

УДК 618.3

О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. А. Архипчук
Вінницький державний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021 Вінниця, Україна

Новий метод зменшення методичної похибки самокалібрування АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення

Запропоновано новий метод зменшення методичної похибки самокалібрування аналого-цифрових перетворювачів із використанням надлишкових позиційних систем числення. Суть методу полягає у виборі допоміжного аналогового сигналу, при якому методична похибка приймає мінімальні значення. Наведено результати математичного моделювання даного методу.

Ключові слова: надлишкові позиційні системи числення, аналого-цифрове перетворення, методична похибка, самокалібрування.

На сучасному етапі розвитку техніки основними вимогами, що висувуються до аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) є висока швидкодія, висока роздільна здатність, стабільність метрологічних характеристик як у заданому температурному діапазоні, так і у часі тощо. Основний метод вирішення низки цих проблем — уведення надлишковості. При використанні структурної надлишковості у пристрій вводяться додаткові аналогові та цифрові вузли. В ряді випадків додаткові аналогові вузли та блоки повинні при цьому мати високі метрологічні характеристики [1, 2], що передбачає використання дорогої прецизійної елементної бази. До того ж це досить часто призводить до ускладнення алгоритмів перетворення та відповідного зменшення швидкості перетворення [3].

Іншим перспективним напрямком покращення метрологічних характеристик АЦП є введення інформаційної надлишковості, а саме надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [4].

В основу підвищення точності АЦП на основі НПСЧ покладено принцип самокалібрування інструментальних похибок [5]. 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 зразкових мір та приладів.

В основу самокалібрування покладено принцип розділення розрядної сітки перетворювача на групи «неточних» (старших), «точних» (молодших) та додаткових розрядів у вигляді, зображеному на рис. 1.

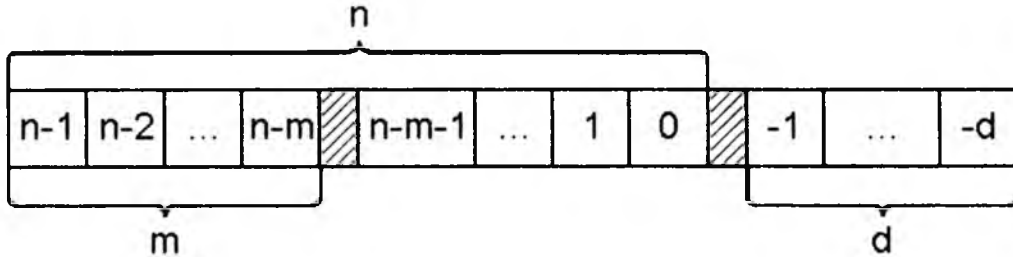


Рис. 1. Модель розрядної сітки перетворювача.

«Неточні» та «точні» розряди при цьому формують групу з n основних розрядів, а група додаткових розрядів використовується лише для зменшення методичної похибки в процесі самокалібрування.

Суть самокалібрування ваги k -го розряду Q_k для такого АЦП полягає у двократному врівноваженні допоміжного сигналу A_d , причому перший раз із використанням Q_k , а другий — без використання. Після чого реальне значення Q_k може бути знайдене за формулою:

$$Q_k^* = \sum_{j=-d}^{k-1} a_j'' \cdot Q_j^* - \sum_{j=-d}^{k-1} a_j' \cdot Q_j^*, \quad (1)$$

де a_j' та a_j'' — відповідно двійкові біти кодів результатів першого та другого врівноваження.

Процес самокалібрування характеризується накопиченням методичної похибки. Значення останньої визначається різними чинниками, зокрема, такими як алгоритм калібрування, відхилення ваг «неточних» розрядів, основа системи числення, значення допоміжного сигналу Ad тощо.

