

УДК 681.5

С. М. ЗАХАРЧЕНКО, А. В. РОСОЩУК, Є. І. ЗЕЛЕНСЬКА, Р. С. ГУМЕНЮК

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПОДИНОКИХ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Анотація. У статті запропоновано метод оперативного виявлення поодиноких відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення, що побудований з використанням вагової надлишковості. Метод базується на аналізі характеристики перетворення АЦП в процесі основного перетворення. В основу методу покладено той факт, що при застосуванні вагової надлишковості множина вихідних кодових комбінацій АЦП буде обмеженою. Проаналізовано зв'язок між переліком можливих комбінацій на виході АЦП та відхиленнями ваг розрядів. Оцінено точність та обмеження методу.

Ключові слова: аналого-цифрове перетворення, вагова надлишковість, АЦП послідовного наближення, відхилення ваг розрядів АЦП

Анотация. В статье предложен метод оперативного обнаружения одиночных отклонений весов разрядов АЦП последовательного приближения, реализованный с использованием весовой избыточности. Метод основан на анализе характеристики преобразования АЦП в процессе основного преобразования. В основу метода положен тот факт, что при применении весовой избыточности множество выходных кодовых комбинаций АЦП будет ограниченным. Проанализирована связь между перечнем возможных выходных комбинаций АЦП и отклонениями весов разрядов. Оценена точность и ограничения метода.

Ключевые слова. Аналого-цифровое преобразование, весовая избыточность, АЦП последовательного приближения, отклонения весов разрядов АЦП.

Abstract. In this article we present a method for operational detection of a single bit's weight deviation for successive approximation ADC that is implemented using weight redundancy. The method is based on analysis of a coding scheme in the main coding process. The method relies on the fact that a set of code combinations of ADC will be limited when applying weight redundancy. A relation between the list of possible code combinations in the output of ADC and the bit deviation was analysed. The accuracy and restrictions of the method were evaluated.

Key words: Analog-to-digital conversion, weight redundancy, successive approximation ADC, deviation of ADC bit's weight

Вступ

АЦП послідовного наближення займають важливе місце серед пропозицій сучасних виробників. Це обумовлено компромісом між високою роздільною здатністю на рівні 16-18 двійкових розрядів та високою частотою дискретизації до 1 мільйона вибірок за секунду. В той же час, якщо розрядність перетворювача перебільшує 12-14 розрядів вплив зонішних чинників призводить до появи суттєвих відхилень ваг старших розрядів [1], що, в свою чергу, погіршує точнісні характеристики перетворювача. Одним із найпоширеніших методів подолання згаданої проблеми є застосування процедури калібрування АЦП [2]. Процедура калібрування виконується після включення пристрою та періодично в процесі роботи, причому АЦП може функціонувати або в режимі основного перетворення, або калібрування. Використання вагової надлишковості при побудові АЦП послідовного наближення дозволило виконувати процедуру калібрування виключно у цифровій формі без фізичного або електричного впливу на ваги розрядів [3]. Застосування методів самокалібрування передбачає вирішення таких задач, як фіксація моменту часу, коли необхідно провести чергове калібрування та організації фонових калібрувань (без переривання процесу основного перетворення). Одним із рішень, що дозволяє в комплексі вирішити обидві задачі є застосування так званої спліт архітектури при побудові АЦП [4]. Однак в даному випадку передбачається використання двох однакових АЦП, що як мінімум вдвічі збільшує апаратні витрати.

Актуальність

Актуальним є дослідження шляхів оперативної ідентифікації відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення виключно у цифровій формі без застосування додаткових аналогових блоків. Крім того актуальним є встановлення номеру розряду або розрядів, що змінили свої значення та попередня оцінка значень цих відхилень.

Мета

Метою статті є дослідження можливості оперативного виявлення поодиноких відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення, що побудований з використанням вагової надлишковості, шляхом аналізу характеристики перетворення АЦП.

Задачі

11. Проаналізувати характеристику перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.
12. Дослідити вплив відхилення ваги окремого розряду на змінення кількості невикористаних комбінацій в зонах різних рівнів.
13. Визначити залежність між значенням відхилення ваги окремого розряду і кількістю невикористаних комбінацій в різних зонах.

