

С. М. Захарченко, к. т. н., доц.; А. В. Бойко

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ САМОКАЛИБРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕСОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

*В статье представлен разработанный метод цифровой самокалибровки АЦП последовательного приближения на основе избыточных позиционных систем исчисления, который позволяет существенно уменьшить методическую погрешность калибровки и избежать применения дополнительных разрядов.*

**Ключевые слова:** цифровая самокалибровка АЦП, аналого-цифровой преобразователь, весовая избыточность, погрешность квантования.

Аналого-цифровые преобразователи широко используются в различных устройствах и системах, в частности в системах сбора и обработки информации, системах связи, разнообразных системах управления технологическим процессом. АЦП последовательного приближения (АЦП ПН) принадлежат к такому классу преобразователей, которые с одной стороны имеют высокую точность, а с другой – достаточно высокое быстродействие, которое фокусирует интерес специалистов к этим устройствам.

Вопросы повышения точности АЦП ПН остаются актуальными. Частично проблема повышения точности может быть решена за счет улучшения технологии (использование лазерной подгонки элементов). Однако этот подход, кроме существенного увеличения стоимости производства, дополнительно приводит к ухудшению температурных параметров, уменьшает надежность устройств. Другой путь улучшения точностных характеристик АЦП ПП – применение методов самокалибровки. Однако при использовании двоичной системы исчисления калибрование осуществляется в цифро-аналоговой форме, которая предусматривает применение дополнительных корректирующих ЦАП и уменьшает быстродействие преобразователя.

Во избежание упомянутых недостатков используют избыточные позиционные системы исчисления (ИПСИ), которые предоставляют возможность выполнения калибрования исключительно в цифровой форме и таким образом избежать главных недостатков цифро-аналогового калибрования. Также использование информационной избыточности в виде избыточной позиционной системы исчисления дает возможность не только упростить процедуру калибрования и уменьшить требования к точности разрядов, но и существенно повысить быстродействие преобразователей.

Построение самокалибрирующих АЦП на основе ИПСИ представляет ряд преимуществ. Во-первых, возможное калибрование весов разрядов со значительными отклонениями, что существенно снижает требования к ряду аналоговых узлов преобразователей. Этот же фактор позволяет при использовании процедуры самокалибровки обеспечить высокие метрологические характеристики преобразователей в широком диапазоне температур и в течение длительного времени. Во-вторых, самокалибровка может быть применена практически во всех АЦП поразрядной кодировки.

Известны две основных стратегии самокалибровки. Первая из них называется “снизу-кверху”, другая – “сверху-книзу”. Алгоритм “снизу-кверху” работает исходя из предположения, что младший разряд или группа младших разрядов являются идеальными. То есть вся разрядная сетка разделяется на  $m$  “неточных” (старших) разрядов, абсолютное отклонение которых может преувеличивать половину веса самого младшего “точного” разряда и  $(n-m)$  “точных” (младших) разрядов. Следует отметить, что распределение на “точные” и “неточные” разряды является условным. В реальном преобразователе

относительные отклонения “точных” и “неточных” разрядов могут быть одинаковыми, однако влияние погрешностей младших разрядов значительно меньше влияния погрешностей старших разрядов. В процессе калибрования старших разрядов их вес определяется на основе младших («точных»), поэтому в данной стратегии накапливается методическая погрешность квантования. Для уменьшения последней во время самокалибровки применяют так называемые дополнительные разряды, веса которых меньше веса самого младшего разряда. Недостатком такого подхода является удлинение разрядной сетки в сторону младших разрядов.

Целью данной работы является совершенствование алгоритма самокалибровки за счет компенсации погрешности квантования.

Для решения данной задачи нужно:

- исследовать погрешность квантования в зависимости от значения вспомогательного сигнала;
- предложить метод компенсации погрешности квантования;
- предложить схемную реализацию.

