Di}$  и  $C_{Fi}$  для каждого сегмента, вычислим ошибку напряжения  $i$ -го сегмента:

$$E_{Si} = (C_R - C_{Fi}) \cdot Q \quad (9)$$

При нормальной работе АЦП на нижний на рис. 2 вход УВХ подаётся не напряжение сегмента, а напряжение  $V_{ЦАП}$ , то есть напряжение на отводе делителя.

Поэтому поправка  $C_{Si}$  каждого сегмента должна компенсировать ошибку на  $i$ -м отводе делителя, равную сумме ошибок сегментов делителя, расположенных между отводом и крайней точкой делителя:

$$C_{Si} = \sum_{k=1}^i E_{Sk} \quad (10)$$

Величина  $C_{Si}$  представляет собой аддитивную поправку к выходному коду АЦП для  $i$ -го отвода. Поэтому нет смысла сохранять дробную часть  $C_{Si}$ .

Тем не менее, во избежание потери точности во всех предыдущих выкладках, включая суммирование по формуле (10), необходимо обрабатывать дробную часть и проводить округление до целого после суммирования по (10).

Объединяя (10), (9), (8) и (7) получим итоговые выражения для  $Q$  и  $C_{Si}$ :

$$Q = \frac{2^{N-M}}{2^{N-M} - D} \cdot \frac{D}{C_{Di} - C_R} \quad (11)$$

$$C_{Si} = \sum_{k=1}^i (C_R - C_{Fk}) \cdot Q \quad (12)$$

При малых  $D$  и принимая  $2^{N-M} - D \approx 2^{N-M}$ , выражение (11) может быть упрощено:

$$Q = \frac{D}{C_{Di} - C_R}$$

За счёт этого упрощения может быть заметно сокращён объём логики калибровки. Погрешность такого упрощения можно оценить по статистической модели при проектировании АЦП.

### С. Особые сегменты

Крайние отводы ЦАП (0 и 32 на рис. 2 и 3) выбираются при входном сигнале, близком к плюс или минус полной шкалы АЦП. В этих условиях выходное напряжение ЦАП равно соответственно плюс или минус опорному напряжению. Очевидно, что это напряжение не зависит от погрешностей резисторов делителя. Следовательно, поправки крайних отводов будут равны нулю. Это означает, что калибровка не нарушит полноту диапазона выходных кодов АЦП и не приведёт к пропуску кодов.

Аналогично при входном напряжении, близком к нулю, дифференциальное напряжение ЦАП равно нулю и также не зависит от погрешностей резисторов делителя.

### Д. Дополнительные возможности калибровки

#### 1) Другие ошибки

Несложно показать, что при введении таких мультипликативных ошибок, как ошибки усиления УВХ и полной шкалы АЦП, вид итоговых выражений (11, 12) не изменится. Это означает, что описанная процедура калибровки устраняет также и эти ошибки.

#### 2) Отрицательная калибровка

Вывод итоговых выражений (11, 12) можно повторить при подаче на входы УВХ разностного напряжения, равного отрицательному напряжению сегмента. При этом будет использован нижний на рис. 4 компаратор калибровки, а в логике калибровки необходимо изменить критерии двоичного поиска. Другие дополнительные ресурсы калибровки не

требуются. Использование в выражениях (4, 11 и 12) усреднённых по положительной и отрицательной калибровке величин  $C_{Fi} = (C_{+Fi} + C_{-Fi})/2$  и  $C_{Di} = (C_{+Di} + C_{-Di})/2$  приведёт к независимости результата от смещения нуля усилителей.

На рассматриваемый в данной работе метод сегментной калибровки получен патент РФ [4]. В материалах патента более детально рассмотрен вывод формул, в том числе для отрицательной калибровки.

## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЛИБРОВКИ

В работе [5] приведено описание статистической модели для исследования возможностей калибровки смещения нуля и Ref2. Приведены также данные по статистическим разбросам схемных элементов для 0.18 мкм КМОП процесса, взятые из технологического файла изготовителя. Разбросы по смещению нуля компараторов определены моделированием.

В ходе данной работы эта модель расширена. Включена калибровка сегментов, представленная итоговыми формулами (11, 12). Модель допускает изменение многих параметров: разрядность АЦП и flash каскада, наличие двойной выборки, разрядность, способ округления и глубину усреднения цифровых данных калибровки и т.д.