Аналіз характеристики перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю

Розглянемо характеристику перетворення (ХП) 5-розрядного АЦП послідовного наближення з $\alpha=1,7$ (рис. 1а). Розташування будь-якої точки на ХП буде визначатися виразом:

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

де K – кодова комбінація, s – номер кодової комбінації, $Q_i = \alpha^i(1 + \delta_i)$, – значення ваги i -го розряду, де α – основа системи числення, δ_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 невикористаних комбінацій $(n-1)$ -го рівня буде вірним рівняння [5]:

$$A(K_e^{12}) < A(K_e^{16}) \leq A(K_n^{13}). \quad (2)$$

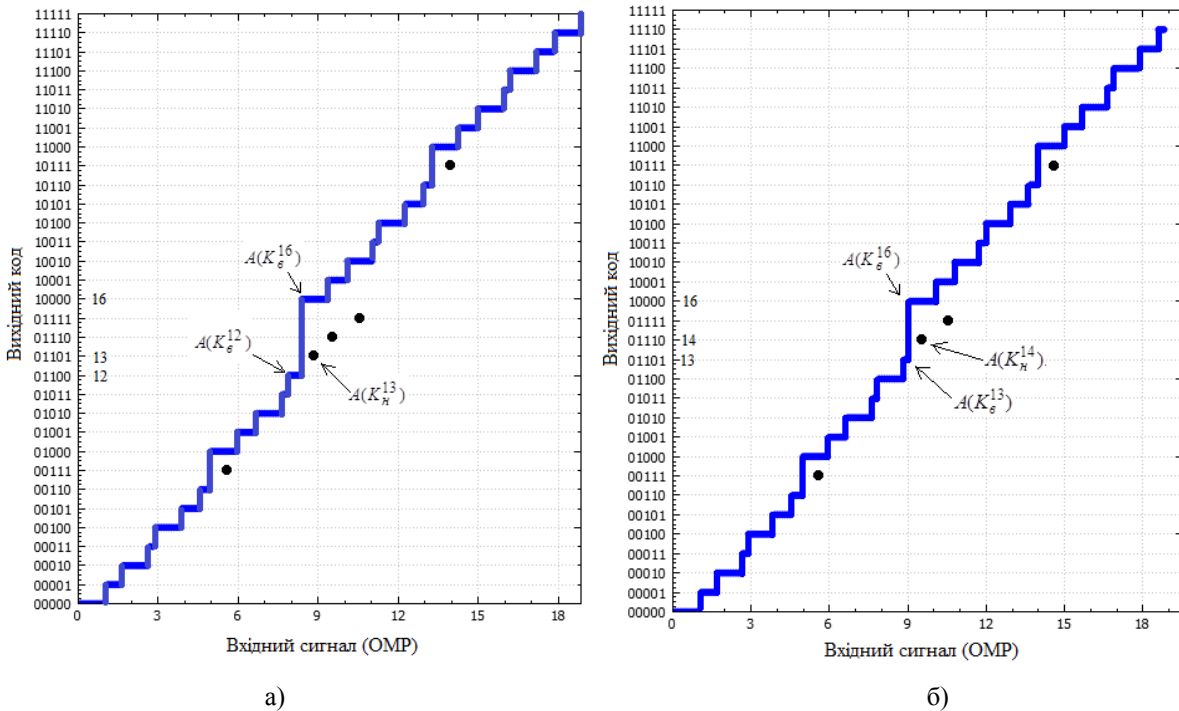


Рисунок 1 – Характеристика перетворення 5-розрядного АЦП із основою системи числення $\alpha=1,7$
 а) без відхилень ваг розрядів, б) за наявності відхилення ваги старшого розряду

Тобто у центральній зоні буде 3 «невикористаних» комбінації з номерами 13, 14, 15. Поява відхилень може призвести до порушення нерівності (2), що призведе до змінення кількості невикористаних комбінацій (рис. 1б). Таким чином існує можливість оцінити значення відхилень ваг розрядів на основі інформації про перелік «невикористаних» комбінацій.

В загальному випадку нерівність (2) матиме вигляд:

$$A(K_e^{m-1}) < A(K_e^l) \leq A(K_n^m), \quad (3)$$

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.

Слід звернути увагу, що значення K_e^l не залежить від основи системи числення та відхилень ваг розрядів і визначається виключно номером зони невикористаних комбінацій. Так для зони $(n-1)$ -го рівня $K_e^l = 100\dots 0$. Для зони $(n-2)$ -го рівня $K_e^{l1} = 010\dots 0$ та $K_e^{l2} = 110\dots 0$ відповідно для першої і другої підзони і т.д.

