

С. М. Захарченко¹
Р. С. Гуменюк¹
М. Г. Захарченко²

МЕТОД КОНТРОЛЮ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ ЗА АНАЛІЗОМ ВИХІДНОГО КОДУ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Вінницький технічний коледж

Проаналізовано характеристику перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. Показано, що на відміну від двійкового АЦП не всі кодові комбінації використовуються для подання вхідного сигналу. Кількість невикористаних комбінацій визначається робочою основою системи числення та збільшується зі зменшенням останньої. Запропоновано метод контролю невикористаних комбінацій, що виникають в процесі роботи АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. Це дозволяє фіксувати факт появи відхилень ваг розрядів перетворювача безпосередньо в процесі основного перетворення. Також за певних умов це дозволяє визначити номер, або номери розрядів, в яких відбулись відхилення. Визначено умови появи невикористаних комбінацій, їх розташування та причини переходу комбінацій з однієї категорії в іншу. Показано, що невикористані комбінації утворюють групи, розташовані у фіксованих зонах характеристики перетворення АЦП. Показано, що для кожної зони існує розряд перетворювача, значення якого є найвпливовішим саме для цієї зони. Розглянуто структуру зон невикористаних комбінацій, зокрема показано, що певні зони складаються з кількох підзон, причому відхилення відповідного розряду однаково впливає на зміни в переліку невикористаних комбінацій кожної з підзон, що суттєво спрощує процедуру контролю відхилення ваги відповідного розряду. Запропоновано алгоритм роботи АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю, який передбачає процедуру фіксації невикористаних комбінацій шляхом спостереження в режимі перетворення тестового або звичайного вхідного сигналу та процедуру контролю переходу комбінацій з категорії невикористаних в категорію використаних та навпаки. Визначено вимоги до допоміжного та основного сигналу, що дозволять провести процедуру фіксації невикористаних комбінацій. Розроблено рекомендації щодо застосування запропонованого методу для оперативного виявлення відхилень ваг розрядів в АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.

Ключові слова: АЦП послідовного наближення, вагова надлишковість, характеристика перетворення, невикористані комбінації, відхилення ваги розряду.

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі є неодмінною складовою систем оброблення аналогової інформації. Характеристики АЦП суттєво впливають на швидкість і якість перетворення і, таким чином, на параметри системи в цілому. Серед перетворювачів форми інформації особливе місце займають АЦП послідовного наближення (ПН), оскільки забезпечують компромісний варіант між швидкодією і роздільною здатністю АЦП. Крім того АЦП ПН мають відносно просту структуру. Реалізація АЦП з роздільною здатністю, що перебільшують 12 двійкових розрядів вимагає періодичного проведення процедури калібрування старших розрядів, оскільки внаслідок температурних та часових змін виникають відхилення їх ваг [1]. Застосування вагової надлишковості в АЦП ПН дає додаткові можливості для проведення процедури калібрування без використання додаткових аналогових вузлів [2], що суттєво спрощує реалізацію останніх. Крім того наявність вагової надлишковості дає змогу контролювати стан старших розрядів безпосередньо в процесі основного перетворення шляхом спостереження за так званими «невикористаними» комбінаціями [3]. Таким чином, актуальною задачею є розробка підходів, що дозволять визначити перелік невикористаних комбінацій в АЦП ПН з ваговою надлишковістю та контролювати перехід з категорії невикорис-

таних до категорії використаних і навпаки.

Метою роботи є підвищення точності АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю за рахунок оперативного контролю відхилень ваг розрядів в процесі основного перетворення.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі задачі:

- проаналізувати процес утворення зон невикористаних комбінацій;
- визначити зв'язок між набором невикористаних комбінацій та параметрами перетворювача;
- запропонувати методи фіксації невикористаних комбінацій та змін у їх складі.

