

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

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО САМОКАЛІБРУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАГОВОЇ НАДЛИШКОВОСТІ

*У статті представлено розроблений метод цифрового самокалібрування АЦП послідовного наближення на основі надлишкових позиційних систем числення, який дозволяє суттєво зменшити методичну похибку калібрування й уникнути застосування додаткових розрядів.*

**Ключові слова:** цифрове самокалібрування АЦП, аналого-цифровий перетворювач, вагова надлишковість, похибка квантування.

Аналого-цифрові перетворювачі широко використовуються в різноманітних пристроях та системах, зокрема в системах збору та обробки інформації, системах зв'язку, різноманітних системах керування технологічним процесом. АЦП послідовного наближення (АЦП ПН) належать до такого класу перетворювачів, які з одного боку мають високу точність, а з іншого – досить високу швидкодію, що фокусує інтерес фахівців до цих пристроїв.

Питання підвищення точності АЦП ПН не втрачають актуальності. Частково проблема підвищення точності може бути вирішена за рахунок покращення технології (використання лазерного припасування елементів). Однак цей підхід, крім суттєвого збільшення вартості виробництва, додатково призводить до погіршення температурних параметрів, зменшує надійність пристроїв. Інший шлях покращення точнісних характеристик АЦП ПН – застосування методів самокалібрування. Проте при використанні двійкової системи числення калібрування здійснюється в цифро-аналоговій формі, що передбачає застосування додаткових коригуючих ЦАП і зменшує швидкодію перетворювача.

Для уникнення зазначених недоліків використовують надлишкові позиційні системи числення, що дозволяє виконати калібрування виключно в цифровій формі і таким чином уникнути головних недоліків цифро-аналогового калібрування. Також використання інформаційної надлишковості у вигляді надлишкової позиційної системи числення дає змогу не тільки спростити процедуру калібрування та зменшити вимоги до точності розрядів, а й суттєво підвищити швидкодію перетворювачів.

Побудова самокаліброваних АЦП на основі НПСЧ надає ряд переваг. По-перше, можливе калібрування ваг розрядів зі значними відхиленнями, що істотно знижує вимоги до ряду аналогових вузлів перетворювачів. Цей же чинник дозволяє під час використання процедури самокалібрування забезпечити високі метрологічні характеристики перетворювачів у широкому діапазоні температур і протягом тривалого часу. По-друге, самокалібрування може бути застосоване практично в усіх АЦП порозрядного кодування.

Відомі дві основні стратегії самокалібрування. Перша з них називається “знизу-догори”, інша – “згори-донизу”. Алгоритм “знизу-догори” працює виходячи з припущення, що молодший розряд або група молодших розрядів є ідеальними. Тобто уся розрядна сітка поділяється на  $m$  “неточних” (старших) розрядів, абсолютне відхилення яких може перевищувати половину ваги наймолодшого “точного” розряду і  $(n-m)$  “точних” (молодших) розрядів. Слід зазначити, що розподіл на “точні” та “неточні” розряди є умовним. У реальному перетворювачі відносні відхилення “точних” і “неточних” розрядів можуть бути однаковими, однак вплив похибок молодших розрядів значно менший за вплив похибок старших розрядів. У процесі калібрування старших розрядів їхня вага визначається на основі молодших («точних»), тому в даній стратегії накопичується методична похибка квантування. Для зменшення останньої під час самокалібрування застосовують так звані додаткові

розряди, ваги яких є меншими за вагу наймолодшого розряду. Недоліком такого підходу є подовження розрядної сітки в бік молодших розрядів.

Метою цієї роботи є вдосконалення алгоритму самокалібрування за рахунок компенсації похибки квантування.

Для розв'язання поставленого завдання потрібно:

- дослідити похибку квантування залежно від значення допоміжного сигналу;
- запропонувати метод компенсації похибки квантування;
- запропонувати схемну реалізацію.

Під час калібрування за стратегією «знизу-догори» [1, 3] калібрування ваги  $i$ -го розряду  $Q_i$  АЦП полягає у дворазовому врівноваженні певного допоміжного сигналу, причому перший раз із використанням  $Q_i$ , а другий раз без його використання. Після чого кодовий еквівалент  $K_i$  розрахункового значення ваги розряду, що калібрується, може бути знайдений за формулою:

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

де  $a_j'$  та  $a_j''$  – відповідно двійкові біти кодів результатів першого та другого перетворення.

Для усунення недоліків, пов'язаних із накопиченням похибки квантування, пропонується ідея багаторазового калібрування. При застосуванні цього методу один неточний розряд калібрується кілька разів при різних значеннях допоміжного сигналу  $A_{di}$ . Мінімальне значення допоміжного сигналу  $A_{d\min i}$  збігається зі значенням ваги розряду, що калібрується, а максимальне  $A_{d\max i}$  – визначається як сума ваг усіх молодших розрядів. Значення  $A_{di}$  у випадку  $a_i \in \{1; 0\}$  обчислюються за формулами:

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

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

де  $A_{d\min i}$  та  $A_{d\max i}$  – відповідно мінімальне та максимальне значення допоміжного сигналу для калібрування  $i$ -го розряду;

$Q_i' = Q_i + \Delta Q_i$ , де  $\Delta Q_i$  – відхилення  $i$ -го розряду, де  $Q_i$  – ідеальне значення  $i$ -го розряду.

Робоче значення допоміжного сигналу  $A_{dpi}$  повинно задовольняти умову  $A_{d\min i} \leq A_{dpi} \leq A_{d\max i}$ . При цьому допоміжний сигнал  $A_d$  при першому і другому калібруваннях дорівнює відповідно:

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

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

де  $\Delta_{\kappa\epsilon}'$ ,  $\Delta_{\kappa\epsilon}''$  – похибка квантування відповідно під час першого і другого калібрування.

На основі [4, 5] похибки квантування можуть бути знайдені за формулами:

$$\Delta_{\kappa\epsilon}' = A_d - \sum_{i=0}^{l-1} a_i' \cdot K_i, \quad (6)$$

$$\Delta_{\kappa\epsilon}'' = A_d - \sum_{i=0}^{l-1} a_i'' \cdot K_i. \quad (7)$$

Графічну інтерпретацію останніх показано на рис. 1а, де ОМР – одиниця молодшого розряду.

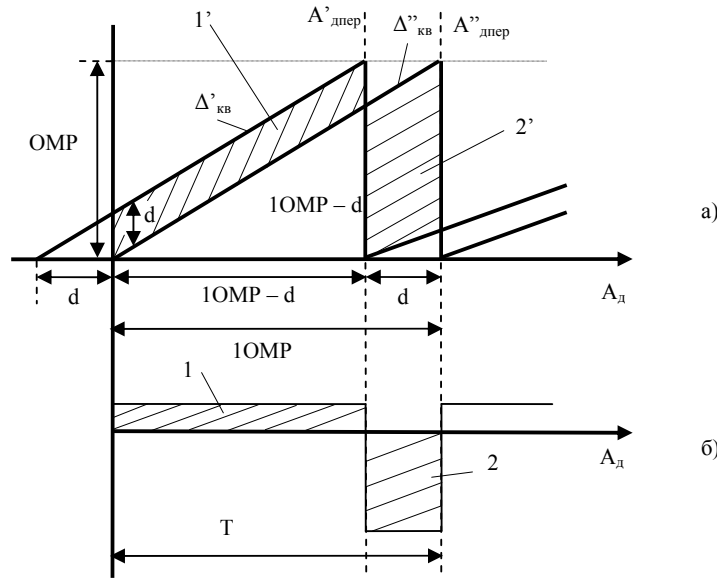


Рис. 1. Похибка квантування

- а) залежність похибки квантування від допоміжного сигналу  $A_d$ ;  
 б) результуюча похибка квантування

На рис. 1а є точки, в яких похибки квантування дорівнюють 0, це точки переключення компаратора, а значення  $A_d$  в цих точках визначається виразами:

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

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

За результатами I-го і II-го врівноважень вагу  $l$ -го розряду можна обрахувати за формулою:

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

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

Тому результуюча похибка квантування визначається різницею  $\Delta_{кв}^{\prime}$  і  $\Delta_{кв}^{\prime\prime}$ , що представлено на рис 1б.

З рисунка 1б слідує, що похибка калібрування приймає як додатні, так і від'ємні значення, причому залежність  $(\Delta_{кв}^{\prime\prime} - \Delta_{кв}^{\prime})$  має періодичний характер, а період зміни  $T$  дорівнює вазі молодшого розряду. Отже, якщо зробити декілька калібрувань протягом одного періоду  $T$ , а результат осереднити за формулою:

$$K_l^* = \frac{\sum_{i=0}^S K_l}{S}, \quad (12)$$

де  $l$  – номер ітерації,  $S$  – загальна кількість ітерацій, то методичну похибку калібрування можна суттєво знизити. Причому якщо довести, що площі прямокутників 1 і 2 на рис. 1б однакові, то за умови  $S \rightarrow \infty$   $K_l^* \rightarrow Q_l^{\prime}$ .

Оскільки площі прямокутників 1 і 2 рис. 1б дорівнюють відповідним площам

паралелограмів 1' і 2' рис. 1а, то достатньо довести що площі останніх є однаковими. Виходячи з формули розрахунку площі паралелограма, отримуємо  $S_{нар-ма1}=d*(1-d)$ ,  $S_{нар-ма2}=(1-d)*d$ .

Для підтвердження отриманих результатів на основі вищеперерахованих алгоритмів і обмежень була розроблена моделююча програма. Результат роботи програми можна побачити на рисунку 2.

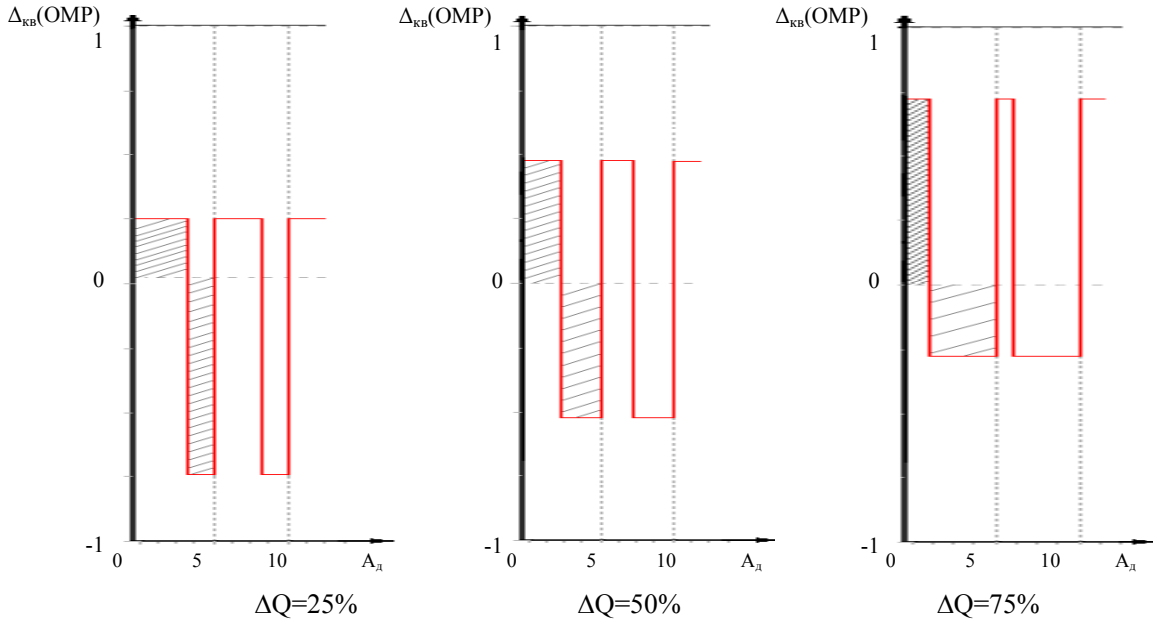


Рис. 2. Результат роботи програми

З отриманих результатів можна зробити висновок, що процедуру калібрування можна проводити кілька разів, змінюючи  $A_d$  в межах одного молодшого розряду на будь-якому проміжку з усього діапазону допоміжного сигналу, а результуюче значення визначати шляхом осереднення за формулою (12). При цьому можна відмовитись від використання додаткових розрядів, адже похибка квантування буде повністю компенсована.

Приклад апаратної реалізації запропонованої ідеї на базі самокаліброваного АЦП із перерозподілом заряду на основі НПСЧ наведено на рис. 3.

