

АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.3:621.375

С.М. Захарченко, А.В. Росощук, М.Г. Захарченко
Вінницький національний технічний університет

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЛІНІЙНОСТІ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ

© Захарченко С.М., Росощук А.В., Захарченко М.Г., 2014

Запропоновано метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення. Він дає змогу шляхом моніторингу вихідного коду перетворювача контролювати факт погіршення лінійності перетворювача. За допомогою цього методу можна не тільки зафіксувати спотворення характеристики перетворення, а й в окремих випадках оцінити значення відхилень ваг розрядів, що призвели до нього. Знайдено похибки визначення відхилень для різних зон та кількості “невикористаних” комбінацій в одиницях молодшого розряду.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, зони “використаних” та “невикористаних” комбінацій, похибка лінійності, відхилення ваг розрядів АЦП.

The method of operational control successive approximation ADC linearity is proposed in this paper. It allows to control fact worsening linearity of the converter by monitoring the source code of the converter. Using this method can not only traces the distortion characteristics of transformation, and in some cases evaluates the value of the deviation of weight bits that led to it. Errors of determination variances for different zones and the number of “unused” combinations in units of LSB were found. There is a possibility to control a larger number of senior levels for ADCs with greater resolution, but considerably mathematical calculations will become more complicated.

Key words: ADC, zones of “used” and “unused” combinations, linearity error, deviation of weights bits ADC.

Вступ

Однією з основних причин погіршення точності АЦП є відхилення ваг розрядів внаслідок зміни температури, старіння тощо. Зміни ваг розрядів призводять до появи похибки лінійності, масштабу і нуля. Більшість методів коригування згаданих похибок передбачають використання додаткового обладнання та додаткових витрат часу на здійснення цієї процедури. Так, для коригування похибок масштабу система повинна містити джерело еталонної напруги або струму. Водночас у більшості застосувань, наприклад, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів, достатньо забезпечити коригування тільки похибок лінійності [1].

Для АЦП найпопулярнішим правилом визначення інтегральної похибки лінійності є проведення прямої лінії через середні точки кодів (центри кодів). Існують два способи вибору прямої лінії: через кінцеві точки чи, як краще (середня), пряма лінія [2].

Як альтернативні підходи до визначення інтегральної похибки лінійності автори [3] пропонують використовувати визначення та видалення зовнішніх похибок для точного визначення

лінійності АЦП; у [4–5] пропонується використовувати синусоїди малої спектральної частоти, а в [6] автори наводять просту схему генератора експоненційних сигналів для тестування інтегральної та диференційної похибок лінійності. У [7] описується використання тестування АЦП на основі швидкого перетворення Фур'є. Існуючі методи контролю лінійності передбачають використання для цього окремого режиму, а тому питання створення методу, що здійснює процедуру контролю у режимі основного функціонування, є актуальним.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення методу оперативного контролю відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення за рахунок застосування вагової надлишковості з подальшим коригуванням похибки лінійності перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати характеристику перетворення (ХП) АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.
2. Визначити зони “невикористаних” комбінацій.
3. Дослідити процес переходу комбінації із зони “невикористаних” комбінацій в зону “використаних”, і навпаки.
4. Отримати математичні співвідношення для визначення відхилень ваг розрядів на основі аналізу зон “невикористаних” комбінацій.

Аналіз характеристики перетворення АЦП з ваговою надлишковістю

Основною статичною характеристикою АЦП є характеристика перетворення (ХП) – залежність між значенням аналогового сигналу на вході і множиною можливих значень вихідного коду. Розрізняють номінальну (ідеальну) ХП та дійсну (реальну) ХП. Номінальну ХП чотирирозрядного АЦП показано на рис. 1, а. У цьому випадку вона утворюється 16-ма точками. У загальному випадку кількість точок ХП визначається розрядністю перетворювача n і становить 2^n . Для ідентифікації точок ХП використовуватимемо поняття номера кодової комбінації, який визначається виразом

$$s = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i, \text{ де } a_i \in \{0,1\}. \quad (1)$$

Під час використання двійкової системи числення точки номінальної ХП розташовані на прямій лінії, що дає змогу однозначно визначити відповідність між вхідним аналоговим сигналом і вихідним кодом. Використовуючи вагову надлишковість (ВН) (основа системи числення $\alpha < 2$), характер ХП змінюється, зокрема, з'являються так звані зони багатозначного представлення. Так, за $\alpha = 1,618$ вхідному аналоговому сигналу $A_{вх1}$ відповідають дві вихідні комбінації: 0011 (3) та 0100 (4) (рис. 1, а). Отже, виникає питання, яка з зазначених комбінацій з'явиться на виході перетворювача. Для ідеального АЦП відповідь на це питання визначається виключно типом алгоритму перетворення.

Принцип функціонування АЦП послідовного наближення передбачає послідовне визначення розрядів вихідного коду, починаючи з найстаршого. Тобто під час застосування ВН за наявності кількох варіантів вихідного коду для певного значення вхідного сигналу буде вибрана комбінація з більшим номером і ХП набуває вигляду, як показано на рис. 1, б.

Отже, під час застосування ВН у вихідному коді будуть відсутні певні комбінації, в подальшому називатимемо їх “невикористаними”, а всі інші – “використаними”. Для наведеного прикладу невикористаних комбінацій 4: 0011 (3), 0110 (6), 0111 (7) та 1011 (11). Кількість “використаних” комбінацій залежить від розрядності перетворювача та основи системи числення.

Комбінація буде “невикористаною” за умови, що існує “використана” комбінація вихідного коду з більшим порядковим номером та меншим значенням аналогового сигналу:

$$A(K_{\epsilon}^l) \leq A(K_H^k), \quad (2)$$

де $A(K_H^k)$ та $A(K_{\epsilon}^l)$ – значення вхідного аналогового сигналу, що відповідає невикористаній кодовій комбінації з номером k , та використаній кодовій комбінації з номером l , відповідно, причому $l > k$. Наприклад, “невикористана” комбінація номер 6 та “використана” комбінація номер 8 на рис. 1 утворюють пару кодових комбінацій, для яких виконується умова (2). Аналогічні пари утворюють комбінації з номерами 3 та 4, 7 та 9, 11 та 12.

“Невикористані” комбінації утворюють групи, які називають зонами “невикористаних” комбінацій [7]. Центральна зона називається зоною (n-1)-го рівня. Зона (n-2)-го рівня складається з двох підзон, розташованих симетрично до зони (n-1)-го рівня і т.д. Кожна зона містить одну або більше послідовних кодових комбінацій, причому номер найбільшої з них (верхній кордон) є фіксованим і не залежить від системи числення. Для зони (n-1)-го рівня номер комбінації верхнього кордону дорівнюватиме $(2^{n-1} - 1)$; для підзон (n-2)-го рівня – $(2^{n-2} - 1)$ та $(2^{n-2} + 2^{n-1} - 1)$ і т.д. Нижній кордон зони невикористаних комбінацій (комбінація з найменшим номером) залежить від основи системи числення. За збільшення останньої він зсувається догори, що в решті-решт призводить до зникнення зони [7].

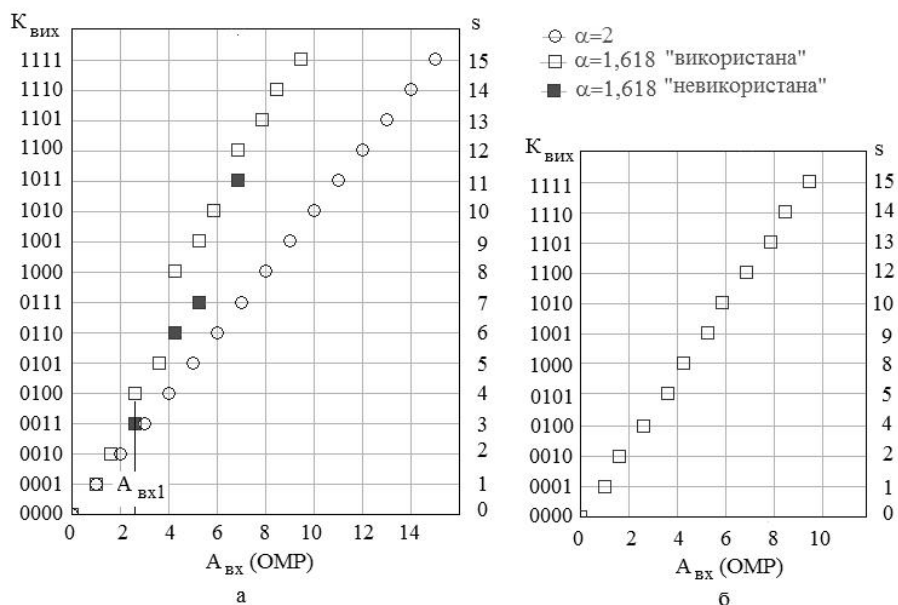


Рис. 1. ХП 4-розрядного АЦП порозрядного наближення:
а – для $\alpha=1,618$ та $\alpha=2$; б – для $\alpha=1,618$ без “невикористаних” комбінацій

За відсутності відхилень ваг розрядів перелік “невикористаних” комбінацій є чітко визначеним [8]. Поява відхилень ваг розрядів призводить до зміни переліку “невикористаних” комбінацій. Якщо внести додатне відхилення, наприклад, до старшого розряду, то зона (n-1)-го рівня звужується (кількість “невикористаних” комбінацій зменшується). Якщо ж вносити, наприклад, від’ємне відхилення до старшого розряду, то зона (n-1)-го рівня розширюється (кількість “невикористаних” комбінацій збільшується). В той самий час відхилення ваги старшого розряду ніяк не впливає на зони молодших рівнів. Неважко також показати, що кількість “невикористаних” комбінацій у кожній із підзон однієї зони

буде однаковою, тому з метою визначення відхилення в k -му розряді достатньо проаналізувати склад однієї підзони зони k -го рівня.

Отже, метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю передбачає аналіз змін у зонах “невикористаних” комбінацій у процесі основного перетворення, що свідчить про появу відхилень в окремих розрядах перетворювача. Обов’язковою умовою контролю відхилень k -го розряду є наявність зони k -го рівня, наприклад, для $(n-1)$ -го розряду – $(n-1)$ -ї зони і т.д.

Опис методу

Розглянемо характеристику перетворення 5-розрядного АЦП послідовного наближення з $\alpha=1,7$ (рис. 2). У цьому випадку контролювати можна два старші розряди, оскільки маємо лише зони $(n-1)$ -го та $(n-2)$ -го рівня.

Розташування будь-якої точки на ХП визначатиметься виразом

$$A(K^s) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot Q_i, \quad (3)$$

де K – кодова комбінація; s – номер кодової комбінації; $Q_i = a^i(1+d_i)$ – значення ваги i -го розряду, де a – основа системи числення; d_i – значення відхилення i -го розряду; $a_i \in \{0,1\}$ – відповідні двійкові розряди коду K .

У 5-розрядному АЦП з $\alpha=1,7$, за відсутності відхилень ваг розрядів ($d_i=0$), для зони $(n-1)$ -го рівня буде правильним рівняння:

$$A(K_B^{12}) < A(K_B^{16}) \leq A(K_H^{13}). \quad (4)$$

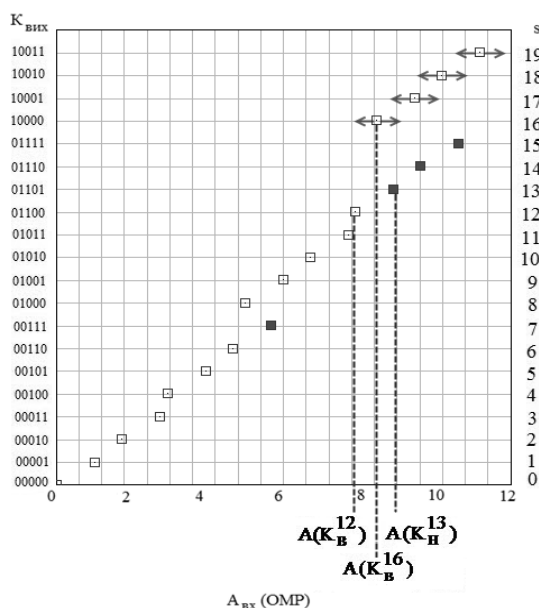


Рис. 2. Фрагмент характеристики перетворення 5-розрядного АЦП із основою системи числення $\alpha=1,7$

Тобто у центральній зоні буде три “невикористані” комбінації з номерами 13, 14, 15. За появи відхилень ця ситуація змінюватиметься. Якщо внаслідок відхилень ваг розрядів вираз (4) набуде вигляду

$$A(K_B^{11}) < A(K_B^{16}) \leq A(K_H^{12}), \quad (5)$$

то “невикористаних” комбінацій буде вже чотири за рахунок переходу комбінації з номером 12 в групу “невикористаних”.

Аналогічно, якщо вираз (4) зміниться на

$$A(K_{\epsilon}^{13}) < A(K_{\epsilon}^{16}) \leq A(K_{\eta}^{14}), \quad (6)$$

то “невикористаних” комбінацій буде дві.

Неважко зрозуміти, що для розрахунку граничних значень відхилень, за яких відбувається зміна кількості “невикористаних” комбінацій, потрібно розв’язати рівняння

$$A(K_{\epsilon}^l) = A(K_{\eta}^m) \text{ та } A(K_{\epsilon}^l) = A(K_{\epsilon}^{m-1}), \quad (7)$$

де l – номер “використаної” комбінації, що є наступною за “невикористаною” комбінацією з найбільшим номером; m – номер “невикористаної” комбінації, що знаходиться на нижньому кордоні між “використаними” і “невикористаними” комбінаціями.

Для розрахунку значень відхилень, що призведуть до зміни кількості “невикористаних” комбінацій в зоні $(n-1)$ -го рівня, підставимо нерівність (4) у рівняння (3):

$$a^3(1+d_3) + a^2 < a^4(1+d_4) \leq a^3(1+d_3) + a^2 + a^0. \quad (8)$$

Скориставшись рівняннями 7, отримаємо:

$$a^4(1+d_4) = a^3(1+d_3) + a^2; \quad (9)$$

$$a^4(1+d_4) = a^3(1+d_3) + a^2 + a^0. \quad (10)$$

Нижня підзона зони $(n-2)$ -го рівня в цьому випадку описується такою нерівністю:

$$A(K_{\eta}^6) < A(K_{\epsilon}^8) \leq A(K_{\eta}^7). \quad (11)$$

Тоді, використавши рівняння (3), отримаємо:

$$a^2 + a^1 < a^3(1+d_3) \leq a^2 + a^1 + a^0; \quad (12)$$

$$a^3(1+d_3) = a^2 + a^1; \quad (13)$$

$$a^3(1+d_3) = a^2 + a^1 + a^0. \quad (14)$$

Графічною інтерпретацією рівнянь (9)–(10) та (13)–(14) є прямі лінії z_{34}^{n-1} , z_{23}^{n-1} , z_{01}^{n-2} , z_{12}^{n-2} , при перетині яких утвориться паралелограм (рис. 3). Координати вершини А, що знаходяться на перетині z_{34}^{n-1} та z_{12}^{n-2} , визначатимуться як

$$\begin{cases} a^4(1+d_4) = a^3(1+d_3) + a^2, \\ a^3(1+d_3) = a^2 + a^1, \end{cases} \quad (15)$$

звідки

$$d_{4A} = \frac{2a^2 + a^1 - a^4}{a^4}, \quad d_{3A} = \frac{a^2 + a^1 - a^3}{a^3}.$$

Аналогічно знаходять координати інших вершин паралелограма. Очевидно, що у випадку, коли комбінація відхилень δ_3 та δ_4 знаходиться у межах паралелограма ABCD в зоні $(n-1)$ -го рівня буде три “невикористані” комбінації, а в зоні $(n-2)$ -го рівня – одна. Отже, маючи дані про кількість невикористаних комбінацій, можна оцінити відхилення ваг відповідних розрядів.

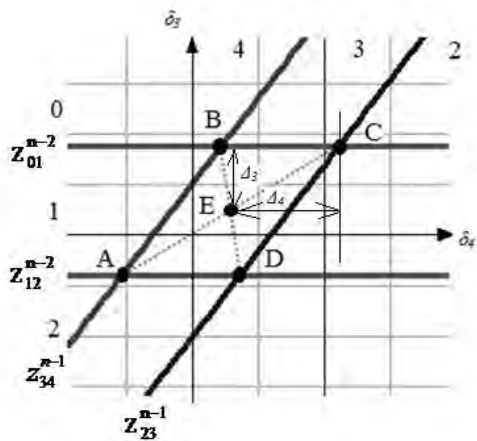


Рис. 3. Графік залежності відхилення від кількості невикористаних комбінацій

Для мінімізації похибки визначення δ_3 та δ_4 необхідно знайти точку, яка є рівновіддаленою від прямих z_{34}^{n-1} , z_{23}^{n-1} та z_{12}^{n-2} , z_{01}^{n-2} . У цьому випадку це є точка E. Ця точка є серединою діагоналей AC та BD, а тому її координати, а, відповідно, й середнє значення відхилень для певної кількості “невикористаних” комбінацій можна знайти за допомогою відомих рівнянь для визначення координат середини відрізка. Візьмемо діагональ AC, де $A(\delta_{4A}, \delta_{3A})$ та $C(\delta_{4C}, \delta_{3C})$, тоді координати точки E:

$$d_{4E} = \frac{d_{4A} + d_{4C}}{2} = \frac{2a^2 + a^1 - a^4 + 1}{a^4}; \quad (16)$$

$$d_{3E} = \frac{d_{3A} + d_{3C}}{2} = \frac{2a^2 + 2a^1 - 2a^3 + 1}{a^3}. \quad (17)$$

Враховуючи рис. 3, де Δ_4 – різниця між координатами δ_4 точок C та E або половина різниці між координатами δ_4 точок C та A. Аналогічно Δ_3 – це різниця між координатами δ_3 точок B(C) та E:

$$\Delta_4 = d_{4C} - d_{4E}; \quad (18)$$

$$\Delta_3 = d_{3B} - d_{3E}. \quad (19)$$

На рис. 4 показано графік δ_4 та δ_3 для різної кількості “невикористаних” комбінацій.

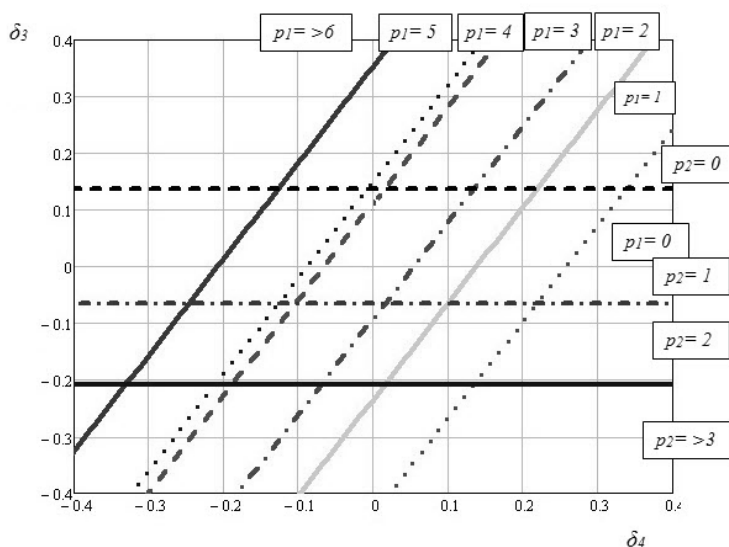


Рис. 4. Графік залежності відхилення від кількості “невикористаних” комбінацій

Проаналізувавши графік та використавши формули (15)–(16), можна записати значення відхилень у таблицю відповідності між зонами, кількістю точок та значеннями відхилень (табл. 2).

Таблиця 1

Оцінка відхилень ваг двох старших розрядів перетворювача за результатами аналізу кількості “невикористаних” комбінацій

n-1	5	4	3	2	1
n-2					
2	$\delta_4=-0,23$ $\delta_3=-0,135$	$\delta_4=-0,16$ $\delta_3=-0,135$	$\delta_4=-0,09$ $\delta_3=-0,135$	$\delta_4=0,02$ $\delta_3=-0,135$	$\delta_4=0,12$ $\delta_3=-0,135$
1	$\delta_4=-0,13$ $\delta_3=0,04$	$\delta_4=-0,06$ $\delta_3=0,04$	$\delta_4=0,02$ $\delta_3=0,04$	$\delta_4=0,07$ $\delta_3=0,04$	$\delta_4=0,22$ $\delta_3=0,04$

У табл. 2 наведено похибки визначення відхилень для різних зон та кількості “невикористаних” комбінацій в одиницях молодшого розряду, які були знайдені за допомогою формул (18) та (19).

Таблиця 2

Оцінка похибки визначення відхилень ваг двох старших розрядів перетворювача в одиницях молодшого розряду

n-1	5	4	3	2	1
n-2					
2	$\Delta_4=0,84$ $\Delta_3=0,34$	$\Delta_4=1,25$ $\Delta_3=0,34$	$\Delta_4=0,92$ $\Delta_3=0,34$	$\Delta_4=0,67$ $\Delta_3=0,34$	$\Delta_4=0,84$ $\Delta_3=0,34$
1	$\Delta_4=1,002$ $\Delta_3=0,48$	$\Delta_4=0,67$ $\Delta_3=0,48$	$\Delta_4=0,92$ $\Delta_3=0,48$	$\Delta_4=1,25$ $\Delta_3=0,48$	$\Delta_4=1,002$ $\Delta_3=0,48$

Для АЦП з більшою розрядністю, а, відповідно, і з більшою кількістю зон “невикористаних” комбінацій буде можливість контролювати більшу кількість старших розрядів, але математичні обчислення істотно ускладняться.

Висновки

Показано, що в характеристиці перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю зустрічаються не усі кодові комбінації, причому кількість і розташування “невикористаних” комбінацій визначається основою системи числення, розрядністю перетворювача та відхиленнями ваг розрядів.

Доведено, що за появи похибок лінійності внаслідок відхилень ваг розрядів від своїх номіналів, спостерігається перехід кодових комбінацій з категорії “використаних” у категорію “невикористаних”, і навпаки, що дає змогу за допомогою моніторингу вихідного коду перетворювача контролювати факт погіршення лінійності перетворювача.

Показано, що запропонований метод може не тільки зафіксувати спотворення характеристики перетворення, а й в окремих випадках оцінити значення відхилень ваг розрядів, що призвели до цього. Причому похибка оцінки здебільшого не перебільшує одиниці молодшого розряду.

1. Азаров О.Д. Методи побудови АЦП порозрядного наближення, що самокалібруються / О.Д. Азаров, О.В. Кадук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – №1. – С. 56 – 66. 2. WaltKesler Analog-digital conversion/ WaltKesler. – ADI CentralApplicationDepartmentMarch 2004. – 1127 p. 3. L. Jin, K. Parthasarathy, T. Kuyeleetal, “AccurateTestingof Analog-to-Digital Converters Using Low Linearity Signals With Stimulus Error Identificationand Removal,” *IEEE Trans. InstrumMeas.*, vol. 54, pp. 1188 – 1199, June 2005. 4. Korhonen E., Kostamovaara J. “AnImproved Algorithmto Identifythe Test Stimulusin Histogram-Based

A/D Converter Testing” *IEEE European Test*, pp. 149–154, 25–29 May 2008. 5. Jin L., He C., Chen D., Geiger R. “An So Ccompatible linearity test approach for precision ADCs using easy-to-generate sinusoidal stimuli” *IEEE Int. Symp. on Ckts and Sys. ISCAS*, vol.1, no., pp. 1- 928-3. – Vol. 1, 23–26 May 2004. 6. Saliga J., Michaeli L., Sakmar M., Busa J. “Processing of bidirectional exponential stimulus in ADC testing” *Measurement, Volume 43, Issue 8, IMEKO XIX World Congress Part 2 – Advances in Measurement of Electrical Quantities, October 2010* – P. 1061–1068. 7. Росоцук А.В. Метод визначення основи системи числення надлишкового АЦП за аналізом кодувальної характеристики / С.М. Захарченко, О.В. Бойко, А.В. Росоцук // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*: зб. наук. пр. – Донецьк: ДНТУ, 2012. – № 15. – С. 35–39. 8. Захарченко С.М., Захарченко М.Г., Бойко О.В. Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю // *Вісник ВПІ.–2011.– № 4. – С. 143–149 с.*

УДК 621.375.024

О.Д. Азаров, О.І. Черняк

Вінницький національний технічний університет

АВТОМАТИЧНЕ КАЛІБРУВАННЯ ЛІНІЙНОСТІ АЦП З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Ї Азаров О.Д., Черняк О.І., 2014

Описано метод та структурну організацію автоматичного калібрування лінійності АЦП з ваговою надлишковістю на основі побітової арифметики.

Ключові слова: АЦП, самокалібрування, побітова арифметика, золота 1-пропорція.

The bit-serial arithmetic based method and structure organization of automatic linearity calibration for ADC with weight redundancy are described in this article. The calibration characteristics of ADC with order-by-order indemnification are used for defining the accuracy of an analog-to-digital signal conversion. This method was developed for ADC with self-calibration which works in gold 1-proportion numerical system. The method is based on comparison of results of two ADC, which converts the same signal. Various pipeline bit-serial arithmetic devices in this numerical system were developed by the authors, which was described in scientific publications and can be used for calculation of linearity deviation in such way.

Key words: DAC, self-calibration, bit-serial arithmetic, gold 1-proportion.

Вступ

Для забезпечення точності перетворення сигналів АЦП порозрядного врівноваження застосовується калібрування їх характеристик [1]. АЦП з самокалібруванням будуються на основі систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН) [2, 3], найвідомішою з яких є система числення золотої 1-пропорції. Існують приклади використання АЦП золотої 1-пропорції, в яких необхідно коригувати лише лінійність характеристики перетворення [4]. Однак відомі методи не дають змогу визначати момент включення режиму самокалібрування та потребують призупинення аналого-цифрового перетворення сигналу на час самокалібрування. Ліквідація цих недоліків є актуальним завданням, що дає змогу автоматизувати процес калібрування пристроїв АЦП і виконувати його паралельно з їх роботою. Автори розробили методи і пристрої побітового потокового виконання усіх арифметичних операцій на основі системи числення золотої 1-пропорції [5, 6]. Ці пристрої можуть використовуватись для обчислення похибок лінійності розрядів АЦП за запропонованим методом.