При калибровании по стратегии “снизу-кверху” [1, 3] калибрования веса  $i$ -го разряда  $Q_i$  АЦП заключается в двухкратном уравнивании определенного вспомогательного сигнала, причем первый раз с использованием  $Q_i$ , а второй раз без его использования. После чего кодовый эквивалент  $K_i$  расчетного значения веса разряда, который калибруется, может быть найден по формуле:

$$K_i = \sum_{j=0}^{i-1} a_j' \cdot Q_j - \sum_{j=0}^{i-1} a_j'' \cdot Q_j, \quad (1)$$

где  $a_j'$  и  $a_j''$  – соответственно двоичные биты кодов результатов первого и второго преобразований.

Для устранения недостатков, связанных с накоплением погрешности квантования, предлагается идея многоразового калибрования. При применении данного метода один неточный разряд калибруется несколько раз при разных значениях вспомогательного сигнала  $A_{\partial i}$ . Минимальное значение вспомогательного сигнала  $A_{\partial \min}$  совпадает со значением веса разряда, который калибруется, а максимальное  $A_{\partial \max}$  – определяется как сумма весов всех младших разрядов. Значение  $A_{\partial i}$  в случае  $a_j \in \{1; 0\}$  вычисляются по формулам:

$$A_{\partial \min i} = Q_i', \quad i \in [l..n-1]; \quad (2)$$

$$A_{\partial \max i} = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j', \quad i \in [l..n-1], \quad (3)$$

где  $A_{\partial \min i}$  и  $A_{\partial \max i}$  – соответственно минимальное и максимальное значения вспомогательного сигнала для калибрования  $i$ -го разряда;

$Q_i' = Q_i + \Delta Q_i$ , где  $\Delta Q_i$  – отклонение  $i$ -го разряда,  $Q_i$  – идеальное значение  $i$ -го разряда.

Рабочее значение вспомогательного сигнала  $A_{\partial p i}$  должно удовлетворять условие  $A_{\partial \min i} \leq A_{\partial p i} \leq A_{\partial \max i}$ . При этом вспомогательный сигнал  $A_{\partial}$  при первом и втором калибровании равен соответственно:

$$A_{\partial} = K_l + \sum_{i=0}^{l-1} a_i' \cdot K_i + \Delta_{\kappa \partial}', \quad (4)$$

$$A_{\partial} = \sum_{i=0}^{l-1} a_i'' \cdot K_i + \Delta_{\kappa \partial}'', \quad (5)$$

где  $\Delta_{\kappa \partial}'$ ,  $\Delta_{\kappa \partial}''$  – погрешность квантования соответственно при первом и втором

калибрований.

На основе (4, 5) погрешности квантования могут быть найдены по формулам:

$$\Delta_{кв}^{\prime} = A_0 - \sum_{i=0}^l a_i^{\prime} \cdot K_i, \quad (6)$$

$$\Delta_{кв}^{\prime\prime} = A_0 - \sum_{i=0}^{l-1} a_i^{\prime\prime} \cdot K_i. \quad (7)$$

Графическая интерпретация последних показана на рис. 1а, где ОМР – единица младшего разряда.

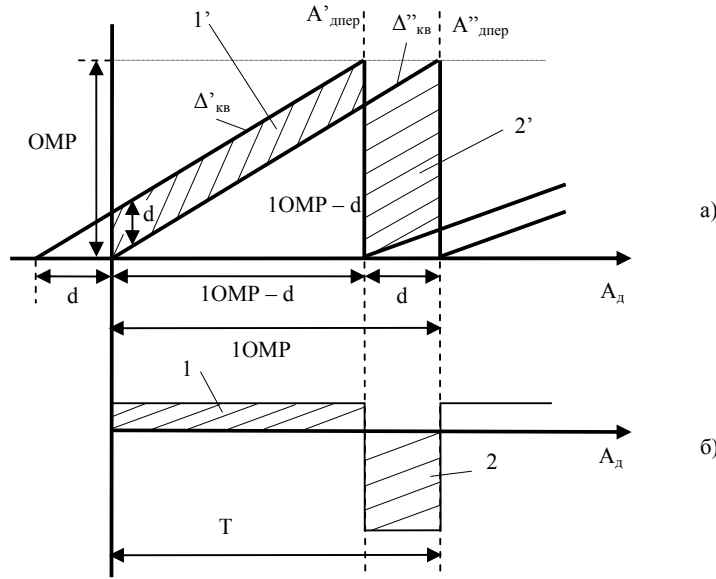


Рис. 1. Ошибка квантования:  
 а) зависимость ошибки квантования от вспомогательного сигнала  $A_d$   
 б) результирующая ошибка квантования

На рис. 1а есть точки, в которых погрешности квантования равны 0, это точки переключения компаратора, а значение  $A_d$  в этих точках определяется выражениями:

$$A_{дпер}^{\prime} = \sum_{i=0}^l a_i^{\prime} \cdot K_i, \quad (8)$$

$$A_{дпер}^{\prime\prime} = \sum_{i=0}^l a_i^{\prime\prime} \cdot K_i. \quad (9)$$

По результатам I-го и II-го уравновешивания вес  $l$ -го разряда можно вычислить по формуле:

$$K_l = \sum_{i=0}^{l-1} a_i^{\prime\prime} \cdot K_i - \sum_{i=0}^{l-1} a_i^{\prime} \cdot K_i - \Delta_{кв}^{\prime\prime} + \Delta_{кв}^{\prime}, \quad \text{или} \quad (10)$$

$$K_l = \sum_{i=0}^{l-1} K_i \cdot (a_i^{\prime\prime} - a_i^{\prime}) - \Delta_{кв}^{\prime\prime} + \Delta_{кв}^{\prime}. \quad (11)$$

Поэтому результирующая погрешность квантования определяется разницей  $\Delta^{\prime}_{кв}$  и  $\Delta^{\prime\prime}_{кв}$ , что представленной на рис 1б.

Из рисунка 1б следует, что погрешность калибрования принимает как положительные, так и отрицательные значения, причем зависимость  $(\Delta^{\prime\prime}_{кв} - \Delta^{\prime}_{кв})$  имеет периодический характер, а период изменения  $T$  равен весу младшего разряда. Следовательно, если сделать несколько

калибрований в течение одного периода  $T$ , а результат усреднить по формуле:

$$K_l^* = \frac{\sum^S K_l}{S}, \quad (12)$$

где  $l$  – номер итерации,  $S$  – общее количество итераций, то методическую погрешность калибрования можно существенно снизить. Причем если доказать, что площади прямоугольников 1 и 2 на рис. 1б одинаковые, то при условии  $S \rightarrow \infty$   $K_l^* \rightarrow Q_l'$ .

Поскольку площади прямоугольников 1 и 2 рис. 1б равны соответствующим площадям параллелограммов 1' и 2' рис. 1а, то достаточно доказать, что площади последних являются одинаковыми. Исходя из формулы расчета площади параллелограмма, получим  $S_{нар-ма1} = d*(1-d)$ ,  $S_{нар-ма2} = (1-d)*d$ .

В подтверждение полученных результатов на основе вышеперечисленных алгоритмов и ограничений была разработана моделирующая программа. Результат работы программы можно увидеть на рисунке 2.