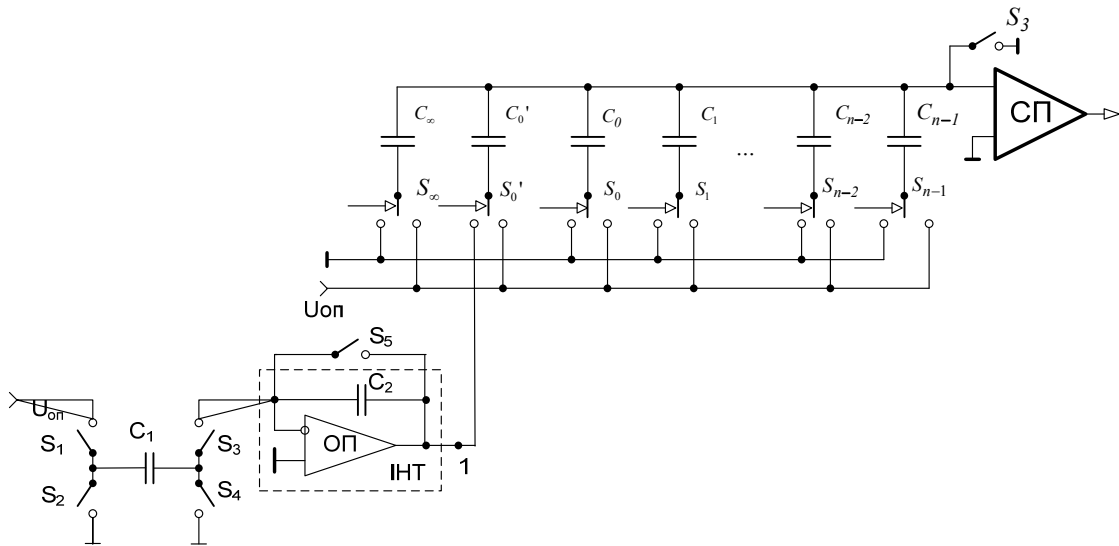


Рис. 3. Апаратна реалізація

При калібруванні  $C_l$ -го розряду, під час першого калібрування включаємо розряди  $C_l$  і  $C_k$ . Необхідність вмикання розряду  $C_k$  зумовлюється тим, що зсув нуля схеми порівняння СП може бути від'ємним, тому для забезпечення гарантованого переключення СП вмикають розряд  $C_k$ . Тоді результатом калібрування буде кодовий еквівалент суми ємностей включених конденсаторів  $C_l + C_k$ . Умову вибору номіналу  $C_k$  можна записати формулою:

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

де  $U_{zc}$  – напруга зсуву нуля схеми порівняння.

Тоді сформований допоміжний сигнал можна представити так:

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

де  $j \in [0, 1, \dots, \frac{C_2}{C_1}]$ . Відношення  $C_l/C_2$  задає крок зміни допоміжного сигналу, послідовно формуючи необхідну напругу.

Робота схеми починається з вибору початкового допоміжного сигналу  $A_0$ , для цього ключ  $S_3$  замикається і на конденсатори  $C_l$  і  $C_k$  подається опорна напруга  $U_{on}$ . Решта конденсаторів підключаються на землю. Потім іде інвертування сигналу: ключ  $S_3$  розмикається, конденсатори  $C_l$  і  $C_k$  під'єднуються на землю, а сформована напруга перерозподіляється на всі конденсатори матриці. На наступному етапі проводиться процедура калібрування, перший раз включенням  $C_l$ , а другий раз без його включення. Наступне врівноваження здійснюється аналогічно, відмінність полягає в напрузі  $U_{on_j}$ , яка подається в точку 1 і визначається виразом (14), змінна  $j$  задає номер врівноваження. Роботу схеми формування допоміжного сигналу описано в [1]. Після того, як  $j$  досягне значення  $C_2/C_1$ , калібрування завершується, а кодовий еквівалент ваги  $l$ -го розряду розраховується за формулою (12).

### Висновки

У статті розглянуто методи підвищення точності АЦП та недоліки цих методів. Запропоновано метод цифрового самокалібрування АЦП з використанням вагової надлишковості, який дозволяє суттєво зменшити похибку квантування й відмовитися від використання додаткових розрядів. Основою методу є багаторазова процедура калібрування при різних значеннях допоміжного сигналу з наступним осередненням результату.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Шляндін 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 Сергій Михайлович* – к. т. н., доцент кафедри обчислювальної техніки.

*Бойко Олександр Володимирович* – магістрант, кафедра обчислювальної техніки.  
Вінницький національний технічний університет.