Неважко побачити, що для розрахунку граничних значень відхилень, за яких відбувається зміна кількості «невикористаних» комбінацій слід розв'язати рівняння:

$$A(K_e^l) = A(K_n^m) \text{ та } A(K_e^l) = A(K_e^{m-1}). \quad (4)$$

Дослідження впливу відхилення ваги окремого розряду на змінення кількості невикористаних комбінацій в зонах різних рівнів

Припустимо, що внаслідок відхилення вага найстаршого (n-1)-й розряду змінилась до значення

$$Q_{n-1} = \alpha^{n-1}(1 + \delta_{n-1}^{II}), \quad (5)$$

що призвело до зменшення кількості невикористаних комбінацій в (n-1)-й зоні до двох, як показано на рис.1б. Римська цифра II з індексом (n-1) у δ_{n-1}^{II} вказує на кількість невикористаних комбінацій в (n-1)-й зоні. Тоді нерівність (2) набуде вигляду:

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

Підставивши відповідні значення у рівняння (4) отримаємо

$$A(K_{\epsilon}^{16}) = A(K_H^{14}) \text{ та } A(K_{\epsilon}^{16}) = A(K_{\epsilon}^{13}), \quad (7)$$

Підставивши (2) та (5) у рівняння (7) отримаємо

$$\alpha^{n-1}(1 + \delta_{n-1}^{II}) = \sum_0^{n-2} \alpha^i - 1 \text{ та } \alpha^{n-1}(1 + \delta_{n-1}^{II}) = \sum_0^{n-2} \alpha^i - \alpha \quad (8)$$

Таким чином за умови вірності нерівності (6) на основі (8) можна визначити допустимий діапазон значень δ_{n-1}^{II} :

$$\frac{\sum_0^{n-2} \alpha^i - \alpha}{\alpha^{n-1}} - 1 < \delta_{n-1}^{II} \leq \frac{\sum_0^{n-2} \alpha^i - 1}{\alpha^{n-1}} - 1. \quad (9)$$

Для довільної кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня рівняння (9) набуде вигляду:

$$\frac{\sum_0^{n-2} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-1}} - 1 < \delta_{n-1}^{p_{n-1}} \leq \frac{\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i}{\alpha^{n-1}} - 1, \quad (10)$$

де a_i та b_i розрядні коефіцієнти кодових комбінацій, що відповідають останній використаній перед початком групи невикористаних комбінацій та першій невикористаній із групи невикористаних комбінацій відповідно, p_{n-1} – кількість невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня.

Позначивши

$$\delta_{n-1 \min}^{p_{n-1}} = \frac{\sum_0^{n-2} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-1}} - 1 \text{ та } \delta_{n-1 \max}^{p_{n-1}} = \frac{\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i}{\alpha^{n-1}} - 1, \text{ отримаємо}$$

$$\delta_{n-1 \min}^{p_{n-1}} < \delta_{n-1}^{p_{n-1}} \leq \delta_{n-1 \max}^{p_{n-1}} \quad (11)$$

Вираз (10) визначає діапазон значення δ_{n-1}^p в частках ваги найстаршого (n-1)-го розряду, для визначення цього значення в одиницях молодшого розряду (ОМР) необхідно помножити лівий і правий бік нерівності на вагу найстаршого (n-1)-го розряду тобто на α^{n-1} . Після чого вираз (10) набуде вигляду:

$$\sum_0^{n-2} a_i \alpha^i - \alpha^{n-1} < \delta_{n-1}^{p_{n-1}} (ОМР) \leq \sum_0^{n-2} b_i \alpha^i - \alpha^{n-1}, \quad (12)$$

Оскільки значення відхилення розряду може знаходитись в будь-якій точці діапазону, то для мінімізації похибки визначення відхилення ваги розряду доцільно взяти її середнє значення:

$$\delta_{n-1}^{p_{n-1}} (ОМР) = \frac{\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i - \alpha^{n-1} + \sum_0^{n-2} a_i \alpha^i - \alpha^{n-1}}{2}. \quad (13)$$

Очевидно, що похибка визначення $\delta_{n-1}^{p_{n-1}}$ (OMP) розраховується як:

$$\Delta \delta_{n-1}^{p_{n-1}} (OMP) = \frac{\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i - \alpha^{n-1} - \sum_0^{n-2} a_i \alpha^i - \alpha^{n-1}}{2} = \frac{\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i - \sum_0^{n-2} a_i \alpha^i}{2}. \quad (14)$$

Враховуючи, що $\sum_0^{n-2} b_i \alpha^i$ та $\sum_0^{n-2} a_i \alpha^i$ в будь-якому випадку визначають розташування двох

сусідніх точок на характеристиці перетворення, то відстань між ними дорівнює кроку квантування АЦП, значення якого є постійним для двійкової системи числення і дорівнює 1 ОМР. Для АЦП на основі надлишкових систем числення значення останнього знаходиться в діапазоні від 0 до 1 ОМР. Таким чином максимальне значення похибки визначення $\delta_{n-1}(OMP)$ становить 0.5 ОМР для будь-якої зони невикористаних комбінацій.

Визначимо вплив δ_{n-1} на змінення кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-2)-го рівня. У прикладі, наведеному на рис. 1. зона (n-2)-го рівня складається з двох підзон, які містять по одній кодовій комбінації 00111 та 10111. Таким чином нерівність (3) набуває вигляду для першої підзони:

$$A(K_e^6) < A(K_e^8) \leq A(K_n^7) \quad (15)$$

та другої підзони:

$$A(K_e^{22}) < A(K_e^{24}) \leq A(K_n^{23}) \quad (16)$$

Скориставшись виразами (1) (4) та (5) отримаємо вирази для визначення граничних значень відхилень для першої підзони:

$$\alpha^{n-2} = \sum_0^{n-3} \alpha^i - 1; \quad \alpha^{n-2} = \sum_0^{n-3} \alpha^i \quad (17)$$

для другої підзони:

$$(1 + \delta_{n-1}^{II_{n-2}}) \alpha^{n-1} + \alpha^{n-2} = (1 + \delta_{n-1}^{II_{n-2}}) \alpha^{n-1} + \sum_0^{n-3} \alpha^i - 1; \quad (18)$$

$$(1 + \delta_{n-1}^{II_{n-2}}) \alpha^{n-1} + \alpha^{n-2} = (1 + \delta_{n-1}^{II_{n-2}}) \alpha^{n-1} + \sum_0^{n-3} \alpha^i, \quad (19)$$

або після перетворень: $\alpha^{n-2} = \sum_0^{n-3} \alpha^i - 1; \quad \alpha^{n-2} = \sum_0^{n-3} \alpha^i$.

Таким чином рівняння для визначення граничних значень відхилень для першої і другої підзони є ідентичними і не містять δ_{n-1} , що свідчить про те, ці підзони є нечутливими до відхилень ваги старшого (n-1)-го розряду. Не важко показати, що аналогічна ситуація спостерігається і для зон інших рівнів. Розглянемо вплив відхилення (n-2)-го розряду на змінення кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня. Припустимо, що внаслідок відхилення вага (n-2)-го розряду змінилась до значення

$$Q_{n-2} = \alpha^{n-2} (1 + \delta_{n-2}), \quad (20)$$

що призвело до змінення кількості невикористаних комбінацій до p в зоні (n-1)-го рівня. Тоді рівняння для визначення граничних значень відхилень набуде вигляду:

$$\alpha^{n-1} = \alpha^{n-2} (1 + \delta_{n-2}^{p_{n-1}}) + \sum_0^{n-3} a_i \alpha^i \quad \text{та} \quad \alpha^{n-1} = \alpha^{n-2} (1 + \delta_{n-2}^{p_{n-1}}) + \sum_0^{n-3} b_i \alpha^i, \quad (21)$$

звідки

$$\frac{\alpha^{n-1} - \sum_0^{n-2} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-2}} > \delta_{n-2}^{p_{n-1}} \geq \frac{\alpha^{n-1} - \sum_0^{n-2} b_i \alpha^i}{\alpha^{n-2}}. \quad (22)$$

Не важко показати, що для визначення відхилення (n-2)-го розряду за кількістю невикористаних комбінацій в (n-2)-й зоні можна скористатись виразом (24):

$$\frac{\sum_{i=0}^{n-3} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-2}} - 1 < \delta_{n-2}^{p_{n-2}} \leq \frac{\sum_{i=0}^{n-3} b_i \alpha^i}{\alpha^{n-2}} - 1 \quad (24)$$

Визначення залежності між значенням відхилення ваги окремого розряду і кількістю невикористаних комбінацій в різних зонах

Графічна інтерпретація зв'язку між кількістю невикористаних комбінацій в зонах (n-1)-го та (n-2)-го рівня та відхиленням ваг (n-1)-го та (n-2)-го розрядів показано на рис. 2

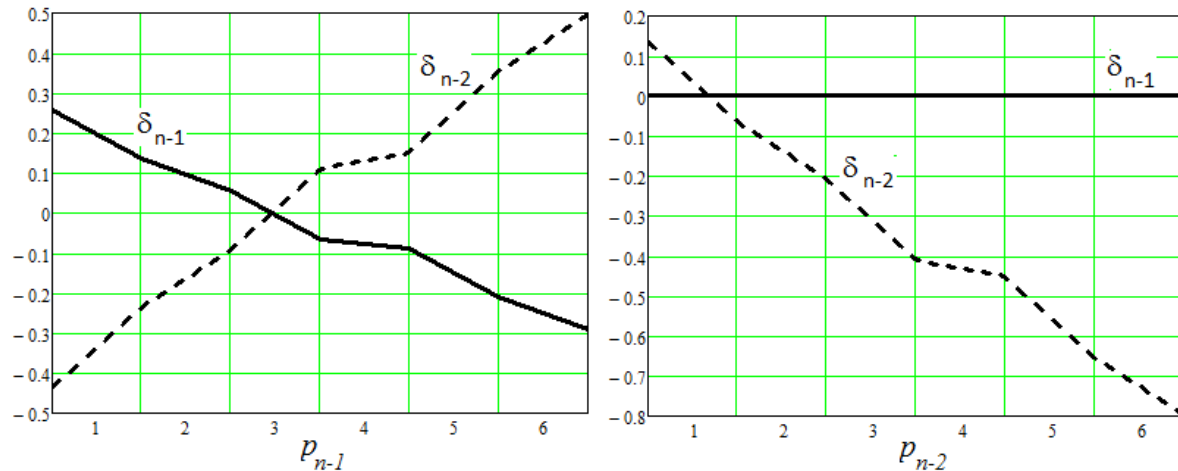


Рисунок 2 - Зв'язок між кількістю невикористаних комбінацій і відхиленням ваг (n-1)-го та (n-2)-го розрядів для
а) зони (n-1)-го рівня та б) зони (n-2)-го рівня

Отже, взаємозв'язок між відхиленням k-розряду і кількістю невикористаних комбінацій в зоні j-го рівня визначається таким чином:

1. Якщо $j < k$ – відхилення не впливає на кількість невикористаних комбінацій

$$2. \text{ Якщо } j=k, \frac{\sum_{i=0}^{j-1} a_i \alpha^i}{\alpha^k} - 1 < \delta_k^{p_j} \leq \frac{\sum_{i=0}^{j-1} b_i \alpha^i}{\alpha^k} - 1, \quad (25)$$

$$3. \text{ Якщо } j>k, \frac{\alpha^j - \sum_{i=0}^{j-1} a_i \alpha^i}{\alpha^k} > \delta_k^{p_j} \geq \frac{\alpha^j - \sum_{i=0}^{j-1} b_i \alpha^i}{\alpha^k}. \quad (26)$$

Для порівняння ступеня чутливості зміння кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня до δ_{n-1} та δ_{n-2} знайдемо їх співвідношення за формулою:

$$\frac{\delta_{n-1}^{p_{n-1}}}{\delta_{n-2}^{p_{n-2}}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-2} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-1}} - 1 \bigg/ \frac{\alpha^{n-1} - \sum_{i=0}^{n-2} a_i \alpha^i}{\alpha^{n-2}} = -\frac{1}{\alpha}. \quad (27)$$

З останнього виразу зокрема впливає, що ступінь впливу δ_{n-2} на зміння кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня в α разів менший за вплив δ_{n-1} . Це обумовлено тим, що співвідношення ваг сусідніх розрядів становить α . Крім того, якщо збільшення δ_{n-1} призводить до зменшення кількості невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня, то наслідком збільшення δ_{n-2} є збі-

льшення кількості невикористаних комбінацій. Неважко показати, що ступінь впливу відхилення довільного (n-k)-го розряду на кількість невикористаних комбінацій в зоні (n-1)-го рівня зменшується порівняно з впливом відхилення (n-1)-го розряду в α^{k-1} разів.

Як вище було зазначено, відхилення ваг розрядів, починаючи з (n-2)-го впливають на кількість невикористаних комбінацій в кількох зонах. Зокрема відхилення ваги (n-2)-го розряду впливає як на зону (n-1)-го рівня, так і на зону (n-2)-го. На рис. 3 наведено вигляд характеристики перетворення за відсутності відхилень (рис. 3а) та за умови від'ємного відхилення ваги (n-2)-го розряду (рис. 3б).

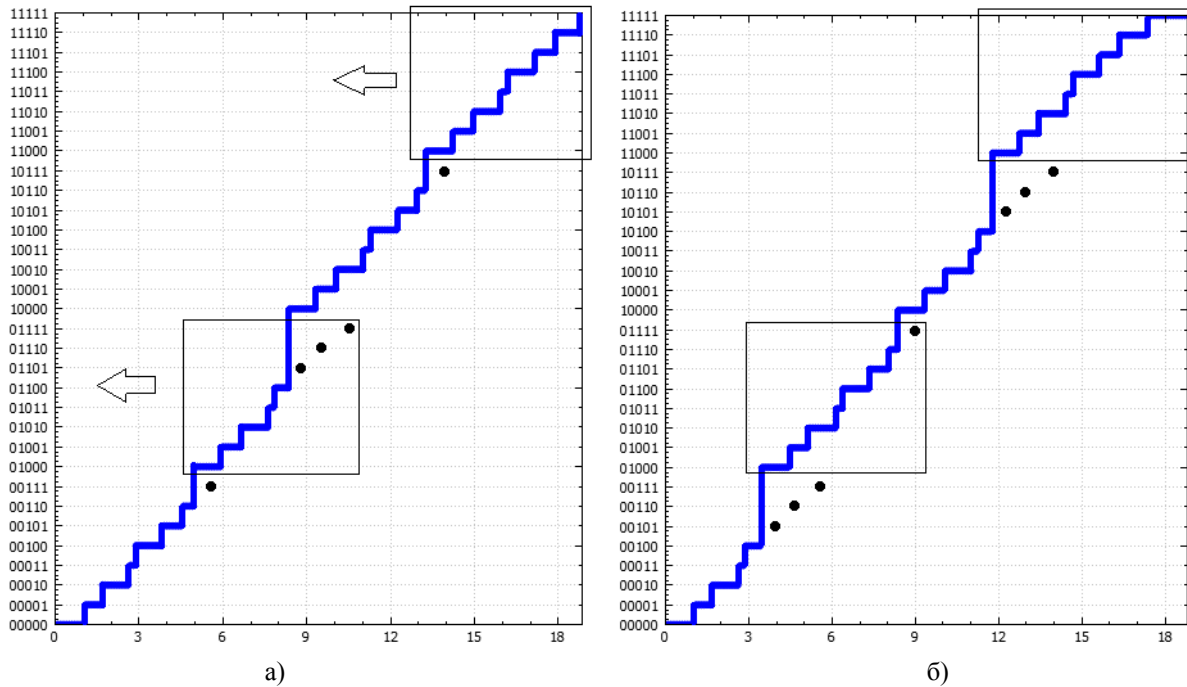


Рисунок 3 – Характеристика перетворення 5-розрядного АЦП із основою системи числення $\alpha=1,7$
 а) без відхилень ваг розрядів, б) за наявності відхилення ваги (n-2)-го розряду

Наслідком появи δ_{n-2} з від'ємним знаком є зсув всіх точок ХП, які містять "1" в (n-2)-му розряді вліво на величину $\alpha^{n-2}\delta_{n-2}$. В результаті цього в зоні (n-1)-го рівня кількість невикористаних комбінацій скоротилась до однієї, в той же час кількість невикористаних комбінацій в кожній із підзон (n-2)-го рівня збільшилась до трьох.

Характер впливу відхилення розряду на певну зону невикористаних комбінацій визначається номером зони та знаком відхилення (додатній або від'ємний). Так додатне відхилення ваги k-го розряду призведе до зменшення кількості невикористаних комбінацій в зоні k-го рівня та збільшення їх кількості в усіх зонах з номерами більше k. Відповідно від'ємне відхилення k-го розряду призведе до зворотної ситуації – збільшення кількості комбінацій в зоні k-го рівня та зменшення їх кількості в інших зонах.

На рис.4 а, б, в показано залежності кількості невикористаних комбінацій в зонах (n-1)-го, (n-2)-го та (n-3)-го рівнів від значення відхилення (n-3)-го, (n-2)-го та (n-1)-го розрядів відповідно. Приклад наведено для n=6 та $\alpha=1.7$. Аналіз наведених діаграм дозволяє стверджувати, що в загальному випадку, визначивши кількість невикористаних комбінацій в кожній із зон можна однозначно вказати номер розряду, вага якого змінилась. Крім того можна оцінити діапазон відхилення. Наприклад, ситуація, коли зони (n-1)-го, (n-2)-го та (n-3)-го рівня містять відповідно 5, 5 та 1 невикористану комбінації спостерігається тільки на рис. 4,б у випадку, коли $-0.2 < \delta_{n-2} < -0.1$.

Слід також відзначити, що в оточенні нульового відхилення кожного з розрядів спостерігається зона невизначеності. На рис.4 зона невизначеності має місце у випадках, коли кількість невикористаних комбінацій по зонах (n-1)-го, (n-2)-го та (n-3)-го відповідно становить (6, 3, 1) або (7, 3, 1). Ці ситуації спостерігаються на всіх діаграмах рис.4. В цьому випадку діапазон відхилень що не може бути ідентифікований становить: від -0.07 до 0.11 для (n-3)-го розряду, -0.07 до 0.05 для (n-2)-го розряду та -0.07 до 0.05 для (n-1)-го розряду. Не важко показати, що в найгіршому випадку ширина зони невизначеності становить α ОМР.

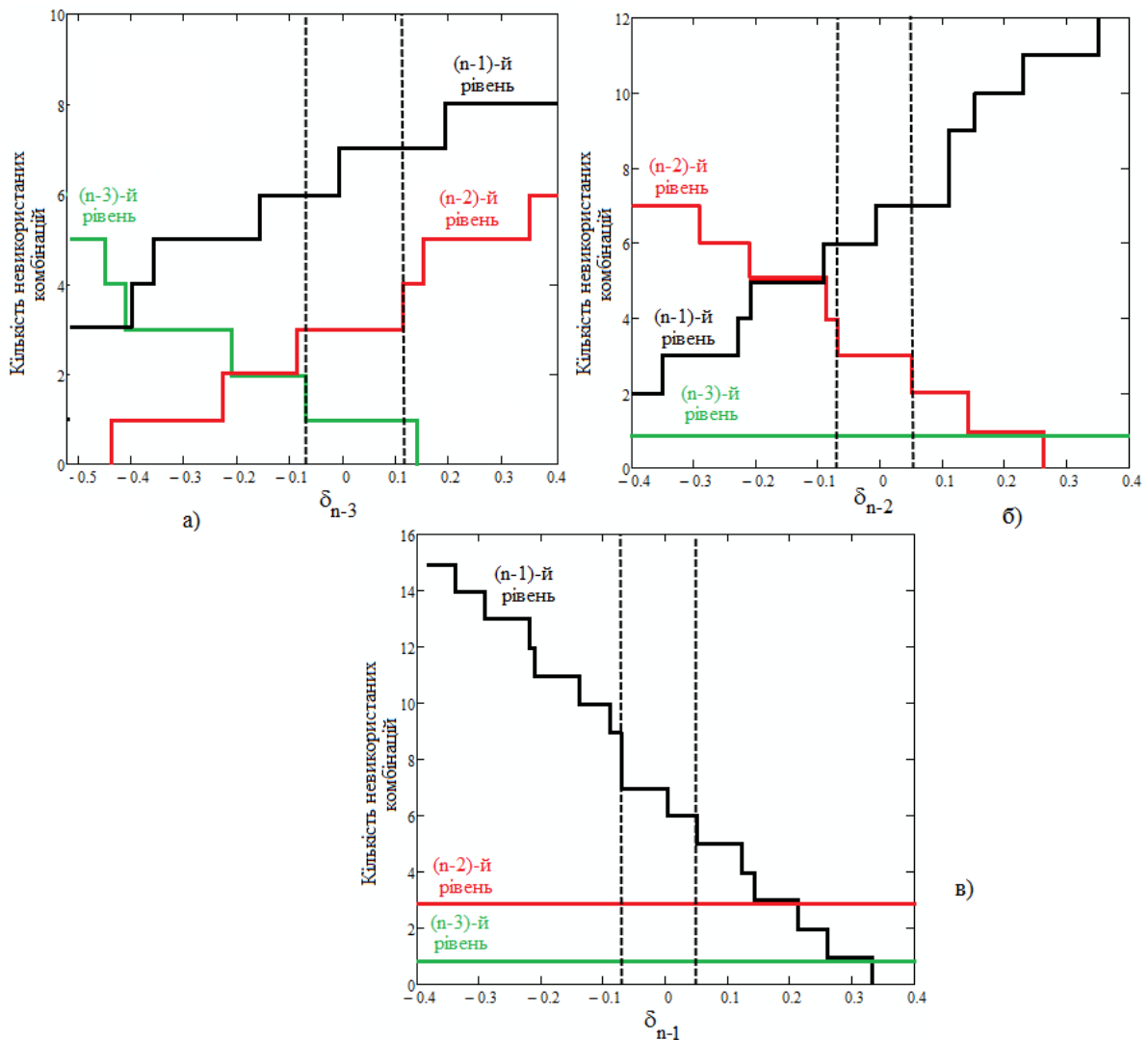


Рисунок 4 – Залежність кількості невикористаних комбінацій в зонах (n-1)-го, (n-2)-го та (n-3)-го рівнів від значення відхилення а) (n-3)-го, б) (n-2)-го в) (n-1)-го розрядів

Висновки

1. Доведено, що відхилення ваги k-го розряду може вплинути на змінення кількості невикористаних комбінацій в зоні k-го рівня характеристики перетворення та в усіх зонах з номерами більше k, причому додатне відхилення ваги k-го розряду призведе до зменшення кількості невикористаних комбінацій в зоні k-го рівня та збільшення їх кількості в усіх зонах з номерами менше k. Відповідно від'ємне відхилення k-го розряду призведе до зворотної ситуації – збільшення кількості комбінацій в зоні k-го рівня та зменшення їх кількості в інших зонах

2. Доведен, що в найгіршому випадку гарантоване змінення кількості невикористаних комбінацій в будь-якій зоні характеристики перетворення, на яку впливає k-й розряд, відбудеться при змінненні ваги розряду більше ніж на 1 OMP

3. Показано, що у випадку поодиноких відхилень ваг розрядів однозначне встановлення номера розряду, в якому відбулось відхилення, за аналізом характеристики перетворення АЦП можливе при значенні відхилення більше ніж $|\alpha/2|$ OMP.

Список літератури

1. McCreary J.L. Matching properties, and voltage and temperature dependens of MOS capacitors / J.L. McCreary //IEEE J. Solid-State Circuits.- 1981.-Dec.- Vol.16.- pp. 608-616.

2. Hae-Seung Lee, A Self-calibrating 15-bit CMOS A/D Converter/ Hae-Seung Lee, David A.Hodges, Paul R. Gray. // IEEE J. Solid-State Circuits.- 1984.-Dec.- Vol.19, N6.- pp. 813-817.

3. Азаров А.Д. Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления: автореф. дис. док. техн. наук./А.Д. Азаров. - Винница, 1994.- 24 с.

4. John McNeill "Split ADC" Architecture for Deterministic Digital Background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC/ John McNeill, Michael C. W. Coln, Brian J. Larivee. //IEEE J. Solid-State Circuits.- 2005. – Dec.- Vol. 40, N12, - pp. 2437-2445.

5. Захарченко С.М. Метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення / С.М. Захарченко, А.В. Росошук, М.Г. Захарченко // Вісник національного університету «Львівська політехніка» Серія «Теплоенергетик. Інженерія докiлля. Автоматизація». – 2014. – №792. – С. 21-28.

Стаття надійшла: 16.04.2015.

Відомості про авторів

Захарченко Сергій Михайлович – к.т.н, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницький національний технічний університет.

Росошук Анастасія Володимирівна – аспірантка кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет.

Зеленська Євгенія Ігорівна – студентка Факультету інформаційних технологій і комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету.

Гуменюк Роман Сергійович – студент Факультету інформаційних технологій і комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету.