

УДК 681.3:621.375

О. Д. АЗАРОВ, О. В. КАДУК, О. В. ДУДНИК

КОРИГОВАНІ І НЕКОРИГОВАНІ ПОХИБКИ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ПФІ, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ, З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. Розглянуто кориговані і некориговані похибки багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Наведено структурні схеми каналів аналогово-цифрового та цифроаналогового перетворення. Представлено моделі складових похибок наскрізних каналів АЦ- та ЦА-перетворення та моделі некоригованих складових похибок вказаних каналів після проведення процедури самокалібрування. Виведено аналітичні вирази для визначення абсолютних похибок АЦ-перетворення та ефективності процедур самокалібрування.

Анотація. Рассмотрены корректируемые и некорректируемые погрешности многоразрядных самокалибрующихся ПФИ с весовой избыточностью. Приведены структурные схемы каналов аналогово-цифрового и цифроаналогового преобразования. Представлены модели составных погрешностей сквозных каналов АЦ- и ЦА-преобразования и модели некорректируемых составляющих погрешностей указанных каналов после проведения процедуры самокалибровки. Выведены аналитические выражения для определения абсолютных погрешностей АЦ-преобразования и эффективности процедур самокалибровки.

Abstract. In this article correctable and uncorrectable errors of a selfcalibrated ADC and DAC with weight redundancy are shown. The block diagrams of analog-to-digital and digital-to-analog conversion channels are also shown. The model of the components errors of a through AD- and DA-channels and the model of the uncorrectable components errors of the above-mentioned channels after selfcalibration are illustrated. Analytical expressions for determination of absolute errors of the AD-conversion and efficiency of selfcalibration technique are offered.

Ключові слова: вагова надлишковість, самокалібрування, аналогово-цифрове перетворення, похибки.

ВСТУП

Аналого-цифрові та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації (ПФІ), що широко застосовуються в різних галузях людської діяльності [1], зокрема і в оптико-електронних системах. Параметри і характеристики перетворювачів залежать від галузі використання і складності розв'язуваних задач. Серед розмаїття ПФІ з роздільною здатністю 10÷18 розрядів основну нішу становлять АЦП порозрядного врівноваження. Водночас, у процесі експлуатації, під впливом таких природних чинників, як змінення температури навколишнього середовища, старіння елементів аналогових вузлів, наявність радіації тощо призводять до змінення параметрів ПФІ, а це у свою чергу може призвести до параметричної відмови пристрою в цілому. При цьому слід зазначити, що зазначена розрядність визначає роздільну здатність приладу, але далеко не в повній мірі забезпечує відповідні метрологічні характеристики ПФІ [2,3]. Так, наприклад, 16÷18 розрядні АЦП фірми Analog Devices у робочому діапазоні температур мають похибки інтегральної та диференціальної лінійності на рівні 4÷6 квантів молодшого розряду [4].

АКТУАЛЬНІСТЬ

Починаючи з кінця 80-х–початку 90-х років для підтримання параметричної відмовостійкості багаторозрядних ПФІ у процесі їх експлуатації використовуються структурно-алгоритмічні методи: самокоригування (для двійкових ПФІ) і самокалібрування (ПФІ з ваговою надлишковістю).

У процесі самокоригування ПФІ розрахована поправка вводиться в ході основного перетворення в аналоговій формі. Варто відзначити, що основним недоліком самокоригування, наприклад для АЦП

порозрядного врівноваження, є зменшення швидкодії перетворення, оскільки обчислення і уведення поправки вимагає додаткового часу. Самокалібрування – це один із різновидів самокоригування, що здійснюється з перериванням процесу основного перетворення для визначення цифрових еквівалентів реальних значень ваг розрядів. При цьому коди цифрових еквівалентів ваг розрядів зберігаються у блокові пам'яті (БП) обчислювального пристрою, який є невід'ємною частиною ПФІ. В АЦП послідовного наближення, що самокалібруються, порозрядне врівноваження здійснюється окремо від обчислення результату перетворення, і фактично по завершенню врівноваження закінчується і перетворення.

Фактично, самокалібрування є самонастроюванням характеристики перетворення АЦП порозрядного врівноваження з урахуванням реальних ваг розрядів [5]. Результати самокалібрування використовуються у процесі основного перетворення або вимірювання доти, поки внаслідок змінення параметрів аналогових вузлів АЦП не виникне потреба здійснювати повторне самокалібрування.

Такий підхід передбачає використання позиційних систем числення з ваговою надлишковістю (ПСЧВН) і його відмітною особливістю є можливість створення високоточних, метрологічно стабільних ПФІ, побудованих на неточних елементах, без застосування спеціальних технологічних прийомів. При цьому неточними елементами вважаються такі, в яких відхилення параметрів від їх номінальних значень перевищують кінцеву похибку перетворення. Разом з тим, у ПФІ з ваговою надлишковістю є можливість істотно скоротити час перетворення і підвищити швидкодію за рахунок компенсації динамічних похибок першого і другого роду [6,7].

Водночас, в каналах ПФІ існують похибки, які шляхом використання самокалібрування зменшити не вдається. У науково-технічній літературі цю проблему розглянуто недостатньо, зокрема, не проведено детального аналізу складових коригованих і некоригованих похибок багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Тому тема статті, присвячена коригованим і некоригованим похибкам багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю є актуальною.

МЕТА

Метою досліджень є визначення й аналіз коригованих і некоригованих похибок ЦАП паралельної дії та багаторозрядних АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, а також складення моделей характеристик перетворення АЦП і ЦАП, в яких враховано вплив похибок. Наявність цих даних дає можливість оцінити потенційну точність ПФІ, побудованих на неточних елементах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1. Аналіз коригованих і некоригованих похибок багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю.
2. Складення математичних моделей коригованих і некоригованих похибок багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються.
3. Оцінювання впливу похибок аналогових вузлів ПФІ на характеристику перетворення.
4. Визначення критерію й оцінювання ефективності процедури самокалібрування.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Основними джерелами статичних похибок ЦАП паралельної дії та багаторозрядних АЦП порозрядного кодування, що містять такі ЦАП, є відхилення параметрів елементів аналогових вузлів від своїх номінальних значень, внаслідок недосконалості технології виготовлення. Крім того, під час експлуатації з'являються додаткові похибки. Вказане разом взяте викликає поступову параметричну відмову аналогових вузлів і пристроїв в цілому.

Похибки ЦАП паралельної дії та багаторозрядних АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, поділяються на такі типи:

- кориговані – це похибки, що можуть бути скориговані різноманітними прийомами;
- частково кориговані – можуть бути скориговані до певного рівня;
- некориговані – це похибки, які неможливо скоригувати, і які можна зменшити лише схемотехнічними чи технологічними методами, або зовсім неможливо.

Для аналізу складових коригованих і некоригованих похибок ЦАП паралельної дії та багаторозрядних АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, доцільно розглянути канали АЦ- і

ЦА-перетворення. Узагальнена структура каналу АЦ-перетворення може мати вигляд, як показано на рис. 1. Тут D_1, D_2, \dots, D_n – давачі, $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ – підсилювачі, АК – аналоговий комутатор, Б – буфер, ПВЗ – пристрій вибірки-зберігання, СП – схема порівняння, ПВР – пристрій виділення різниці, ПЕ – пороговий елемент, α -ЦАП – цифроаналоговий перетворювач із ваговою надлишковістю, РПН – реєстр послідовного наближення, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, БУ – блок управління, ГКС – генератор калібрувального сигналу.

Слід відзначити, що похибки аналогових вузлів поділяються на первинні та вторинні [8, 9]. Первинні – це похибки, що виникають внаслідок відхилення параметрів вузлів та елементів і визначаються можливостями технології виготовлення [10]. Коригування цих похибок можна здійснювати на етапі виготовлення пристрою, як за допомогою дорогавартісних технологічних прийомів, так і з використанням структурно-алгоритмічних або схемотехнічних методів. Вторинні похибки – це ті, що з'являються у процесі експлуатації під впливом чинників навколишнього середовища і через старіння елементів аналогових вузлів. У статті наголос зроблено на розгляд саме вторинних похибок, оскільки вони є головною причиною параметричних відмов ПФІ.

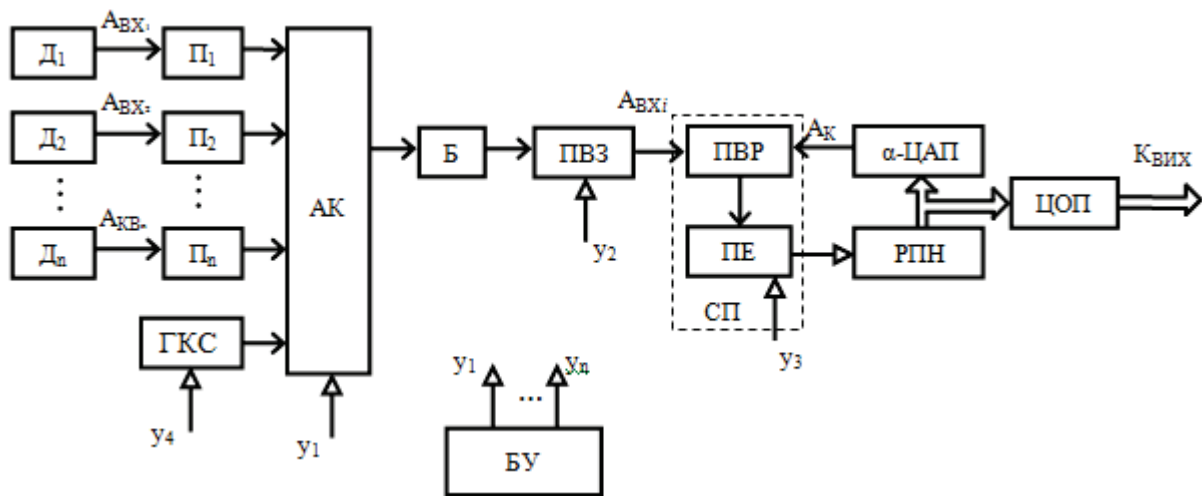


Рис. 1. Структурна схема каналу АЦ-перетворення з самокалібруванням

Будь-який АЦ-канал можна представити таким чином, що на вхідний A_{BX} і компенсуючий A_K сигнали накладаються похибки, що з'являються у процесі експлуатації під дією чинників навколишнього середовища, а також внаслідок недосконалості технології виготовлення елементів аналогових вузлів:

1. Температурний дрейф: зміщення нуля підсилювача $\Delta_{0\Pi}$, аналогового комутатора Δ_{0AK} , буфера Δ_{0B} , пристрою вибірки-зберігання Δ_{0PVZ} , схеми порівняння $\Delta_{0СП}$.
2. Змінення коефіцієнта підсилення підсилювача Δ_{Π} .
3. Інтегральна $\Delta_{\text{нл}}$, диференційна $\Delta_{\text{днл}}$ нелінійності, зміщення нуля $\Delta_{0\alpha\text{ЦАП}}$ та квантування $\Delta_{\text{кв}\alpha\text{ЦАП}}$ α -ЦАП.
4. Похибка суперпозиції ваг розрядів α -ЦАП $\Delta_{\text{роз}}$.
5. Нелінійність характеристики перетворення: підсилювача $\Delta_{\text{нл}\Pi}$, аналогового коммутатора $\Delta_{\text{нл}AK}$, буфера $\Delta_{\text{нл}B}$, пристрою вибірки-зберігання $\Delta_{\text{нл}PVZ}$.

Провівши аналіз структурної схеми, що представлена на рис. 1, можна запропонувати модель складових похибок наскрізного каналу АЦ-перетворення, що представлена на рис. 2.

Таким чином, на вхід схеми порівняння поступає різниця аналогових сигналів

$$\Delta A_{BX} = A_{BXi} - A_K.$$

Причому, сигнал A_{BXi} містить похибки аналогових вузлів каналу АЦ-перетворення:

$$A_{BXi} = A_{BX} + \Delta_{\Sigma \text{ КАН}},$$

де $\Delta_{\Sigma \text{ КАН}}$ – сумарна похибка, що з’являється в результаті появи некорельованих похибок аналогових вузлів у процесі експлуатації, що додається до вхідного сигналу і визначається як [11]:

$$\Delta_{\Sigma \text{ КАН}} = \sqrt{\Delta_{\Sigma \text{ П}}^2 + \Delta_{\Sigma \text{ АК}}^2 + \Delta_{\Sigma \text{ Б}}^2 + \Delta_{\Sigma \text{ ПВЗ}}^2},$$

де $\Delta_{\Sigma \text{ П}}$ – загальна похибка підсилювача, причому: $\Delta_{\Sigma \text{ П}} = \sqrt{\Delta_{0\text{П}}^2 + \Delta_{\text{П}}^2 + \Delta_{\text{ЛНП}}^2}$;

$\Delta_{\Sigma \text{ АК}}$ – загальна похибка аналогового комутатора, причому: $\Delta_{\Sigma \text{ АК}} = \sqrt{\Delta_{0\text{АК}}^2 + \Delta_{\text{ЛНАК}}^2}$;

$\Delta_{\Sigma \text{ Б}}$ – загальна похибка буфера, причому: $\Delta_{\Sigma \text{ Б}} = \sqrt{\Delta_{0\text{Б}}^2 + \Delta_{\text{ЛНБ}}^2}$;

$\Delta_{\Sigma \text{ ПВЗ}}$ – загальна похибка пристрою вибірки зберігання, причому: $\Delta_{\Sigma \text{ ПВЗ}} = \sqrt{\Delta_{0\text{ПВЗ}}^2 + \Delta_{\text{ЛНПВЗ}}^2}$.

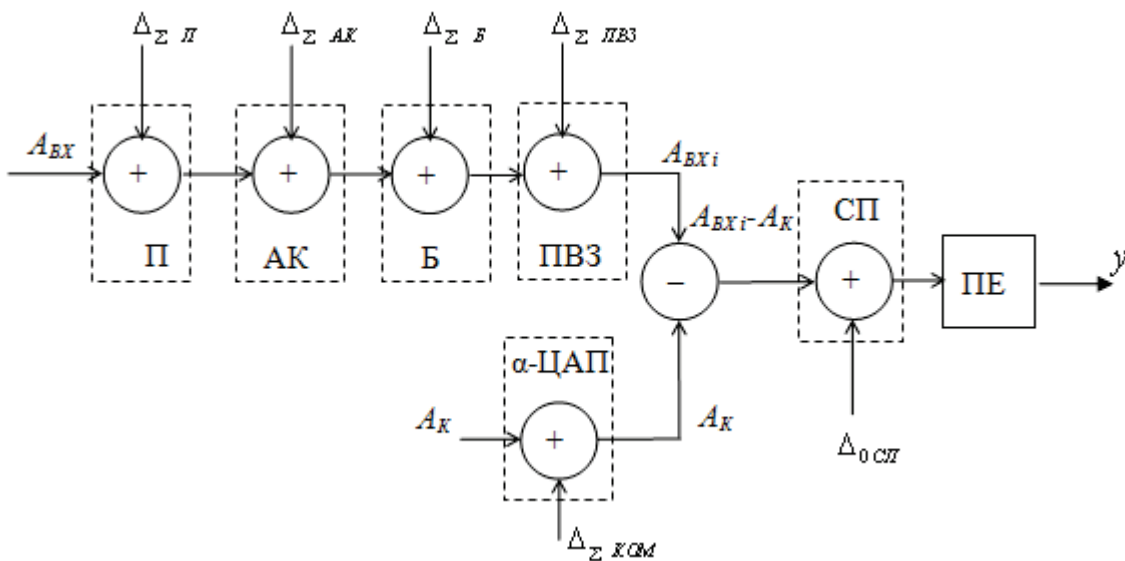


Рис. 2. Модель складових похибок наскрізного каналу АЦ-перетворення

Компенсуючий сигнал на виході α -ЦАП також містить похибки:

$$A_K = K + K \cdot \Delta_{\Sigma \text{ КОМ}} = K(1 + \Delta_{\Sigma \text{ КОМ}}),$$

де $\Delta_{\Sigma \text{ КОМ}}$ – сумарна похибка компенсуючого сигналу на іншому вході СП, що з’являється в результаті появи некорельованих похибок ваг розрядів ЦАП у процесі експлуатації і визначається як [11]:

$$\Delta_{\Sigma \text{ КОМ}} = \sqrt{\Delta_{\text{КВ ЦАП}}^2 + \Delta_{0\text{ЦАП}}^2 + \Delta_{\text{ІНЛ}}^2 + \Delta_{\text{ДНЛ}}^2 + \Delta_{\text{РОЗ}}^2}.$$

При цьому цифровий еквівалент $K_{\text{ВИХ}}$ вихідного коду $N_{\text{ВИХ}}$ формується відповідно до такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} A_{BXi} = A_{BX} + \Delta_{\Sigma \text{ КАН}}; \\ A_K = K + K \cdot \Delta_{\Sigma \text{ КОМ}}; \\ A_{BXi} - A_K = 0; \\ K_{\text{ВИХ}} = K + \Delta_{0\text{СП}}, \end{cases} \quad (1)$$

де A_{BX} – значення аналогової величини на вході перетворювача.

Виконавши математичні перетворення, отримаємо розв'язок системи рівнянь (1):

$$K_{ВИХ} = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} . \quad (2)$$

Абсолютне значення похибки перетворення можна визначити як:

$$\Delta K = K_{ВИХ} - K_{ВИХ id} , \quad (3)$$

де $K_{ВИХ id}$ – цифровий еквівалент вхідного аналогового сигналу при відсутності похибок у каналі перетворення:

$$K_{ВИХ id} = A_{ВХ} . \quad (4)$$

Отже, виконавши підстановки (2) і (4) в (3), отримаємо:

$$\Delta K = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} - A_{ВХ} = A_{ВХ} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} - 1 \right) + \left(\frac{\Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} \right) + \Delta_{0СП} .$$

Для усунення лінійної складової вказаної похибки ΔK можна застосовувати процедуру цифрового самокалібрування, яка можлива при побудові ПФІ на основі систем числення з ваговою надлишковістю [6, 7, 12].

Існує декілька алгоритмів процедур самокалібрування [13, 14]. Так, найкращі результати дає процедура самокалібрування з осередненням на розгортках [13]. Варто також відзначити, що при застосуванні самокалібрування з'являються додаткові методичні похибки, що проявляються у вигляді частково коригованих диференційної $\Delta_{ДНЛМСК}$, інтегральної $\Delta_{ИНЛМСК}$ нелінійностей та похибки масштабу $\Delta_{ММСК}$, що підпорядковані рекурентним співвідношенням і мають невелике значення порівняно з похибками, що виникають внаслідок зміни параметрів елементів аналогових вузлів [15].

Код на виході АЦП $K_{ВИХ}$ визначається як:

$$K_{ВИХ} = f(A_{ВХ}) ,$$

де $A_{ВХ}$ - аналоговий сигнал на вході перетворювача. Характеристика перетворення АЦП, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю зображена на рис. 3.

При застосуванні самокалібрування частина похибок, що вносяться П, АК, Б, ПВЗ, СП, α -ЦАП коригуються, оскільки усі вказані вузли охоплені контуром цифроаналогового зворотного зв'язку. Тоді модель складових похибок каналу АЦ-перетворення після застосування самокалібрування можна представити таким чином (див. рис. 4).

Проаналізувавши модель некоригованих складових похибок каналу АЦ-перетворення після проведення процедури самокалібрування та модель складових похибок наскрізного каналу АЦ-перетворення, можемо побудувати зведену таблицю (див. табл. 1) коригованих, некоригованих та частково коригованих похибок АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю.

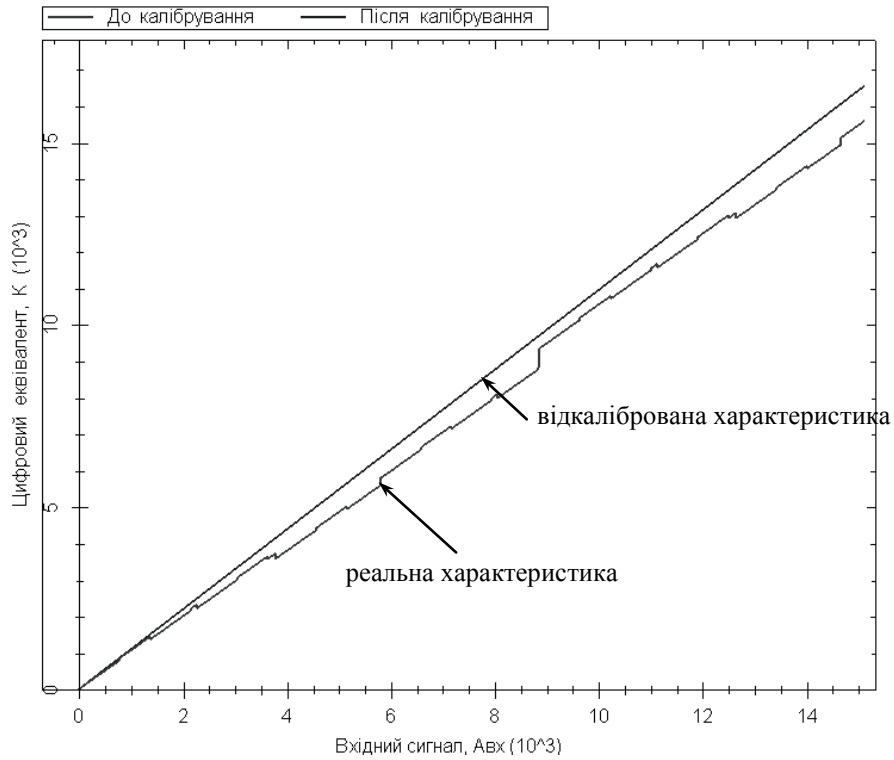


Рис. 3. Характеристика перетворення АЦП, що самокалібується

Варто відзначити, що похибка масштабу є коригованою у випадку наявності джерела опорного сигналу.

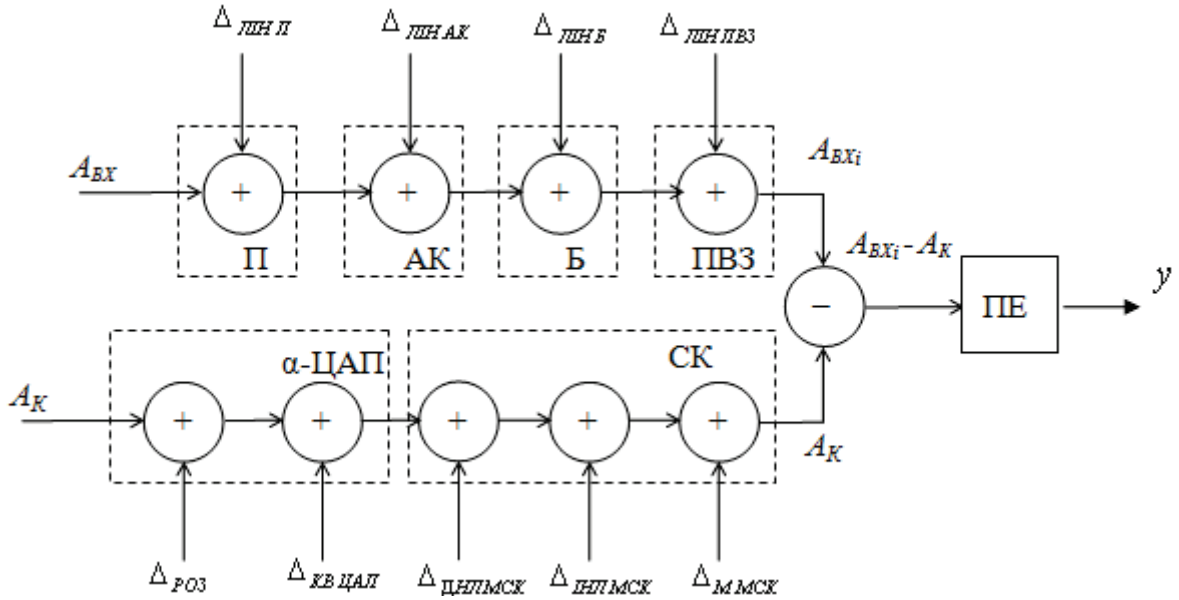


Рис. 4. Модель некоригованих складових похибок каналу АЦ-перетворення після проведення процедури самокалібрування

Таблиця 1.

Систематизація складових похибки перетворення АЦП порозрядного кодування, що самокалібрується

Кориговані похибки	Некориговані похибки	Частковокориговані похибки
1. Зміщення нуля: - П $\Delta_{0П}$; - АК $\Delta_{0АК}$ - Б $\Delta_{0Б}$; - ПВЗ $\Delta_{0ПВЗ}$; - СП $\Delta_{0СП}$; - α -ЦАП $\Delta_{0ЦАП}$. 2. Похибка диференційної лінійності α -ЦАП $\Delta_{ДНЛ}$. 3. Похибка масштабу самокалібрування $\Delta_{ММСК}$.	1. Похибки інтегральної лінійності: - П $\Delta_{ЛНП}$ - Б $\Delta_{ЛНБ}$; - ПВЗ $\Delta_{ЛНПВЗ}$; - АК $\Delta_{ЛНАК}$ 2. Похибка квантування α -ЦАП $\Delta_{КВЦАП}$. 3. Похибка суперпозиції ваг розрядів $\Delta_{РОЗ}$. 4. Інтегральна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ІНЛМСК}$.	1. Похибка інтегральної лінійності α -ЦАП $\Delta_{ІНЛ}$. 2. Змінення коефіцієнта підсилення П $\Delta_{П}$. 3. Диференційна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ДНЛМСК}$.

Оскільки після проведення самокалібрування значна частина похибок скоригувалась, систему (1) можемо переписати як:

$$\begin{cases} A_{ВХi} = A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma ЛН} ; \\ A_K = K + K \cdot \Delta_{\Sigma СК} ; \\ A_{ВХi} - A_K = 0 ; \\ K_{ВИХ КАЛ} = K , \end{cases} \quad (5)$$

де $\Delta_{\Sigma СК}$ – похибка після проведення самокалібрування, що визначається як [11]:

$$\Delta_{\Sigma СК} = \sqrt{\Delta_{ДНЛМСК}^2 + \Delta_{ІНЛМСК}^2 + \Delta_{ММСК}^2 + \Delta_{КВЦАП}^2 + \Delta_{РОЗ}^2} ;$$

$\Delta_{\Sigma ЛН}$ – сумарна похибка лінійності:

$$\Delta_{\Sigma ЛН} = \sqrt{\Delta_{ЛНП}^2 + \Delta_{ЛНБ}^2 + \Delta_{ЛНПВЗ}^2 + \Delta_{ЛНАК}^2} .$$

Розв'язок системи (5) має вигляд:

$$K_{ВИХ} = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma ЛН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} .$$

Абсолютне значення похибки перетворення після проведення процедури самокалібрування АЦП можна визначити згідно (3) як:

$$\Delta K_{СК} = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma ЛН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} - A_{ВХ} = A_{ВХ} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} - 1 \right) + \frac{\Delta_{\Sigma ЛН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} .$$

Ефективність застосування процедури самокалібрування можна визначити як відношення абсолютної похибки перетворення, до та після застосування процедури самокалібрування:

$$E = \frac{\Delta K}{\Delta K_{СК}} = \frac{A_{ВХ} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} - 1 \right) + \frac{\Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП}}{A_{ВХ} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} - 1 \right) + \frac{\Delta_{\Sigma ЛИН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}}}$$

У табл. 2, 3 наведено результати комп'ютерного моделювання АЦП, що самокалібруються, на основі ПСЧВН з основою системи числення $\alpha=1,618$. Варто відзначити, що в даному випадку використовується процедура самокалібрування з осередненням на розгортках [13].

Таблиця 2.

Статистичні параметри похибки інтегральної лінійності (ІНЛ) АЦП з 1% допуском на елементу базу

Кількість розрядів $n_2(n_\alpha)$	Параметри	До самокалібрування	Після самокалібрування	E
16 (23)	M(ІНЛ)	104,37	1,11	93,716
	σ (ІНЛ)	54,37	0,29	183,81
14 (20)	M(ІНЛ)	24,18	0,91	26,49
	σ (ІНЛ)	29,76	0,38	76,91
12 (17)	M(ІНЛ)	8,14	0,95	8,54
	σ (ІНЛ)	5,79	0,32	17,96

Аналогічно зробимо аналіз похибок каналу ЦА-перетворення, використовуючи структурну схему, що представлена на рис. 5. Тут ПКС (α -ЦАП) – перетворювач код-струм, який по суті є головним компонентом ЦАП, СП – схема порівняння, ПВР – пристрій виділення різниці, ПЕ – пороговий елемент, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, БУ – блок управління, ГКС – генератор калібрувального сигналу, АК – аналоговий комутатор, ЦК – цифровий комутатор.

Таблиця 3.

Статистичні параметри похибки інтегральної лінійності АЦП з 5% допуском на елементу базу

Кількість розрядів $n_2(n_\alpha)$	Параметри	До самокалібрування	Після самокалібрування	E
16 (23)	M(ІНЛ)	357,32	1,45	244,89
	σ (ІНЛ)	246,01	0,43	569,21
14 (20)	M(ІНЛ)	89,69	1,09	81,56
	σ (ІНЛ)	66,34	0,29	221,82
12 (18)	M(ІНЛ)	24,65	1,21	20,48
	σ (ІНЛ)	14,36	0,41	34,33

Залежно від призначення пристрою, в якому реалізовано канал ЦА-перетворення, він може містити також перетворювач струм-напруга (ПСН), що вносить додаткові похибки.

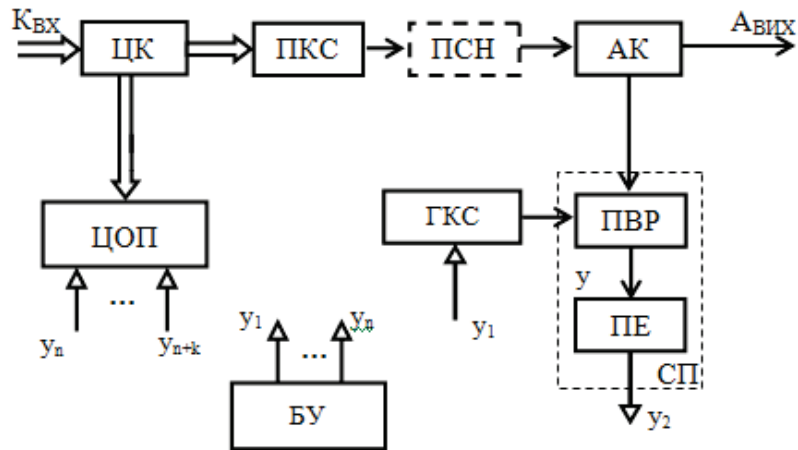


Рис. 5. Структурна схема каналу ЦА-перетворення

Похибки аналогових вузлів у каналі ЦА-перетворення:

1. Температурний дрейф зміщення нуля: перетворювача струм-напруга $\Delta_{0П}$, аналогового комутатора $\Delta_{0АК}$, буфера $\Delta_{0Б}$, перетворювача струм-напруга $\Delta_{0ПСН}$.
2. Похибки інтегральної $\Delta_{ІНІ}$, диференційної $\Delta_{ДНІ}$ лінійності, зміщення нуля $\Delta_{0ЦАП}$ та квантування $\Delta_{КВЦАП}$ ПКС (α -ЦАП);
3. Похибки лінійності характеристики перетворення: перетворювача струм-напруга $\Delta_{ЛНПСН}$, аналогового комутатора $\Delta_{ЛНАК}$, буфера $\Delta_{ЛНБ}$.

Модель складових похибок каналу ЦА-перетворення представлена на рис. 6.

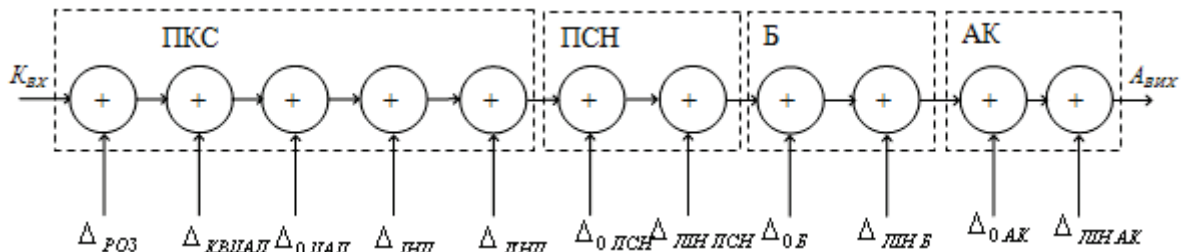


Рис. 6. Модель складових похибок наскрізного каналу ЦА-перетворення

На виході каналу ЦА-перетворення сигнал $A_{ВИХ}$ містить похибки усіх аналогових вузлів каналу. При цьому значення $A_{ВИХ}$ можна представити як:

$$A_{ВИХ} = A_{ВИХ id} + \Delta_{\Sigma},$$

де $A_{ВИХ id}$ – це аналоговий еквівалент вхідного цифрового сигналу при відсутності похибок у каналі перетворення, Δ_{Σ} – загальна похибка наскрізного каналу ЦА-перетворення, яку можна оцінити як [11]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\Sigma ПКС}^2 + \Delta_{\Sigma АК}^2 + \Delta_{\Sigma Б}^2 + \Delta_{\Sigma ПСН}^2},$$

де $\Delta_{\Sigma ПКС}$ – загальна похибка перетворювача код-струм, причому:

$$\Delta_{\Sigma ПКС} = \sqrt{\Delta_{КВЦАП}^2 + \Delta_{0ЦАП}^2 + \Delta_{ІНІ}^2 + \Delta_{ДНІ}^2 + \Delta_{РОЗ}^2};$$

$$\Delta_{\Sigma АК} - \text{загальна похибка аналогового комутатора, причому: } \Delta_{\Sigma АК} = \sqrt{\Delta_{0АК}^2 + \Delta_{ЛНАК}^2};$$

$\Delta_{\Sigma Б}$ – загальна похибка буфера, причому: $\Delta_{\Sigma Б} = \sqrt{\Delta_{0Б}^2 + \Delta_{ЛНБ}^2}$;

$\Delta_{\Sigma ПСН}$ – загальна похибка перетворювача струм-напруга, причому: $\Delta_{\Sigma ПСН} = \sqrt{\Delta_{0ПСН}^2 + \Delta_{ЛНПСН}^2}$.

Для коригування характеристики перетворення наскрізного ЦА каналу також можна використовувати процедури цифрового самокалібрування. Так, модель складових похибок каналу ЦА-перетворення після проведення самокалібрування можна зобразити так, як показано на рис. 7.

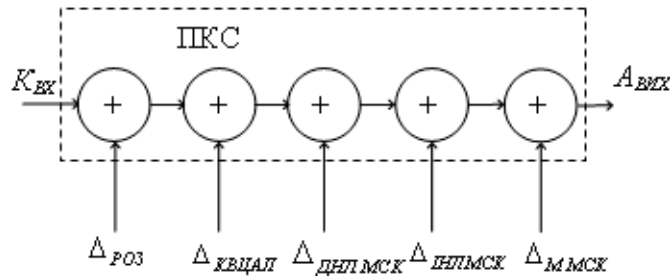


Рис. 7. Модель некоригованих складових похибок каналу ЦА-перетворення після проведення процедури самокалібрування

Таким чином, на виході каналу ЦА-перетворення після проведення процедури самокалібрування маємо аналоговий сигнал $A_{ВХ}$ такий, що:

$$A_{ВХ} = A_{ВХ id} + \Delta_{\Sigma СК} \cdot$$

Таблиця 4.

Систематизація складових похибки перетворення ЦАП паралельної дії, що самокалібруються

Кориговані похибки	Некориговані похибки	Частково кориговані похибки
1. Зміщення нуля: - ПСН $\Delta_{0ПСН}$; - АК $\Delta_{0АК}$ - Б $\Delta_{0Б}$; - α -ЦАП $\Delta_{0ЦАП}$. 2. Похибка диференційної лінійності ПКС $\Delta_{ДНЛ}$. 3. Похибка масштабу самокалібрування $\Delta_{ММСК}$.	1. Похибки інтегральної лінійності: - ПСН $\Delta_{ЛНПСН}$ - Б $\Delta_{ЛНБ}$; - АК $\Delta_{ЛНАК}$. 2. Похибка квантування ПКС $\Delta_{КВЦАП}$. 3. Похибка суперпозиції ваг розрядів $\Delta_{РОЗ}$. 4. Інтегральна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ІНЛМСК}$.	1. Похибка інтегральної лінійності ПКС(ЦАП) $\Delta_{ІНЛ}$. 2. Диференційна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ДНЛМСК}$.

На основі аналізу моделі складових похибок наскрізного каналу ЦА-перетворення та моделі складових некоригованих похибок каналу ЦА-перетворення після проведення процедури самокалібрування будується зведена таблиця (див. табл. 4) похибок ЦАП паралельної дії, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз складових похибок багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Визначено кориговані, частково кориговані та некориговані складові похибок каналів перетворення.

2. Оцінено значення коригованих і некоригованих похибок багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Показано, що незважаючи на значні допуски параметрів аналогових вузлів, підсумкова похибка перетворення АЦП послідовного наближення, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю має досить мале значення (на рівні молодших квантів).

3. Проаналізовано ефективність процедур самокалібрування. Доведено, що застосування процедур цифрового самокалібрування з осередненням на розгортках дає змогу істотно (на 2-3 порядки) зменшити підсумкову похибку перетворення АЦП послідовного наближення на основі ПСЧВН, порівняно з похибками елементної бази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / [пер. с англ. Володина Е.Б.]. – М.: «Техносфера», 2007. – 1019..
2. ДСТУ 3636-98. (ГОСТ 30606-98) Перетворювачі цифрового коду у напругу або струм вимірювальні. Основні параметри. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань / П. Ключан, Т. Гончарук, Л. Леженко. – Введ. 14. 05. 99. – 9 с.
3. ДСТУ 3744-98. (ГОСТ 30605-98) Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні умови / П.С.Ключан, Л.В. Бібік, Т.І. Гончарук, В.Н. Лаврентьев. – Введ. 14. 05. 99. – 11 с.
4. High Speed, High Accuracy, 14-Bit, 16-Bit, and 18-Bit PulSAR ADCs / Analog Devices [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/PulSAR.pdf>.
5. Азаров О. Д. Характеристика перетворення порозрядного АЦП, що самокалібрується, побудованого на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю / О.Д. Азаров, О.В. Кадук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007.– №3. С. 8 – 18.
6. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.
7. Крупельницький Л.В., Азаров О.Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : [Монографія] / Ред.: О.Д. Азаров — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 166 с.
8. Грушвицкий Р.И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р.И. Грушвицкий, А.Х.Мурсаев, В.Б.Смолов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с.
9. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжений / Под ред. В.Б. Смолова, Н.А. Смирнова. – Л.: Энергия, 1967.-312с.
10. Сотсков Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б. С. Сотсков. – М.: «Высшая школа», 1970. – 270 с.
11. Орнатский Е. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / Е. П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1976.
12. Азаров О.Д. Похибки квантування в АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага, О. В. Кадук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. –N 3. –С. 67-73.
13. Азаров О.Д. Стратегії самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – N 1. – С. 102-110.
14. Захарченко С.М., Азаров О.Д., Харьков О.М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення. : [Монографія] / С.М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 235 с.
15. Азаров О.Д. Методичні похибки самокалібрування АЦП послідовного наближення із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008.– №5. С. 12 – 17.

Надійшла до редакції 27.05.2009р.

АЗАРОВ ОЛЕКСІЙ ДМИТРОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

КАДУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – асистент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ДУДНИК ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ – магістрант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.