

## МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЛІНІЙНОСТІ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ

© Захарченко С.М., Росоцук А.В., Захарченко М.Г.

У статті запропоновано метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення. Він дає змогу шляхом моніторингу вихідного коду перетворювача контролювати факт погіршення лінійності перетворювача. За допомогою даного методу можна не тільки зафіксувати спотворення характеристики перетворення, а і 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.

**Keywords** – 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 змінення температури, старіння тощо. Зміни ваг розрядів призводять до появи похибки лінійності, масштабу і нуля. Більшість методів коригування згаданих похибок передбачає 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 найбільш популярним правилом визначення інтегральної похибки лінійності є проведення прямої лінії через середні точки кодів (центри кодів). Існує два способи вибору прямої лінії: через кінцеві точки чи як краща (середня) пряма лінія [2].

У якості альтернативних підходів до визначення інтегральної похибки лінійності автори [3] пропонують використовувати визначення та видалення зовнішніх похибок для точного визначення лінійності АЦП, у [4]-[5] пропонують використовувати синусоїди малої спектральної частоти, автори [6] приводять просту схему генератора експоненційних сигналів для тестування інтегральної та диференційної похибок лінійності. В [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 в режимі основного функціонування, є актуальним.

## Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка 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 розв'язати такі задачі:

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 чотирьох розрядного АЦП показано на рис.1а. В даному випадку вона утворюється 16-тю точками. В загальному випадку кількість точок ХП визначається розрядністю перетворювача  $n$  і становить  $2^n$ . Для ідентифікації точок ХП будемо використовувати поняття номеру кодової комбінації, який визначається виразом:

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

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

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

Таким чином при застосуванні ВН у вихідному коді будуть відсутні певні комбінації, в подальшому будемо називати 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:

$$A(K_N^l) \leq A(K_N^k), \quad (2)$$

де  $A(K_N^k)$  та  $A(K_N^l)$  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 відносно 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 буде рівним  $(2^{n-1} - 1)$ ; 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. При збільшенні останньої він зсувається догори що в решті решт приводить до зникнення зони [7].