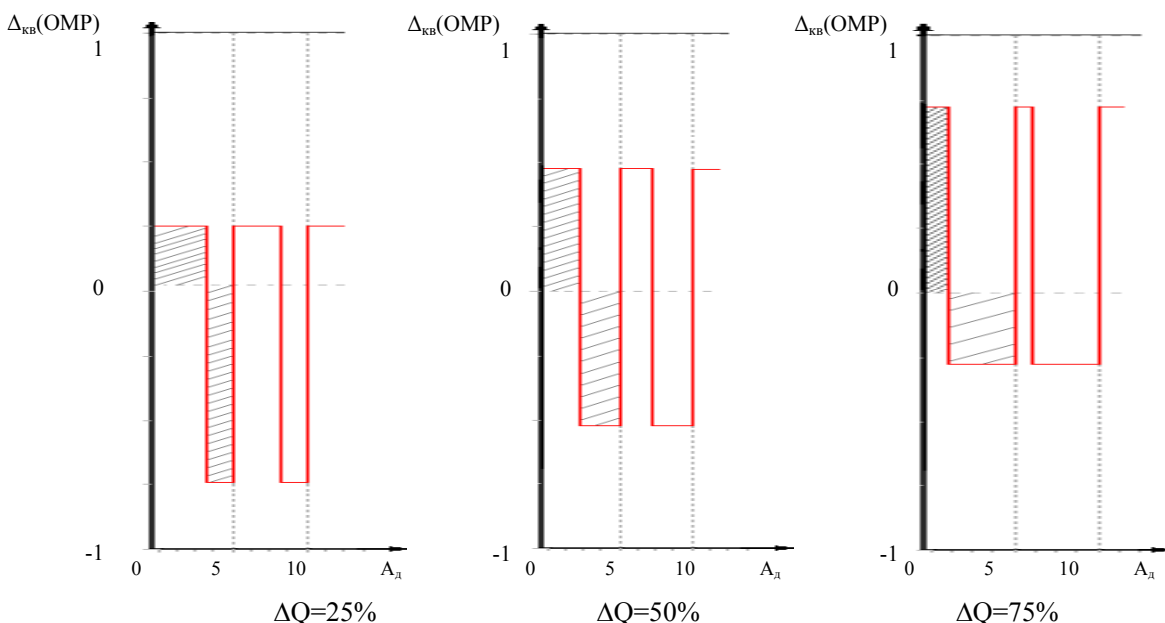


Рис. 2. Результат работы программы

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что процедуру калибрования можно проводить несколько раз, изменяя  $A_d$  в пределах одного младшего разряда на любом промежутке из всего диапазона вспомогательного сигнала, а результирующее значение определять путем осреднения по формуле (12). При этом можно отказаться от использования дополнительных разрядов, ведь погрешность квантования будет полностью компенсирована.

Пример аппаратной реализации предложенной идеи на базе самокалибрующего АЦП с перераспределением заряда на основе ИПСИ приведен на рис. 3.

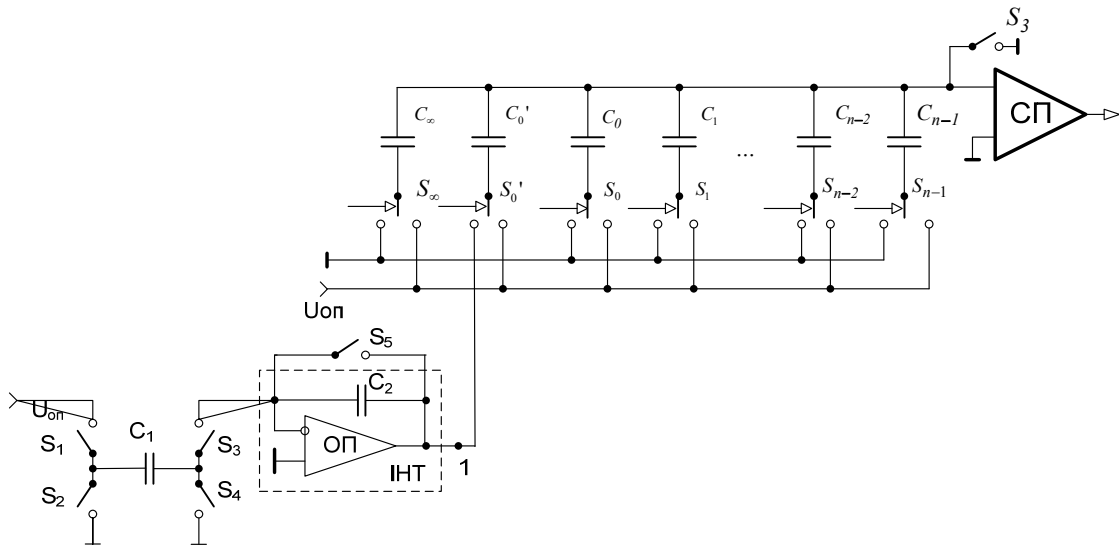


Рис. 3. Аппаратная реализация

При калибровании  $C_l$ -го разряда при первом калибровании включаем разряды  $C_l$  и  $C_k$ . Необходимость включения разряда  $C_k$  обуславливается тем, что сдвиг нуля схемы сравнения СП может быть отрицательным, поэтому для обеспечения гарантированного переключения СП включают разряд  $C_k$ . Тогда результатом калибрования будет кодовый эквивалент суммы емкостей включенных конденсаторов  $C_l + C_k$ . Условие выбора номинала  $C_k$  можно записать формулой:

$$U_{on} \cdot \frac{C_l + C_k}{\sum_{i=0}^{n-1} C_i} > \frac{C_l}{\sum_{i=0}^{n-1} C_i} \cdot U_{on} + U_{zc}, \quad (13)$$

где  $U_{zc}$  – напряжение сдвига нуля схемы сравнения.

Тогда сформированный вспомогательный сигнал можно представить так:

$$U_{\partial n_j} = U_{on} \cdot \frac{C_l + C_k}{\sum_{i=0}^{n-1} C_i} + j \cdot U_{on} \cdot \frac{C_l}{C_2} \cdot \frac{C_0}{\sum_{i=0}^{n-1} C_i}, \quad (14)$$

где  $j \in [0, 1, \dots, \frac{C_2}{C_1}]$ . Отношение  $C_1/C_2$  задает шаг изменения вспомогательного сигнала,

последовательно формируя необходимое напряжение.

Работа схемы начинается с выбора начального вспомогательного сигнала  $A_0$ , для этого ключ  $S_3$  закрывается и на конденсаторы  $C_l$  и  $C_k$  подается опорное напряжение  $U_{on}$ . Остальные конденсаторы подключаются на землю. Потом идет инвертирование сигнала: ключ  $S_3$  размыкается, конденсаторы  $C_l$  и  $C_k$  подсоединяются на землю, а сформированное напряжение перераспределяется на все конденсаторы матрицы. На следующем этапе проводится процедура калибрования, первый раз включением  $C_l$ , а второй раз без его включения. Следующее уравнивание осуществляется аналогично, отличие заключается в напряжении  $U_{\partial n_j}$ , которое подается в точку 1 и определяется выражением (14), переменная  $j$  задает номер уравнивания. Работа схемы формирования вспомогательного сигнала описана в [1]. После того, как  $j$  достигнет значения  $C_2/C_1$ , калибрование завершается, а кодовый эквивалент веса  $l$ -го разряда рассчитывается по формуле (12).

## Выводы

В статье рассмотрены методы повышения точности АЦП и недостатки данных методов. Предложен метод цифровой самокалибровки АЦП с использованием весовой избыточности, который позволяет существенно уменьшить погрешность квантования и отказаться от использования дополнительных разрядов. Основой метода является многоразовая процедура калибрования при разных значениях вспомогательного сигнала со следующим осреднением результата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарченко С. М., Азаров О. Д., Харьков О. М. Самокалібровані АЦП з накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 235 с.
2. Шлядин В. М. Цифровые измерительные устройства: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
3. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев – К: Наукова думка, 1987. – 280 с.
4. Алипов Н. В. Алгоритмы функционирования параллельно-последовательных преобразователей формы информации, корректирующих динамические ошибки // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков: Вища школа. – 1985. – С. 57 – 64.
5. Захарченко С. М., Біліченко Н. О., Азаров О. Д. Нові методи цифрового самокалібрування для АЦП з перерозподілом заряду // Зб. праць Міжнародної науково-технічної конференції “Приборостроение – 2000” – Симеїз. – 2000. – С. 233 – 237.
6. Азаров О. Д., Захарченко С. М., Кравцов М. О. Підвищення точності та швидкодії аналого-цифрових перетворювачів методами інформаційної надлишковості // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №2. – С. 78 – 83.

*Захарченко Сергей Михайлович* – к. т. н., доцент кафедры вычислительной техники.

*Бойко Александр Владимирович* – магистрант, кафедра вычислительной техники.  
Винницкий национальный технический университет.