

УДК 681.3:621.375

С.М. Захарченко, канд. техн. наук, доц.,
О.В. Бойко,
А.В. Росощук
Вінницький національний технічний університет
zahar@vstu.vinnica.ua, sashokbss@rambler.ru, a.rososhchuk@gmail.com

Метод визначення основи системи числення надлишкового АЦП за аналізом кодувальної характеристики

Проведено дослідження кодувальної характеристики надлишкового АЦП. Доведено можливість визначення основи системи числення перетворювача шляхом аналізу окремих ділянок кодувальної характеристики. Досліджено метод визначення основи системи числення за аналізом кодувальної характеристики та оцінено його точність.

Ключові слова: *циклічний АЦП, вагова надлишковість, зони «заборонених» та «дозволенних» комбінацій, калібрування, аналогово-цифрове перетворення.*

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі послідовного наближення широко використовуються в різноманітних системах завдяки оптимальному співвідношенню між такими параметрами, як швидкодія, роздільна здатність та структурна складність. Найбільш поширеним способом забезпечення високої точності цих пристроїв є застосування методів самокалібрування ваг розрядів [1,2]. Існують різноманітні стратегії калібрування АЦП [3,4], однак всі вони реалізуються в цифро-аналоговому вигляді, тобто потребують використання додаткових калібрувальних ЦАП. Одним з перспективних методів покращення характеристик АЦП послідовного наближення є застосування вагової надлишковості (ВН) [5]. На сьогоднішній день розроблено низку методів покращення як швидкодії, так і точності даного класу перетворювачів за рахунок використання ВН [6-8].

Однак існують такі різновиди АЦП послідовного наближення, специфіка функціонування яких унеможлиблює застосування відомих підходів до самокалібрування. Зокрема в циклічних або алгоритмічних АЦП [9] неможливо виділити окремі розряди і здійснити їх самокалібрування. Однак відомо, що в таких АЦП похибка лінійності призводить виключно до змінення коефіцієнта множення на 2 [10], тобто, фактично змінюється основа системи числення.

Особливістю АЦП з ВН є наявність зон перекриття в кодувальній характеристиці, внаслідок чого одному значенню вхідного сигналу відповідають кілька значень вихідного коду. Поява того чи іншого значення вихідного коду із множини можливих залежить від багатьох чинників, зокрема основи системи числення,

відхилень ваг розрядів, динамічних характеристик перетворювача тощо [7].

Встановлення взаємозв'язку між набором можливих значень вихідного коду та основними параметрами перетворювача дозволить оптимізувати процес калібрування АЦП з ВН, зокрема визначити розряди, що потребують калібрування. Визначення основи числення шляхом аналізу кодувальної характеристики робить можливим калібрування циклічних АЦП [11]. Аналіз кодувальної характеристики в процесі основного перетворення дозволить також визначити моменти часу, коли необхідно провести калібрування. Саме тому тема статті є актуальною.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка методу визначення основи системи числення надлишкового АЦП за аналізом кодувальної характеристики.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити процес утворення зон «заборонених» комбінацій кодувальної характеристики надлишкового АЦП;
- розробити та дослідити метод визначення основи системи числення надлишкового АЦП за аналізом кодувальної характеристики;
- продемонструвати роботу методу на прикладі;
- оцінити точність роботи методу.

Дослідження кодувальної характеристики надлишкового АЦП

Принцип функціонування АЦП послідовного наближення передбачає послідовне визначення розрядів вихідного коду починаючи з най-

старшого [5]. Таким чином при застосуванні ВН за наявності кількох варіантів вихідного коду для певного значення вхідного сигналу буде вибрано «старше» значення. Таким чином кодувальна характеристика набуває вигляду, що наведено на рис.1.

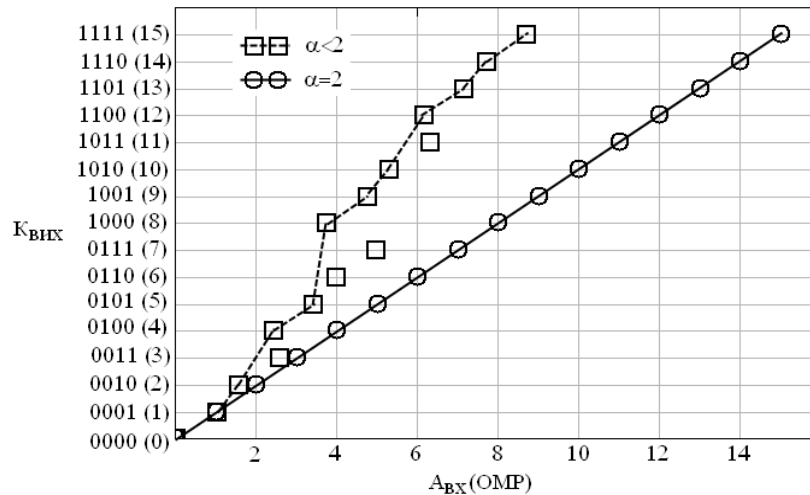


Рисунок 1 – Кодувальна характеристика АЦП порозрядного наближення

Аналіз рис.1 показує, що при застосуванні ВН у вихідному коді будуть відсутні певні комбінації, в подальшому будемо називати їх „забороненими”, а всі інші – «дозволеними». Для наведеного прикладу заборонених комбінацій 4: 0011 (3), 0110 (6), 0111 (7) та 1011 (11). Кількість «заборонених» комбінацій залежить від розрядності перетворювача та основи системи числення. Комбінація буде «забороненою» за умови, що існує «дозволена» комбінація вихідного коду з більшим порядковим номером та меншим значенням $A_{вх}$:

$$A(K_3^k) \geq A(K_\partial^l), \quad (1)$$

де $A(K_3^k)$ та $A(K_\partial^l)$ значення вхідного аналогового сигналу, що відповідає забороненій кодовій комбінації з номером k та дозволеній кодовій комбінації з номером l відповідно, причому $l > k$. Наприклад, «заборонена» комбінація номер 6 та «дозволена» комбінація номер 8 на рис.1 утворюють пару кодових комбінацій, для яких виконується умова (1). Аналогічні пари утворюють комбінації з номерами 3 та 4, 7 та 9, 11 та 12.

Слід звернути увагу, що за відсутності відхилень ваг розрядів місце розташування заборонених комбінацій є чітко визначеним.

«Заборонені» комбінації утворюють групи, які будемо називати зонами «заборонених» комбінацій.

Для ідентифікації зон будемо використовувати номер найстаршого розряду, який гарантовано змінюється при переході від нижнього кордону зони до верхнього. Таким чином центральна зона буде називатись 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} ; для підзон $(n-2)$ -го рівня – 2^{n-2} та $2^{n-2} + 2^{n-1}$; для підзон $(n-3)$ -го рівня – 2^{n-3} , $2^{n-3} + 2^{n-2}$, $2^{n-3} + 2^{n-1}$, $2^{n-3} + 2^{n-2} + 2^{n-1}$ і т.д.

При збільшенні основи системи числення нижній кордон буде зсуватись догори і при певних значеннях α досягне значення верхнього кордону. Подальше збільшення α призводить до виродження зони – кількість заборонених комбінацій в зоні дорівнює нулю. При зменшенні α нижній кордон навпаки буде зсуватись донизу, а кількість заборонених комбінацій буде збільшуватись.

Пару «дозволенних» кодових комбінацій, між якими розташовані «заборонені» комбінації j -ої зони будемо називати граничними кодовими комбінаціями або граничними точками j -ої зони. Так для прикладу на рисунку 1 граничними комбінаціями $(n-1)$ -ї зони є 0101 (5) та 1000 (8).

Визначення основи системи числення

Аналіз кодувальної характеристики надлишкового АЦП дозволяє визначити реальне значення основи системи числення. Нехай $K_{2^{n-1}-k}$ та $K_{2^{n-1}}$ (рис. 2) дві граничні точки між якими знаходиться k точок, що відповідають забороненим комбінаціям [11].

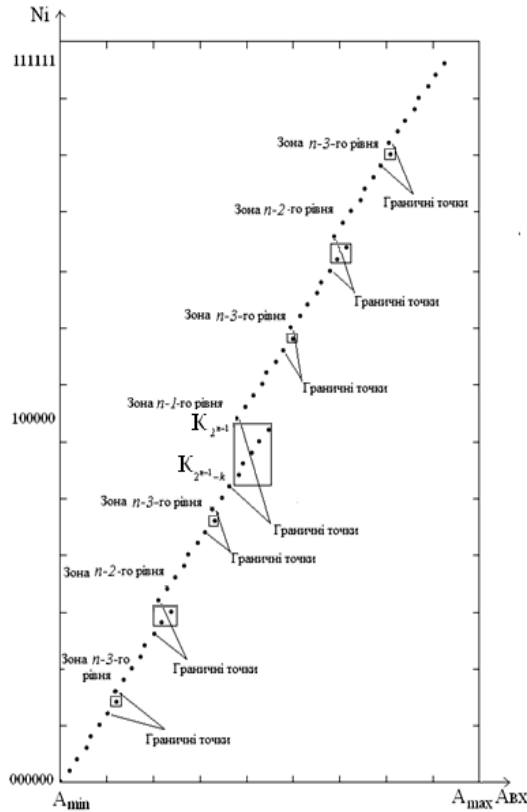


Рисунок 2 – Передатна характеристика 6-ти розрядного АЦП із основою системи числення $\alpha=1,8$

З рис. 2 видно, що для зони (n-1)-го рівня справедлива нерівність:

$$A(K_{2^{n-1}-k}) \leq A(K_{2^{n-1}}) \leq A(K_{2^{n-1}-k+1}) \quad (2)$$

Таким чином для визначення діапазону можливих значень основи системи числення α необхідно розв'язати дану нерівність. Відповідно максимальне і мінімальне значення α можна знайти розв'язавши такі рівняння:

$$A(K_{2^{n-1}-k}) = A(K_{2^{n-1}}), \quad (3)$$

$$A(K_{2^{n-1}-k+1}) = A(K_{2^{n-1}}), \quad (4)$$

де $A(K) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \alpha^i$, $a_i \in \{0,1\}$ – відповідні двійкові розряди коду K .

Наприклад, якщо між граничними точками знаходиться одна точка, яка потрапила в зону багатозначного представлення, то відповідні коди та їх аналогові еквіваленти матимуть такий вигляд:

$$K_{\emptyset}^{2^{n-1}} = 10..00, A(K_{\emptyset}^{2^{n-1}}) = \alpha^{n-1}, \quad (5)$$

$$K_{\emptyset}^{2^{n-1}-1} = 01..11, A(K_{\emptyset}^{2^{n-1}-1}) = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha^i, \quad (6)$$

$$K_3^{2^{n-1}-2} = 01..10, A(K_3^{2^{n-1}-2}) = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha^i. \quad (7)$$

Підставивши (5-7) в (3-4) отримаємо вирази для розрахунку діапазону допустимих значень α :

$$\alpha_{n-1}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha_{n-1}^i, \quad (8)$$

$$\alpha_{n-1}^{n-1} = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha_{n-1}^i. \quad (9)$$

За наявності k заборонених комбінацій вирази (8-9) набувають вигляду:

$$\alpha_{n-1}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} a_i \alpha_{n-1}^i, \quad (10)$$

$$\alpha_{n-1}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} b_i \alpha_{n-1}^i, \quad (11)$$

де a_i – розряди коду $K_{\emptyset}^{2^{n-1}-k}$, b_i – розряди

коду $K_3^{2^{n-1}-k+1}$.

Для знаходження реальної основи системи числення необхідно розв'язати останні співвідношення відносно α , а результат осереднити:

$$\alpha_{n-1} = \frac{\alpha_{n-1}^{\min} + \alpha_{n-1}^{\max}}{2}, \quad (12)$$

при цьому похибка визначення α на основі аналізу зони (n-1)-го рівня визначатиметься як

$$\Delta\alpha_{n-1} = \alpha_{n-1} - \alpha_{i0}, \quad (13)$$

а її максимальне значення відповідно становитиме:

$$\Delta\alpha_{n-1}^{\max} = \frac{\alpha_{n-1}^{\max} - \alpha_{n-1}^{\min}}{2}. \quad (14)$$

Аналогічним чином розраховується α на основі аналізу зони (n-2)-го рівня. Нехай ця зона містить l заборонених комбінацій, тоді при здійсненні розрахунку на основі першої підзони вирази (10-11) набувають вигляду:

$$\alpha_{n-2}^{n-2} = \sum_{i=0}^{n-3} a_i \alpha_{n-2}^i, \quad (15)$$

$$\alpha_{n-2}^{\min} = \sum_{i=0}^{n-3} b_i \alpha_{n-2}^{\min i}, \quad (16)$$

де a_i – розряди коду $K_0 2^{n-2-l}$, b_i – розряди

коду $K_3 2^{n-2-l+1}$.

В загальному випадку для зони p -го рівня, що містить s_p заборонених комбінацій вирази для розрахунку α набувають вигляду:

$$\alpha_{p \max}^p = \sum_{i=0}^{p-1} a_i \alpha_{p \max}^i, \quad (17)$$

$$\alpha_{p \min}^p = \sum_{i=0}^{p-1} b_i \alpha_{p \min}^i, \quad (18)$$

де a_i – розряди коду $K_0 2^p - s_p$, b_i – розряди

коду $K_3 2^p - s_p + 1$.

$$\alpha_p = \frac{\alpha_{p \min} + \alpha_{p \max}}{2}, \quad (19)$$

$$\Delta \alpha_p = \alpha_p - \alpha_{id}. \quad (20)$$

Аналіз похибки методу

Графічну інтерпретацію залежності похибки визначення основи системи числення від, власне, самої системи числення для 6-розрядного АЦП наведено на рис.3.

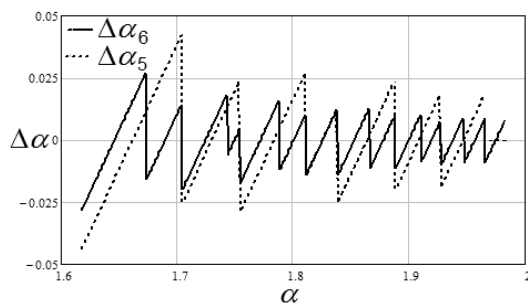


Рисунок 3 – Похибка визначення основи СЧ для 7-розрядного АЦП

З рисунку видно, що в загальному випадку менша похибка визначення α відповідає зоні більшого рівня. Таким чином найінформативнішою зоною, з точки зору визначення основи системи числення є зона $(n-1)$ -го рівня.

З останнього виразу витікає, що максимальна похибка спостерігатиметься для кодової комбінації, що містить всі одиниці i , відповідно, визначається як

$$\Delta_{\max} = \sum_{i=0}^{n-1} (\alpha + \Delta\alpha)^i - \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i. \quad (22)$$

Графічну інтерпретацію останнього виразу для 7-розрядного АЦП наведено на рис.4

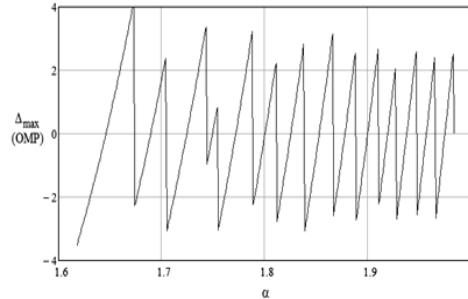


Рисунок 4 – Максимальна методична похибка для 7-розрядного АЦП

Оскільки вага i -го розряду АЦП $Q_i = \alpha^i$, похибка визначення останньої за допомогою запропонованого методу дорівнює

$$\Delta Q_i = Q_i^* - Q_i^{id} = (\alpha + \Delta\alpha)^i - \alpha^i, \quad (21)$$

де Q_i^* та Q_i^{id} відповідно реальне та ідеальне значення ваги i -го розряду.

Аналіз наведеного графіку показує, що максимальна методична похибка для більшості систем числення не перебільшує 3ОМР. Дослідження також показали, що значення останньої несуттєво змінюється при збільшенні кількості розрядів. Слід також зауважити, що значення похибки може бути зменшено завдяки застосування додаткових заходів.

Висновки

В роботі розглянуто та досліджено метод визначення основи системи числення надлишкового АЦП за аналізом кодувальної характеристики.

Показано, що за наявності вагової надлишковості не всі кодові комбінації зустрічаються у вихідному коді, причому так звані «заборонені» комбінації локалізуються в певних зонах.

Показано, що для визначення основи системи числення найінформативнішою є зона $(n-1)$ -рівня, яка розташована в середині кодувальної характеристики.

Показано, що точність методу залежить від основи системи числення, а максимальна похибка для найгіршої кодової комбінації для більшості α не перебільшує кількох ОМР.

Застосування запропонованого методу в циклічних АЦП дозволить визначити реальну систему числення перетворювача i , таким чином, забезпечити високу роздільну здатність.

Список використаної літератури

1. On board self-calibration of analog-to-digital and digital-to-analog converters: U.S. Patent 4399426 / Tan K.S. – 1983. – Aug.16. – P.21-25.
2. Hae-Seung Lee. Self-calibration technique for A/D converters / Hae-Seung Lee, David A.Hodges // IEEE Transactions on circuits and systems. – 1983, March. – Vol.30. – №3. – P. 188-190.
3. Грушвицкий Р.И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурсаев, В.Б. Смолов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
4. Khen-Sang Tan. Error correction techniques for high-performance differential A/D Converters / Khen-Sang Tan, Sami Kiriaki, Michiel de Wit // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1990, Dec. – Vol. 25. – №6. – P. 1318-1327.
5. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення / О.Д. Азаров. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2004. – 257 с.
6. Азаров О.Д. Високо лінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів / О.Д. Азаров, О.А.Архипчук, С.М. Захарченко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 125 с.
7. Захарченко С.М. Самокалібровані АЦП з накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення / С.М. Захарченко, О.Д. Азаров, О.М. Харьков. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 235 с.
8. Азаров О.Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов / О.Д. Азаров, О.В.Кадук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2010. – 150 с.
9. Lee C.C. A new switched-capacitor realization for cyclic analog-to-digital converter / C.C. Lee // Proc. ISCAS'83, Newport, CA. – 1983. – P. 1261-1265.
10. Мулявка Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами / Я. Мулявка; пер. с пол. – М.: Мир, 1992. – 253 с.
11. Захарченко С.М. Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю / С.М. Захарченко, М.Г. Захарченко, О.В. Бойко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2011. – № 4. – С. 143-148.

Надійшла до редколегії 20.03.2012

**С.М. ЗАХАРЧЕНКО, А.В. БОЙКО,
А.В. РОСОЩУК**

Винницкий национальный технический университет

S.M. ZAHARCHENKO, A.V. BOYKO, A.V. ROSOSHCHUK

The Vinnytsya National Technical University

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО АЦП ПО АНАЛИЗУ КОДИРУЮЩЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено исследование кодирующей характеристики избыточного АЦП. Доказана возможность определения основы системы счисления преобразователя путем анализа отдельных участков кодирующей характеристики. Исследован метод определения основания системы счисления по анализу кодирующей характеристики и оценена его точность.

Ключевые слова: *циклический АЦП, весовая избыточность, зоны «запрещенных» и «разрешенных» комбинаций, калибрование, аналогово-цифровое преобразование.*

METHOD OF DETERMINING THE BASE OF NUMBER SYSTEM ON THE ANALYSIS OF REDUNDANT ADC CODING CHARACTERISTICS

An investigation of redundant ADC's coding characteristics was conducted. The possibility to determine the base of the number system by analyzing individual sections of coding characteristics was proved. Method of determining the base of number system on the analysis of redundant ADC coding characteristics was explored and the accuracy of the method was evaluated

Keywords: *cyclic ADC weight redundancy, zone of «forbidden» and «allowed» combinations, calibration, analog-digital conversion.*