

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 618.3

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

МЕТОД САМОКАЛІБРУВАННЯ ПОХИБОК ПОРОЗРЯДНИХ АЦП З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

На сучасному етапі розвитку техніки основними вимогами до аналого-цифрових перетворювачів є високі швидкодія і роздільна здатність, стабільність метрологічних характеристик як у заданому температурному діапазоні, так і в часі тощо. Розповсюджений метод вирішення цих проблем — покращення технології та уведення надлишковості. Так, під час використання, наприклад, структурної надлишковості у пристрій вводяться додаткові аналогові та цифрові вузли. При цьому в ряді випадків додаткові аналогові вузли та блоки повинні мати високі метрологічні характеристики, що передбачає використання вартісної прецизійної елементної бази. До того ж це досить часто призводить до ускладнення алгоритмів перетворення та відповідного зменшення швидкості перетворення.

Іншим перспективним напрямком покращення метрологічних характеристик АЦП є використання інформаційної, зокрема, вагової надлишковості, тобто систем числення, 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.

В основу підвищення точності АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) покладено принцип самокалібрування інструментальних похибок [1]. Причому робота пристрою передбачає два режими: самокалібрування та основного перетворення. В режимі самокалібрування відбувається визначення реальних ваг Q_i розрядів перетворювача, зсуву нуля ΔA_{zc} та масштабного коефіцієнта M . Характерним є те, що процес калібрування в даному випадку не потребує використання спеціальних взірцевих мір та приладів.

Авторами розроблено алгоритм калібрування АЦП порозрядного врівноваження, який реалізований за схемою «згори-донизу» і який, завдяки використанню інформаційної надлишковості у вигляді НПСЧ, дозволяє виконувати калібрування ваг розрядів виключно програмним шляхом у цифровій формі.

Базовим припущенням, на якому будується алгоритм калібрування за схемою «згори-донизу», наприклад, для двійкового ЦАП, є виконання рівняння

$$\sum_{i=0}^{n-1} 2^i \epsilon_i + \epsilon'_0 = 0, \quad (2)$$

де ϵ_i — відносне відхилення ваги i -го розряду; ϵ'_0 — відносне відхилення ваги допоміжного розряду Q'_0 , вага якого повинна дорівнювати вазі молодшого значущого розряду Q_0 .

Інакше кажучи, припускається, що сумарне відхилення ваг розрядів дорівнює нулю. Це припущення є справедливим для ЦАП, в яких відхилення ваги довільного розряду впливає на масштабний коефіцієнт інших розрядів (наприклад резистивна або конденса-

торна матриця). Тому слід зазначити, що далі мова йтиме саме про такі АЦП. Для двійкової системи дія алгоритму базується на такому співвідношенні розрядів:

$$\sum_{i=0}^{l-1} Q_i + Q_0 = Q_l, \tag{3}$$

де Q_i, Q_0, Q_l – відповідно ваги i -го, нульового та l -го розрядів. Такий підхід детально описаний в роботах [2, 3].

Уведення вагової надлишковості в АЦП порозрядного врівноваження здійснюється шляхом забезпечення надлишкового співвідношення між вагами розрядів, а саме:

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

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

Оскільки вираз (3) не відповідає випадку з НПСЧ, то алгоритм, запропонований в [2, 3], не можна використовувати в даному випадку. Слід зазначити, що на відміну від алгоритмів «знизу-догори», які є системонезалежними, і в яких послідовність кроків алгоритму не залежить від значення основи робочої системи числення, алгоритми класу «згори-донизу» жорстко прив'язані до α . Більш того, зв'язок між вагами розрядів повинен бути рекурентним (будь-який старший розряд можна представити як суму фіксованої кількості молодших розрядів). Цій вимозі, зокрема, задовольняють системи числення, основа яких α може бути знайдена як дійсний додатний корінь полінома

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

де $s = 1, 2, 3, \dots$ – параметр системи.

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 $s = 0$, ми отримуємо так званий одиничний код. У випадку, коли $s \rightarrow \infty$, $\alpha \rightarrow 2$.

Таблиця 1 Значення α для деяких S показані в табл. 1.

Значення α для деяких s

s	0	1	2	3	4
α	1	1,618	1,84	1,928	1,966

Вибір основи системи числення залежить від можливості технологічного процесу, а, точніше кажучи, від значення похибки припасування параметрів елементів основного ЦАП. Розраховується максимально можливе відносне відхилення за формулою

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

Таблиця 2 Значення δQ_{\max} для деяких α показані в табл. 2.

Значення δQ_{\max} для деяких α

α	1,618	1,84	1,928	1,966
δQ_{\max}	0,236	0,087	0,037	0,017

Залежність α від δQ_{\max} показує формула

$$\alpha = \frac{2}{1 + \delta Q_{\max}}, \tag{7}$$

потрібне α вибирається як найближче менше значення.

Для розроблення алгоритму калібрування візьмемо значення основи, наприклад, $\alpha = 1,618$. На першому етапі калібрування вимірюється різниця $Q_{n-1} - Q_{n-2} - Q_{n-3}$. В результаті отримуємо вираз

$$\Delta Q_{n-1} = Q_{n-1} - Q_{n-2} - Q_{n-3}. \tag{8}$$

Оскільки розряди $Q_{n-1} \dots Q_{n-3}$ не є ідеальними і мають відносні відхилення $\epsilon_{n-1}, \epsilon_{n-2}, \epsilon_{n-3}$ відповідно, вираз (8) можна записати так:

$$\Delta Q_{n-1} = Q'_{n-1}(1 + \epsilon_{n-1}) - Q'_{n-2}(1 + \epsilon_{n-2}) - Q'_{n-3}(1 + \epsilon_{n-3}), \tag{9}$$

де $Q'_{n-1}, Q'_{n-2}, Q'_{n-3}$ – ідеальні ваги розрядів.

Якщо $\alpha = 1,618$, то маємо $Q'_{n-1} = Q'_{n-2} + Q'_{n-3}$, тоді останній вираз набуває вигляду

$$\Delta Q_{n-1} = Q'_{n-1}\epsilon_{n-1} - Q'_{n-2}\epsilon_{n-2} - Q'_{n-3}\epsilon_{n-3}. \tag{10}$$

Таким чином, рівень ΔQ_{n-1} у даному випадку визначатиметься сумарною різницею відхилень розрядів $Q_{n-1} \dots Q_{n-3}$ від своїх ідеальних значень. Для вимірювання останнього може бути використаний додатковий неточний m -розрядний АЦП, кількість розрядів в якому менше розрядності основного АЦП.

Аналогічно запишуться вирази для $\Delta Q_{n-2} \dots \Delta Q_2$. Таким чином, для визначення відхилень ваг розрядів від потрібних номіналів отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta Q_{n-1} = Q'_{n-1}\epsilon_{n-1} - Q'_{n-2}\epsilon_{n-2} - Q'_{n-3}\epsilon_{n-3}; \\ \Delta Q_{n-2} = Q'_{n-2}\epsilon_{n-2} - Q'_{n-3}\epsilon_{n-3} - Q'_{n-2}\epsilon_{n-2}; \\ \dots \\ \Delta Q_3 = Q'_3\epsilon_3 - Q'_2\epsilon_2 - Q'_1\epsilon_1; \\ \Delta Q_2 = Q'_2\epsilon_2 - Q'_1\epsilon_1 - Q'_0\epsilon_0. \end{cases} \tag{11}$$

Вказана система містить $n - 2$ рівнянь, в яких n членів є невідомими ($\epsilon_0 \dots \epsilon_{n-1}$). Для розв'язання системи (11) необхідно увести дві додаткові умови. Перша умова – це використовувати припущення, що $\epsilon_0 = 0$. Відзначимо при цьому, що це припущення істотно не вплине на точність розрахунків, оскільки ϵ_0 має досить мале значення, адже це відхилення має наймолодший розряд з мінімальною вагою ($Q_0 = 1$). Друга умова буде

$$\text{мати вигляд } \sum_{i=1}^{n-1} Q'_i \epsilon_i = 0.$$

Для оцінювання адекватності запропонованої моделі похибок була розроблена комп'ютерна програма яка дає можливість промоделювати процес самокалібрування і оцінити результативну похибку аналого-цифрового перетворення. Результати моделювання репрезентативної вибірки АЦП зображуються у вигляді графіків.

У процесі досліджень було виконано імітаційне моделювання для параметрів $\alpha = 1,618$, кількість розрядів $n = 16$, роздільна здатність додаткового m -розрядного АЦП – α^{-1} , взято 100000 варіантів відхилень ваг розрядів АЦП, відхилення задається в межах $\pm 10\%$. Графіки щільності розподілу методичної похибки під час калібрування 3-го, 7-го та 15-го розряду показані на рис. 1. Аналіз графіків дає можливість зробити висновок, що функція розподілу є нормальною. Так для 7-го розряду математичне очікування $M = -0,001038$, а дисперсія $D = 0,198722$.

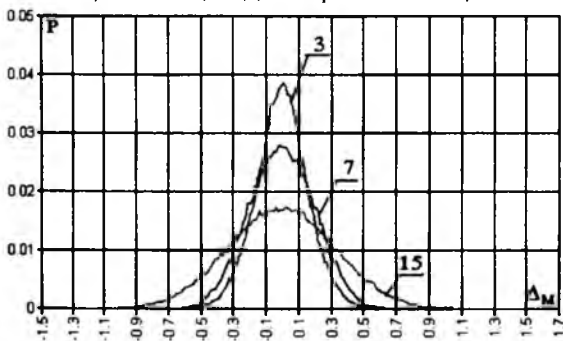


Рис. 1. Графіки щільності розподілу методичної похибки під час калібрування 3-го, 7-го та 15-го розряду

Зазначимо, що зі збільшенням діапазону відхилень результати моделювання мають подібний характер.

Таким чином видно, що спосіб самокалібрування дозволяє калібрувати АЦП в широкому діапазоні похибок нелінійності та масштабу.

Дослідження показали, що відхилення ваг розрядів слабо впливають на дисперсію щільності розподілу методичної похибки, але при цьому збільшується розрядність m додаткового АЦП. Значення m можна знайти за формулою

$$m = \log_{\alpha} [Q'_{n-1}\varepsilon_{n-1} - Q'_{n-2}\varepsilon_{n-2} - Q'_{n-3}\varepsilon_{n-3}]. \quad (12)$$

У свою чергу залежність дисперсії від роздільної здатності додаткового АЦП та номера розряду показана на рис. 2.

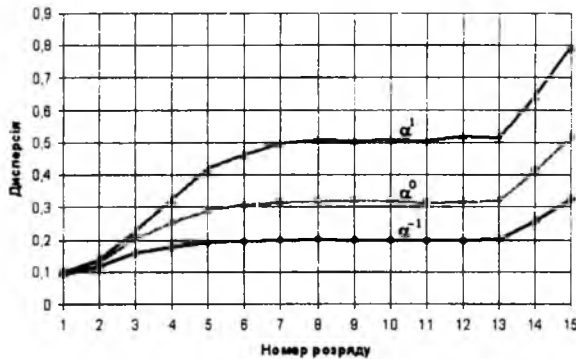


Рис. 2. Залежність дисперсій методичної похибки від роздільної здатності додаткового АЦП та номера розряду

— зменшити вимоги щодо технології виготовлення вимірювального ЦАП, а також зменшити його роздільну здатність до рівня молодшого розряду основного ЦАП (Q_0).

Як недолік слід зазначити необхідність виконання додаткових обчислень та використання додаткового m -розрядного АЦП. Проте, оскільки обчислення похибок виконуються тільки на етапі калібрування, це практично не впливає на швидкість основного аналого-цифрового перетворення.

Висновки

- запропоновано новий метод самокалібрування статичних похибок АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю за стратегією «згори-донизу»;
- метод самокалібрування дозволяє уникнути характерного для методу «знизу-догори» накопичення похибки самокалібрування, причому математичне сподівання похибок самокалібрування має значення близьке до нуля та дисперсію в межах половини молодшого розряду додаткового m -розрядного АЦП;
- запропонований метод самокалібрування дозволяє зменшити похибки перетворення на один-два порядки в порівнянні з первинною точністю елементів, що дозволяє використовувати спрощену дешеву технологію виготовлення аналогових вузлів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации.: Учебное пособие / В. А. Поджаренко, А. Д. Азаров, В. А. Власенко, И. И. Коваленко. — К.: Выш. школа, 1990. — 208 с.
2. Khen-Sang Tan, Sami Kiriaki, Michiel de Wit. Error correction techniques for high-performance differential A/D Converters // IEEE J. Solid-State Circuits. — 1990. — Dec. — Vol. 25. — № 6. — P. 1318—1327.
3. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Смолов В. Б. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. — 160 с.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Надійшла до редакції 10.09.02
Рекомендована до опублікування 26.09.02

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

Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький державний технічний університет