

УДК 681.3:621.375

О. Д. Азаров, д. т. н., проф.;

О. В. Кадук, асп.

СТРАТЕГІЇ САМОКАЛІБРУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ АЦП ПОРОЗРЯДНОГО КОДУВАННЯ ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Розглянуто різні стратегії самокалібрування ваг розрядів АЦП порозрядного врівноваження із ваговою надлишковістю, побудованого на неточному ЦАП. Проаналізовано надлишкові позиційні системи числення, їх основні види, поняття абсолютної і відносної вагової надлишковості. Наведено структурні схеми перетворювачів форми інформації на основі НПСЧ і граф-схеми алгоритмів калібрування, їх характеристики перетворення. Доведено, що збільшуючи кількість неточних розрядів, необхідно використовувати стратегію самокалібрування з осередненням на розгортках.

Вступ

Серед розмаїття перетворювачів форми інформації із роздільною здатністю 10...18 розрядів основну нішу становлять АЦП порозрядного врівноваження [1, 2]. Проте зазначена розрядність далеко не повною мірою забезпечує відповідні метрологічні характеристики вказаних приладів. Так аналіз АЦП, які випускають провідні фірми світу (Analog Devices, Burr-Brown, Intersil, MAXIM, Linear Technology Corporation), свідчить про певну невідповідність похибок перетворення роздільній здатності. Наприклад, 16...18 розрядні АЦП фірми Analog Devices мають похибки масштабу, інтегральної та диференціальної нелінійності на рівні 4...6 квантів молодших розрядів. Крім того, зміна температури навколишнього середовища і старіння додатково призводить до деградації аналогової елементної бази і додаткового збільшення похибок. Розробники сучасних АЦП і ЦАП наполегливо шукають шляхи поліпшення точнісних характеристик вказаних приладів, зокрема, у технологічному, схемотехнічному і структурно-кібернетичному напрямках [3, 4].

Аналіз моделей сучасних АЦП і ЦАП високої роздільності показує, що технологічні і схемотехнічні методи самі по собі навряд чи забезпечать абсолютну точність перетворення більше дванадцяти двійкових розрядів у широкому діапазоні температур і протягом життєвого циклу. Водночас, якщо додатково використовувати структурно-кібернетичні методи, що полягають у самонастроюванні характеристик перетворення, зокрема, самокоригування ваг розрядів без фізичного впливу на них, а також коригування температурних і часових впливів, дають можливість стабілізувати метрологічні характеристики у роботі за важких умов.

Автори пропонують застосувати як один із видів самонастроювання характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження процедуру цифрового самокалібрування ваг розрядів [5]. Такий підхід передбачає використання позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, і його відмінною особливістю є можливість побудови високоточних метрологічно стабільних АЦП порозрядного врівноваження, побудованих на низькоточних аналогових вузлах, без застосування спеціальної процедури лазерного припасування, а також можливість істотного скорочення часу перетворення і підвищення швидкодії за рахунок компенсації динамічних похибок першого і другого роду [3].

Окремі стратегії процедур самокалібрування, зокрема, алгоритм калібрування «знизу-вгору» у різноманітних типах АЦП із ваговою надлишковістю детально розглядалися у працях [3, 6, 7, 8]. Проте систематизованого аналізу можливостей наявної множини стратегій, який би дав можливість відібрати найефективнішу, наприклад, за критерієм мінімальної методичної похибки, не проводилося. Тому тема статті є актуальною.

Метою статті є аналіз ефективності процедур самокалібрування АЦП порозрядного врівноваження із ваговою надлишковістю за умови, що критерієм ефективної є мінімальне значення методичної похибки, що накопичується із збільшенням числа каліброваних розрядів.

Постановка задач

1. Проаналізувати процедури самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження на основі НПСЧ у рамках різних стратегій завдання значень калібрувальних сигналів.

2. Оцінити підсумкові похибки перетворення для різних стратегій самокалібрування ваг розрядів АЦП на основі НПСЧ.

Розв'язання задач

Термін «вагова надлишковість» пов'язаний з так званими надлишковими позиційними системами числення (НПСЧ), в яких будь-яке число можна зобразити у вигляді

$$D = \sum_{i=0}^{n-1} a_i Q_i,$$

де $a_i \in \{\bar{1}, 1\}; \{0, 1\}$ — розрядні коефіцієнти або алфавіт системи числення; $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ — номер розряду, Q_i — вага i -го розряду.

Залежно від закону задання значення ваги i -го розряду по відношенню до молодших $Q_i = f(Q_{i-1}, Q_{i-2}, \dots, Q_{i-k})$ можна поділити НПСЧ на системи з *природним* і *штучним* набором ваг розрядів.

Природний набір — це такий, в якому існує постійне співвідношення між вагами розрядів, зокрема

$$Q_i = \alpha Q_{i-1} = \alpha^2 Q_{i-2} = \alpha^3 Q_{i-3} = \dots = \alpha^i Q_0,$$

де $\alpha = \frac{Q_i}{Q_{i-1}}$ — основа системи числення.

Прикладом НПСЧ із природним набором ваг розрядів є НПСЧ на базі золоті пропорції $\alpha = 1,618$ або відношенні Коца $\alpha = 1,84$, або $\alpha = \sqrt{2}$ та ін.

Для НПСЧ зі штучним набором вага кожного розряду формується у рамках базису $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}$ як певна сума ваг молодших розрядів

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + \dots + Q_{i-k},$$

де k — деяке ціле число.

Можна вважати, що в цьому випадку набір ваг розрядів — це базис. Прикладом такого базису може бути набір ваг розрядів, пропорційних p -числам Фібоначчі або числам, значення яких пропорційні дубльованому двійковому ряду типу $1; 1; 2; 2; 4; 4; \dots, 2^{n-1}, 2^{n-1}$ та інші [9].

Вагова надлишковість характеризується як перевищення суми ваг молодших розрядів над вагою старшого розряду у вигляді

$$Q_i \leq \sum_{j=0}^{n-1} Q_j.$$

Причому, абсолютне значення вагової надлишковості визначається як

$$\Delta \tilde{Q}_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i.$$

Відносна вагова надлишковість характерна для НПСЧ із природним розташуванням ваг розрядів, оскільки її значення не залежить від номера розряду і розраховується як

$$\delta \tilde{Q} = \frac{\sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{j=0}^i Q_j} \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha}.$$

У табл. 1 наведені значення відносної вагової надлишковості для НПСЧ з різними α .

Таблиця 1

Максимальне значення відносної вагової надлишковості

α	2	1,9	1,84	1,70	1,618	1,6	1,5	1,41	1,3
$\delta\tilde{Q}_{\max}, (\%)$	0	5,29	11,11	17,65	23,62	25,00	33,33	41,4	53,8

Самокалібрування є різновидом процедури самокоригування, що полягає у визначенні абсолютних відхилень ваг розрядів АЦП (ЦАП) від номінальних (дійсних) значень і визначення коригувальних поправок до характеристики вхід-вихід з перериванням процесу основного перетворення [4]. Обчислення і введення коригувальної поправки у двійкових АЦП і ЦАП здійснюється безпосередньо під час основного перетворення і знижує швидкодію пристрою [3]. Реалізація процедури коригування, як правило, вимагає наявності еталонних сигналів або взірцевих мір. Термін «самокалібрування» означає визначення відхилень ваг старших розрядів шляхом послідовного порівняння ваги поточного розряду із сумою певної групи сусідніх молодших розрядів. Це порівняння базується на основі існуючих між ними математичних співвідношень. Результати самокалібрування можуть багатократно використовуватися у процесі основного перетворення або вимірювання, аж доки внаслідок змінення параметрів аналогових вузлів АЦП або вимірювального каналу не виникне потреба здійснювати повторне самокалібрування.

В основу методу самокалібрування покладено принцип умовного розбиття розрядної сітки перетворювача на групу «неточних» старших розрядів і «точних» молодших (рис. 1). При цьому всі ваги розрядів мають однаковий технологічний допуск δQ , причому досить значний — 1...10%,

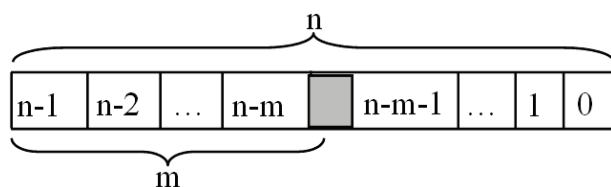


Рис. 1. Модель розрядної сітки АЦП у режимі самокалібрування

що значно спрощує технологію виготовлення аналогових вузлів і, зокрема, дозволяє відмовитися від лазерного припасування ваг розрядів ЦАП. Це забезпечує цілісність структури матеріалів елементів, їх стабільність і зменшення вартості. Для двійкових АЦП існують і інші моделі розподілу похибок розрядної сітки, наприклад, старші — «точні», за умови що їх абсолютні відхилення не перевищують половини молодшого значимого кванта, і молодші, відповідно, умовно «неточні», коли їх абсолютна похибка також не перевищує половини молодшого значимого кванта, але відносна похибка більша, ніж для старших розрядів. Проте це ускладнює технологію припасування ваг розрядів.

У АЦП на основі НПСЧ є можливість формувати ваги всіх розрядів з великим технологічним допуском. При цьому належність до «точних» молодших розрядів вибирається з умови

$$\Delta Q_{i \max} \leq 0,5 Q_0,$$

де $\Delta Q_{i \max}$ — максимальне значення абсолютної похибки i -го розряду, що залежить від технологічного допуску δQ на відхилення від ідеального значення ваги i -го розряду $Q_{i \text{ ід}}$

$$\Delta Q_{i \max} = \delta Q \cdot Q_{i \text{ ід}}.$$

Слід зазначити, що відхилення $\Delta Q_{i \max}$ старших розрядів із номерами $i \geq (n - m)$ є великими і більшими половини молодшого кванта, а відхилення $\Delta Q_{i \max}$ розрядів із номерами $i < (n - m)$ будуть меншими половини молодшого кванта

$$\begin{cases} \Delta Q_{i \max} > 0,5 Q_{1 \text{ ід}}, \text{ якщо } i \geq n - m; \\ \Delta Q_{i \max} < 0,5 Q_{1 \text{ ід}}, \text{ якщо } i < n - m. \end{cases}$$

Алгоритм самокалібрування залежить від призначення АЦП і похибок, що калібруються. Для так званих сигнальних АЦП важливу роль відіграє лінійність перетворювача, а саме мінімізація похибок інтегральної та диференційної лінійності, водночас наявність похибки масштабу або зміщення нуля є некритичною. Стратегії самокалібрування, що розглядаються, орієнтовані саме на усунення похибок лінійності.

Структурну схему АЦП порозрядного врівноваження на базі НПСЧ з алфавітом (0; 1), що самокалібрується, показано на рис. 2. Тут БК — блок керування; РПН1, РПН2 — перший і другий регістри послідовного наближення відповідно; К — аналогових комутатор; СП — схема порівняння; α -ЦАП1, α -ЦАП2 — відповідно перший і другий неточні цифроаналогові перетворювачі, побудовані на НПСЧ, що дозволяє, не зважаючи на неточне завдання ваг розрядів здійснювати точне врівноваження; БП — блок пам'яті, що містить постійну пам'ять (ПП) і оперативну пам'ять (ОП); ЦОП — цифровий обчислювальний пристрій.

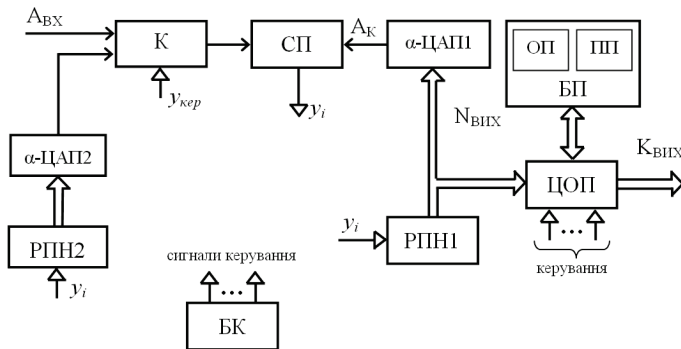


Рис. 2. Узагальнена структурна схема АЦП порозрядного врівноваження, що самокалібрується

АЦП працює у двох режимах: основного перетворення і самокалібрування. У режимі самокалібрування АЦП реалізується за алгоритмом, що передбачає визначення, коригування і зберігання відкоригованих значень ваг розрядів у цифровій формі, зокрема, із зображенням цифрових еквівалентів відкаліброваних ваг розрядів у вигляді двійкових кодів у пам'яті ЦОП.

Основним недоліком стратегій самокалібрування «знизу-вгору» є поява методичної

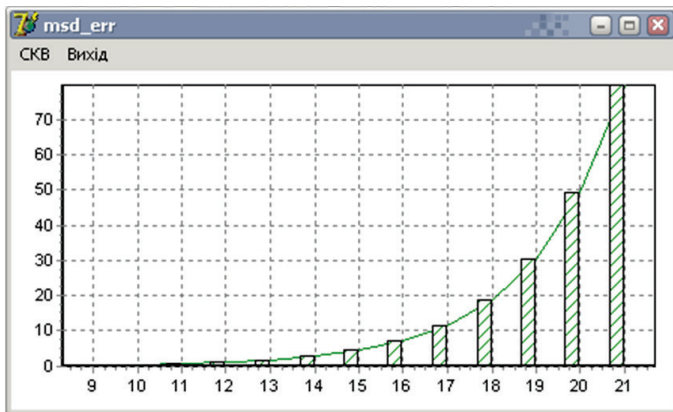


Рис. 3. Похибки самокалібрування 22-розрядного АЦП із ваговою надлишковістю (технологічний допуск $\delta Q = 1\%$)

похибки самокалібрування, що накопичується із збільшенням кількості «неточних» розрядів (рис. 3). Дослідження показали, що значення цієї похибки істотно залежить від різновиду стратегії завдання калібрувального сигналу $A_{\text{кал } i}$.

Стратегія — це послідовність процедур завдання значення $A_{\text{кал } i}$ по відношенню до ваги розряду Q_i , а також інших розрядів під час самокалібрування. Автори пропонують декілька стратегій завдання значення вхідного калібрувального сигналу.

Відповідно до *першої стратегії* завдання калібрувального сигналу здійснюється

із максимальним допуском по відношенню до ідеальної ваги розряду. Значення вхідного калібрувального сигналу $A_{\text{кал } i}$ дорівнює сумі ідеальної ваги розряду і максимального технологічного допуску:

$$A_{\text{кал } i} = Q_{i\text{д}} (1 + \delta Q_{\text{макс}}).$$

Друга стратегія — це завдання калібрувального сигналу, рівного реальній вазі розряду, що калібрується

$$A_{\text{кал } i} = Q_i.$$

При цьому на вхід АЦП подається калібрувальний сигнал $A_{\text{кал } i}$, що забезпечує встановлення на виході коду

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

У випадку використання *третьої стратегії* завдання значення калібрувального сигналу залежить від результату порівняння ваги даного i -го розряду із деякою базовою сумою молодших розрядів, тобто для НПСЧ із $\alpha = 1,618$ і на основі кодів Фібоначчі

$$A_{\text{кал } i} = \begin{cases} Q_i, & \text{якщо } Q_i > Q_{i-1} + Q_{i-2}; \\ Q_{i-1} + Q_{i-2}, & \text{якщо } Q_i < Q_{i-1} + Q_{i-2}. \end{cases}$$

У рамках четвертої стратегії виконується визначення коду поправки $\Delta K(Q_i)$ за допомогою ряду усереднень на розгортках даного розряду, в результаті чого знаходиться його відхилення. Дана стратегія базується на можливості у НПСЧ зображувати те саме число багатьма кодовими комбінаціями. Для цього використовуються операції згортки і розгортки [10]. Так, для золотой пропорції ($\alpha = 1,618$) і кодів Фібоначчі операція згортки полягає у заміні одиниць в $(i - 1)$ -му і $(i - 2)$ -му розрядах одиницею в i -му розряді. Для позначення згортки використовується символ $\uparrow \downarrow$. Мікрооперація розгортки полягає у заміні одиниці i -го розряду одиницями в $(i - 1)$ -му і $(i - 2)$ -му розрядах, якщо в них знаходяться нулі. Розгортка позначається значком $\downarrow \uparrow$. У результаті проведення всіх можливих розгортки отримується повністю розгорнута форма коду. Приклад виконання операцій згортки-розгортки наведено у табл. 2. У реальних схемах для заданого типу НПСЧ операції згортки-розгортки можна не виконувати. Розгорнуті кодові комбінації зберігаються у пам'яті цифрового обчислювального пристрою.

Таблиця 2

Виконання операцій згортки-розгортки в кодах Фібоначчі

A _{ВХ}	Ваги розрядів								Код
	34	21	13	8	5	3	2	1	
34	0	1	1	0	0	0	0	0	N'
34	1	0	0	0	0	0	0	0	N''
34	0	1	1	0	0	0	0	0	N'''
34	0	1	0	1	1	0	0	0	N ^{IV}
34	0	1	0	1	0	1	1	0	N ^V

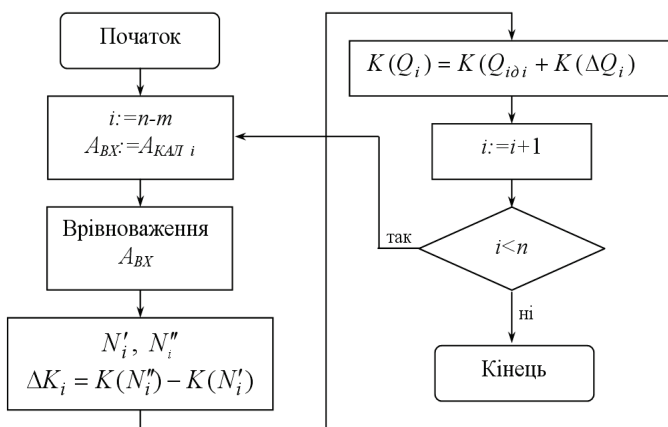


Рис. 4. Граф-схема алгоритму самокалібрування

Граф-схему алгоритму цифрового самокалібрування для першої, другої і третьої стратегії показано на рис. 4.

Визначення коду реальної ваги $K(Q_i)$ починається з $(n - m)$ -го молодшого із неточних розрядів і базується на двократному врівноваженні допоміжного сигналу $A_{\text{кал } i}$ із вмиканням і без вмикання i -го розряду.

У результаті врівноваження отримуються коди

	$n - 1$	...	$i + 1$	i	$i - 1$	$i - 2$	$i - 3$	...	1	0
N'_i	0	...	0	1	0	0	X	...	X	X
N''_i	0	...	0	0	1	X	X	...	X	X

При цьому код реальної ваги i -го розряду обчислюється в ЦОП за формулою

$$\Delta K(Q_i) = \sum_{i=0}^{n-1} a'_i K_i - \sum_{i=0}^{n-1} a''_i K_i,$$

де a'_i, a''_i — розрядні коефіцієнти, що відповідають кодам N'_i, N''_i відповідно.

Отримані коди реальних ваг розрядів фіксуються у БП, узагальнену структурну схему якого показано на рис. 5, і в подальшому використовуються в процесі основного перетворення. Причому вхідний аналоговий сигнал АВХ врівноважується компенсувальним сигналом АКОМ і з формуванням робочого коду в РПН обчислюється результат перетворення за формулою

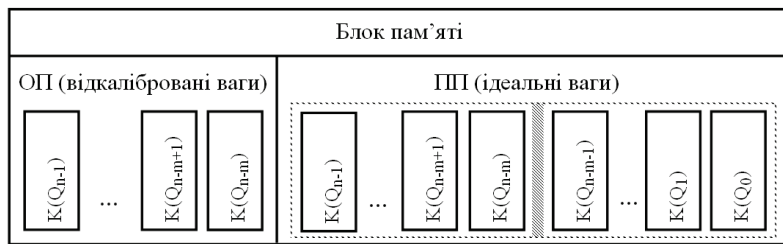


Рис. 5. Структурна схема блоку пам'яті

$$K_{вих} = \sum_0^{n-1} K_i a_i .$$

Стратегія самокалібрування з осередненням на розгортках дозволяє підвищити точність визначення коду реальної ваги розряду. У цьому випадку калібрування починається з $(n - m)$ -го розряду і проводиться протягом кількох циклів з подальшим усередненням результатів, отриманих на кожному циклі. Розглянемо роботу алгоритму, наприклад, для НПСЧ з $\alpha = 1,618$. Під час самокалібрування даного i -го розряду на α -ЦАП1 подається кодова комбінація, що містить одиницю в i -му розряді. Далі з допомогою РПН2 і α -ЦАП2 встановлюємо сигнал, що рівний вазі i -го розряду основного α -ЦАП1 з точністю до молодшого кванту. Після цього виконується розгортка коду в РПН1.

	$n - 1$	...	$i + 1$	i	$i - 1$	$i - 2$	$i - 3$	...	1	0
$A'_{кал i}$	0	...	0	1	0	0	0	...	0	0
$A''_{кал i}$	0	...	0	0	1	1	0	...	0	0

Далі виконується опитування компаратора. Якщо $A'_{кал i} \geq A''_{кал i}$, то виконується згортка і встановлюється калібрувальний сигнал рівний вазі даного i -го розряду. Якщо ж $A'_{кал i} < A''_{кал i}$, то виконується врівноваження з допомогою РПН2 і α -ЦАП2. Таким чином формується калібрувальний сигнал, рівний вазі $(i - 1)$ -го та $(i - 2)$ -го розрядів. На даному циклі виконується встановлення калібрувального сигналу відповідно до умови

$$A_{кал i} = \begin{cases} A'_{кал i}, & \text{якщо } A'_{кал i} \geq A''_{кал i}; \\ A''_{кал i}, & \text{якщо } A'_{кал i} < A''_{кал i}. \end{cases}$$

Далі виконується подвійне врівноваження $A_{кал i}$ із вмиканням і без вмикання i -го розряду і визначається код відхилення для даного розряду як

$$\Delta K'(Q_i) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i'' K_i - \sum_{i=0}^{n-1} a_i' K_i .$$

У наступному циклі калібрування i -го розряду виконується розгортка $(i - 2)$ -го розряду і знову задається потрібне значення $A_{кал i}$.

	$n - 1$	...	$i + 1$	i	$i - 1$	$i - 2$	$i - 3$	$i - 3$	...	0
$A'_{кал i}$	0	...	0	1	0	0	0	0	...	0
$A''_{кал i}$	0	...	0	0	1	1	0	0	...	0
$A'''_{кал i}$	0	...	0	0	1	0	1	1	...	0

Далі виконується порівняння $A'_{кал i}$ і $A'''_{кал i}$, результатом чого є формування калібрувального сигналу $A_{кал i}$ для i -го розряду:

$$A_{\text{кал } i} = \begin{cases} A'_{\text{кал } i}, & \text{якщо } A'_{\text{кал } i} \geq A'''_{\text{кал } i}; \\ A'''_{\text{кал } i}, & \text{якщо } A'_{\text{кал } i} < A'''_{\text{кал } i}. \end{cases}$$

Після цього виконується подвійне врівноваження $A_{\text{кал } i}$ із вмиканням і без вмикання i -го розряду. При цьому під час врівноваження розгорнутий $(i - 2)$ -й розряд примусово не вмикається. В результаті формується код відхилення

$$\Delta K''(Q_i) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i'' K_i - \sum_{i=0}^{n-1} a_i' K_i.$$

Далі також виконується розгортка, порівняння $A'_{\text{кал } i}$ і $A^{IV}_{\text{кал } i}$, встановлення відповідного $A_{\text{кал } i}$ і формується код $\Delta K'''(Q_i)$. Аналогічним чином виконуються всі можливі k розгортки.

На цьому калібрування i -го розряду закінчується. В результаті чого отримано множину $\Delta K(Q_i) \in \{ \Delta K'(Q_i), \Delta K''(Q_i), \dots, \Delta K^k(Q_i) \}$, на основі якої шляхом осереднення визначається код поправки i -го розряду у вигляді

$$\Delta \tilde{K}(Q_i) = \frac{\sum_{j=1}^k \Delta K^j(Q_i)}{k}.$$

Таким чином визначається код реальної ваги розряду $K(Q_i)$, що фіксується у БП і використовується в процесі основного перетворення

$$K(Q_i) = K(Q_{i \text{ id}}) + \Delta \tilde{K}(Q_i).$$

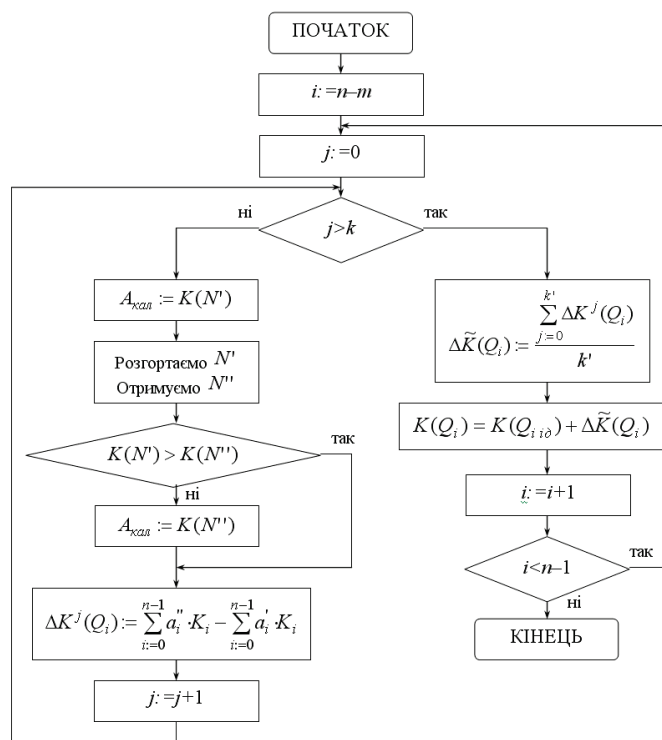


Рис. 6. Граф-схема алгоритму самокалібрування з осередненням на розгортках

самокалібрування в i -й вибірці.

$$\sigma(\Delta \bar{Q}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} [\Delta \bar{Q}_i - M(\Delta \bar{Q})]^2}. \quad (2)$$

Далі калібрується $(i + 1)$ -й розряд і так до $(n - 1)$ -го розряду. Граф-схему алгоритму самокалібрування з осередненням на розгортках показано на рис. 6.

Застосування НПСЧ у АЦП порозрядного врівноваження дозволяє виконувати самокалібрування ваг розрядів у цифровій формі і фізично не впливати на значення ваг розрядів, тобто не руйнувати структуру матеріалу мікросхеми, і таким чином стабілізувати ваги розрядів (рис. 7).

У [5] було доведено, що закон розподілу похибок відкаліброваних ваг розрядів АЦП послідовного наближення є нормальним. Тому для оцінювання ефективності стратегії самокалібрування використаємо статистичні характеристики, а саме математичне сподівання $M(\Delta \bar{Q})$ (1) і середньоквадратичне відхилення $\sigma(\Delta \bar{Q})$ (2) [11].

$$M(\Delta \bar{Q}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta \bar{Q}_i, \quad (1)$$

де n — розрядність перетворювача форми інформації; $\Delta \bar{Q}_i = Q_i - Q_{i \text{ кал}}$ — похибка

Значення математичного сподівання $M(\Delta\bar{Q})$ і середньоквадратичного відхилення $\sigma(\Delta\bar{Q})$ похибок самокалібрування, що проводиться відповідно до різних стратегій, знайдені за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми. Вона призначена для моделювання роботи АЦП порозрядного врівноваження, побудованого на неточному надлишковому ЦАП.

Результати моделювання для АЦП з основою НПСЧ $\alpha = 1,618$ і різною кількістю розрядів, наведено в табл. 3. У табл. 4 надані значення коефіцієнтів подовження розрядної сітки двійкової системи числення для різних α .

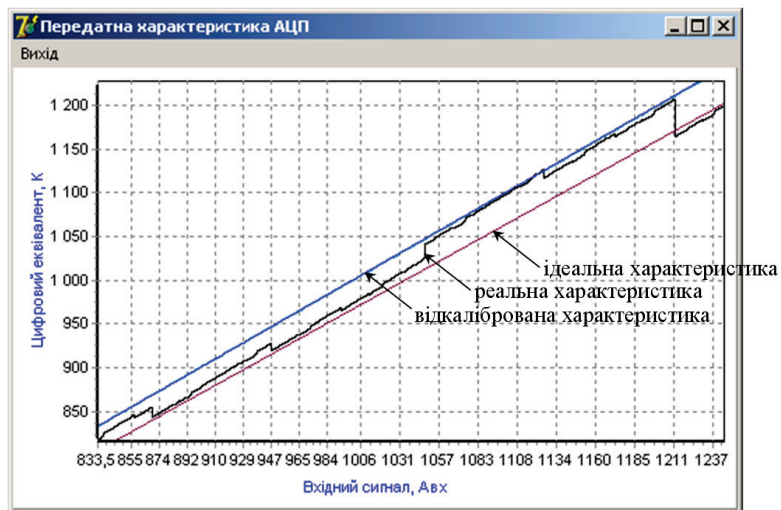


Рис. 7. Реальна, ідеальна і відкалібрована характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження із вагою надлишковістю

Таблиця 3

Результати комп'ютерного моделювання статистичних характеристик для різних методик самокалібрування

n_α	$\delta Q, \%$	r	$M(\Delta\bar{Q})$				$\sigma(\Delta\bar{Q})$			
			CI	СII	СIII	СIV	CI	СII	СIII	СIV
17	1	5000	-1,2	-15,4	0,3	0,03	11,9	6,9	10,3	3,6
	3		-2	-70	-0,4	0,1	37,7	34,5	34,3	11
	5		-3,7	-104	-0,5	-0,3	61,6	43	56,8	18,9
21	1		-8,5	-104,5	1,4	-0,4	82,2	46,8	72,3	25,4
	3		-25,6	-490,4	2,28	0,54	251,4	237,7	228,3	75,9
	5		-31,9	-712,7	7,5	-2,7	423,3	294,7	389,2	129,2
24	1		-36,3	-442,9	17,3	-2,9	348	198,8	306,3	107,6
	3		-108,5	-2077	-9,7	-1,1	1065	1007	967	321,7
	5		-135,9	-3018	32,1	-11,6	1791,8	1249	1647,9	546,9

Примітки: CI, СII, СIII, СIV — відповідно перша, друга, третя, четверта стратегії самокалібрування; n_α — кількість розрядів НПСЧ; δQ — технологічний допуск; r — кількість реалізацій; $M(\Delta\bar{Q})$ — математичне сподівання; $\sigma(\Delta\bar{Q})$ — середньоквадратичне відхилення.

Слід зазначити, що використання НПСЧ приводить до збільшення розрядної сітки перетворювача.

Таблиця 4

Значення коефіцієнта подовження розрядної сітки для різних α

α	1,2	1,3	1,41	1,5	1,618	1,7	1,84	1,9	2
γ_n	3,8	2,64	2,06	1,71	1,48	1,31	1,18	1,08	1

Аналіз результатів моделювання, наведених у таблиці, дає можливість вибрати конкретну стратегію самокалібрування. Вибір буде залежати від того, яка з них дасть найменші похибки перетворення АЦП порозрядного врівноваження із вагою надлишковістю. Кількість неточних розрядів m залежить від значення технологічного допуску на елементи δQ . Зі збільшенням m і δQ вибір конкретної стратегії самокалібрування складніший.

Висновки

1. Проведений аналіз дозволив визначити умови застосування тієї чи іншої стратегії самокалібрування АЦП порозрядного врівноваження із вагою надлишковістю, яка при заданих параметрах перетворення (допуск на елементну базу, число розрядів), дасть мінімальну методичну похибку.

ку калібрування.

2. Доведено, що збільшення допуску на похибки формування параметрів аналогових вузлів автоматично приводить до зростання числа неточних розрядів m і викликає потребу використовувати стратегію самокалібрування з осередненням на розгортках. Для малих значень m можна використовувати інші стратегії самокалібрування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. www.analog.com — офіційний сайт фірми Analog Devices.
2. Analog-Digital Conversion / Edited by Walt Kaster / Analog Devices Inc. 2004. 1230 p.
3. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 260 с.
4. Грушвицкий Р. И. Мурсаев А. Х., Смоллов В. Б. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 160 с.
5. Азаров О. Д., Кадук О. В. Характеристика перетворення порозрядного АЦП, що самокалібрується, побудованого на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2007. — № 3. — С. 8—18.
6. Захарченко С. М., Азаров О. Д., Харьков О. М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія / Під заг. ред. О. Д. Азарова. — Вінниця: УНІВЕРСУМ — Вінниця, 2005. — 235 с.
7. Азаров О. Д., Архипчук О. А., Захарченко С. М. Високолінійні порозрядні АЦП із ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 125 с.
8. Азаров О. Д., Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: Монографія / Під заг. ред. О. Д. Азарова. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 167 с.
9. Азаров О. Д., Решетнік О. О., Гарнага В. А., Кадук О. В. Похибки квантування в АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 3. — С. 67—73.
10. Стахов А. П., Азаров А. Д., Марценюк В. П., Моисеев В. И., Стейскал В. Я. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления. — К.: УМК ВО, 1988. — 180 с.
11. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. 10-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 2005. — 404 с.: ил.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Надійшла до редакції 4.02.08
Рекомендована до друку 18.02.08

Азаров Олексій Дмитрович — завідувач кафедри, **Кадук Олександр Володимирович** — аспірант.
Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет