

АНОТАЦІЯ

Гуменюк Р.С. Методи та засоби оперативного оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» (12 «Інформаційні технології»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

В дисертаційній роботі розв'язана наукова задача з розробки методів та засобів оперативного оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. Аналого-цифрові пристрої послідовного наближення широко застосовуються в інформаційно-вимірювальних системах, системах збору і оброблення даних, в системах опрацювання голосу і відео. Сучасні галузі застосування АЦП висувають високі вимоги відносно точності і швидкодії. Традиційні методи підвищення точності мають принципові обмеження, обумовлені застосування двійкової системи числення. Застосування вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення дає додаткові можливості покращення характеристик АЦП послідовного наближення. Цей підхід дозволяє виконувати коригування похибок розряді виключно в цифровій формі без застосування додаткових прецизійних аналогових вузлів. В той же час залишаються актуальними задачі точного визначення моменту часу, коли необхідно проводити калібрування та проведення калібрування без переривання процесу основного перетворення, що є вкрай важливим для більшості застосувань, особливо в системах критичного призначення.

В дисертаційній роботі проведено аналітичний огляд особливостей побудови та функціонування АЦП послідовного наближення, проаналізовано основні типи похибок, що виникають в процесі перетворення та шляхи їх зменшення. Показано, що до категорії похибок, які найскладніше корегуються, належать похибки лінійності, зокрема диференційна та

інтегральна нелінійність. Показано, що сучасні АЦП з роздільною здатністю більше дванадцяти двійкових розрядів потребують періодичного проведення процедури корегування похибок лінійності. Показано, що основним способом корегування похибок лінійності є процедура калібрування перетворювача, яка найчастіше зараз реалізується у вигляді самокалібрування. Проаналізовано базові алгоритми самокалібрування, зокрема алгоритмічні стратегії «знизу-догори», «згори-донизу» та комбінований варіант, визначено переваги та недоліки кожної з них.

Показано, що при застосуванні двійкової системи числення самокалібрування є можливим виключно в цифроаналоговій формі, яка потребує використання додаткових коригуючих аналогових компонентів, що суттєво ускладнює структуру пристрою та його інтегральну реалізацію. Застосування вагової надлишковості дає можливість задачу корегування ваг розрядів перенести виключно в цифрову площину і реалізувати шляхом розрахунку коригуючих поправок, які будуть впливати на вихідний код.

Проаналізовано особливості застосування вагової надлишковості в сучасних перетворювачах форми інформації, математичні основи надлишкових позиційних систем числення, технологію застосування інформаційної надлишковості в техніці перетворення форми інформації. Розглянуто розрядну сітку самокаліброваного АЦП, що складається з умовно «точних» молодших та «неточних» старших розрядів. До категорії «неточних» віднесено розряди, ваги яких під впливом різноманітних чинників можуть суттєво змінюватись і тому потребують періодичного калібрування. Під категорію неточних розрядів потрапляють розряди, ваги яких можуть змінюватись більше ніж на одиницю молодшого розряду.

Показано, що всі сучасні самокалібровані АЦП передбачають зупинку процесу основного перетворення на період калібрування. Крім того залишається актуальним питання визначення періодичності цієї процедури. Класичні двійкові АЦП послідовного наближення принципово не здатні сформулювати явні ознаки необхідності калібрування ваг розрядів. Основними

підходами до таймінгу процедури калібрування є застосування фіксованого проміжку часу між черговими калібруваннями та використання неявних ознак для визначення необхідності проведення калібрування. До неявних ознак як правило відносять зміну зовнішніх чинників, таких як температура, тиск тощо. Слід звернути увагу, що ні перший ні другий підхід не гарантують, що калібрування здійснюється вчасно, причому можливі як випадки проведення калібрування, коли в цьому немає потреби, так і випадки пропусків калібрування, хоча відбулась критична зміна ваг розрядів.

Для дослідження можливості отримання явних ознак необхідності калібрування розроблено математичну модель характеристики перетворення АЦП послідовного наближення. Показано, що при використанні основи системи числення менше 2, не всі двійкові комбінації з'являються на виході перетворювача. Комбінації, що за нормальних умов відсутні на виході перетворювача, отримали назву "невикористаних". Отримано базові математичні співвідношення, що дозволяють визначити перелік "невикористаних" комбінацій залежно від основи системи числення та розрядності перетворювача.

Показано, що «невикористані» комбінації утворюють певні групи, так звані зони "невикористаних" комбінацій, розташування яких є фіксованим. Центральна зона, або зона (n-1)-го рівня, складається з безперервної послідовності кодових комбінацій, розташованих приблизно в середині характеристики перетворення. Зона (n-2)-го рівня містить дві підзони, розташовані симетрично відносно зони (n-1)-го рівня тощо. Кожна зона містить одну або більше послідовних кодових комбінацій, причому номер крайньої верхньої з них (верхній кордон) є фіксованим і не залежить від системи числення. Доведено, що кожна підзона однієї зони містить однакову кількість "невикористаних" комбінацій.

Проведено дослідження впливу поодиноких відхилень ваг розрядів на кількість "невикористаних" комбінацій в окремих зонах. Показано, що відхилення ваги k-го розряду може вплинути на кількість "невикористаних"

комбінацій тільки в зоні k -го рівня та в усіх зонах з номерами більшими за k . Також доведено, що найбільш чутливою до відхилень k -го розряду є саме k -та зона «невикористаних» комбінацій. Отримано математичні співвідношення, що визначають взаємозв'язок між відхиленням k -розряду і кількістю «невикористаних» комбінацій в зоні довільного j -го рівня. Проведено дослідження впливу відхилення кількох ваг розрядів на кількість «невикористаних» комбінацій в різних зонах. Отримано математичні співвідношення та графічні інтерпретації для визначення взаємозв'язку між відхиленнями ваг кількох розрядів та змінами в різних зонах «невикористаних» комбінацій.

Розроблено метод оперативної фіксації відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю, який дозволяє формалізувати процес виявлення відхилень ваг розрядів за аналізом характеристики перетворення. Виявлено характерні риси, що мають всі «невикористані» комбінації в межах певної зони та підзони. Також розглянуто питання перекриття та поглинання зонами «невикористаних» комбінацій вищих рівнів зон нижчих рівнів.

Проведено дослідження можливості оцінювання значень відхилень ваг розрядів за кількістю «невикористаних» комбінацій в певних зонах. Доведено, що похибка оцінювання значення ваги окремого розряду не перебільшує 0,5 одиниці молодшого розряду. Запропоновано послідовний алгоритм визначення відхилень ваг розрядів за аналізом характеристики перетворення. Проведено тестування алгоритму на окремому прикладі, що підтвердило вірність запропонованого методу.

Запропоновано низку структурних реалізацій методів фіксації та оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. Особливістю останніх є те, що вони не передбачають внесення принципових змін в класичну структуру АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю. В базову структурну схему додано окремий блок контролю характеристики перетворення, на вхід якого

подається проміжний надлишковий код, який формується в процесі аналого-цифрового перетворення. Запропоновано модифікації алгоритмів роботи самокаліброваного АЦП з ваговою надлишковістю, що реалізують можливості контролю відхилень ваг розрядів та оцінювання значень цих відхилень. Запропоновано структурні реалізації блоку контролю характеристики перетворення як для методу контролю відхилень ваг розрядів, так і для методу оцінювання значень цих відхилень. Показано, що блок контролю характеристики перетворення має регулярну структуру де кількість модулів визначається кількістю зон «невикористаних» комбінацій. Цей факт суттєво спрощує реалізацію останнього на основі регулярних цифрових структур.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання розроблених методів. Програмне забезпечення складається з двох незалежних компонентів. Перший компонент дозволяє моделювати процес формування характеристики перетворення АЦП послідовного наближення за наявності та відсутності відхилень ваг розрядів та визначати перелік “невикористаних” комбінацій. Другий компонент моделює зворотню процедуру - оцінювання відхилень ваг розрядів за кількістю “невикористаних” комбінацій в певній зоні. Незалежна реалізація окремих компонентів дозволяє перевірити коректність роботи запропонованого методу контролю та оцінювання відхилень ваг розрядів. Наведено результати тестування запропонованого програмного продукту.

Ключові слова: АЦП послідовного наближення, характеристика перетворення, відхилення ваг розрядів, самокалібрування, вагова надлишковість.

ABSTRACT

Humeniuk R. S. Methods and instruments for operative estimation of weight deviations of the ADC digits of consecutive approximation with weight redundancy.
- Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 123 "Computer Engineering" (12 "Information Technology"). - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

The scientific problem on the development of methods and instruments of operative estimation of weight deviations of the ADC digits of consecutive approximation with weight redundancy is solved in the dissertation work. Analog-digital serial approximation devices are widely used in information and measurement systems, in data acquisition and processing systems, in voice and video processing systems. Modern ADC applications place a high priority on accuracy and speed. Traditional methods of improving accuracy have fundamental limitations due to the usage of the binary system. The usage of weight redundancy in the form of redundant positional number systems provides additional opportunities to improve the characteristics of the ADC sequential approximation. This approach allows us to correct the discharge errors only in digital form without the usage of additional precision analog nodes. At the same time, we still need to focus on the tasks of accurate determination of the time, especially when it is necessary to perform calibration without interrupting the process of the main transformation, which is extremely important in critical systems, remain relevant.

the analytical review of features of construction and functioning of ADC of consecutive approximation In the dissertation work was done, the basic types of the errors arising in the course of transformation and ways of their reduction are analyzed. It is shown that the category of errors that are most difficult to correct includes linearity errors, in particular differential and integral nonlinearity. It is shown that modern ADCs with a resolution of more than 12 binary digits require a periodic procedure for correcting linearity errors. It is shown that the main way to correct linearity errors in the calibration procedure of the converter, which is often implemented in the form of self-calibration. The basic algorithms of thermal calibration, in particular, algorithmic strategies "bottom-up" and "top-down" are analyzed, the advantages and disadvantages of each of them are determined.

It is shown that self-calibration is possible only in digital-analog form when we are using a binary number system, which requires the use of additional corrective analog components, which significantly complicates the structure of the device and its integrated implementation. The use of weight redundancy makes it possible to transfer the task of adjusting the weights of the digits exclusively in the digital plane.

Peculiarities of application of weight redundancy in modern converters of the form of information, mathematical bases of redundant positional number systems, the technology of usage the information redundancy in the technique of transformation of the form of information are analyzed. A bit grid of a self-calibrated ADC consisting of conditionally "accurate" junior and "inaccurate" senior bits is considered. The category of "inaccurate" includes discharges, the weights of which under the influence of various factors can change significantly and therefore require periodic calibration.

It is shown that all modern self-calibrated ADCs require the procedure of stopping the process of basic conversion for the calibration period. In addition, the question of determining the frequency of this procedure remains relevant. Classical binary ADCs of sequential approximation are not able to form clear signs of the need to calibrate the weights of the digits. The main approaches for the timing of the calibration procedure are next - the use of a fixed period of time between successive calibrations and the use of implicit features to determine the need for calibration. Implicit signs usually include changes in external factors, such as temperature, pressure, and so on. It should be noted that neither the first nor the second approach guarantees that the calibration is carried out in time.

A mathematical model of the ADC transformation characteristic of sequential approximation was developed to research the possibility of obtaining clear signs of the need for calibration. It is shown that not all binary combinations appear at the output of the converter when we use the basis of the number system which is less than 2. Combinations that are normally absent at the output of the converter are called "unused". The basic mathematical relations are obtained, which allow determining the list of "unused" combinations.

It is shown that "unused" combinations form certain groups, the so-called zones of "unused" combinations, the location of which is fixed. The central zone, or zone (n-1) -th level, consists of a continuous sequence of code combinations located approximately in the middle of the transformation characteristic. The (n-2) level zone contains two subzones located symmetrically to the (n-1) level zone. Each zone contains one or more consecutive code combinations, and the number of the uppermost of them (upper border) is fixed and does not depend on the number system. It is proved that each subzone of one zone contains the same number of unused combinations.

Next research was made - the effect of single weight deviations of the discharges on the number of "unused" combinations in some areas. It is shown that the deviation of the weight of the k-th digit can affect the number of unused combinations only in the zone of the k-th level and in all zones with numbers greater than k. It is also proved that the k-th zone of "unused" combinations is the most sensitive to deviations of the k-th category. Mathematical relations are obtained to determine the relationship between the deviation of the k-digit and the number of unused combinations in the zone of arbitrary j-th level. Research was made about the effect of the deviation of several weights of discharges on the number of "unused" combinations in different zones. Mathematical relations and graphical interpretations are obtained to determine the relationship between the deviations of the weights of several digits and changes in different areas of "unused" combinations.

The method of operative fix of weight deviations of ADC digits of consecutive approximation with weight redundancy which allows formalizing the process of detection of weight deviations of digits on the analysis of characteristic of transformation is developed. Characteristic features having all unused combinations within a certain zone and subzone are revealed. The issues of overlapping and absorption by zones of higher levels and zones of lower levels are also considered.

The research was made about the possibility of estimating the values of weight deviations of the discharges by the number of unused combinations in certain areas.

It is proved that the error of estimating the weight value of a single category does not exceed 0.5 units of the lower category. A sequential algorithm for determination of the deviations of bit weights by analyzing the transformation characteristics is proposed. The algorithm was tested on a separate example, which confirmed the accuracy of the proposed method.

A number of structural implementations of methods to fix and estimate the ADC bits deviation of sequential approximation with weight redundancy are proposed. The peculiarity of the last is that they do not involve fundamental changes in the classical structure of the ADC sequential approximation with weight deviation. A separate control unit of the conversion characteristic is added to the basic block diagram, to the input of which an intermediate redundant code is fed, which is formed in the process of analog-to-digital conversion. Modifications of operation algorithms of self-calibrated ADC with weight redundancy are offered, which realize possibilities of control of digits weight deviations and realize also an estimation of values of these deviations. Structural implementations of the control unit of the transformation characteristic are proposed both for the method of control of weight deviations of digits and for a method of estimation of values of these deviations.

Specialized software was developed for modeling the developed methods. The software consists of two independent components. The first component allows to model the process of forming the ADC conversion characteristic of sequential approximation in the presence and absence of deviations of the weights of the digits and to determine the list of "unused" combinations. The second component simulates the inverse procedure - estimating the deviations of the weights of the discharges by the number of "unused" combinations in a given area. Independent implementation of individual components allows you to check the correctness of the proposed method of control and evaluation of weight deviations of the discharges. The results of testing the proposed software product are provided.

Keywords: ADC sequential approximation, transformation characteristics, deviation of discharge weights, self-calibration, weight redundancy.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] 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.
- [2] S. Zakharchenko та R. Humeniuk, «Bit error notification and estimation in redundant successive approximation ADC», *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, № 10(4), р. 29–32, 2020.
- [3] С. М. Захарченко, Р.С. Гуменюк, та М.Г. Захарченко, «Метод визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення в режимі основного перетворення», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т.1, №38, с. 53-61, 2017.
- [4] С. М. Захарченко, Р.С. Гуменюк, та М.Г. Захарченко, «Метод контролю відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю за аналізом вихідного коду», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 53–59, 2018.
- [5] С. М. Захарченко, М. Г. Захарченко та Р. С. Гуменюк, «Метод ініціалізації зон “невикористаних” комбінацій в АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю», на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету* (2018), Вінниця: ВНТУ, 2018, с. 914–916. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/index/pages/view/zbirn2018>.
- [6] S. Zakharchenko, M. Zakharchenko та R. Humeniuk, «Method of determining the unused combinations in the ADC of successive approximation with weight redundancy» на Шоста міжнародна науково-практична конференція "Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації", Вінниця: ВНТУ, 2017, с. 114–117.

- [7] С. М. Захарченко, Р. С. Гуменюк та М. Г. Захарченко, «Спеціалізовані програмні засоби для моделювання характеристики перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю», на 5 th International scientific and practical conference «*Priority directions of science and technology development*», Kyiv, 2021, с. 406–411.