

УДК 618.3

О. Д. Азаров, д. т. н., проф.; С. М. Захарченко, к. т. н., доц.;
О. А. Архипчук, асп.

АЦП ПОРОЗРЯДНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ З САМОКАЛІБРУВАННЯМ ЗА СТРАТЕГІЄЮ ЗГОРИ-ДОНИЗУ

На сучасному етапі розвитку техніки перетворення інформації основними вимогами, що висувуються до аналого-цифрових перетворювачів є високі точність або швидкодія, стабільність метрологічних характеристик, як під час зміни умов навколишнього середовища (температури, тиску), так і в часі, тощо. Найрозповсюдженішими принципами вирішення цих проблем є покращення технології та введення надлишковості: структурної, алгоритмічної, інформаційної [1, 2]. Під час використання структурної надлишковості у пристрій вводяться додаткові аналогові та цифрові вузли. При цьому в ряді випадків додаткові аналогові вузли та блоки повинні мати досить високі метрологічні характеристики, що передбачає використання дороговартісної елементної бази. До того ж це досить часто призводить до ускладнення алгоритмів та зменшення швидкості перетворення. Можливості технологій також мають свої фундаментальні обмеження.

Іншим перспективним напрямком покращення метрологічних характеристик АЦП є використання інформаційної надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [3, 4], в яких вага кожного наступного розряду завжди менше суми ваг молодших розрядів:

$$Q_i < \sum_0^{i-1} Q_j, \quad (1)$$

де i — номер розряду.

Вагова надлишковість проявляється в наявності ненульової додатної різниці ΔQ_i між сумою ваг молодших розрядів і поточним i -м розрядом:

$$\Delta Q_i = \sum_0^{i-1} Q_j - Q_i > 0. \quad (2)$$

Для двійкових систем числення ΔQ_i завжди менше нуля.

Метою статті є аналіз можливості підвищення точності АЦП порозрядного врівноваження, побудованого на низькоточних аналогових вузлах, шляхом самокалібрування ваг розрядів з використанням вагової надлишковості.

В основу підвищення точності порозрядного АЦП, побудованого на низькоточних аналогових вузлах, покладено принцип визначення реальних ваг розрядів, що базується на використанні математичних співвідношень між вагами розрядів НПСЧ, і не вимагає використання взірцевих мір та приладів. Причому функціонування пристрою при цьому передбачає два режими: самокалібрування та основного перетворення. В режимі самокалібрування відбувається визначення кодів (цифрових еквівалентів) реальних ваг $K(Q_i)$ розрядів перетворювача, зсуву нуля $K(\Delta A_0)$, а для вимірювальних АЦП — і масштабного коефіцієнта $K(M)$. Як взірець при цьому використовується рекурентні співвідношення, наприклад, $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$, $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + Q_{i-3}$ і тому подібне [5]. Невиконання цих співвідношень свідчить про наявність відхилень ваг розрядів від ідеальних значень. Причому застосування спеціальних процедур (самокалібрування) із урахуванням цих співвідношень дає можливість отримати інформацію про значення цих відхилень.

Авторами запропоновано використовувати процедуру самокалібрування АЦП порозрядного врівноваження, яку реалізовано за стратегією «згори-донизу» й яка завдяки вико-

ристанню вагової надлишковості у вигляді НПСЧ дозволяє виконувати визначення реальних ваг розрядів виключно програмним шляхом у цифровій формі.

Базовим припущенням, на якому будується процедура самокалібрування за схемою «згори-донизу» є баланс похибок, зокрема, у вигляді

$$\sum_{i=0}^{n-1} \Delta Q_i = 0, \tag{3}$$

причому $\Delta Q_i = Q_i \delta Q_i$; Q_i — ідеальна вага i -го розряду; δQ_i — відносне відхилення ваги i -го розряду.

Інакше кажучи, припускається, що сумарне відхилення ваг розрядів дорівнює нулю. Це припущення є справедливим для ЦАП, в яких відхилення ваги довільного розряду безпосередньо впливає на масштабний коефіцієнт інших розрядів (наприклад резистивна або конденсаторна матриця). Тому слід зазначити, що далі мова йтиме про такий АЦП, який містить ЦАП саме такого типу.

Рівень вагової надлишковості, яка уводиться в АЦП порозрядного врівноваження здійснюється шляхом завдання певного співвідношення між вагами розрядів (основи системи числення), а саме:

$$\alpha = \frac{Q_i}{Q_{i-1}}, \tag{4}$$

де $1 < \alpha < 2$; $i \in [0 : n - 1]$. Тут α — основа робочої системи числення.

Робочою ми будемо називати систему числення, яка використовується в процесі побудови ЦАП, а основною — ту в якій виконуються обчислення та формується вихідний код (як правило двійкова система числення).

Основу робочої системи числення беруть таку, щоб зв'язок між вагами розрядів був рекурентним (вага будь-якого старшого розряду повинна дорівнювати сумі ваг заданої кількості молодших розрядів). Цій вимозі, зокрема, задовольняють системи числення, основа яких α може бути знайдена як дійсний додатний корінь поліному:

$$x^{s+1} = \sum_0^s x^i, \tag{5}$$

де $s = 1, 2, 3, \dots$ — параметр системи, який i задає кількість членів суми, тобто кількість молодших розрядів.

У випадку $s = 1$ («золота» пропорція) вага кожного наступного розряду, починаючи з $(s + 1)$ -го, дорівнює сумі двох попередніх; для $s = 2$ — трьох попередніх і т.д. У випадку, коли $s = 0$, отримуємо так званий одиничний код. У випадку, коли $s \rightarrow \infty$, $\alpha \rightarrow 2$. Значення α для деяких s є такі:

s	0	1	2	3	4	5	6	7	...	∞
α	1	1,618	1,839	1,928	1,966	1,984	1,992	1,996	...	2,000

Вибираючи основи системи числення, виходять з можливості технологічного процесу, а точніше кажучи з максимальної припустимої похибки припасування параметрів елементів основного ЦАП. Розраховується максимально можливе відносне відхилення за формулою

$$\delta Q_{i\max} = \frac{\sum_0^{i-1} Q_j - Q_i}{\sum_0^i Q_j} \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha}. \tag{6}$$

Значення δQ_{\max} для деяких α є такими:

α	1,618	1,839	1,928	1,966	1,984	1,992	1,996
$\delta Q_{\max}, \%$	23,61	8,74	3,76	1,73	0,83	0,4	0,2

Залежність α від δQ_{\max} інтерпретує формула

$$\alpha = \frac{2}{1 + \delta Q_{\max}}, \quad (7)$$

де δQ_{\max} максимально допустиме відносне відхилення. Потрібне α вибирається як найближче менше значення

Зазначимо, що в АЦП, в якому реалізується самокалібрування, повинен виконуватися принцип суперпозиції. Практично це означає, що ваги розрядів не повинні залежати від видів кодової комбінації в АЦП і відповідно від станів розрядних коефіцієнтів (включено чи виключено).

До складу самокаліброваного АЦП з ваговою надлишковістю входить (рис. 1): основний цифро-аналоговий перетворювач з ваговою надлишковістю (α -ЦАП), аналоговий комутатор (АК), пристрій вибірки та збереження (ПВЗ), схема порівняння (СП), регістр порозрядного наближення (РПН), цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП), блок пам'яті (БП) та блок керування (БК).

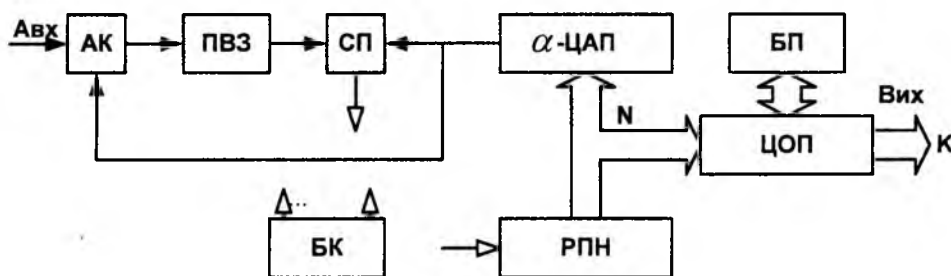


Рис. 1. Структурна схема самокаліброваного АЦП

Для демонстрації процедури самокалібрування візьмемо значення основи, наприклад, $\alpha = 1,839$. При використанні такої основи системи числення, отримуємо можливість калібрувати ваги розрядів з первинними похибками розрядів до $\pm 8,74\%$, при подовженні розрядної сітки основного ЦАП на 1 розряд на кожних 12 розрядів порівняно з двійковим ЦАП. Тобто для отримання на виході 16-ти розрядного двійкового коду — основний α -ЦАП має бути 18-ти розрядним.