Аналіз утворення зон невикористаних комбінацій на характеристиці перетворення

Характеристика перетворення (ХП) є основною характеристикою, що визначає роботу АЦП і ставить у відповідність значення вихідного двійкового коду до значення вхідного аналогового сигналу. Для двійкового АЦП ХП в ідеальному випадку є прямою лінією, таким чином для кодування вхідного сигналу застосовується весь діапазон вихідних кодів. Для АЦП з ваговою надлишковістю її характер дещо змінюється. Математично ХП може бути описана виразом [4]

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

де K — вихідна кодова комбінація, n — кількість розрядів перетворювача; s — порядковий номер кодової комбінації, $Q_i = \alpha^i (1 + \delta_i)$ — вага i -го розряду, де α — основа системи числення, δ_i — відхилення i -го розряду, $a_i \in \{0,1\}$ — значення розрядних коефіцієнтів вихідного коду K .

Графічну інтерпретацію ХП шести розрядного АЦП з ваговою надлишковістю показано на рис. 1. Як зазначено в [3], невикористані комбінації утворюють так звані зони невикористаних комбінацій, в яких ці комбінації формують безперервну послідовність, тому для визначення належності до тієї чи іншої зони достатньо знайти прикордонні комбінації зони за допомогою виразу

$$A(K_{us}^{m-1}) < A(K_{us}^l) \leq A(K_{un}^m), \tag{2}$$

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. Фактично задача зводиться до пошуку наймолодшої невикористаної комбінації K_{un}^m , оскільки значення старшої невикористаної комбінації для кожної зони є фіксованим і відомим.

Кількість зон невикористаних комбінацій залежить від розрядності АЦП та основи системи числення і може бути розрахована за допомогою виразу

$$z = n - d, \tag{3}$$

де d — мінімальна кількість розрядів, що приводить до появи невикористаних комбінацій. Значення d залежить виключно від основи системи числення α і може бути знайдено за допомогою рівнянь

$$\begin{aligned} \alpha_3^2 &= \alpha_3 + 1; \\ \alpha_4^3 &= \alpha_4^2 + \alpha_4 + 1; \\ &\dots \\ \alpha_k^{k-1} &= \alpha_k^{k-2} + \alpha_k^{k-3} + \dots + \alpha_k^0. \end{aligned} \tag{4}$$