В качестве объекта моделирования выбран 16 разрядный АЦП с архитектурой по рис. 1, но с увеличенным числом RSD каскадов. На рис. 5 приведены гистограммы распределения выборки из 1000 АЦП по нелинейности (Integral NonLinearity - INL, Differential NonLinearity - DNL) до и после калибровки.

Рис. 5 показывает, что естественные разбросы элементов приводят к распределению нелинейности подавляющей части АЦП в области неприемлемо больших значений (серые графики). Калибровка позволяет сконцентрировать распределение основной части АЦП в пределах нескольких LSB (чёрные графики). Выход годных по приведённой выборке в результате калибровки вырос с 0.2% до 60.2%. Критерии годности отражены на рис. 5 вертикальными пунктирными линиями.

Действительно, естественное рассогласование парных элементов не позволяет рассчитывать на приемлемый выход годных высокоразрядных АЦП без калибровки. Кроме того, достигнутый после калибровки выход годных всё ещё далёк от желаемого. Практикой ведущих производителей высокоразрядных АЦП является наличие версий АЦП с пониженной разрядностью, так что изделия, забракованные по самым жёстким нормам, не являются окончательным браком.

Модель также оказалась полезной для оценки вклада калибровок сегментов и вторичной опоры в улучшение общих параметров АЦП. В качестве примера на рис. 6 приведено распределение АЦП по RMS ошибке при применении разных наборов калибровок.

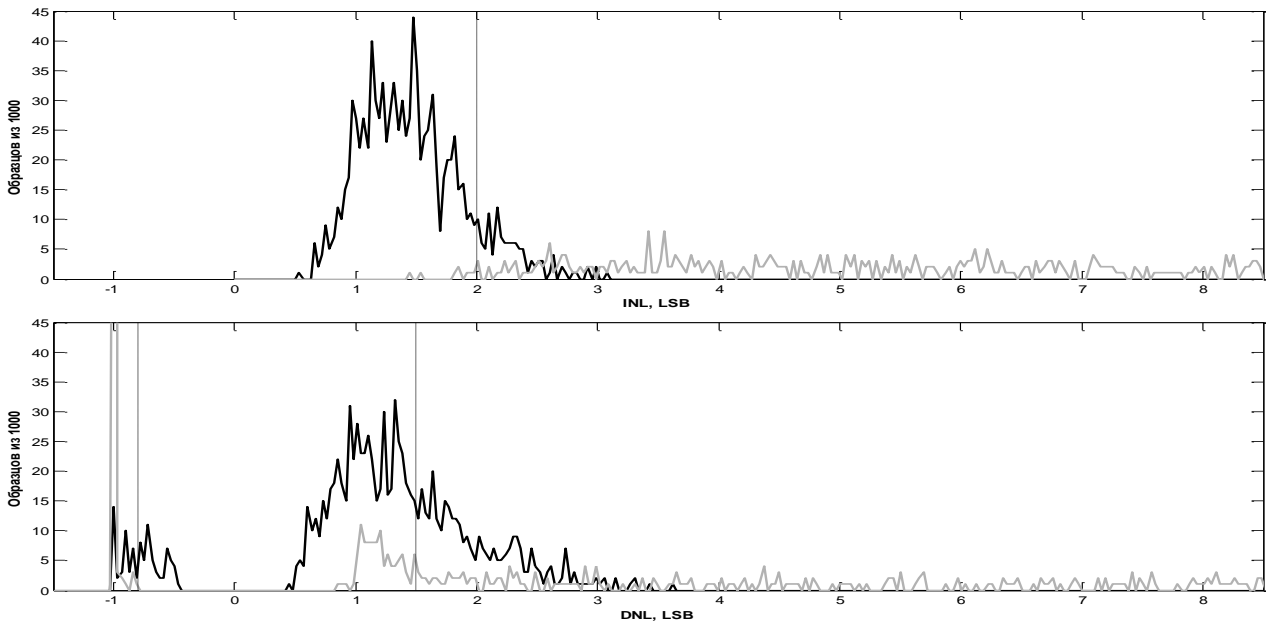


Рис. 5. Гистограммы распределения 16 разрядных АЦП по INL, DNL до и после калибровки

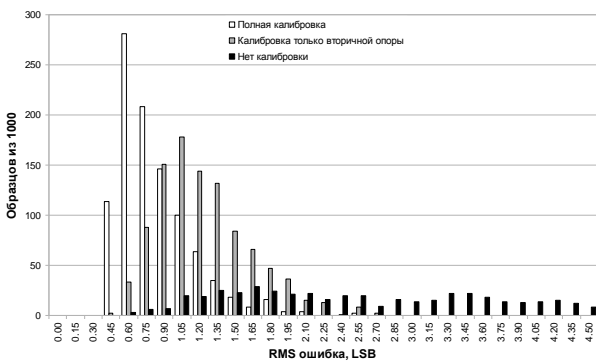


Рис. 6. Гистограммы распределения 16 разрядных АЦП по RMS ошибке при разных наборах калибровок

По данным рис. 6 максимум гистограммы распределения RMS ошибки откалиброванных только по вторичной опоре АЦП попадает на 1.05 LSB. Применение калибровки сегментов смещает максимум к значению 0.6 LSB. Это говорит о существенном снижении средней ошибки за счёт сегментной калибровки при использованных данных изготовителя о рассогласовании элементов.

С помощью модели исследована необходимая разрядность логики калибровки и калибровочных ЦАПов. В качестве универсальной оценки разрядности удобно выбрать вес  $Q$  младшего разряда АЦП2, выраженный в единицах одного разряда ЦАП2. На рис. 7 приведены гистограммы распределения ошибок округления при разных значениях  $Q$ . Случай  $Q = \infty$  соответствует абсолютно точным вычислениям при калибровке, при этом ошибка округления не превосходит 0.5 LSB. Случай  $Q = 16$  представляется приемлемым компромиссом между точностью и аппаратными затратами. Это означает, что все

цифровые данные калибровки, выраженные в битах АЦП, должны иметь 4 дробных двоичных разряда.

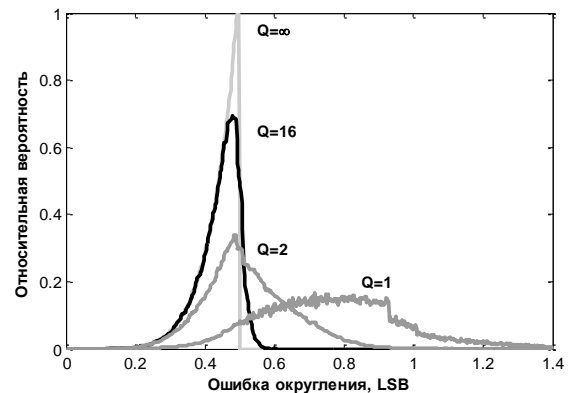


Рис. 7. Гистограммы распределения ошибок округления при разных значениях  $Q$

## V. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Рассматриваемая в настоящей работе калибровка сегментов использована в разработанном для процесса XC018 компании XFAB 16-разрядном АЦП. Из-за неправильного учёта краевых условий при проектировании резистивного делителя последний имеет систематическую ошибку, превосходящую ошибку, обусловленную статистическим разбросом резисторов. Это приводит к переполнению регистров калибровки.

Тем не менее, в скановом режиме можно выгрузить состояние логики, промоделировать правильную калибровку на компьютере и загрузить правильные результаты калибровки обратно в регистры логики. Обработанный такой внешней калибровкой АЦП пригоден для измерения параметров.

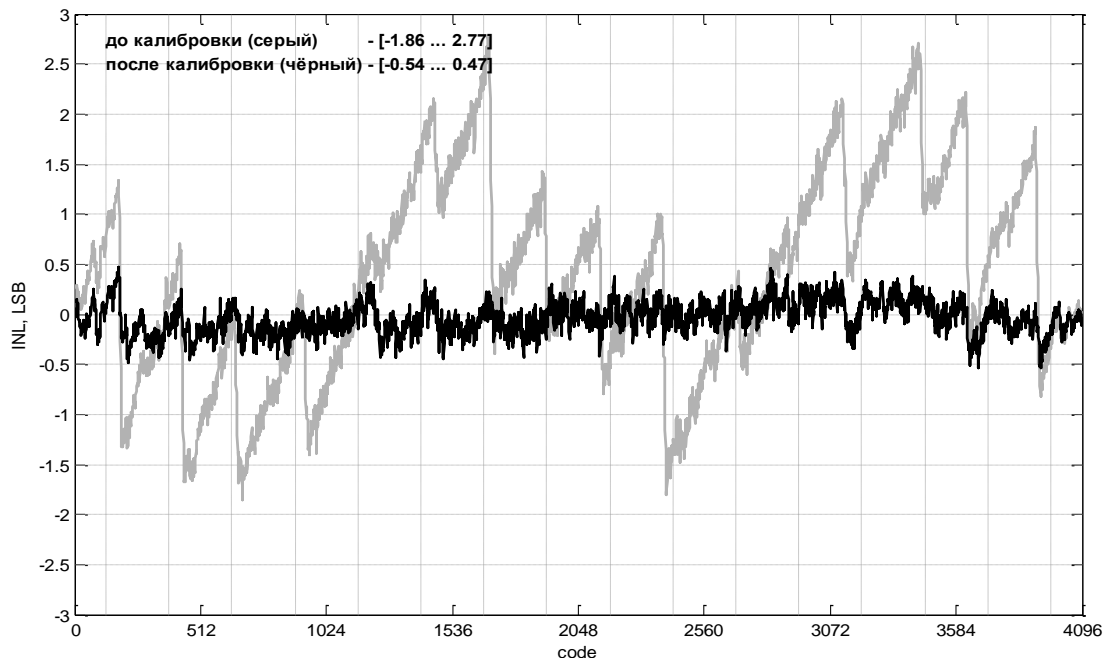


Рис. 8. INL по 12 старшим разрядам 16 разрядного АЦП до и после калибровки

На рис. 8. представлена измеренная интегральная нелинейность INL 16 разрядного АЦП, обработанного внешней калибровкой. INL измерена по 12 старшим разрядам.

Исходная характеристика нелинейности отражает сегментную структуру АЦП. Значительный наклон в пределах сегмента обусловлен ошибкой Ref2. После калибровки наклон существенно снижен и ошибки сегментов в основном устранены. Оставшиеся ошибки являются предметом дальнейших исследований.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод калибровки сегментов высокоразрядных АЦП:

- метод обоснован теоретически, выведены уравнения калибровки;
- приведены результаты статистического моделирования на основе данных техпроцесса изготовителя;
- работоспособность метода подтверждена результатами исследования экспериментальных образцов.

Показана эффективность применения статистического моделирования при проектировании высоко-разрядных АЦП. В ходе проектирования статистическая модель использовалась для:

- исследования вариантов архитектуры и выбора оптимального варианта;
- оптимизации размеров согласованных элементов (резисторов, конденсаторов);
- определения необходимой и достаточной разрядности калибровочных ЦАПов и логики калибровки;

- прогнозирования распределения параметров АЦП INL, DNL, SNDR и оценки выхода годных.

Статистическая модель допускает различные расширения. В настоящее время авторы работают над введением в модель дополнительных источников ошибок:

- шума, вызванного ошибками неустановления, определёнными по результатам **tran** анализа;
- термического шума, определённого по результатам **noise** анализа;
- джиттера тактового сигнала, определённого по результатам **pnoise** анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пат. № 2341017 РФ. Быстродействующий аналого-цифровой преобразователь и способ его калибровки / Агрич Ю.В. ; заявл. 29.09.2006 ; опубл. 10.04.2008.
- [2] Агрич Ю.В., Лифшиц В.Б. Архитектура быстродействующих конвейерных АЦП, оптимизированная под современные субмикронные технологии // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сб. трудов / под общ. ред. ак. РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 497-502.
- [3] Rakers et al. US Patent No. 5,644,313 Jul. 1, 1997 Redundant signed digit A-to-D conversion circuit and method thereof.
- [4] Пат. № 2442279 РФ. Аналого-цифровой преобразователь и способ его калибровки / Агрич Ю.В., Лифшиц В.Б. ; заявл. 27.08.2010 ; опубл. 10.02.2012.
- [5] Лифшиц В.Б., Агрич Ю.В. Моделирование статической погрешности конвейерных АЦП с калибровкой // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сб. трудов / под общ. ред. ак. РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 527-532.