Починається самокалібрування з визначення зсуву нуля. Для цього на вхід АЦП подається нульовий рівень, та виконується врівноваження компенсним аналоговим сигналом. Отриманий в РПН код буде цифровим еквівалентом похибки зсуву нуля. Він заноситься в БП для подальшого використання під час самокалібрування та основного перетворення.

На наступному кроці складається система з n рівнянь, де n — кількість розрядів основного ЦАП. Перші $(n - s)$ рівнянь отримуються таким чином. На вхід АЦП через АК подається аналогова величина, що забезпечує встановлення на виході кодової комбінації

$$\begin{matrix} n-1 & n-2 & n-3 & \dots & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0. \end{matrix}$$

Далі відбувається врівноваження вхідної величини компенсним сигналом з α -ЦАП, але без включення $n - 1$ розряду. На виході пристрою отримуємо кодову комбінацію

$$\begin{matrix} n-1 & n-2 & n-3 & \dots & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & x & \dots & x & x & x. \end{matrix}$$

На основі отриманої комбінації складаємо перше рівняння

$$K_{n-1} - \sum_0^{n-2} a_i K_i = 0, \quad (8)$$

де K_i — цифрові еквіваленти дійсних ваг розрядів, α_i — розрядні коефіцієнти коду, отриманого внаслідок врівноваження.

Послідовно врівноважуючи вхідні величини, що відповідають кодовим комбінаціям з одним включеним розрядом, складаємо ще $(n - s - 1)$ рівняння.

Наступні $s - 1$ рівняння складаються з припущення, що $s - 1$ молодших розрядів є точними. Це припущення не вплине істотно на результат самокалібрування оскільки відхилення молодших розрядів мають незначний рівень.

Останнє рівняння складемо з умови балансу похибок

$$\sum_{i=0}^{n-1} \Delta K_i = 0, \tag{9}$$

де ΔK_i — цифровий еквівалент відхилення ваги i -го розряду від ідеального значення. Додавши до рівняння суму ваг ідеальних розрядів отримаємо

$$\sum_{i=0}^{n-1} \Delta K_i + \sum_{i=0}^{n-1} K_i' = \sum_{i=0}^{n-1} K_i'. \tag{10}$$

Оскільки $\Delta K_i + K_i' = K_i$, то рівняння набуде вигляду

$$\sum_{i=0}^{n-1} K_i = \sum_{i=0}^{n-1} K_i'. \tag{11}$$

Зібравши разом всі рівняння отримаємо таку систему:

$$\begin{cases} K_{n-1} - \sum_0^{n-2} a_i K_i = 0; \\ \vdots \\ K_s - \sum_0^{s-1} a_i K_i = 0; \\ K_{s-2} = K_{s-2}'; \\ \vdots \\ K_0 = K_0'; \\ \sum_0^{n-1} K_i = \sum_0^{n-1} K_i'. \end{cases} \tag{12}$$

Дана система містить n рівнянь з n невідомими $(K_{n-1} \dots K_0)$. Розв'язавши цю систему в ЦОП отримаємо цифрові еквіваленти реальних ваг розрядів. Отримані результати заносяться в БП для подальшого використання під час основного перетворення.

Для перевірки достовірності запропонованого підходу було розроблено програму моделювання, в якій передбачається: внесення похибки завдання ваг розрядів в імітаційну модель реального АЦП; виконання процедури самокалібрування та обчислення методичної похибки самокалібрування. Результати моделювання репрезентативної вибірки АЦП зображуються у вигляді графіків.

У процесі досліджень було виконано комп'ютерне моделювання 100000 варіантів відхилень ваг розрядів АЦП для параметрів: $\alpha = 1,839$, $n = 18$, $\delta Q_{\max} = \pm 5\%$. Графіки щільності розподілу методичної похибки, значення математичного сподівання та дисперсії, наприклад, для 3-го, 10-го та 17-го розряду до та після самокалібрування показано на рис. 1. Аналіз цих графіків, а також результатів моделювання, дає можливість зробити висновок, що функція розподілу є нормальною.

Як видно з графіків на рис. 2 запропонований підхід дозволяє зменшити похибки на 3—4 порядки у порівнянні з первинною точністю елементів. Зі зміною діапазону відхилень результати моделювання мають подібний характер.

Слід зазначити, що запропонований спосіб самокалібрування дозволяє калібрувати ваги розрядів АЦП за умови, що рівні похибок елементної бази, які впливають на відхи-

лення ваг розрядів, можуть бути досить значними — $5\div 20\%$, що дозволяє значно спростити технологію їх виготовлення, зокрема, не виконувати лазерне припасування. Дослідження показали, що відхилення ваг розрядів слабо впливають на дисперсію щільності розподілу методичної похибки самокалібрування.

