УДК 681.5

С. М. Захарченко, Р.С. Гуменюк, М. Г. Захарченко

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ В РЕЖИМІ ОСНОВНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. У статті запропоновано метод визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення в режимі основного перетворення. Метод базується на використанні вагової надлишковості і передбачає аналіз 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. Запропоновано алгоритм послідовного визначення відхилень ваг розрядів від молодших до старших.

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

Аннотация. В статье предложен метод определения отклонений весов разрядов АЦП последовательного приближения в режиме основного преобразования. Метод основан на использовании весовой избыточности и предусматривает анализ 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. Предложен алгоритм последовательного определения отклонений весов разрядов от младших к старшим.

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

Abstract. In this article we present a method for determining the deviations of bit weights for successive approximation ADC in the main conversion mode. that is implemented using weight redundancy. The method is based on the use of weight redundancy and 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. An algorithm is proposed for a successive determination of the deviations of the weights of the digits from the less significant bit (LSB) to the most significant bit (MSB).

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

Вступ

Одним із різновидів перетворювачів форми інформації є АЦП послідовного наближення, які займають близько 40 % сучасного ринку АЦП. Ці пристрої, з одного боку, мають досить високу роздільну здатність на рівні 14–18 двійкових розрядів, а з іншого боку – досить високу частоту дискретизації в діапазоні від 50 кГц до 50 МГц, що пояснює інтерес фахівців до цих пристроїв. Однак, якщо розрядність перетворювача перебільшує 12-14 розрядів вплив зонішних чинників призводить до появи відхилень ваг розрядів, при чому максимальні абсолютні відхилення спостерігаються в зоні старших розрядів [1]. Наслідком цього є поява диференційної та інтегральної нелінійностей. Шляхи подолання цієї проблеми можна поділити на технологічні і алгоритмічні. Технологгічні методи є досить трудоміськими та дозволяють покращити лінійність на кілька розрядів. Більш універсальним методом подолання згаданої проблеми є застосування процедури калібрування ваг розрядів АЦП[2-4]. Процедура калібрування виконується після включення пристрою та періодично в процесі роботи, причому АЦП може функціонувати або в режимі основного перетворення, або калібрування. Головним недоліком такого підходу є те, що калібрування здійснюється в цифроаналоговій формі шляхом формування коригуючого сигналу для режиму основного перетворення. Використання вагової надлишковості при побудові АЦП послідовного наближення дозволило виконувати процедуру калібрування виключно у цифровій формі без фізичного або електричного впливу на ваги розрядів [5]. Застосування методів самокалібрування передбачає вирішення таких задач, як фіксація моменту часу, коли необхідно провести чергове калібрування та організації фонового калібрування (без переривання процесу основного перетворення). Одним із рішень, що дозволяє в комплексі вирішити обидві задачі є застосування так званої спліт архітектури при побудові АЦП [6]. Однак в даному випадку передбачається використання двох однакових АЦП, що як мінімум вдвічі збільшує апаратні витрати. В роботі [7] було доведено можливість здійснення фонового калібрування при застосуванні вагової надлишковості, а в роботі [8] розглянуто процес визначення поодиноких відхилень ваг розрядів АЦП з ваговою надлишковістю.

Актуальність

Актуальним є дослідження шляхів визначення і корегування відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення безпосередньо в режимі основного перетворення без використання додаткових режимів. Розв’язання цієї задачі дозволить забезпечити безперервну роботу АЦП та пристроїв на його основі.

Мета

Метою статті є дослідження можливості визначення і корегування відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення безпосередньо в режимі основного перетворення без використання додаткових режимів.

Задачі

1. Дослідити характеристику перетворення (ХП) АЦП послідовного наближення за наявності вагової надлишковості.
2. Отримати математичні співвідношення, що визначають залежність між значенням відхилень ваг розрядів і кількістю невикористаних комбінацій.
3. Розробити алгоритм розрахунку відхилень ваг розрядів за аналізом характеристики перетворення АЦП.
4. Продемонструвати роботу методу на прикладі.

Дослідження ХП АЦП послідовного наближення за наявності вагової надлишковості

Характеристика перетворення АЦП визначає зв’язок між вхідним сигналом на вихідною кодовою комбінацією. При використанні двійкової системи числення кожному значенню вхідного аналогового сигналу відповідає одна кодова комбінація. В той же час, при застосуванні вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення існують зони ХП, де одному значенню вхідного сигналу відповідають кілька вихідних кодових комбінацій, як показано на рис. 1а. В той же час в процесі роботи АЦП у вихідному коді зустрічається тільки одна з можливих вихідних комбінацій (рис. 1б), яку називають «використаною». Відповідно, ті комбінації, що не зустрічаютья у виходному коді називаються «невикористаними» [7].

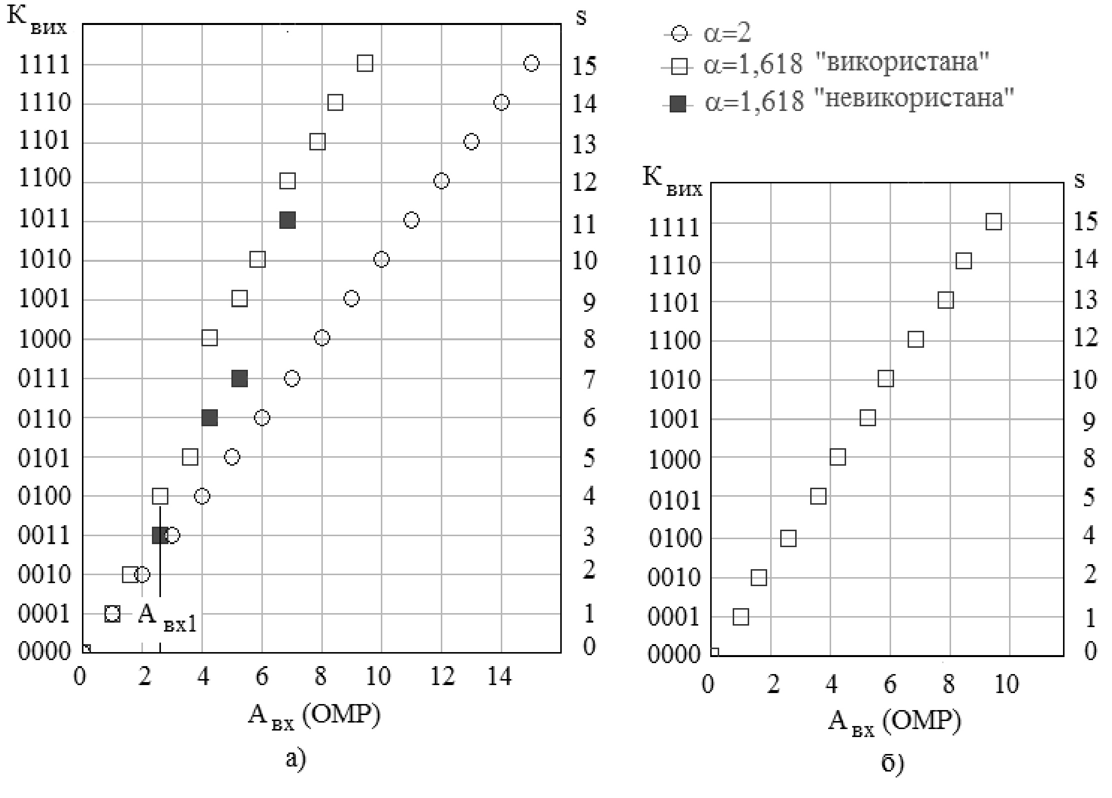


Рис.1 ХП 4-розрядного АЦП порозрядного наближення:
а)для α=1,618 та α=2; б) для α=1,618 без «невикористаних» комбінацій

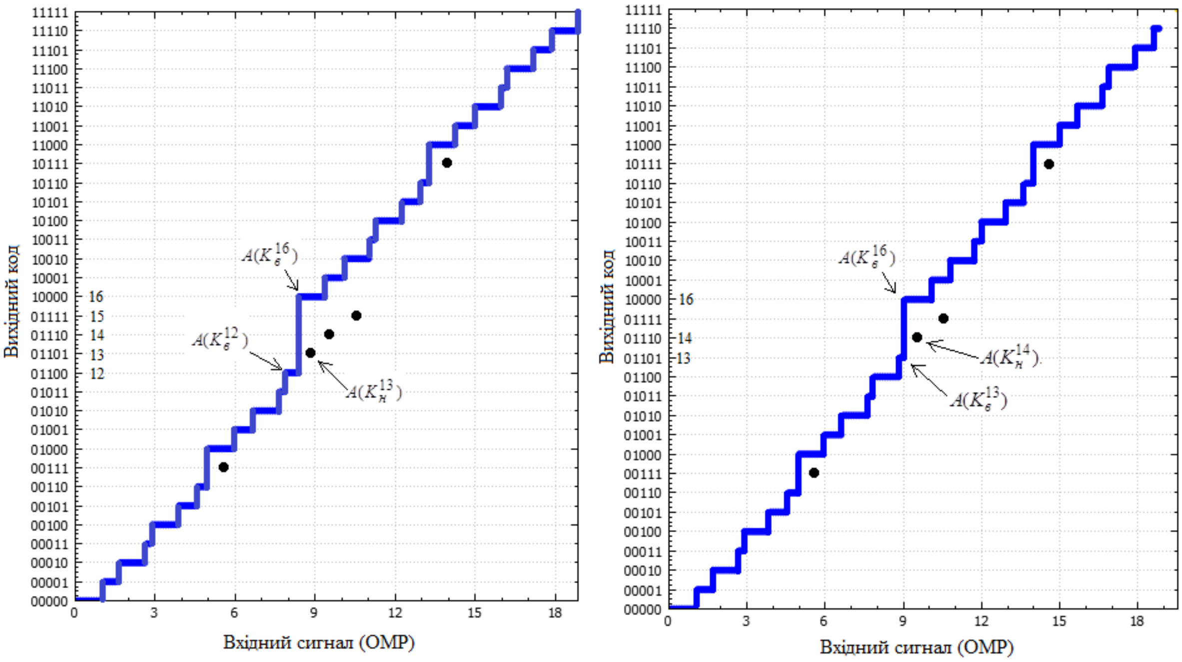
Розглянемо ХП 5-розрядного АЦП послідовного наближення з α=1,7 (рис. 2а). Розташування будь-якої точки на ХП буде визначатися виразом [8]:

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

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 α=1,7, за відсутності відхилень ваг розрядів (δ_i=0), для зони невикористаних комбінацій (n-1)-го рівня буде вірним рівняння [7]:

$$A(K_в^{12}) < A(K_в^{16}) \le A(K_н^{13}). \tag{2}$$



а) б)

Рисунок 2 – Характеристика перетворення 5-розрядного АЦП із основою системи числення α=1,7
а) без відхилень ваг розрядів, б) за наявності відхилення ваги старшого розряду

В цьому випадку у центральній зоні буде 3 «невикористаних» комбінації з номерами 13, 14, 15. Наслідком відхилень ваг розрядів є порушення нерівності (2), що призведе до змінення кількості невикористаних комбінацій (рис. 2б). В даному випадку їх кількість скоротилась за рахунок того, що «невикористана» комбінація з номером 13 перейшла в категорію «використаних». Цей факт свідчить про можливість оцінювання значення відхилень ваг розрядів на основі інформації про перелік «невикористаних» комбінацій.

В загальному випадку нерівність (2) матиме вигляд:

$$A(K_в^{m-1}) < A(K_в^{l})) \le A(K_н^{m}), \tag{3}$$

де l – номер «використаної» комбінації, що є наступною за «невикористану» комбінацію з найбільшим номером; m – номер «невикористаної» комбінації, що знаходиться на нижньому кордоні між «використаними» і «невикористаними» комбінаціями.

Було встановлено [7], що значення $K_в^l$ не залежить від основи системи числення та відхилень ваг розрядів і визначається виключно номером зони невикористаних комбінацій. Так для зони (n-1)-го рівня $K_в^l = 100...0$. Для зони (n-2)-го рівня $K_в^{l1} = 010...0$ та $K_в^{l2} = 110...0$ відповідно для першої і другої підзони і т.д. Таким чином для розрахунку граничних значень відхилень, за яких відбувається зміна кількості «невикористаних» комбінацій слід розв'язати рівняння:

$$A(K_в^l) = A(K_н^m) \text{ та } A(K_в^l) = A(K_в^{m-1}). \tag{4}$$

Аналіз впливу відхилення ваг розрядів на змінення кількості невикористаних комбінацій

Нехай внаслідок відхилення $\delta_{n-1}^{II_{n-1}}$ вага (n-1)-го розряду змінилась до значення

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

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

$$A(K_{в}^{13}) < A(K_{в}^{16}) \le A(K_{н}^{14}). \tag{6}$$

Підставивши відповідні значення у рівняння (4) отримаємо

$$A(K_{в}^{16}) = A(K_{н}^{14}) \text{ та } A(K_{в}^{16}) = A(K_{в}^{13}), \tag{7}$$

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

$$\alpha^{n-1}(1 + \delta_{n-1}^{II_{n-1}}) = \sum_{0}^{n-2}\alpha^{i} - 1 \text{ та } \alpha^{n-1}(1 + \delta_{n-1}^{II_{n-1}}) = \sum_{0}^{n-2}\alpha^{i} - \alpha \tag{8}$$

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

$$\frac{\sum_{0}^{n-2}\alpha^{i} - \alpha}{\alpha^{n-1}} - 1 < \delta_{n-1}^{II_{n-1}} \le \frac{\sum_{0}^{n-2}\alpha^{i} - 1}{\alpha^{n-1}} - 1. \tag{9}$$

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

$$\frac{\sum_{0}^{n-2}a_{i}\alpha^{i}}{\alpha^{n-1}} - 1 < \delta_{n-1}^{p_{n-1}} \le \frac{\sum_{0}^{n-2}b_{i}\alpha^{i}}{\alpha^{n-1}} - 1, \tag{10}$$

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

$$\delta_{n-1\min}^{p_{n-1}} = \frac{\sum_{0}^{n-2}a_{i}\alpha^{i}}{\alpha^{n-1}} - 1 \text{ та } \delta_{n-1\max}^{p_{n-1}} = \frac{\sum_{0}^{n-2}b_{i}\alpha^{i}}{\alpha^{n-1}} - 1, \text{ отримаємо}$$

$$\delta_{n-1\min}^{p_{n-1}} < \delta_{n-1}^{p_{n-1}} \le \delta_{n-1\max}^{p_{n-1}} \tag{11}$$

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:

$$\sum_{0}^{n-2}a_{i}\alpha^{i} - \alpha^{n-1} < \delta_{n-1}^{p_{n-1}}(OMP) \le \sum_{0}^{n-2}b_{i}\alpha^{i} - \alpha^{n-1}, \tag{12}$$

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

$$\delta_{n-1}^{p_{n-1}}(OMP) = \frac{\sum_{0}^{n-2}b_{i}\alpha^{i} - \alpha^{n-1} + \sum_{0}^{n-2}a_{i}\alpha^{i} - \alpha^{n-1}}{2}. \tag{13}$$

Алгоритм оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.

Скориставшись виразом (13) та враховуючи той факт, 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, при чому вплив на зони з номерами більше k зменшується пропорційно степеням основи системи числення [8], дозволяє реалізувати послідовний алгоритм визначення відхилень ваг розрядів починаючи з наймолодшого розряду з номером першої зони невикористаних комбінацій.

Крок 1

Визначити, починаючи з зони якого рівня для заданої системи числення мають з'явитись невикористані комбінації. Якщо ця зона наявна, перейти до кроку 2, якщо зона відсутня – розрахувати відхилення ваги відповідного розряду $\delta_{n-k}^{0\to1}$, при якому невикористана комбінація переходить у використану за формулою:

$$\alpha^{n-k}(1+\delta_{n-k}^{0\to1}) = \sum_{i=0}^{n-k-1}\alpha^{i}, \tag{14}$$

де $\delta_{n-k}^{0\to1}$ - відхилення *(n-k)*-го розряду, при якому спостерігається в зоні *(n-k)*-го рівня перехід з 0 до 1 невикористаної комбінації. Перейти до кроку 3.

Крок 2

Визначити зону найнижчого рівня (n-k), де з'явилась хоча б одна «невикористана» комбінація. У випадку появи однієї невикористаної комбінації середнє значення відхилення (n-k)-го розряду визначатиметься за формулою

$$\delta_{n-k} = \frac{\delta_{n-k}^{1\to2}+\delta_{n-k}^{0\to1}}{2}, \tag{15}$$

де $\delta_{n-k}^{0\to1}$ та $\delta_{n-k}^{1\to2}$ - відхилення (n-k)-го розряду, при досягненні якого відбувається перехід з 0 «невикористаних» комбінацій до 1, та з 1 «невикористаної» комбінацій до 2 відповідно і які можуть бути отримані з виразів:

$$\alpha^{n-k}(1+\delta_{n-k}^{0\to1}) = \sum_{i=0}^{n-k-1}\alpha^{i}, \tag{16}$$

та

$$\alpha^{n-k}(1+\delta_{n-k}^{1\to2}) = \sum_{i=0}^{n-k-1}\alpha^{i}-1. \tag{17}$$

У випадку появи *x* невикористаних комбінацій формули набувають вигляду:

$$\delta_{n-k} = \frac{\delta_{n-k}^{x\to(x+1)}+\delta_{n-k}^{(x-1)\to x}}{2}, \tag{18}$$

де $\delta_{n-k}^{x\to(x+1)}$ та $\delta_{n-k}^{(x-1)\to x}$ знаходяться відповідно з виразів:

$$\alpha^{n-k}(1+\delta_{n-k}^{(x-1)\to x}) = \sum_{i=0}^{n-k-1}a_i\alpha^{i}, \tag{19}$$

та

$$\alpha^{n-k}(1+\delta_{n-k}^{x\to(x+1)}) = \sum_{i=0}^{n-k-1}b_i\alpha^{i}, \tag{20}$$

де a_i та $b_i \in [0,1]$ і відповідають розрядним коефіцієнтам кодових комбінації з номерами $2^{n-k}-x$ та $2^{n-k}-x-1$.

Крок 3

Перехід до наступної зони невикористаних комбінацій (n-k+1)-го рівня. У випадку появи y невикористаних комбінацій формули набувають вигляду:

$$\delta_{n-k+1} = \frac{\delta_{n-k+1}^{y\to(y+1)} + \delta_{n-k+1}^{(y-1)\to y}}{2}, \tag{21}$$

де $\delta_{n-k+1}^{y\to(y+1)}$ та $\delta_{n-k+1}^{(y-1)\to y}$ знаходяться відповідно з виразів:

$$\alpha^{n-k+1}(1+\delta_{n-k+1}^{(y-1)\to y}) = \sum_{i=0}^{n-k-1} a_i\alpha^i + a_{n-k}(1+\delta_{n-k})\alpha^{n-k}, \tag{22}$$

та

$$\alpha^{n-k+1}(1+\delta_{n-k+1}^{y\to(y+1)}) = \sum_{i=0}^{n-k-1} b_i\alpha^i + b_{n-k}(1+\delta_{n-k})\alpha^{n-k}, \tag{23}$$

де a_i та $b_i \in [0,1]$ і відповідають розрядним коефіцієнтам кодових комбінації з номерами $2^{n-k+1} - y$ та $2^{n-k+1} - y - 1$.

Крок 4

Провести аналогічні розрахунки для всіх зон до (n-1)-ої.

Крок 5

Відхилення старшого, (n-1)-го розряду може бути визначено за формулою:

$$\delta_{n-1} = \frac{\delta_{n-1}^{z\to(z+1)} + \delta_{n-1}^{(z-1)\to z}}{2}, \tag{24}$$

де $\delta_{n-1}^{z\to(z+1)}$ та $\delta_{n-1}^{(z-1)\to z}$ знаходяться відповідно з виразів:

$$\alpha^{n-1}(1+\delta_{n-1}^{(z-1)\to z}) = \sum_{i=0}^{n-k-1} a_i\alpha^i + \sum_{j=n-k}^{n-2} a_j(1+\delta_j)\alpha^j, \tag{25}$$

та

$$\alpha^{n-1}(1+\delta_{n-1}^{z\to(z+1)}) = \sum_{i=0}^{n-k-1} b_i\alpha^i + \sum_{j=n-k}^{n-2} b_j(1+\delta_j)\alpha^j, \tag{26}$$

де a_i та $b_i \in [0,1]$ і відповідають розрядним коефіцієнтам кодових комбінації з номерами $2^{n-1} - z$ та $2^{n-1} - z - 1$.

Приклад

Проведемо дослідження роботи методу на прикладі 6-ти розрядного АЦП (n=6) з основою системи числення α =1,7. В програму, що моделює роботу такого АЦП штучно введемо відхилення ваг розрядів, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Ваги розрядів АЦП з ваговою надлишковістю та їх відхилення

№ розряду	0	1	2	3	4	5
Вага (ОМР)	1	1.7	2.89	4.91	8.35	14.20
Відхилення (%)	0	0	0	5	-10	5

В результаті аналізу характеристики перетворення знайдено перелік невикористаних комбінацій, як показано в таблиці 2

Таблиця 2 – Перелік невикористаних комбінацій, виявлених процесі аналізу ХП.

№	7	11	12	13	14	15	23	27	28	29	30	31	39	43	44	45	46	47	55
a_0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1
a_1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
a_2	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
a_3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
a_4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
a_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
зона	3			4			3			5			3			4			3

Аналіз таблиці 2 показує, що в зоні (n-1)-го рівня спостерігаються 5 невикористаних комбінацій, в зоні (n-2)-го рівня також 5, в зоні (n-3)-го рівня 1.

Визначимо, з якої зони для α =1,7 мають з’явитись невикористані комбінації. Для цього слід знайти k, починаючи з якого

$$\alpha^{n-k} < \sum_{i=0}^{n-k-1} \alpha^i .$$

В нашому прикладі k=3, тому що $1{,}7^3$=4,913, а $\sum_{i=0}^{2} 1{,}7^i = 5{,}59$. Переходимо до наступног кроку

Оскільки маємо одну невикористану комбінацію, то відхилення визначається виразом

$$\delta_{n-3} = \frac{\delta_{n-3}^{1\to 2} + \delta_{n-3}^{0\to 1}}{2},$$

де $\delta_{n-3}^{0\to 1}$ - може бути отримано з виразу

$$\alpha^{n-3}(1+\delta_{n-3}^{0\to 1}) = \sum_{i=0}^{n-4} \alpha^i,$$

а $\delta_{n-3}^{1\to 2}$ відповідно з виразу

$$\alpha^{n-3}(1+\delta_{n-3}^{1\to 2}) = \sum_{i=0}^{n-4} \alpha^i - 1.$$

Підставимо значення основи системи числення та кількості розрядів і виконаємо розрахунки:

$$1.7^3(1+\delta_3^{0\to 1}) = \sum_{i=0}^{2} 1.7^i, \quad \delta_3^{0\to 1} = 0.138$$

$$1.7^3(1+\delta_3^{1\to 2}) = \sum_{i=0}^{2} 1.7^i - 1 \quad \delta_3^{1\to 2} = -0.066$$

$$\delta_3 = \frac{0.138 - 0.066}{2} = 0.036$$

Таким чином розрахункове значення δ_3 становить 3.6%. Переходимо до розрахунку δ_4. Оскіль-ки в зоні 4-го рівня 5 невикористаних комбінацій,

$$\delta_4 = \frac{\delta_4^{5\to 6} + \delta_4^{4\to 5}}{2}$$

Визначимо розрядні коефіцієнти кодових комбінації з номерами $2^{n-k+1} - y = 11$ та $2^{n-k+1} - y - 1 = 10$. Тобто

$$a_0 = 0; a_1 = 1; a_2 = 0; a_3 = 1; a_4 = 0; a_5 = 0;$$

$$b_0 = 1; b_1 = 1; b_2 = 0; b_3 = 1; b_4 = 0; b_5 = 0;$$

Підставивши відповідні значення в (22) та (23), отримаємо:

$$\sum_{i=0}^{n-k-1} a_i \alpha^i + a_{n-k}(1+\delta_{n-k})\alpha^{n-k} = 1.7 + 1.7^3(1+0.036)$$

$$\sum_{i=0}^{n-k-1} b_i \alpha^i + b_{n-k}(1+\delta_{n-k})\alpha^{n-k} = 1 + 1.7 + 1.7^3(1+0.036)$$

Після перетворень отримаємо:

$$1.7^4(1+\delta_4^{4\to5}) = 1.7 + 1.7^3(1+0.036),$$

$$1.7^4(1+\delta_4^{5\to6}) = 1 + 1.7 + 1.7^3(1+0.036),$$

Виконавши розрахунки отримаємо $\delta_4^{4\to5}$ =-0.187 та $\delta_4^{5\to6}$ = -0.067. Відповідно δ_4 буде розраховано як

$$\delta_4 = \frac{-0.187 - 0.067}{2} = -0.127 .$$

Переходимо до розрахунку δ_5 . Оскільки в зоні 5-го рівня 5 невикористаних комбінацій, то

$$\delta_5 = \frac{\delta_5^{5\to6} + \delta_5^{4\to5}}{2}.$$

Визначимо розрядні коефіцієнти кодових комбінації з номерами $2^{n-k+2} - z = 27$ та $2^{n-k+2} - z - 1 = 26$, тобто

$$a_0 = 0; a_1 = 1; a_2 = 0; a_3 = 1; a_4 = 1; a_5 = 0;$$

$$b_0 = 1; b_1 = 1; b_2 = 0; b_3 = 1; b_4 = 1; b_5 = 0;$$

Підстатвивши відповідні значення в (25) та (26) отримаємо

$$\sum_{i=0}^{n-k-1} a_i \alpha^i + \sum_{j=n-k}^{n-2} a_j (1+\delta_j)\alpha^j = 1.7 + 1.7^3(1+0.036) + 1.7^4(1-0.127)$$

$$\sum_{i=0}^{n-k-1} b_i \alpha^i + \sum_{j=n-k}^{n-2} b_j (1+\delta_j)\alpha^j = 1 + 1.7 + 1.7^3(1+0.036) + 1.7^4(1-0.127)$$

В результаті $\delta_5^{4\to5}$ =-0.008, а $\delta_5^{5\to6}$ = 0.062. Підставивши в (24) отримаємо:

$$\delta_5 = \frac{-0.008 + 0.062}{2} = 0.027 .$$

Результати розрахунків зведено в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків відхилень ваг розрядів

№ розряду	0	1	2	3	4	5
Вага (ОМР)	1	1.7	2.89	4.91	8.35	14.20
Відхилення (%)	0	0	0	5	-10	5
Розраховане відхилення (%)	0	0	0	3.6	-12.7	2.7
Похибка розрахунку відхилення (ОМР)	0	0	0	-0.07	-0.22	-0.33

Висновки

1. Проаналізовано ХП АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю, в результаті чого було доведено, що ця характеристика містить так звані зони «невикористаних» комбінацій, при чому на ширину зони, тобто кількість «невикористаних» комбінацій впливає значення основи системи числення, номер розряду та його відхилення. Таким чином існує можливість визначати відхилення ваги розряду шляхом аналізу ширини зони «невикористаних» комбінацій.
2. Доведено, що оскільки 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, то існує можливість послідовного розрахунку відхилень розрядів починаючи з k-го розряду і, відповідно, k-ої зони і завершуючи (n-1)-м розрядом і (n-1)-ю зоною.
3. Запропоновано метод послідовного розрахунку відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення починаючи з молодшого розряду, якому відповідає найвужча зона «невикористаних» комбінацій. Метод дозволяє проводити розрахунок шляхом аналізу ХП в режимі основного перетворення без застсування додаткового режиму калібрування. Роботу методу продемонстровано на прикладі.

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. Hae-Seung Lee, David A.Hodges. Self-calibration technique for A/D converters // IEEE Transactions on circuits and systems.- 1983.-March.- Vol.30, N3.- pp.188-190.
4. Khen-Sang Tan, Sami Kiriaki, Michiel de Wit. Error correction techniques for high-performance differential A/D Converters // IEEE J. Solid-State Circuits.- 1990.-Dec.- Vol.25, N6.- pp.1318-1327.
5. 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.
6. 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.
7. Захарченко С.М. Метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення / С.М. Захарченко, А.В. Росощук, М.Г. Захарченко // Вісник національного університету «Львівська політехніка» Серія «Теплоенергетик. Інженерія довкілля. Автоматизація». – 2014. – №792. – С. 21-28.
8. Захарченко С.М. Метод оперативного виявлення поодиноких відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю / С.М. Захарченко, А.В. Росощук, Є.І. Зеленська, Р.С. Гуменюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015:Том1, №32. – С. 40–47.

Стаття надійшла: 27.03.2017.

Відомості про авторів

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

Гуменюк Роман Сергійович – аспірант кафедри обчислювальної техніки Інституту інформаційних технологій і комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету.

Захарченко Михайло Григорович – старший викладач Вінницького технічного коледжу.