

# ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 681.3:621.375

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОРОЗРЯДНОГО АЦП, ЩО САМОКАЛІБРУЄТЬСЯ, ПОБУДОВАНОГО НА НЕТОЧНОМУ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

*О.Д. Азаров, О.В. Кадук*

### Вступ

Інструментальні похибки аналогових вузлів АЦП і ЦАП збільшуються внаслідок змінення умов навколишнього середовища, зокрема, температури, вологості, тиску та інших чинників, а також через старіння. Це призводить до збільшення загальних похибок перетворювачів інформації. За даними фірми Analog Devices абсолютна точність перетворення у широкому діапазоні температур сучасних АЦП не перевищує дванадцяти двійкових розрядів [1].

Сучасні тенденції розвитку техніки перетворювачів інформації (ПІ) свідчать про те, що провідні західні фірми, наприклад, Analog Devices, Intersil, Maxim Integrated Products, Burr Brown, Texas Instruments почали широко використовувати у схемах багаторозрядних АЦП неточні ЦАП, зокрема без спеціального припасування ваг розрядів. Причому під неточними елементами (у тому числі і ЦАП) розуміють такі, первинні похибки яких можуть значно (на порядок і більше) перевищувати підсумкову похибку перетворення аналог-код або код-аналог.

Так компанія Intersil ще у 1982 році розробила шістнадцятирозрядний ЦАП ICL7145, який був на той час першим сумісним з мікропроцесором. В ICL7145 використовувалися перемикачі на п-канальних метал-оксид-напівпровідних структурах та тонкоплівкових резисторах, що виготовлялися без спеціального припасування. Замість цього коригування диференційної нелінійності і похибок підсилення виконувалося за допомогою пари допоміжних коригувальних ЦАП, які працювали разом з двома програмованими запам'ятовувачами пристроями, що входили до складу інтегральної схеми [2]. Даний підхід дозволяє зменшувати похибки перетворення, але вимагає введення структурної надлишковості в ЦАП.

Слід також зазначити, що застосування неточного двійкового ЦАП в АЦП буде мати наслідком появу пропусків кодів у характеристиці перетворення останнього. Це свідчить про недоцільність використання такого ЦАП в АЦП, оскільки не дозволить здійснювати цифрове коригування вихідних кодів.

### Актуальність

У зв'язку з наявністю розривів характеристики перетворення у двійковому ЦАП, що входить до складу АЦП виникає проблема введення коригувальної поправки безпосередньо у цифровій формі до вихідного коду пристрою. Традиційно вирішення цього питання полягає в тому, що коригувальна поправка вводиться в основний ЦАП в аналоговій формі за допомогою коригувальних ЦАП [3]. Проте це призведе до введення у пристрій структурної надлишковості і ускладнює аналогову частину АЦП. Водночас, введення замість структурної вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення, зокрема, у неточний ЦАП паралельної дії дозволяє отримати нерозривну характеристику перетворення без ускладнення аналогової частини. До того ж вона навіть буде спрощуватися, оскільки при цьому можна використовувати аналогові вузли, виготовлені за спрощеною технологією. Використання такого ЦАП в АЦП порозрядного врівноваження дозволяє здійснювати коригування інструментальних похибок шляхом введення коригувальних поправок виключно в цифровій формі. Таке коригування може здійснюватися в ході процедури самокалібрування ваг розрядів АЦП.

Разом з тим, питання самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження із ваговою надлишковістю особливо з урахуванням ймовірнісних характеристик інструментальних похибок аналогових вузлів є недостатньо дослідженими. Тому тема статті, що присвячена вирішенню цього питання, є *актуальною*.

### Мета досліджень

Підвищення точності АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю, що містить у своїй структурі неточний ЦАП, шляхом використання процедури калібрування характеристики перетворення, зокрема, з урахуванням ймовірнісних характеристик параметрів елементної бази.

### Постановка задач

Згідно із зазначеною метою формулюються такі задачі:

1. Дослідити вплив значень інструментальних похибок ЦАП на спотворення характеристики перетворення АЦП, зокрема, з урахуванням ймовірнісних характеристик елементної бази.
2. Вивести аналітичні співвідношення, що дозволяють оцінити характеристики похибок перетворення до і після калібрування.
3. Зробити порівняльний аналіз рівня похибок перетворення з використанням і без використання процедури самокалібрування.

### Розв'язання задач

Неточність ваг розрядів двійкового ЦАП може призвести до розриву характеристики перетворення. Це відповідає випадку, коли вага поточного ( $i$ -го) розряду двійкового ЦАП перевищує суму ваг усіх молодших розрядів (має додатне відхилення). Дана ситуація ілюструється на рис 1.

Наявність такої деформації характеристики перетворення ЦАП не можна скоригувати підбором вхідного цифрового еквіваленту, оскільки коду, що заповнить проміжок  $\Delta A_i$ , у цій зоні не існує (рис 1).

Використання ж вказаного ЦАП в АЦП порозрядного врівноваження призведе до появи так званого розтягнутого коду (wide code) (див. рис. 2) в характеристиці перетворення [1]. Це обумовлено грубим врівноваженням (з похибкою більше молодшого кванта) вхідного аналогового сигналу  $A_{вх}$  компенсуючим сигналом ЦАП  $A_{Кі}$ , що виключає можливість цифрової корекції безпосередньо кінцевого результату перетворення [4].

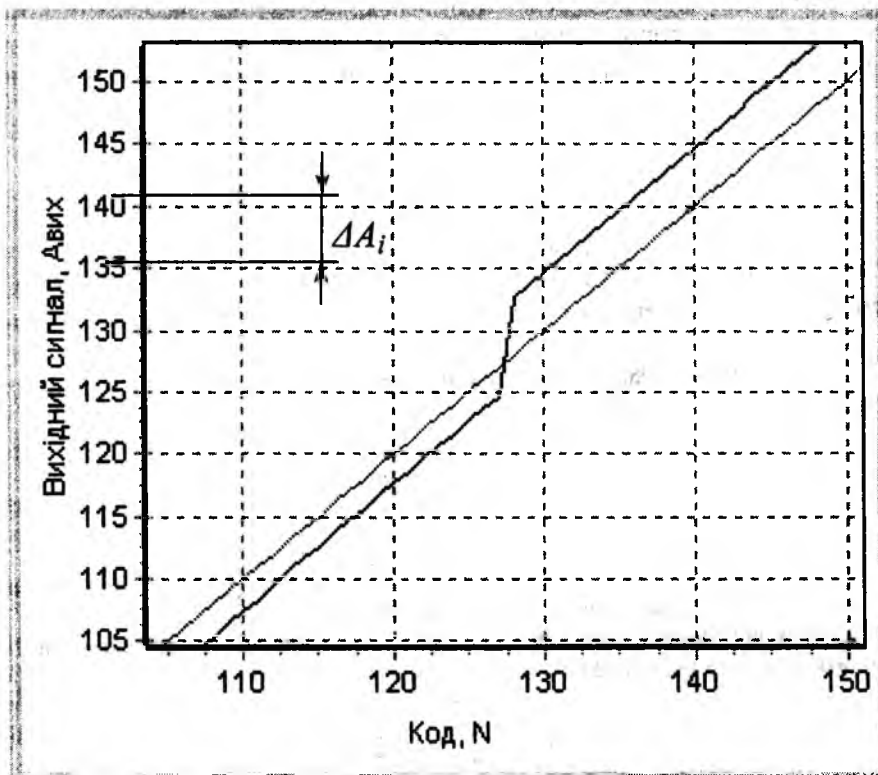


Рисунок 1 – Розрив характеристики перетворення неточного двійкового ЦАП

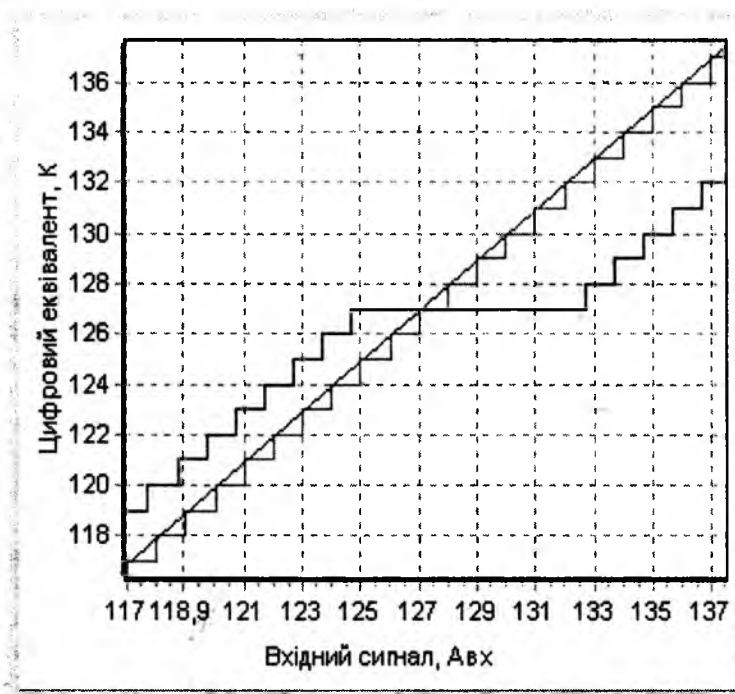


Рисунок 2 – Наявність розтягнутого коду в характеристики перетворення АЦП, що містить неточний двійковий ЦАП

Розглянемо ситуацію, коли ЦАП, що має відхилення, побудовано з ваговою надлишковістю, зокрема, на основі надлишкових позиційних систем числення.

Надлишкові позиційні системи числення можна розділити на дві групи: з дробовими і з цілочисловими вагами розрядів. У першій групі НПСЧ будь-яке натуральне число  $N$  можна зобразити у вигляді

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \alpha^i,$$

де  $i$  – номер розряду,  $a \in \{0,1\}$  або  $a \in \{1, \bar{1}\}$  – двійкова цифра в  $i$ -му розряді,  $\alpha^i$  – вага  $i$ -го розряду,  $\alpha$  – основа системи числення, значення якої знаходиться в межах  $1,0 < \alpha < 2,0$ ;  $(n-1)$  – номер старшого розряду.

У НПСЧ із цілочисловими вагами розрядів будь-яке натуральне число можна представити у вигляді

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \varphi_i,$$

де  $\varphi_i$  – вага  $i$ -го старшого розряду, що є цілим числом. Прикладом НПСЧ із цілочисловими вагами можуть служити системи числення на основі  $p$ -чисел Фібоначчі [4].

У НПСЧ на відміну від двійкової системи числення мають місце зони перекриттів. Ширина зони перекриття для  $i$ -го розряду задається виразом

$$\Delta A_i = \sum_0^{i-1} Q_j - Q_i,$$

де  $Q_i$  – вага  $i$ -го розряду.

У цьому випадку, якщо абсолютні значення відхилень  $\Delta Q_i$  ваг розрядів задовольняють нерівності  $\Delta Q_i \leq \Delta A_i$ , тоді характеристика перетворення надлишкового ЦАП розривів мати не буде.

У випадку додатного відхилення номінальної ваги розряду ЦАП характеристика перетворення АЦП, що його містить, буде мати немонотонність (рис. 3).

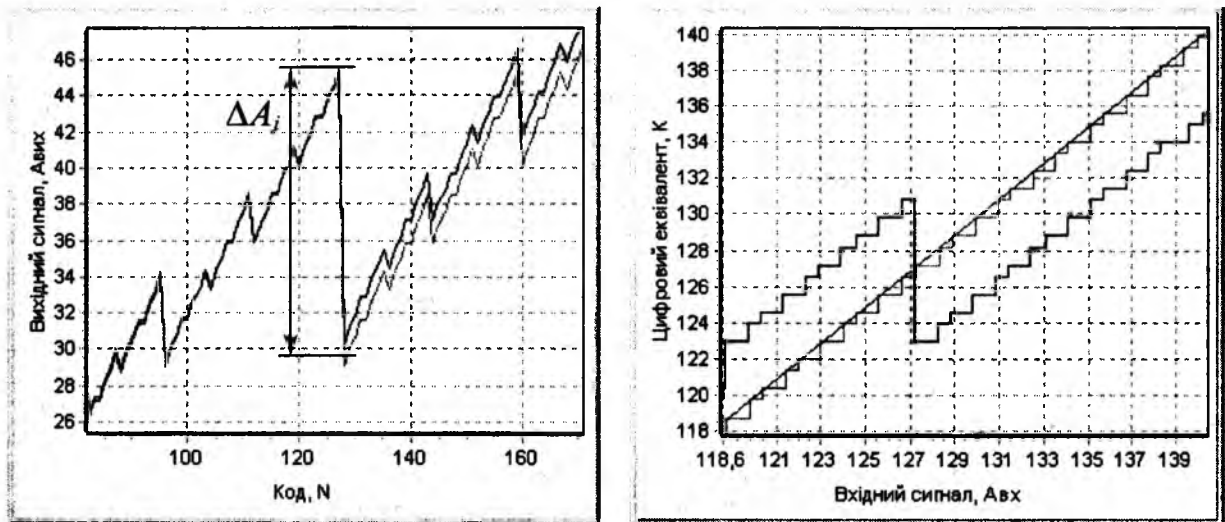


Рисунок 3 – Немонотонність характеристики перетворення надлишкового АЦП

Коли ж вага старшого ( $i$ -го) розряду ЦАП перевищує номінальну вагу, в характеристиці перетворення АЦП з'являється пропуск коду (рис. 4), який у надлишковому АЦП є природнім, оскільки алгоритм порозрядного перетворення слугує фільтром для появи в процесі перетворення лише окремих кодів, і з'явиться лише одна кодова комбінація з множини еквівалентних, залежно від значення відхилення ваги розряду. Дану ситуацію можна продемонструвати на прикладі представлення певної вхідної величини кодом Фібоначчі (див. табл. 1). В таблиці 1 наведено кодові комбінації  $N', \dots, N^{IV}$  на виході АЦП, що мають однаковий цифровий еквівалент для одного вхідного значення  $A_{Вх}$ . Це пов'язано з багатозначністю характеристики перетворення АЦП, що дозволяє досягти її неперервності навіть за умови наявності відхилень значень розрядів.

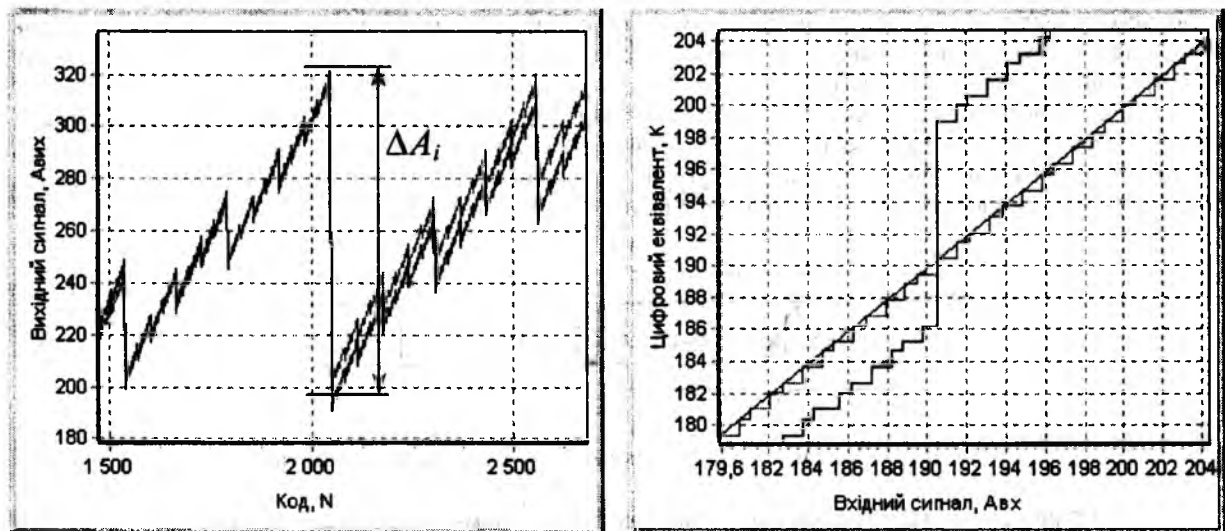


Рисунок 4 – Пропуск кодів у надлишковому АЦП

Пропуск коду в АЦП можна скоригувати в цифровий спосіб за рахунок наявності в  $III$  ваговій надлишковості (формула 1), що дає можливість представити декількома еквівалентними кодами вхідну аналогову величину із заданого діапазону (табл. 1).

$$\Delta A_i = \Delta \tilde{Q}_i = \sum_0^{i-1} Q_j - Q_i \quad (1)$$

Таблиця 1

Представлення вхідної величини  $A_{ВХ}$  кодом Фібоначчі

Вхідне значення ( $A_{ВХ}$ )	Ваги розрядів									Код
	55	34	21	13	8	5	3	2	1	
68	1	0	0	1	0	0	0	0	0	$N'$
68	1	0	0	0	1	1	0	0	0	$N''$
68	1	0	0	0	1	0	1	1	0	$N'''$
68	0	1	1	0	1	0	1	1	0	$N^{IV}$

У роботі [4] показано, що максимальне припустиме відхилення ваг розрядів, при якому зберігається нерозривність характеристики перетворення, наприклад, для золоті пропорції  $\alpha=1,618$  сягає 23,6%. Це можливо, якщо відхилення старшого розряду додатне, а всіх молодших – від’ємне. Для інших значень  $\alpha$  максимальні відхилення наведено у таблиці 2. При зменшенні  $\alpha$  допустимий відсоток відхилень збільшується.

Таблиця 2

Максимальне припустиме відносне відхилення ваг розрядів

$\alpha$	2,00	1,90	1,80	1,70	1,618	1,60	1,50
$\delta Q_{\max}(\%)$	0	5,29	11,11	17,65	23,61	25,00	33,33

Використання неточного ЦАП із ваговою надлишковістю в багаторозрядному АЦП порозрядного врівноваження є можливим і навіть доцільним, оскільки розглянуті відхилення можна скоригувати в ході процедури самокалібрування.

**Самокалібрування** полягає у визначенні відхилень ваги поточного розряду  $\Delta Q_i$  і ваг старших розрядів шляхом порівняння ваги поточного розряду, що калібрується, з сумою ваг певної групи сусідніх молодших розрядів на базі існуючих між ними математичних співвідношень. При цьому не потрібне використання спеціальних зразкових мір або еталонних сигналів. Визначенні відхилень враховуються при отриманні вихідного коду АЦП.

Слід відзначити, що при цьому розрядна сітка багаторозрядного АЦП, що самокалібрується, умовно розбивається на групи з  $m$  неточних (старших) і  $(n-m)$  точних (молодших) розрядів (рис. 5), причому неточні і точні розряди утворюють групу з  $n$  основних розрядів. Визначені ваги  $(n-m)$  точних розрядів фіксуються в блоку постійної пам’яті в процесі виготовлення перетворювача (рис. 6).

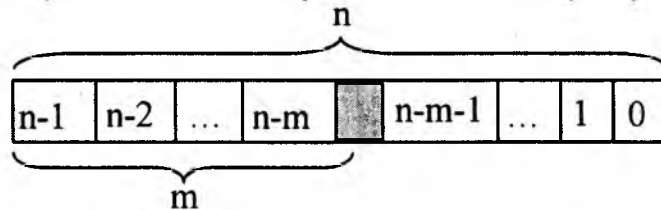


Рисунок 5 – Модель розрядної сітки АЦП у режимі самокалібрування

Структурна схема АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібрується і містить неточний ЦАП, має вигляд, наведений на рисунку 7.

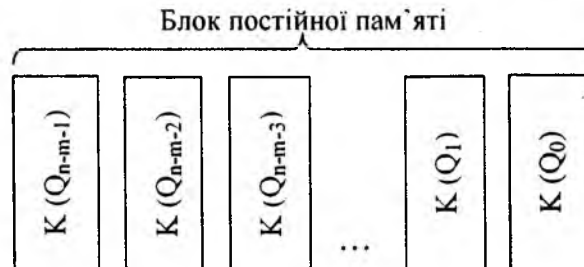


Рисунок 6 – Розподіл кодів ваг розрядів у БПП

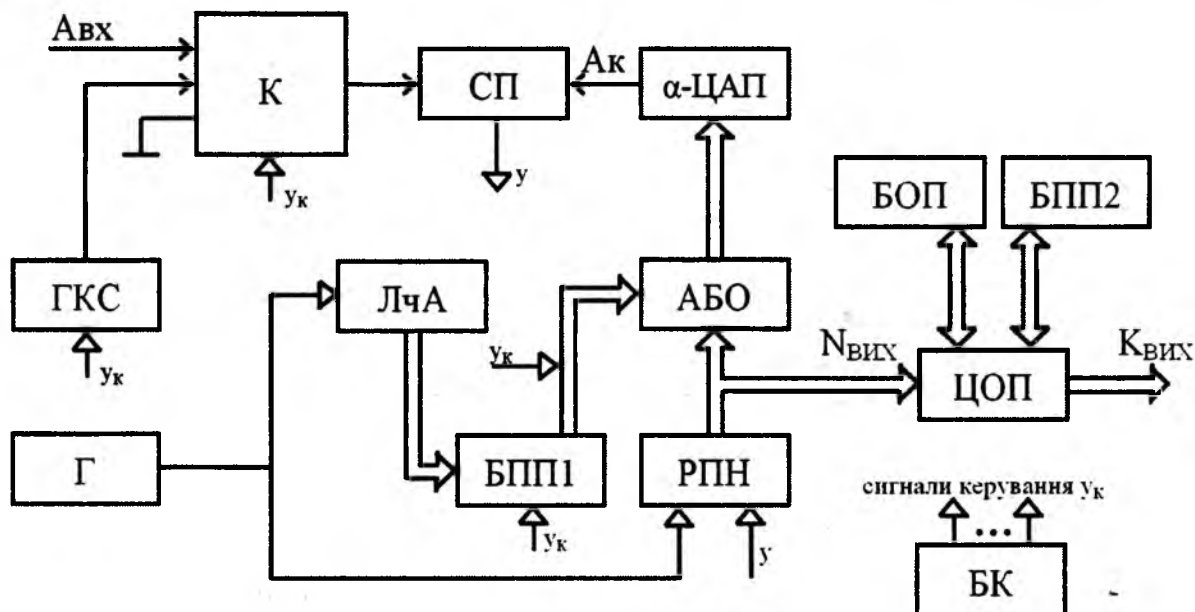


Рисунок 7 – Структурна схема високошвидкісного АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібується

Тут ГКС – генератор калібрувальних сигналів (неточних), Г – генератор імпульсів, К – комутатор, СП – схема порівняння, ЛчА – лічильник адреси, БПП1 – перший блок постійної пам’яті,  $\alpha$ -ЦАП – цифроаналоговий перетворювач із ваговою надлишковістю, АБО – блок елементів АБО, БОП – блок оперативної пам’яті; ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, БПП2 – другий блок постійної пам’яті, БК – блок керування.

Схема працює у двох режимах: самокалібрування й основного перетворення, причому перший передє другому. У режимі самокалібрування беруть участь такі блоки: генератор калібрувальних сигналів, комутатор, лічильник адреси, перший та другий блоки постійної пам’яті, регістр послідовного наближення, блок елементів АБО, цифроаналоговий перетворювач із ваговою надлишковістю, цифровий обчислювальний пристрій, блок оперативної пам’яті.

Граф схему алгоритму самокалібрування «знизу-догори» [5] наведено на рисунку 8. У ході самокалібрування послідовно здійснюється визначення відхилень  $\Delta Q_i$  шляхом подвійного врівноваження вхідного аналогового сигналу  $A_{n-m}$  компенсуючою величиною  $A_{k n-m}$  із вмиканням (n-m)-го розряду (отримується кодова комбінація  $N_i'$ ) і без вмикання його (відповідно комбінація  $N_i''$ ). Коди  $N_i'$ ,  $N_i''$  формуються на виході шини РПН і послідовно із старших розрядів подаються в ЦОП. Визначення реальної ваги (n-m)-го розряду засновано на перевірці виконання співвідношення

$$\sum_0^{i-1} Q_j \geq Q_i$$

де  $Q_i = Q_{i-1} + \dots + Q_{i-l}$ ,  $l = 2$  для  $\alpha=1,618$ ;  $l = 3$  для  $\alpha=1,84$ . При цьому код реальної ваги (n-m)-го розряду представляється таким чином:

$$K(Q_{n-m}) = K(Q_{n-m id}) + K(\Delta Q_{n-m}),$$

$$\Delta Q_i = \delta Q * Q_i;$$

де  $Q_{n-m id}$  – ідеальна вага (n-m)-го розряду,  $\delta Q$  – технологічний допуск.

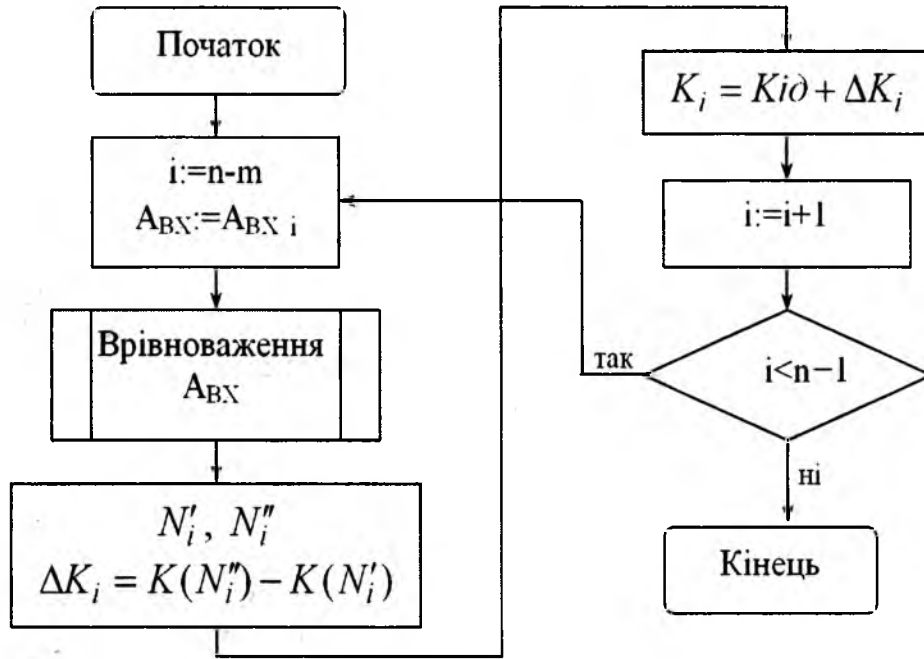


Рисунок 8– Алгоритм самокалібрування «знизу-догори»

У подальших циклах аж до m-го процедура калібрування неточних розрядів аналогічна. При цьому код реальної ваги розряду розраховується за співвідношенням

$$K(Q_i) = K(Q_{i0}) + K(\Delta Q_i).$$

Після етапу калібрування ваг неточних розрядів визначається зсув нуля  $\Delta A_{3M}$ . При цьому на вхід АЦП подається нульова зразкова міра  $A_{ВХ}=0$  і здійснюється її врівноваження, в результаті якого на виході формується кодова комбінація  $K(\Delta_0)$ . Відповідно до  $K(\Delta_0)$  обчислюється код зсуву нуля за формулою

$$K_{3M0} = Q_i a_i,$$

де  $a_i$  – розрядні коефіцієнти. Коды реальних ваг розрядів і зсуву нуля фіксуються БОП і в подальшому використовуються в процесі основного перетворення.

У режимі основного перетворення вхідний аналоговий сигнал  $A_{ВХ}$  врівноважується компенсуючим сигналом  $A_{КОМ}$  і в міру формування робочого коду в РПН обчислюється результат перетворення за формулою

$$K_{вих} = \sum_0^{n-1} K_i a_i + K(\Delta_0).$$

Знайдені в процесі калібрування відхилення  $\Delta Q_i$  є відносними стосовно абсолютних значень ваг молодших розрядів. Фактично калібрування характеристики перетворення призведе до коригування її диференціальної нелінійності. Характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження побудованого на неточному ЦАП до і після самокалібрування наведено на рисунку 9.

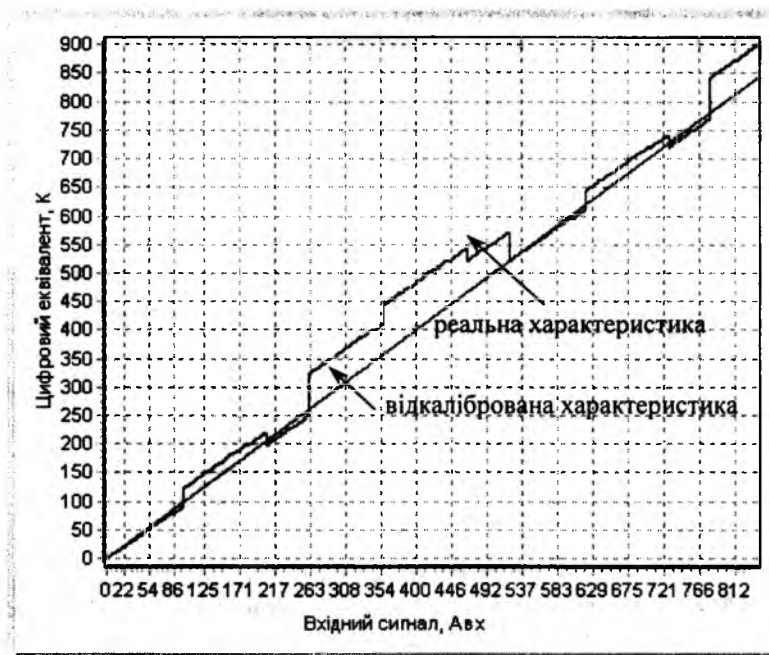


Рисунок 9 – Характеристики перетворення АЦП до і після самокалібрування

Важливим є оцінювання впливу відхилень на деформацію характеристики перетворення і, зокрема, врахування статистичного розподілу відхилень  $\Delta Q_i$  до і після самокалібрування. Оскільки перетворювачі інформації містять мікроелектронні аналогові вузли, параметри яких можуть бути задані неточно, то доцільно врахувати розкид параметрів цих вузлів від номінальних значень [6, 7]. Розробники інтегральних схем [8] вказують, що цей розкид як правило відповідає нормальному закону (Гауссівський розподіл), що описується виразом

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty,$$

де  $\bar{x}$  – математичне сподівання похибки, що характеризує середнє значення, навколо якого групуються можливі значення відхилення (для АЦП це – номінальна вага розрядів),  $\sigma$  – стандартне відхилення, або середньоквадратичне відхилення випадкової величини  $x$ , що характеризує ширину розсіяння значень похибки навколо середнього значення.

Відхилення від номінальної ваги  $\sigma$  (сігма) задається допуском на інструментальні похибку завдання ваг розрядів ЦАП. Дані таблиці 3 характеризують зв'язок між середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  і технологічним допуском. Згідно з [9] відхилення параметрів інтегральної схеми на рівні  $\pm 3\sigma$  є мінімальною умовою придатності такої ІС до експлуатації.

Для дослідження статистичних характеристик ПІ до і після калібрування було розроблено спеціальну комп'ютерну програму, що дозволяє моделювати характеристику перетворення АЦП із завданням таких вихідних даних:  $n$  – кількість розрядів,  $\alpha$  – основа системи числення,  $\delta Q$  – технологічний допуск,  $r$  – кількість реалізацій. У ході моделювання є можливість змінювати ваги розрядів від номінальних значень випадковим чином по нормальному закону. Оцінювання результатів моделювання здійснюється відповідно до методики обробки експериментальних даних у такому порядку [10, 11]:

1. Виключаються значення відхилень ваг розрядів, що виходять за межі  $\pm 3\sigma$ ;
2. Експериментальні дані перевіряються на відповідність нормальному закону.
3. Знаходиться математичного сподівання похибки  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i,$$

де  $n$  – розрядність ПІ.



4. Розраховується середньоквадратичне відхилення експериментальних даних  $\sigma$ :

$$\sigma = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - x)^2}$$

Таблиця 3

Зв'язок між середньоквадратичним відхиленням і технологічним допуском

№ п.п.	Середньоквадратичне відхилення ( $\pm\sigma$ )	Відсоток, що відповідає допуску	Похибка
1.	$\pm\sigma$	68,3%	31,75%
2.	$\pm 2\sigma$	95,4%	4,56%
3.	$\pm 3\sigma$	99,73	0,27%
4.	$\pm 4\sigma$	99,994%	0,006%
5.	$\pm 5\sigma$	99,99994%	0,00006%

За допомогою цієї програми моделюються такі ймовірнісні характеристики: математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення із заданими параметрами перетворення. Так, за умови, що кількість розрядів АЦП порозрядного врівноваження, побудованого на неточному ЦАП,  $n=14$ , основа НПСЧ  $\alpha=1,618$ , технологічний допуск на елементи  $\delta Q=5\%$  отримано значення математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення, за якими побудовано криві розподілу відхилень розрядів, що наведені на рисунку 10. Тут крива  $A_1$  характеризує розподіл відхилень відповідно до заданого допуску ваги старшого  $n-1$ -го розряду до самокалібрування, а крива  $A_2$  – розподіл відхилень після калібрування.

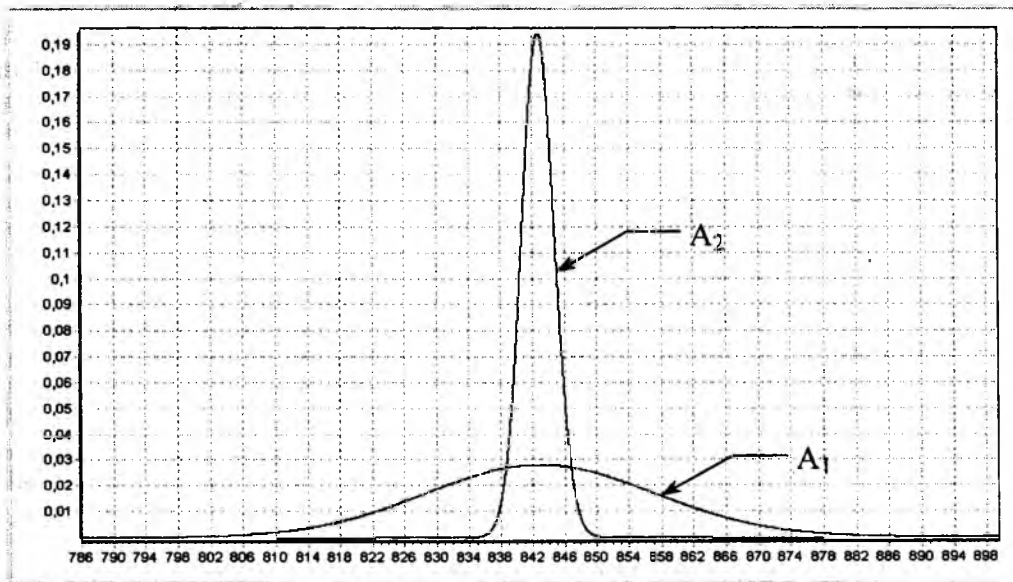


Рисунок 10 – Криві розподілу відхилень  $\Delta Q$ , розряду АЦП до і після самокалібрування

Згідно з [8, 12] технологічний допуск на елементну базу як правило задається в межах 1–5%. Важливим є доведення некорельованості відхилень ваг розрядів, щоб можна було використовувати властивості незалежних випадкових величин, розподілених по нормальну закону. Враховуючи значення ваг неточних розрядів для розглянутого АЦП і максимальне значення технологічного допуску, можна стверджувати, що значення відхилень сусідніх ваг на рівні  $\pm 3\sigma$  перекриватися не будуть. При цьому розподіл відхилень для трьох сусідніх неточних розрядів  $i, i+1, i+2$  по діапазону буде мати вигляд, представлений на рисунку 11.

Наведений приклад (для  $\delta Q=5\%$ ) доводить, що корелювання практично відсутнє і можна використовувати нормальних закон. При цьому з теорії ймовірності відомо, що дисперсія алгебраїчної суми незалежних випадкових величин  $\Delta_i$  дорівнює сумі їх дисперсій [6], тобто

$$D[\Delta_1 \pm \Delta_2 \pm \Delta_3 \pm \dots \pm \Delta_n] = D[\Delta_1] + D[\Delta_2] + D[\Delta_3] + \dots + D[\Delta_n].$$

Знаючи значення дисперсії до і після калібрування, можна оцінити рівень зменшення похибки перетворення порівняно з інструментальними похибками елементної бази за допомогою коефіцієнта зменшення середньоквадратичного значення похибки за допомогою формули (2).

$$\xi = \frac{D}{D_{СКЛ}}, \tag{2}$$

де  $D$  – відхилення ваг розрядів до самокалібрування,  $D_{СКЛ}$  – відхилення ваг розрядів після самокалібрування.

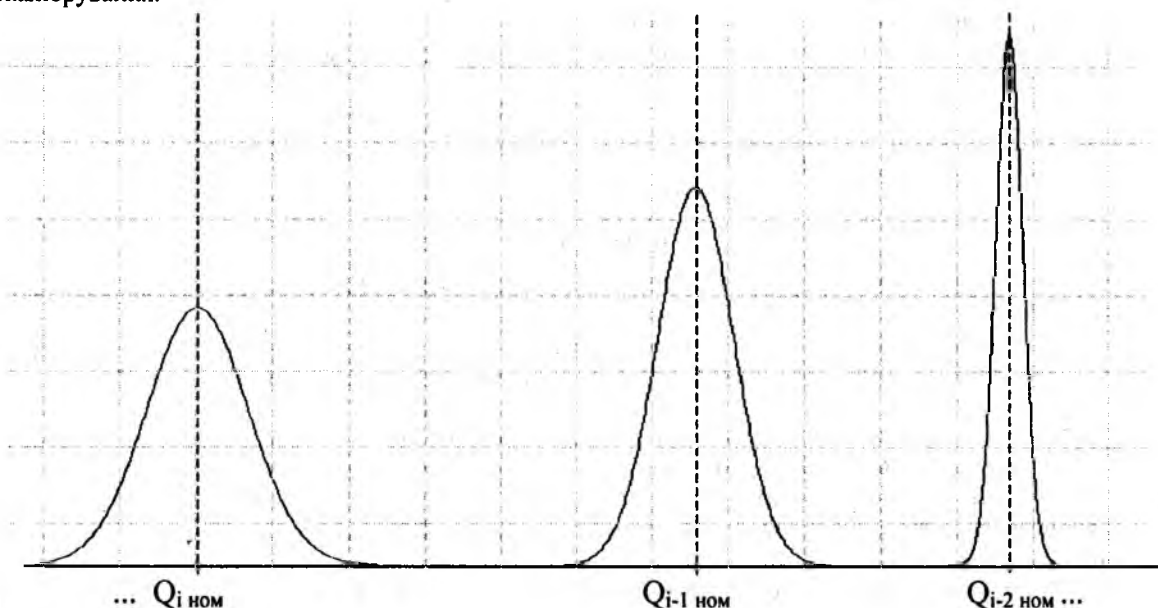


Рисунок 11 – Зони розподілу відхилень  $\Delta Q_i$  між номінальними значеннями сусідніх розрядів

Значення  $\xi$  знайдені за допомогою комп'ютерного моделювання для АЦП порозрядного врівноваження, побудованого на неточному ЦАП, з основою НПСЧ  $\alpha=1,618$  і різною кількістю розрядів наведено в таблиці 4. При цьому слід зазначити, що 17 розрядів НПСЧ відповідає 12 двійковим розрядам, 21 розряд – 14 розрядам, а 24 – 16 розрядам.

Таблиця 4  
Результати комп'ютерного моделювання

Кількість розрядів НПСЧ, n	Технологічний допуск, $\delta Q$	Кількість реалізацій, r	$\xi$
17	1%	1000	8,91
	3%		8,66
	5%		6,47
21	1%		27,58
	3%		10,63
	5%		6,79
24	1%		40,63
	3%		11,14
	5%		6,84

Аналіз значення коефіцієнта зменшення середньоквадратичного значення похибки в результаті використання процедури калібрування ваг розрядів АЦП порозрядного врівноваження, що містить неточний ЦАП, дозволяє підвищити точність перетворення. Причому із збільшенням кількості розрядів вигравш по точності збільшується. Однак збільшення допуску на елементи дещо погіршує точнісні показники після самокалібрування.

### Висновки

1. Використання неточного ЦАП із ваговою надлишковістю у схемі АЦП порозрядного врівноваження дозволяє навіть при значних технологічних допусках на елементи уникнути розриву характеристики перетворення. Причому, навіть при значних рівнях допусків (1 – 5%) зони відхилень є некорельованими, що дозволяє під час оцінювання похибок використовувати нормальний закон розподілу відхилень ваг розрядів.

2. Отримано аналітичне співвідношення для знаходження коефіцієнта зменшення середньоквадратичного відхилення ваг розрядів, тобто зменшення підсумкової похибки перетворення порівняно з первинними похибками елементної бази. При цьому значення коефіцієнта зменшення середньоквадратичного відхилення знаходиться за результатами комп'ютерного моделювання із завданням вихідних параметрів.

3. Показано, що нарощування числа розрядів сприяє збільшенню виграшу по точності після проведення процедури самокалібрування, а розширення технологічного допуску на елементи  $\delta Q$  незначно погіршує показники.

### Список літератури

1. Analog-Digital Conversion / Edited by Walt Kaster / Analog Devices Inc. 2004. 1230 p.
2. Electronic Design. November 11, 1982. – p. 121 – 130.
3. Смолов В.Б., Смирнов Н.А., Угрюмов Е.П., Шмидт В.К., Фомичев В.С., Чернявский Е.А., Грушвицкий Р.И. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжений. – Л.: «Энергия», 1967. – 312 с.
4. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.
5. Азаров О.Д., Архипчук О.А., Захарченко С.М. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.
6. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 1. – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 532 с.
7. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – Киев: Логос, 2002. – 486 с.
8. Hans Camenzind. 700 Series 20v Bipolar Array Design Manual. 2005. – p. 192.
9. Hans Camenzind. Designing Analog Chips. 2005. – p. 242.
10. Статистические методы в инженерных исследованиях. Под редакцией Г.К. Круга. – Москва: Высшая школа, 1983. – 216 с.
11. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. – Киев: Техніка, 1987. – 123 с.
12. Alan V. Grebene. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design. 2003. – 894 p.

**Азаров Олексій Дмитрович** – завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 58-02-25, e-mail azarov@vstu.vinnica.ua

**Кадук Олександр Володимирович** – аспірант кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. +38-097-602-42-84, e-mail k67alex@yahoo.com.