СТАТИЧНІ ПОХИБКИ САМОКАЛІБРОВАНИХ АЦП ПОРОЗРЯДНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Азаров О.Д., Захарченко С.М., Архипчик О.А.
Вінницький державний технічний університет,
кафедра обчислювальної техніки

Abstract. ***Azarov O., Zaxarchenko S., Arhipchuk O. Static errors self-gauged CPU of digit-by-digit steadiness with weight redundancy.*** *In this article We analyse the problem of accuracy increasing in successive approximation ADC. We offer to use the self-calibration procedure with the strategy "top-to-bottom". The particularity of our approach is an weight redundancy using, that allows to determinate a bit weight by the programme way. The graphical results of the offered approach computer simulation are presented.*

На сучасному етапі розвитку техніки перетворення інформації основними вимогами, що висуваються до аналого-цифрових перетворювачів є високі точність або швидкодія, стабільність метрологічних характеристик, як під час змінювання умов навколишнього середовища (температури, тиску), так і в часі, тощо. Найбільш розповсюдженими принципами вирішення цих проблем є покращення технології та уведення надлишковості: структурної, алгоритмічної, інформаційної [1, 2]. Під час використання структурної надлишковості у пристрій уводяться 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:

$$Q_i < \sum_{0}^{i-1} Q_j , \qquad (1)$$

де i — номер розряду.

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

$$\Delta Q_i = \sum_{0}^{i-1} Q_j - Q_i > 0 \qquad (2)$$

Для двійкових систем числення ΔQ_i завжди менше нуля.

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

В основу підвищення точності порозрядних АЦП, побудованих 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 використанню 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:

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

причому $\Delta Q_i = Q_i' \cdot \delta Q_i$; 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 такі АЦП, які містять саме такий ЦАП.

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 при побудові ЦАП, а основною — ту, в якій виконуються обчислення та формується вихідний код (як правило двійкова система числення).

Слід відзначити, 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 має бути 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 $s = 1,2,3,\ldots$ — параметр системи, який і 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 $s = 0$, отримаємо так званий одиничний код. У випадку, коли $s \to \infty$, $\alpha \to 2$. 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

При виборі 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 по формулі:

$$\delta Q_{i\max} = \frac{\sum_{0}^{i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{0}^{i} Q_j} \approx \frac{2-\alpha}{\alpha}. \tag{6}$$

Значення $\delta Q_{\max}$ для деяких α є такими:

α	1,618	1,84	1,928	1,966	1,9836	1,992	1,996
$\delta Q_{\max}$,%	23,6	8,7	3,7	1,7	0,8	0,4	0,2

Залежність α від $\delta Q_{\max}$ інтерпретує формула:

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

де $\delta Q_{\max}$ максимально припустиме відносне відхилення. Потрібне α вибирається як найближче менше значення

Зазначимо, що в АЦП, в яких 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).

Для аналізу алгоритму самокалібрування візьмемо значення основи, наприклад, $\alpha = 1.618$. На першому етапі самокалібрування вимірюється різниця $Q_{n-1} - Q_{n-2} - Q_{n-3}$. В результаті отримаємо вираз:

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

Оскільки розряди $Q_{n-1} \div Q_{n-3}$ не є ідеальними і мають відхилення $\Delta Q_{n-1}, \Delta Q_{n-2}, \Delta Q_{n-3}$ відповідно, вираз (8) можна записати як:

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

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

При використанні $\alpha = 1.618$ маємо $Q'_{n-1} = Q'_{n-2} + Q'_{n-3}$, тоді останній вираз набуває вигляду:

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

Таким чином, значення $\Delta\widetilde{Q}_{n-1}$ у даному випадку визначатиметься різницею відхилень розрядів $Q_{n-1} \div Q_{n-3}$ від своїх ідеальних значень. Для вимірювання $\Delta\widetilde{Q}_{n-1}$ використовуються молодші розряди того ж АЦП.

Аналогічно запишуться вирази для $\Delta\widetilde{Q}_{n-2} \div \Delta\widetilde{Q}_2$. Таким чином, для визначення відхилень ваг розрядів від потрібних номіналів отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta\widetilde{Q}_{n-1} = \Delta Q_{n-1} - \Delta Q_{n-2} - \Delta Q_{n-3}; \\ \Delta\widetilde{Q}_{n-2} = \Delta Q_{n-2} - \Delta Q_{n-3} - \Delta Q_{n-2}; \\ \vdots \\ \Delta\widetilde{Q}_3 = \Delta Q_3 - \Delta Q_2 - \Delta Q_1; \\ \Delta\widetilde{Q}_2 = \Delta Q_2 - \Delta Q_1 - \Delta Q_0. \end{cases} \qquad (11)$$

Під час обчислення відхилень ваг розрядів використовується цифрові еквіваленти відповідних величин, тому система рівнянь (11) набуває вигляду:

$$\begin{cases} K[N(\Delta\widetilde{Q}_{n-1})] = K[\Delta Q_{n-1}] - K[\Delta Q_{n-2}] - K[\Delta Q_{n-3}]; \\ K[N(\Delta\widetilde{Q}_{n-2})] = K[\Delta Q_{n-2}] - K[\Delta Q_{n-3}] - K[\Delta Q_{n-2}]; \\ \vdots \\ K[N(\Delta\widetilde{Q}_3)] = K[\Delta Q_3] - K[\Delta Q_2] - K[\Delta Q_1]; \\ K[N(\Delta\widetilde{Q}_2)] = K[\Delta Q_2] - K[\Delta Q_1] - K[\Delta Q_0]. \end{cases} \qquad (12)$$

де $K[...]$ — цифровий код відповідної величини, представленої в основній системі числення;

$N(...)$ — цифровий код відповідної аналогової величини, представленої в робочій системі числення.

Вказана система містить $n-2$ рівнянь, в яких n членів ($\Delta Q_0 \div \Delta Q_{n-1}$) є невідомими. Для розв'язання системи (12) необхідно увести дві додаткові умови. Перша умова — це використовувати припущення, що $\Delta Q_0 = 0$. Відзначимо при цьому, що це припущення істотно не вплине на точність розрахунків, оскільки ΔQ_0 має досить мале значення, адже це відхилення має наймолодший розряд з мінімальною вагою ($Q_0 = 1$). Друга умова буде мати вигляд: $\sum_{i=1}^{n-1} K(\Delta Q_i) = 0$.

Для перевірки достовірності запропонованого підходу було розроблено моделюючу програму, в який 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: $\alpha = 1{,}618$, $n = 24$, δQ_{max} =±10%. Графіки щільності розподілу методичної похибки, значення математичного сподівання та дисперсії, наприклад, для 3-го, 12-го та 23-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.

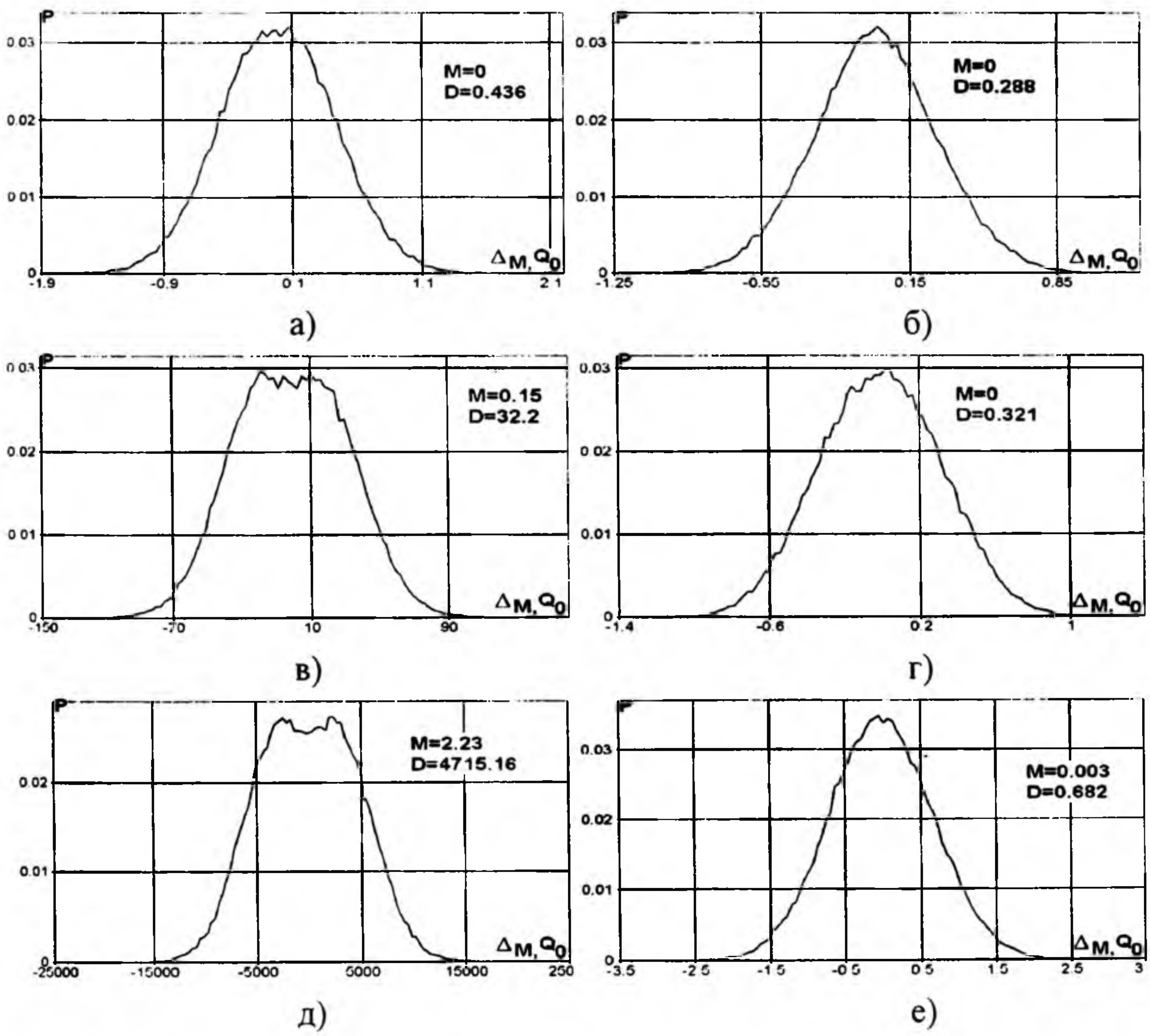

Рисунок 1 — Графіки щільності розподілу методичної похибки до та після самокалібрування для: 3-го(а, б), 12-го(в, г) та 23-го(д, е) розряду.

Як видно з графіків запропонований підхід дозволяє зменшити похибки на 3-4 порядки у порівняні з первинною точністю елементів. При зміні 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 відхилення ваг розрядів, можуть бути досить значними - 5÷20%, що дозволяє значно спростити технологію їх виготовлення, зокрема, не виконувати лазерне припасування. Дослідження показали, що відхилення ваг розрядів слабко впливають на дисперсію щільності розподілу методичної похибки самокалібрування.

Висновки: Використання алгоритму самокалібрування за схемою "згоридонизу" 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 змінювання умов навколишнього середовища та протягом всього терміну експлуатації.

Література

1. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Смолов 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. — Вінниця, 1994.

Здано в редакцію: 11.03.2003р.

Рекомендовано до друку: д.т.н., проф. Юхимчук С.В.