Під час калібрування ваг розрядів, максимальна похибка у відповідності з алгоритмом врівноваження дорівнює $\pm q_0$. Таким чином, якщо калібрується n розрядів, то похибка кожного з розрядів у найгіршому випадку буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= \pm q_0; \\ \Delta Q_{i+1} &= \pm q_0 + \Delta Q_i = \pm 2 \cdot q_0; \\ \Delta Q_{i+2} &= \pm q_0 + \Delta Q_i + \Delta Q_{i+1} = \pm 4 \cdot q_0; \\ &\dots \\ \Delta Q_{n+i} &= \pm q_0 + \sum_{k=i}^{i+n-1} \Delta Q_k = \pm 2^n \cdot q_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Відповідно сумарна похибка матиме вигляд:

$$\Delta = \sum_{k=i}^{i+n} Q_k = \pm(2^{n+1} - 1) \cdot q_0.$$

З (2) видно, що навіть при невеликій кількості розрядів, що калібруються, кінцевий результат може значно відрізнятись від реального значення аналогового сигналу.

Величина похибки калібрування безпосередньо залежить від величини аналогового сигналу за допомогою якого відбувається калібрування розрядів, оскільки саме від нього залежить значення похибки калібрування при першому ($\xi Q'$) та другому ($\xi Q''$) врівноваженні (рис. 2).

Причиною зсуву $\xi Q''$ відносно $\xi Q'$ є те, що в наслідок відхилення ваг розрядів порушується пропорція $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$ у випадку використання $\alpha = 1,618$, або аналогічні співвідношення у випадку використання інших α . У свою чергу це призводить до того, що на першому врівноваженні переключення розрядів відбувається раніше (або пізніше) у залежності від відхилення розряду, що калібрується. Причому різниця значень Ad , при яких переключаються розряди, дорівнює відхиленню ваги каліброваного розряду.

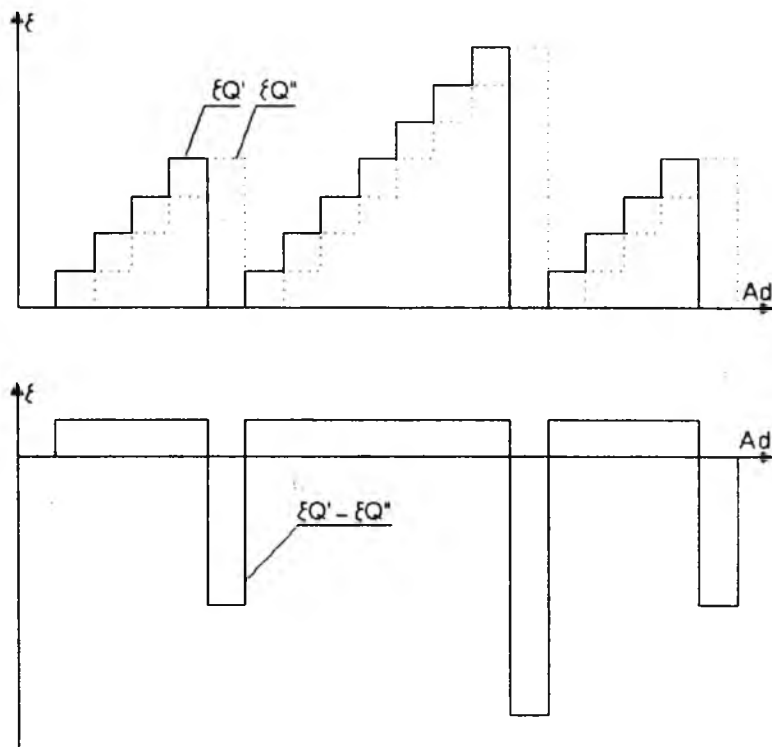


Рис. 2. Залежність методичної похибки ξ від допоміжного сигналу.

Таким чином, якщо вірно вибрати допоміжний аналоговий сигнал існує можливість звести цю похибку до мінімуму, або принаймні уникнути утворення великих похибок. Для вирішення цієї задачі була розроблена моделююча програма. Основу моделі складає АЦП на основі НПСЧ, що використовує калібрування за алгоритмом двократного врівноваження.

Більш конкретний висновок можна зробити, якщо проаналізувати математичне очікування значення методичної похибки калібрування при великій кількості вимірювань. Для цього було змодульовано велику кількість АЦП, відхилення неточних розрядів яких генерувались за допомогою генератора випадкових чисел, що реалізує нормальний закон розподілення. Для кожного АЦП були розраховані методичні похибки за формулою:

$$\xi_{ij} = Q_{ij}^* - Q_{ij},$$

де Q_{ij} — реальна вага i -го розряду в j -му АЦП; Q_{ij}^* — вага i -го розряду в j -му АЦП, отримана в результаті калібрування по алгоритму дворазового врівноваження;

Залежність математичного очікування методичної похибки M_{ξ} від допоміжного сигналу наведена на рис. 3.

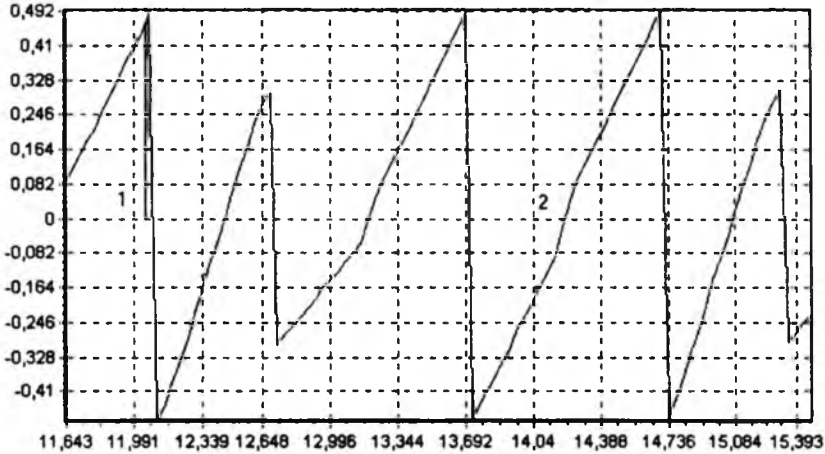


Рис. 3. Залежність $\xi_{io}(Ad)$.

Аналіз залежності на рис. 3 показує, що найбільші відхилення припадають на місця так званих критичних точок допоміжного сигналу Ad_k , що відповідають дискретним значенням:

$$Ad_{\min}, Ad_{\min} + q_0, Ad_{\min} + q_1, Ad_{\min} + q_2, Ad_{\min} + q_2 + q_0 \dots Ad_{\max},$$

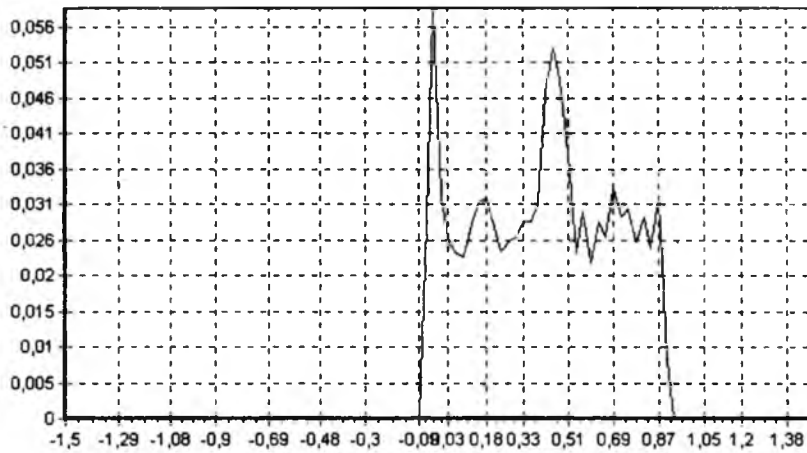
де $Ad_{\min} = q_k$; $Ad_{\max} = \sum_{i=1}^{k-1} q_i$; k — номер розряду, що калібрується; q — вага i -го розряду.

Або в іншому вигляді:

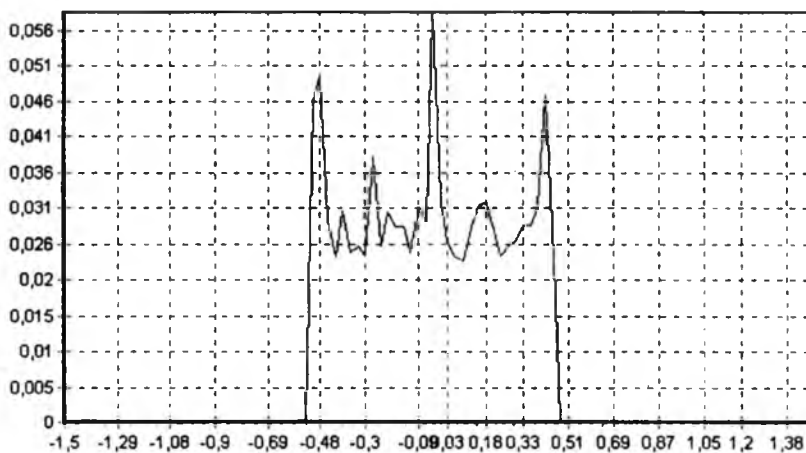
$$Ad_{kl} = Ad_{\min} + \sum_{i=0}^l \alpha^i \cdot q_0, \quad (3)$$

де $l \in [0 \dots k-3]$; α — основа системи числення.

Гістограма розподілення ξ_j для випадків максимального математичного очікування (точка 1 на рис. 3) та близького до 0 (точка 2 на рис. 3) наведені на рис. 4. Аналіз останньої показує, що практично всі відхилення в точці 2 знаходяться в межах $0,5q_0$, в той час як у точці 1 вони сягають q_0 .



а)



б)

Рис. 4. Гістограма розподілення: а) ξ_j у точці 1; б) ξ_j у точці 2.

Аналогічна ситуація спостерігається і при калібруванні старших розрядів. Таким чином можна сказати, що зменшення похибки калібрування можливо досягнути правильним вибором допоміжного сигналу, а саме уникати вибору Ad , що відповідають критичним значенням.

Висновки

Значення методичної похибки самокалібрування суттєво залежить від рівня допоміжного сигналу і набуває як додатних так і від'ємних значень, а це дозволяє прогнозувати значення похибки і відповідно підвищити точність перетворення.

Критичні значення допоміжного сигналу при яких методична похибка калібрування є максимальною визначається основою системи числення і слабо залежить від відхилень ваг розрядів, і як наслідок, можливість використання дешевих ЦАП із значними відхиленнями ваг розрядів.

Для проведення процедури самокалібрування доцільно вибирати значення Ad , що знаходяться приблизно посередині між критичними значеннями Ad_k , оскільки в цьому випадку методична похибка самокалібрування буде найменшою.

1. *Tan K.S.* On board self-calibration of analog-to-digital and digital-to-analog converters // U.S. Patent 4399426. — 1983, Aug., 16.

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. *Hae-Seung Lee, David A.Hodges.* Self-calibration technique for A/D converters // IEEE Transactions on circuits and systems. — 1983, March. — Vol. 30. — № 3. — P. 188-190.

4. *Азаров О.Д.* Разработка преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основами: Автореф. дис... канд. техн. наук / ХИРЭ. — Харьков, 1980.

5. *Азаров О.Д.* Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления: Дис... д-ра техн. наук. — Винница, 1994. — Исследование принципов построения. — 438 с.

Надійшла до редакції 16.10.2000