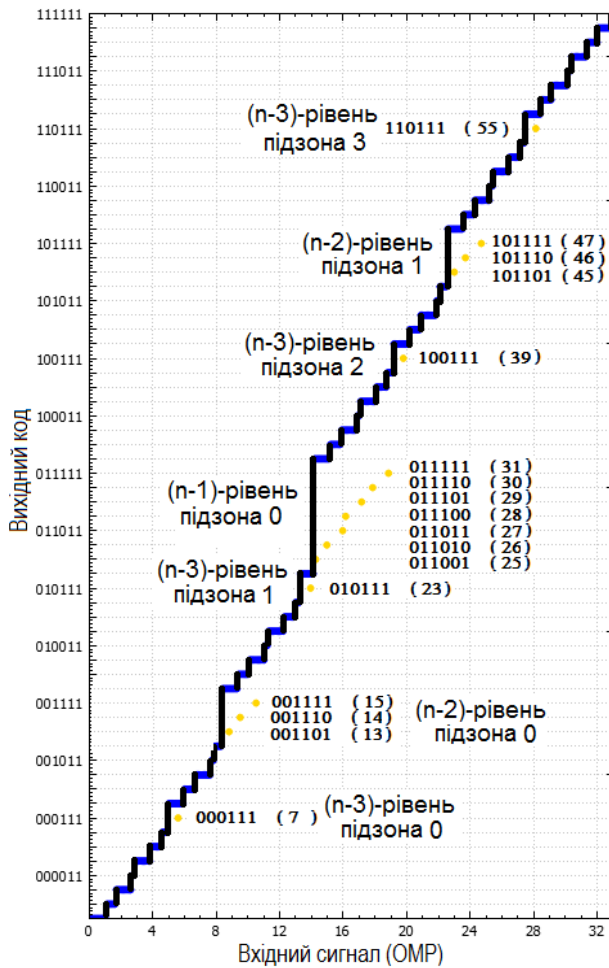


Рис. 1. Характеристика перетворення шестиразрядного АЦП з ваговою надлишковістю

Таким чином

$$\begin{aligned}
 &\text{якщо } \alpha_3 \leq \alpha < \alpha_4, \quad d = 3; \\
 &\text{якщо } \alpha_4 \leq \alpha < \alpha_5, \quad d = 4; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\text{якщо } \alpha_k \leq \alpha < \alpha_{k+1}, \quad d = k.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Результати розв’язання частини рівнянь зведено в таблицю.

α	1,618...1,839	1,840...1,928	1,929...1,966	1,967...1,984
d	3	4	5	6

Розглянемо характерні риси кодових комбінацій, що утворюють певні зони. Зона $(n - 1)$ -го рівня розташована в середині характеристики перетворення, причому найстарша із невикористаних комбінацій має вигляд: 0111...11 і її значення залишається незмінним. Перехід цієї комбінації в категорію використаних свідчить про зникнення зони. Як було показано в [4] на кількість комбінацій, що потрапляють в зону цього рівня окрім основи системи числення впливають відхилення всіх розрядів перетворювача. Так додатні відхилення найстаршого $(n - 1)$ -го розряду зменшують кількість невикористаних комбінацій в цій зоні — звужують зону, водночас від’ємні відхилення збільшують кількість невикористаних комбінацій, тобто розширюють зону. Вплив відхилень розрядів з номерами меншими за $(n - 1)$ має інший характер — додатні відхилення звужують зону, від’ємні — розширюють.

Починаючи з зони $(n - 2)$ -го рівня, структура зони ускладнюється за рахунок появи кількох складових, так званих підзон. Кількість підзон для зони довільного $(n - k)$ -го рівня визначається виразом

$$sz = 2^{(n-1)-(n-k)} = 2^{k-1}. \tag{6}$$

Тобто кожна наступна зона, починаючи з $(n - 2)$, містить вдвічі більше підзон, ніж попередня. Так на рис. 1 зона $(n - 2)$ -го рівня містить дві підзони, до яких відповідно входять комбінації з номерами 13—15 та 45—47. В свою чергу зона $(n - 3)$ -го рівня містить 4 підзони, що містять по одній комбінації з номерами 7, 23, 39, 55. За аналогією з комбінацією 0111...11 $(n - 1)$ -ї зони кожна підзона обов’язково містить комбінацію з найбільшим номером яка має вигляд: X...X01...1, причому старші розряди, що позначені X-ми визначають номер підзони. Кількість розрядів, що визначають номер підзони може бути визначено як $\log_2(sz)$. Тобто для зони з номером $(n - 1)$ вони відсутні, в $(n - 2)$ -й зоні це найстарший біт, в $(n - 3)$ -й зоні два найстарших біти і т.д.

Слід звернути увагу, що кількість невикористаних комбінацій в кожній підзоні однієї зони є однаковою. Для доведення цього факту розглянемо підзони зони $(n - 2)$ -го рівня за умови відхилень ваг розрядів. Відповідно до (2) та рис. 1 для підзони 0 виконується умова

$$A(K_{us}^{12}) < A(K_{us}^{16}) \leq A(K_{un}^{13}), \tag{7}$$

підставивши (1), отримаємо:

$$Q_3 + Q_2 < Q_4 \leq Q_3 + Q_2 + Q_0. \tag{8}$$

Для підзони 1 зони $(n - 2)$, відповідно виконується умова

$$A(K_{us}^{44}) < A(K_{us}^{48}) \leq A(K_{un}^{45}), \tag{9}$$

підставивши (1), отримаємо:

$$Q_5 + Q_3 + Q_2 < Q_5 + Q_4 \leq Q_5 + Q_3 + Q_2 + Q_0. \tag{10}$$

Частини нерівності містять Q_5 і таким чином цю складову можна скоротити. Після цього вираз (10) переходить у вираз (8), тобто умови, що визначають належність комбінації до категорії невикористаних є ідентичними для обох підзон. Аналогічно можна показати, що для всіх підзон зони

$(n - 3)$), наведених на рис. 1, виконується умова

$$Q_2 + Q_1 < Q_3 \leq Q_2 + Q_1 + Q_0. \quad (11)$$

Враховуючи, що на стан зони $(n - k)$ -го рівня впливають тільки ваги розрядів з 0-го до $(n - k)$ -го, причому вплив $(n - k)$ -го є найбільшим [4], з'являється можливість контролювати зміни в першу чергу ваги $(n - k)$ -го розряду, аналізуючи будь-яку з підзон зони $(n - k)$ -го рівня.

Метод фіксації зон невикористаних комбінацій на характеристиці перетворення

Оскільки невикористані комбінації у складі зони розташовані послідовно, достатньо зафіксувати наймолодшу невикористану комбінацію з будь якої підзони і далі в процесі роботи перетворювача контролювати появу комбінацій з номерами, що дорівнюють, або більше за наймолодшу комбінацію. Таким чином на першому етапі необхідно зафіксувати всі наймолодші невикористані комбінації — цей етап можна назвати етапом навчання.

Етап навчання можна проводити активно або пасивно. В активному навчанні перетворювач після включення має перейти в режим навчання, аналогічний режиму калібрування [2]. В цьому режимі на вхід АЦП має бути поданий вхідний сигнал $A_{\text{вх}}$ від додаткового генератора, який гарантовано забезпечить проходження всіх зон невикористаних комбінацій. Враховуючи особливість розташування зон невикористаних комбінацій цілком достатньо, щоби вхідний сигнал був або в діапазоні від 0 до $A_{\text{max}}/2$, або від $A_{\text{max}}/2$ до A_{max} . Варіант пасивного навчання можливий, коли вхідний сигнал гарантовано проходить всі зони невикористаних комбінацій. В цьому випадку немає потреби в додатковому генераторі, оскільки для навчання використовується вхідний сигнал. Відмінністю пасивного навчання є необхідність визначення факту завершення процесу навчання, ознакою чого є завершення формування всіх зон невикористаних комбінацій. Кількість зон невикористаних комбінацій має бути попередньо розрахована за допомогою виразу (3). Крім того тривалість процесу навчання може бути різною і залежить від особливості вхідного сигналу.

Якщо АЦП підтримує режим самокалібрування [2] і перед включення проведено калібрування АЦП, то перелік невикористаних може бути отриманий аналітичним шляхом. Для цього необхідно, скориставшись виразом (3), визначити кількість зон невикористаних комбінацій, після чого за допомогою виразу (2) знайти $K_{\text{ин}}^m$ для кожної зони.

Етап навчання завершується фіксацією інформації про номер наймолодшої невикористаної комбінації в кожній зоні. Наприклад, для ХП (рис. 1), етап навчання завершується після знаходження комбінацій з номерами 25 (зона $(n - 1)$ -го рівня); 13 або 45 (зона $(n - 2)$ -го рівня); 7, 23, 39 або 45 (зона $(n - 3)$ -го рівня).

Після завершення режиму навчання АЦП переходить в режим звичайної роботи, в процесі якого відбувається фонове спостереження за зонами невикористаних комбінацій. Відсутність змін в переліку невикористаних комбінацій свідчить про відсутність відхилень ваг розрядів, або про те, що ці відхилення не перетинають певні межі. Процес спостереження за зонами невикористаних комбінацій передбачає фіксацію двох ситуацій — перехід комбінації з категорії невикористаних в категорію використаних і навпаки.

Поява невикористаної комбінації може бути зафіксована шляхом порівняння всіх комбінацій, що потенційно належать до тієї чи іншої зони з невикористаною комбінацією з мінімальним номером. Для ХП (рис. 1) для підзони 0 $(n - 2)$ -го рівня (старші три розряди 001) поява комбінації з номером більшим за 12 (001100) є ознакою відхилень ваг розрядів, при чому, як показано в [4], це може бути або додатне відхилення $(n - 2)$ -го, або від'ємне $(n - 3)$ -го. Відхилення $(n - 1)$ -го розряду на цю зону не впливає.

Інша ситуація, яка може бути наслідком відхилень ваг розрядів, є перехід комбінації з категорії використаних в категорію невикористаних. Розглянемо знову ж таки на прикладі підзони 0 $(n - 2)$ -го рівня. У випадку, коли вага $(n - 2)$ -го розряду зменшиться, або збільшиться вага $(n - 3)$ -го розряду, комбінація 001100 перейде у категорію невикористаних. Контролювати цю ситуацію можна шляхом фіксації прикордонних комбінацій, що з'являються в процесі роботи АЦП протягом певного терміну часу T_k . Якщо, припустимо, протягом T_k комбінація 001100 не фіксувалась, а комбінація 010000 фіксувалась, значить комбінація 001100 перейшла в категорію невикористаних. Якщо ж не фіксувалась ні комбінація 001100 ні 010000 — значить вхідний сигнал не потрапив у від-

повідний діапазон. Спрощений алгоритм, що демонструє роботу обох режимів: навчання та контролю показаний на рис. 2.

Режим навчання передбачає введення вхідного аналогового сигналу та перетворення його в цифровий надлишковий код відповідно до ХП (рис. 1). На наступних кроках перевіряється, чи не сформовані пари прикордонних комбінацій для всіх зон. Якщо ні — вибирається чергове значення $A_{вх}$ і процес повторюється доки не будуть сформовані всі пари прикордонних комбінацій. Після цього перетворювач переходить в режим фоновому контролю. Кожна вихідна кодова комбінація перевіряється на належність до так званих невикористаних комбінацій, що дозволяє контролювати перехід з категорії невикористаних в категорію використаних. Зворотний перехід фіксується шляхом контролю появи порогових комбінацій протягом часу T_k . Наявність змін в переліку невикористаних комбінацій свідчить про необхідність проведення процедури калібрування або перерахунку значень ваг розрядів. Після проведення відповідної процедури АЦП переходить в режим звичайної роботи з фоновим контролем.

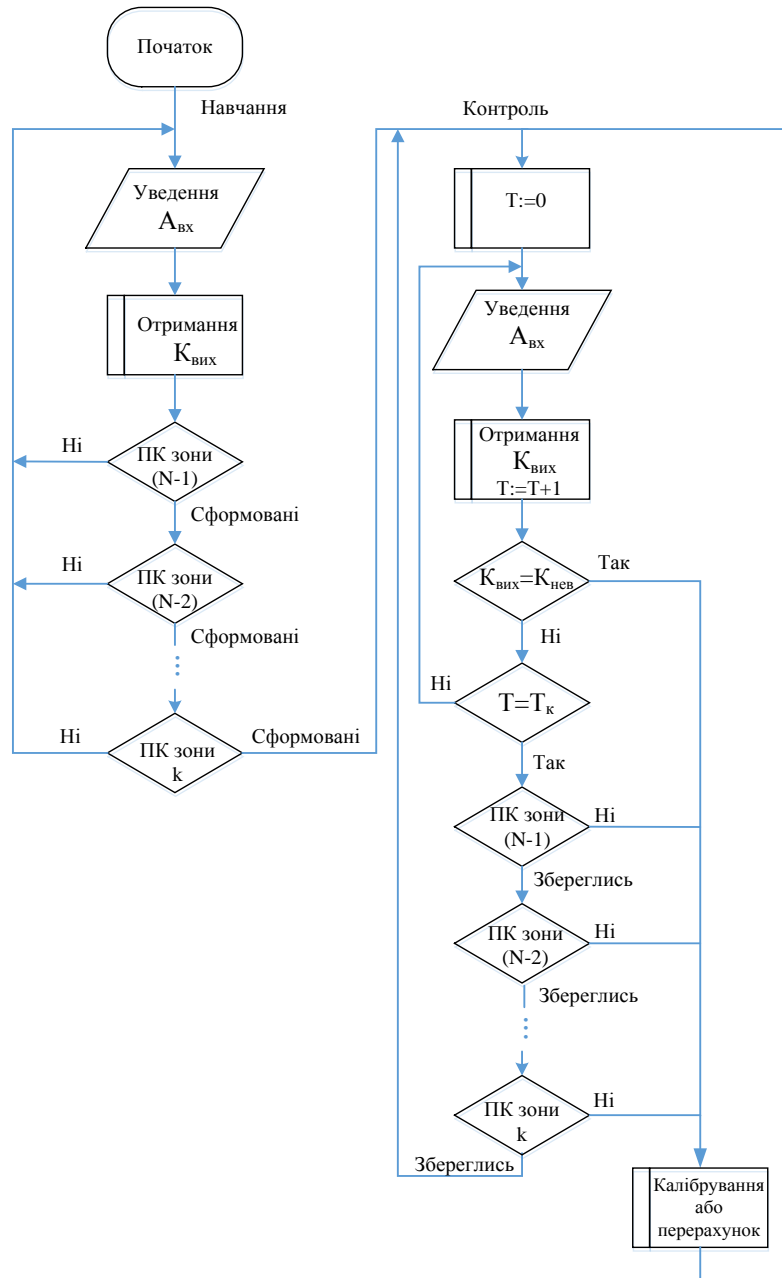


Рис. 2. Спрощений алгоритм режимів навчання і контролю АЦП

Висновки

Проаналізовано процес утворення зон невикористаних комбінацій в АЦП з вагою надлишковістю, що дозволило визначити зв'язок між кількістю зон, основою системи числення та розрядністю перетворювача.

Запропоновано шляхи фіксації невикористаних комбінацій на початку та в процесі роботи перетворювача, що дозволить оперативно фіксувати відхилення ваг розрядів не перериваючи процес основного перетворення.

Запропоновано алгоритм реалізації методу контролю невикористаних комбінацій, що дозволить забезпечити практичну реалізацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] J. L. McCreary, "Matching properties, and voltage and temperature dependens of MOS capacitors," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 16, no. 6, pp. 608-616, December. 1981.

[2] О. Д. Азаров, *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2004.

[3] С. М. Захарченко, А. В. Росощук, и М. Г. Захарченко, «Метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення.» *Вісник національного університету «Львівська політехніка» Серія «Теплоенергетик. Інженерія довідля. Автоматизація»*, № 792, с. 21-28, 2014.

[4] С. М. Захарченко, А. В. Росощук, Є. І. Зеленська, та Р. С. Гуменюк, «Метод оперативного виявлення поодиноких відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 1, № 32, с. 40-47, 2015.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.09.2018

Захарченко Сергій Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: zachar@i.ua ;

Гуменюк Роман Сергійович — студент факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, e-mail: romka_gumeniuk@mail.ru ;

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Захарченко Михайло Григорович — старший викладач, e-mail: mzahar@i.ua ;

Вінницький технічний коледж, Вінниця

S. M. Zakharchenko¹
R. S. Humeniuk¹
M. H. Zakharchenko²

Method for Controlling the Bit's Deviations of Successive Approximation ADC with Weight Redundancy from Analysis of Output Code

¹Vinnytsia National Technical University;

²Vinnytsia Technical College

The analysis of transfer curve successive approximation ADC with weight redundancy is done. It is shown that unlike binary ADCs, not all code combinations are used to represent an input signal. The number of unused combinations is determined by the base of counting system and increases with its decreasing. There has been presented the method of control of the unused combinations in the transfer curve of the successive approximation ADC with weight redundancy. This method allows recording the fact of the deviations of the weight of the digits of the converter directly in the conversion process. Also, under certain conditions, this allows to determine the bit or bits in which the deviation occurred. The conditions of appearance of unused combinations, their location and reasons for switching combinations from one category to another are determined. It is shown that unused combinations form groups that are located in fixed zones of ADC transfer curve. It is shown that for each zone there is a most influential bit. The structure of unused combinations zones is considered, in particular, it is shown that certain zones consist of several sub-regions, and the deviation of the corresponding bit equally affects the changes in the list of unused combinations of each subzone, which significantly simplifies the procedure for controlling the deviation of the weight of the corresponding bit. The algorithm of the successive approximation ADC with weight redundancy is proposed, which involves the procedure of unused combinations record by observing in the mode of converting a test or ordinary input signal and a procedure for controlling the transition of combinations from the category of unused to used and vice versa. The requirements for the auxiliary and basic signal are defined, which will allow to discover unused combinations. The recommendations for the proposed method realization for the rapid detection of bits deviations in the successive approximation ADC with weight redundancy have been developed.

Keywords: analog-to-digital conversion, weight redundancy, successive approximation ADC, transfer curve, unused combinations.

Zakharchenko Serhii M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Computer Facilities, e-mail: zachar@i.ua ;

Humeniuk Roman S. — Student of the Chair of Information Technologies and Computer Engineering, e-mail: romka_gumeniuk@mail.ru ;

Zakharchenko Mykhailo H. — Senior Lecturer, e-mail: mzahar@i.ua

С. М. Захарченко¹
Р. С. Гуменюк¹
М. Г. Захарченко²

Метод контроля отклонений весов разрядов АЦП последовательных приближений с весовой избыточностью по анализу выходного кода

¹Винницкий национальный технический университет;

²Винницкий технический колледж

Проанализирована характеристика преобразования АЦП последовательного приближения с весовой избыточностью. Показано, что в отличие от двоичного АЦП не все кодовые комбинации используются для представления входного сигнала. Количество неиспользованных комбинаций определяется основанием рабочей системы счисления и увеличивается при уменьшении последней. Предложен метод контроля неиспользованных комбинаций, возникающих в процессе работы АЦП последовательного приближения с весовой избыточностью. Это позволяет фиксировать факт появления отклонений весов разрядов преобразователя непосредственно в процессе основного преобразования. Также при определенных условиях это позволяет определить номер или номера разрядов, в которых состоялись отклонения. Определены условия появления неиспользованных комбинаций, их расположение и причины перехода комбинаций из одной категории в другую. Показано, что неиспользованные комбинации образуют группы, которые расположены в фиксированных зонах характеристики преобразования АЦП. Показано, что для каждой зоны существует разряд преобразователя, значение которого является наиболее влиятельным именно для этой зоны. Рассмотрена структура зон неиспользованных комбинаций, в частности показано, что определенные зоны состоят из нескольких подзон, причем отклонения соответствующего разряда одинаково влияют на изменения в перечне неиспользованных комбинаций каждой из подзон, что существенно упрощает процедуру контроля отклонения веса соответствующего разряда. Предложен алгоритм работы АЦП последовательного приближения с весовой избыточностью, который предусматривает процедуру фиксации неиспользованных комбинаций путем наблюдения в режиме преобразования тестового или обычного входного сигнала и процедуру контроля перехода комбинаций из категории неиспользованных в категорию использованных и наоборот. Определены требования к вспомогательному и основному сигналу, позволяющие провести процедуру фиксации неиспользованных комбинаций. Разработаны рекомендации по применению предложенного метода для оперативного выявления отклонений весов разрядов в АЦП последовательного приближения с весовой избыточностью.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование последовательного приближения, весовая избыточность, характеристика преобразования, неиспользованные комбинации.

Захарченко Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, e-mail: zahar@i.ua ;

Гуменюк Роман Сергеевич — студент факультета информационных технологий и компьютерной инженерии, e-mail: romka_gumeniuk@mail.ru ;

Захарченко Михаил Григорьевич — старший преподаватель, e-mail: mzahar@i.ua