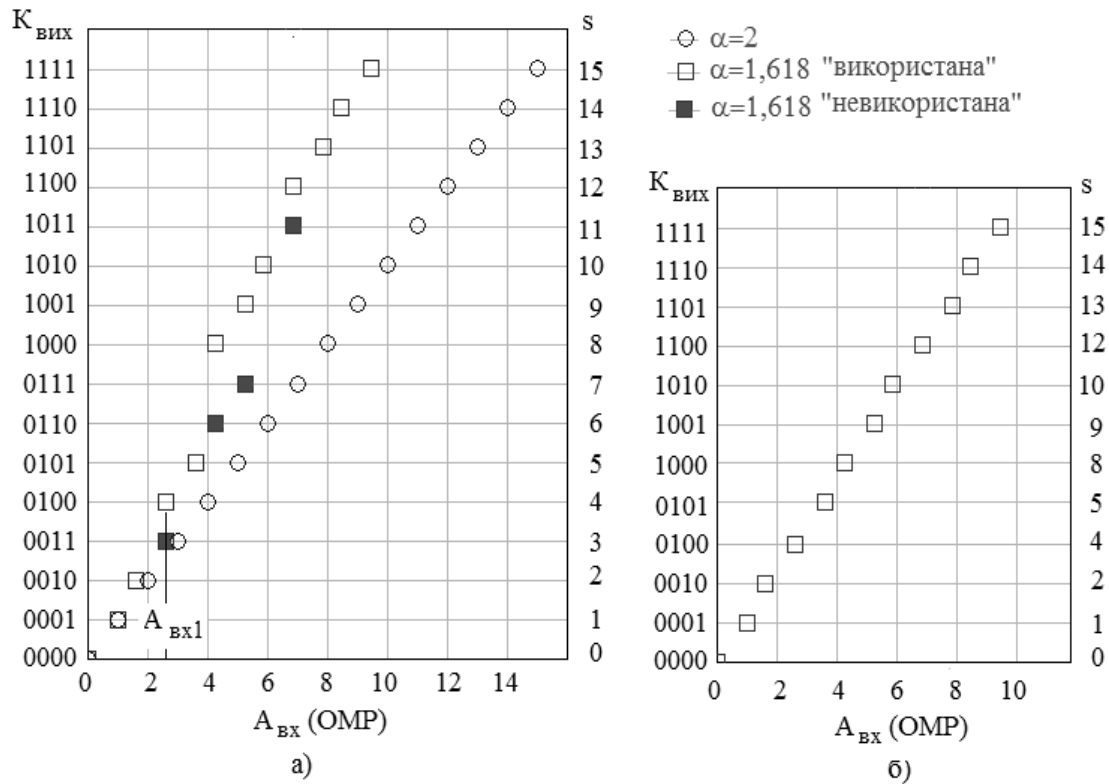


Рис.1 ХП 4-розрядного АЦП порозрядного наближення:

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 змінення 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 же час відхилення ваги старшого розряду ніяк не впливає на зони молодших рівнів. Незавжди також показати, що кількість «невикористаних» комбінацій в 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.

Таким чином метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю передбачає аналіз змін в зонах «невикористаних» комбінацій в 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). В даному випадку контролювати можна два старших розряди, оскільки маємо лише зони (n-1)-го та (n-2)-го рівня.

Розташування будь-якої точки на ХП буде визначатися виразом:

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

де  $K$  – кодова комбінація,  $s$  – номер кодової комбінації,  $Q_i = \alpha^i (1 + \delta_i)$ , – значення ваги  $i$ -го розряду, де  $\alpha$  – основа системи числення,  $\delta_i$  – 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 ( $\delta_i=0$ ), для зони (n-1)-го рівня буде вірним рівняння:

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

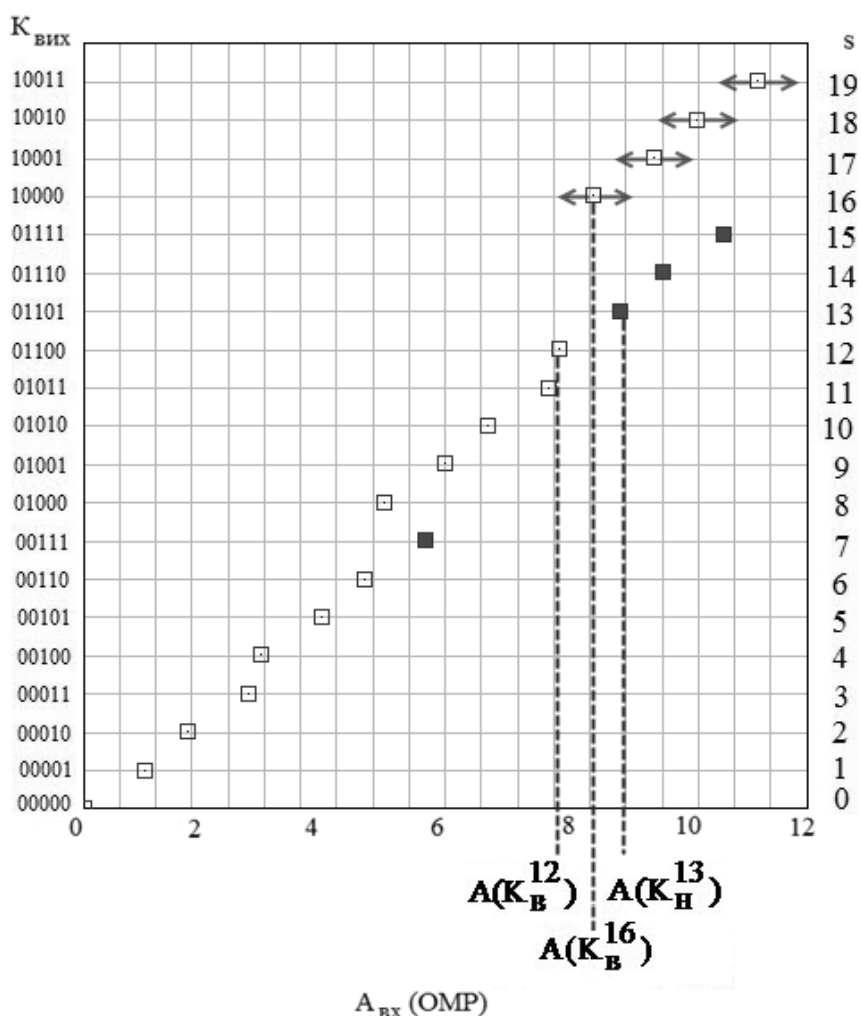


Рис. 2 Фрагмент характеристики перетворення 5-розрядного АЦП із основою системи числення  $\alpha=1,7$

Тобто у центральній зоні буде 3 «невикористаних» комбінації з номерами 13, 14, 15. За появи відхилень ця ситуація буде змінюватися. 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 побачити, що для розрахунку граничних значень відхилень, за яких відбувається зміна кількості «невикористаних» комбінацій слід 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 змінення кількості «невикористаних» комбінацій в зоні (n-1)-го рівня, підставимо в нерівність (4) рівняння (3):

$$\alpha^3(1 + \delta_3) + \alpha^2 < \alpha^4(1 + \delta_4) \leq \alpha^3(1 + \delta_3) + \alpha^2 + \alpha^0 \quad (8)$$

Скориставшись рівняннями 7 отримаємо:

$$\alpha^4(1 + \delta_4) = \alpha^3(1 + \delta_3) + \alpha^2, \quad (9)$$

$$\alpha^4(1 + \delta_4) = \alpha^3(1 + \delta_3) + \alpha^2 + \alpha^0. \quad (10)$$

Нижня підзона зони (n-2)-го рівня в даному випадку описується нерівністю:

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

Тоді, використавши рівняння (3), отримаємо

$$\alpha^2 + \alpha^1 < \alpha^3(1 + \delta_3) \leq \alpha^2 + \alpha^1 + \alpha^0, \quad (12)$$

$$\alpha^3(1 + \delta_3) = \alpha^2 + \alpha^1, \quad (13)$$

$$\alpha^3(1 + \delta_3) = \alpha^2 + \alpha^1 + \alpha^0. \quad (14)$$

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 (рисунок 3). Координати вершини А, що знаходиться на перетині  $z_{34}^{n-1}$  та  $z_{12}^{n-2}$  визначатимуться як

$$\begin{cases} \alpha^4(1 + \delta_4) = \alpha^3(1 + \delta_3) + \alpha^2; \\ \alpha^3(1 + \delta_3) = \alpha^2 + \alpha^1. \end{cases} \quad (15)$$

звідки

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

Аналогічно знаходяться координати інших вершин паралелограма. Очевидно, що у випадку, коли комбінація відхилень  $\delta_3$  та  $\delta_4$  знаходиться в межах паралелограму ABCD в зоні (n-1)-го рівня буде три «невикористаних» комбінацій, а в зоні (n-2)-го рівня – одна. Таким чином, маючи дані про кількість невикористаних комбінацій можна оцінити відхилення ваг відповідних розрядів.

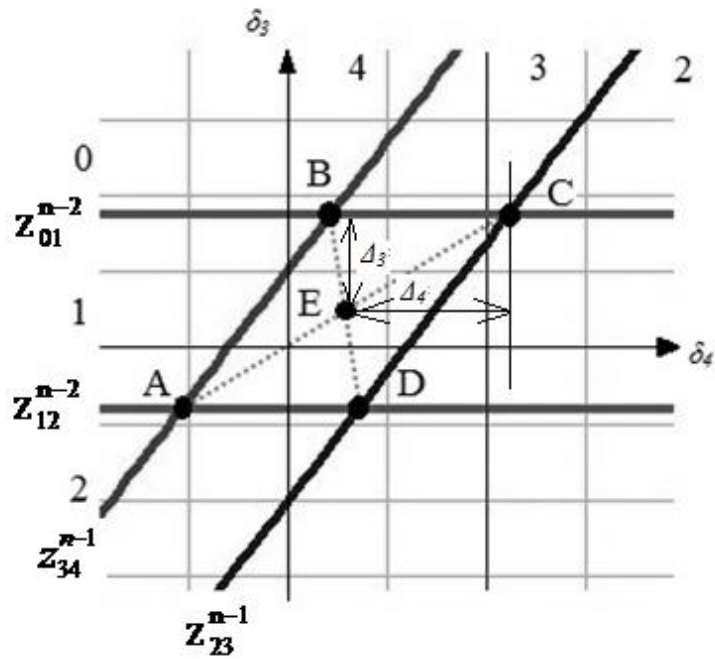


Рис. 3 Графік залежності відхилення від кількості невикористаних комбінацій

Для мінімізації похибки визначення  $\delta_3$  та  $\delta_4$  слід знайти точку, яка є рівновіддаленою від прямих  $z_{34}^{n-1}$ ,  $z_{23}^{n-1}$  та  $z_{12}^{n-2}$ ,  $z_{01}^{n-2}$ . В даному випадку це 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:

$$\delta_{4E} = \frac{\delta_{4A} + \delta_{4C}}{2} = \frac{2\alpha^2 + \alpha^1 - \alpha^4 + 1}{\alpha^4}. \quad (16)$$

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

Виходячи з рисунку 3,  $\Delta_4$  – це різниця між координатами  $\delta_4$  точок C та E або половина різниці між координатами  $\delta_4$  точок C та A. Аналогічно  $\Delta_3$  – це різниця між координатами  $\delta_3$  точок B(C) та E.

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

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

На рисунку 4 наведено графік  $\delta_4$  та  $\delta_3$  для різної кількості «невикористаних» комбінацій.

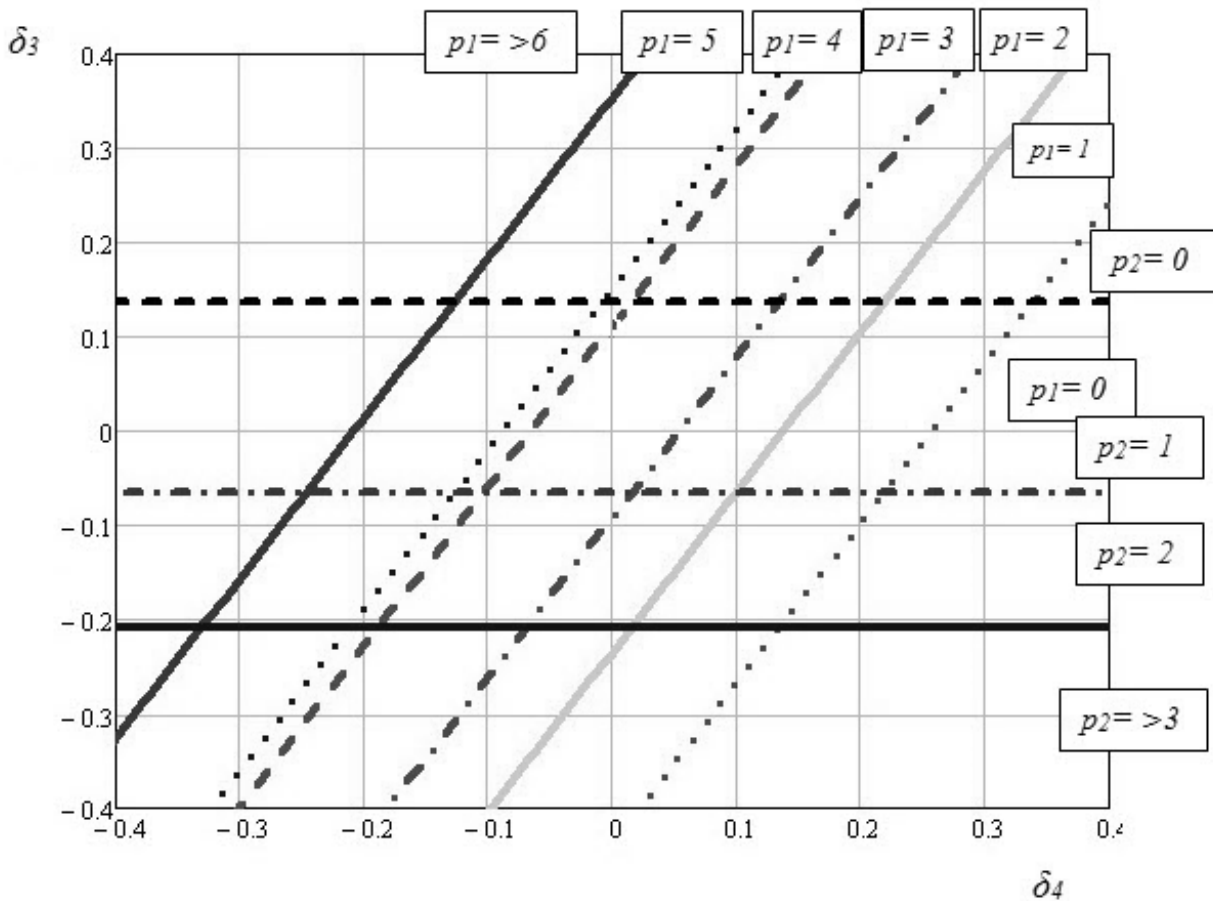


Рис. 4 Графік залежності відхилення від кількості «невикористаних» комбінацій

Проаналізувавши графік та використавши формули (15)-(16), можна записати значення відхилень в таблицю відповідності між зонами, кількістю точок та значеннями відхилень (Таблиця 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	$\delta_4 = -0,13$ $\delta_3 = 0,04$	$\delta_4 = -0,06$ $\delta_3 = 0,04$	$\delta_4 = 0,02$ $\delta_3 = 0,04$	$\delta_4 = 0,07$ $\delta_3 = 0,04$	$\delta_4 = 0,22$ $\delta_3 = 0,04$

В таблиці 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):

**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 суттєво ускладнюються.

### Висновки

Показано, що в характеристиці перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю зустрічаються не всі кодові комбінації, при чому кількість і розташування «невикористаних» комбінацій визначається основою системи числення, розрядністю перетворювача та відхиленнями ваг розрядів

Доведено, що в при появі похибок лінійності в наслідок відхилень ваг розрядів від своїх номіналів, спостерігається перехід кодових комбінацій з категорії «використаних» в категорію «невикористаних» і навпаки, що дає змогу шляхом моніторингу вихідного коду перетворювача контролювати факт погіршення лінійності перетворювача.

Показано, що запропонований метод дає змогу не тільки зафіксувати спотворення характеристики перетворення, а і в окремих випадках оцінити значення відхилень ваг розрядів, що призвели до нього. Причому похибка оцінки в більшості випадків 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. – ВНТУ: Вінниця, 2008. – №1. – С. 56 – 66.
2. Walt Kesler Analog-digital conversion/ Walt Kesler. – ADI Central Application Department March 2004. – 1127 p.
3. L. Jin, K. Parthasarathy, T. Kuyel et al, "Accurate Testing of Analog-to-Digital Converters Using Low Linearity Signals With Stimulus Error Identification and Removal," *IEEE Trans. Instrum Meas.*, vol. 54, pp. 1188 – 1199, June 2005.
4. E. Korhonen, J. Kostamovaara, "An Improved Algorithm to Identify the Test Stimulus in Histogram-Based A/D Converter Testing," *IEEE European Test*, pp.149-154, 25-29 May 2008.
5. L. Jin, C.He, D.Chen, R. Geiger, "An SoC compatible linearity test approach for precision ADCs using easy-to-generate sinusoidal stimuli," *IEEE Int. Symp. on Ckts and Sys .ISCAS* , vol.1, no., pp. I- 928-31 Vol.1, 23-26 May 2004.
6. J. Saliga, L.Michaeli, M.Sakmar, J.Busa," 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, Pages 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». Збірник наукових праць. – ДНТУ: Донецьк, 2012. – № 15. – С. 35-39.
8. С.М. Захарченко, М.Г. Захарченко, О.В. Бойко Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю. *Вісник ВПІ.*–2011.– №4 – 143 –149 с.