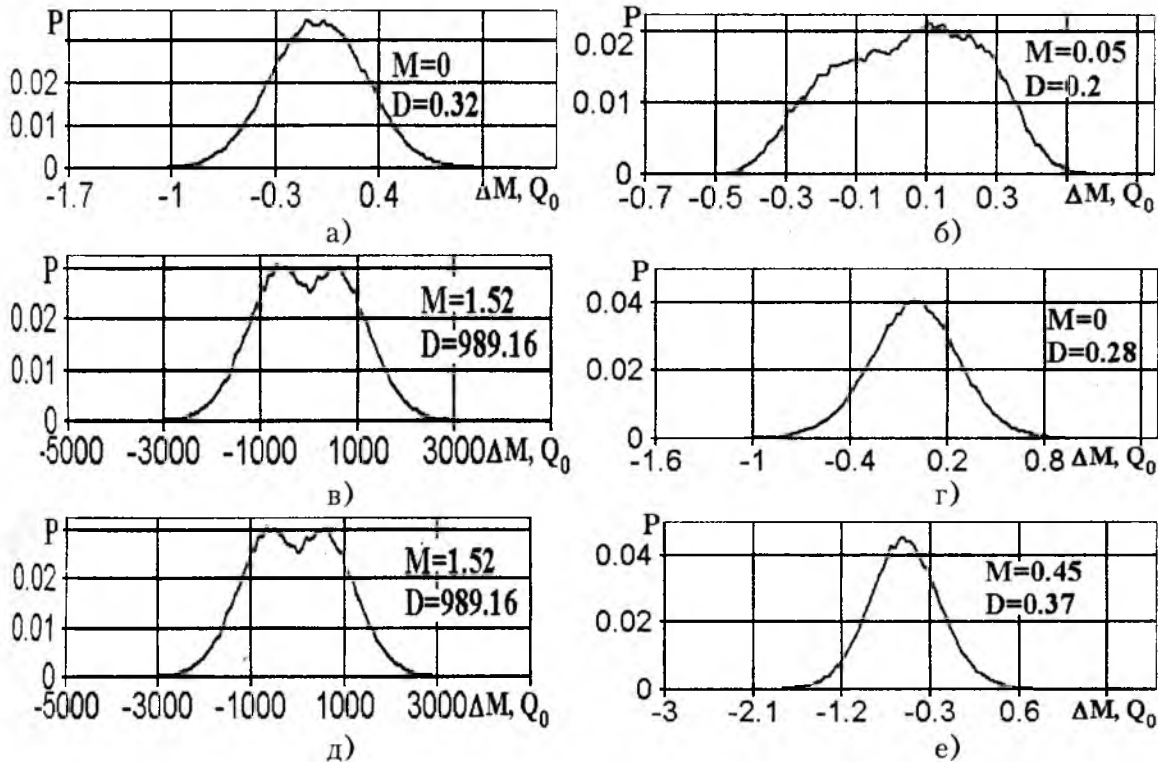


Рис. 2. Графіки щільності розподілу методичної похибки до та після самокалібрування для: 3-го (а, б), 10-го (в, г) та 17-го (д, е) розряду

Висновки

Використання алгоритму самокалібрування за схемою «згори-донизу» в АЦП порозрядного врівноваження на основі НПСЧ дозволяє:

- використовувати низькоточну елементну базу;
- спростити технологію виготовлення;
- знизити вартість;
- періодичне проведення самокалібрування дозволяє стабілізувати метрологічні характеристики під час зміни умов навколишнього середовища та протягом всього терміну експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Смолков В. Б. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989, — 160 с.
2. Шлыков Г. П. Аппаратурное определение погрешностей цифровых приборов. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Азаров А. Д. Избыточные позиционные системы счисления в технике преобразования информации // Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации. Учебное пособие. — К.: Выш. Школа. — 1990. — С. 62—105.
4. Стахов А. П. Коды золотой пропорции. М.: Радио и связь, 1984, — 155 с.
5. Азаров О. Д. Розробка теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Автореф. дис.... д-ра техн. наук / Вінницький політехнічний ін-т. — 35 с.

Азаров Олексій Дмитрович — завідувач кафедри; **Захарченко Сергій Михайлович** — доцент; **Архипчук Олександр Анатолійович** — аспірант.

Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет