

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГУМЕНЮК РОМАН СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 681.518

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ**  
**ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З**  
**ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Спеціальність 123 – «Комп'ютерна інженерія»

Галузь знань 12 – «Інформаційні технології»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Р. С. Гуменюк

Науковий керівник:

Захарченко Сергій Михайлович,  
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця -2021

## 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-вимірвальних 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 залежать 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 зворотну 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), p. 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.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ ШЛЯХІВ КОНТРОЛЮ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ	21
Особливості побудови та функціонування АЦП послідовного наближення	21
Огляд похибок АЦП послідовного наближення та шляхів їх врахування .....	30
Аналіз методів застосування вагової надлишковості для підвищення точності АЦП послідовного наближення.....	38
Висновки до першого розділу.....	48
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ .....	50
Розробка математичної моделі ХП АЦП послідовного наближення.....	50
Дослідження впливу поодиноких відхилень ваг розрядів на структури зон “невикористаних” комбінацій.....	59
Аналіз впливу відхилень кількох ваг розрядів на ХП АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	69
Висновки до другого розділу .....	75
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ .....	77
Метод оперативної фіксації відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	77
Метод оперативного оцінювання значень відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	84

Методика визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	91
3.4. Дослідження методу оперативного оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	95
Висновки до третього розділу .....	99
<b>РОЗДІЛ 4 ПРОЕКТУВАННЯ ЗАСОБІВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ВІДХИЛЕНЬ ВАГ РОЗРЯДІВ АЦП ПОСЛІДОВНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ .....</b>	<b>101</b>
Структурна реалізація методів фіксації та оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю .....	101
Проектування спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання методів контролю відхилень ваг розрядів АЦП.....	110
Тестування спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання методів контролю відхилень ваг розрядів АЦП.....	121
Висновки до четвертого розділу .....	127
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>128</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>130</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>143</b>
Додаток А Акти впровадження результатів досліджень.....	144
Додаток Б Лістинг програмного продукту.....	146
Додаток В Список публікацій здобувача .....	159

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

DNL – диференційна нелінійність

INL – інтегральна нелінійність

АК – аналоговий комутатор

АЛП – арифметико-логічний пристрій

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БДС – блок допоміжного сигналу

БКХП – блок контролю характеристики перетворення

БП – блок пам'яті

БЦАП – багатофункціональний ЦАП

ВН – вагова надлишковість

НПСЧ – надлишкові позиційні системи числення

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій

ОМР – одиниця молодшого розряду

ПВЗ – пристрій вибірки зберігання

ПН – послідовне наближення

ПФІ – перетворювачі форми інформації

РПН – регістр послідовних наближень

СП – схема порівняння

ХП – характеристика перетворення

ЦАП – цифроаналоговий перетворювач

ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Одним із різновидів перетворювачів форми інформації є АЦП послідовного наближення, які займають близько 40 % сучасного ринку АЦП [1]. 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 зовнішніх чинників призводить до появи відхилень ваг розрядів [2], [3], при чому максимальні абсолютні відхилення спостерігаються в зоні старших розрядів [4]. Наслідком цього є поява диференційної та інтегральної нелінійностей[5].

Шляхи подолання цієї проблеми можна поділити на технологічні і алгоритмічні. Технологічні методи є досить трудоміськими та дозволяють покращити лінійність на кілька розрядів [4], [5], [6]. Більш універсальним методом подолання згаданої проблеми є використання методів самокоригування [7], [8], [9], [10] і самокалібрування [11], [12], [13], [14], [15] ваг розрядів і характеристики перетворення в цілому. 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.

При поєднання методів самокалібрування та інформаційної надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення можна отримати ще кращі результати. Крім того, побудова АЦП на основі НПСЧ є одним із перспективних шляхів комплексного вирішення проблеми підвищення точності та швидкодії АЦП послідовного наближення [16], [17], [18], [19].

Використання НПСЧ у техніці АЦП та ЦАП почалося в Україні з кінця 70-х років і продовжується сьогодні в науковій школі професора О. Д. Азарова [20], [21], [6], [22], [23], [24], [16], [17]. Крім того, питанням покращення

характеристик АЦП займалися наукові школи України, зокрема, наукові школи під керівництвом З.Р. Мичуди [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], А. І. Кондалєва, В. О. Романова, В. О. Багацького, Фабричева В.А. [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], П. П. Орнатського [48], [49], [50], [51], [52], [53], М. В. Аліпова [54], [55], Б. Й. Швецького [56], Л.Б. Петришина [57], [58]. Загальні принципи побудови та покращення характеристик АЦП досліджувалися та розроблялися науковими школами колишнього СРСР, серед яких можна виділити, В. Б. Смолова [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], Е. І. Гітіса [68], [69], [70], [71].

Питанням покращення характеристик АЦП займалися відомі науковці зарубіжжя, зокрема: Х. Зумбахлен [72], С. Х. Лі [73], [74], [75], [76], [77] з корпорації Analog Device, К. Нагарадж [78], [79] з корпорації Texas Instruments, М. К. Майес та С.В. Чін [80], [81], [82] з корпорації National Semiconductor, а також співробітники науково-дослідних підрозділів інших корпорацій. Технології використання вагової надлишковості для компенсації динамічних похибок розглянуто в [83], [84], [85], [86].

Використання вагової надлишковості при побудові АЦП послідовного наближення дозволило виконувати процедуру калібрування виключно у цифровій формі без фізичного або електричного впливу на ваги розрядів [21], [6], [22], [87], [23], [24]. Застосування методів самокалібрування передбачає вирішення таких задач, як фіксація моменту часу, коли необхідно провести чергове калібрування та організації фоновому калібрування (без переривання процесу основного перетворення). Одним із рішень, що дозволяє в комплексі вирішити обидві задачі є застосування так званої спліт архітектури [88] при побудові АЦП. Однак в даному випадку передбачається використання двох однакових АЦП, що як мінімум вдвічі збільшує апаратні витрати. Використання вагової надлишковості дає можливість здійснення фоновому калібрування без суттєвого збільшення апаратних витрат.

Таким чином 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.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до держбюджетних тем «Компоненти та пристрої системних багаторозрядних перетворювачів форми інформації з ваговою надлишковістю» № державної реєстрації 0113U003137 та «Високопродуктивні багатоканальні аналого-цифрові самокалібровані системи моніторингу й синхронного опрацювання низькочастотних сигналів» (58-Д-398) 2020-2022р. Автор брав участь у виконанні науково-дослідної роботи як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є зменшення технологічних витрат часу на процес калібрування АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі поставлені і розв'язані такі наукові завдання:

- проаналізувати структуру характеристики перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю;
- визначити правила формування переліку “невикористаних” комбінацій в характеристиці перетворення;
- визначити залежності між відхиленнями ваг окремих розрядів АЦП та переліком “невикористаних” комбінацій в характеристиці перетворення;
- дослідити можливості оцінювання значень відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю без переривання основного перетворення;
- розробити спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання характеристики перетворення АЦП послідовного наближення;

- запропонувати практичну реалізацію оцінювання значень відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю без переривання основного перетворення.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення вхідного аналогового сигналу у вихідний двійковий код в АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.

**Предметом дослідження** є характеристика перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.

**Методи дослідження.** В процесі виконання роботи було використано такі методи досліджень: методи математичного аналізу та теорії аналого-цифрового перетворення для створення математичної моделі роботи АЦП послідовного наближення; методи імітаційного моделювання процесу аналого-цифрового перетворення; елементи теорії похибок для встановлення точності розробленого методу.

**Наукова новизна отриманих результатів** і положень, що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні процесу калібрування АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю.

В роботі отримано такі наукові результати:

- **вперше** запропоновано метод оперативного контролю відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю за аналізом вихідного коду, особливість якого полягає у використанні явних ознак для визначення необхідності проведення калібрування, що мінімізує технологічні витрати часу на процедуру калібрування АЦП;

- **вперше** запропоновано метод оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення, який полягає у визначити відхилення окремих розрядів перетворювача без переривання процесу основного перетворення, що дозволило виключити режим додаткового калібрування;

- **подальшого розвитку** отримала математична модель перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю, яка відрізняється від відомих виділенням зон невикористаних комбінацій, що

дозволило встановити залежність між відхиленнями ваг окремих розрядів та структурою характеристики перетворення.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в

- розробці методики визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю на основі аналізу характеристики перетворення;
- розробці структурних схем та алгоритмів функціонування АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю з можливістю контролю відхилень ваг розрядів;
- розробці структурних схем блоку контролю характеристики перетворення;
- розробці спеціалізованого програмного забезпечення для дослідження характеристики перетворення АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю;
- розробці спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання процесу визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю на основі аналізу характеристики перетворення.

Отримані результати дослідження було впроваджено в ТОВ МАЙТЕК ПЛЮС та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: в роботі [89] – розроблено алгоритм фіксації зон невикористаних комбінацій на характеристиці перетворення; в роботі [90] – встановлено залежності між значенням відхилення ваги окремого розряду і кількістю «невикористаних» комбінацій в різних зонах; в роботі [91] – виконано дослідження характеристики перетворення АЦП послідовного наближення за наявності вагової надлишковості; в роботі [92] – проведено моделювання в пакеті

MathCAD впливу відхилень ваг кількох розрядів АЦП на перелік «невикористаних» комбінацій в ХП; в роботі [93] – запропоновано активну ініціалізацію зон «невикористаних» комбінацій на початку перетворення; в роботі [94] – отримано графічну інтерпретацію ХП з виділеними зонами «невикористаних» комбінацій; в роботі [95] – розроблено спеціалізовані програмні засоби для моделювання ХП.

**Апробація матеріалів дисертації.** Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: Шоста Міжнародна науково-практична конференція "Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації", Вінниця, 2017; V International Scientific and Practical Conference “Priority directions of science and technology development”, Kyiv, 2021; XLVII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 2018.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 7 наукових працях, в тому числі 3 статті в наукових фахових виданнях України, 1 – у періодичному науковому виданні іншої держави, 3 – у матеріалах конференцій та семінарів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 160 сторінок, з яких основний зміст викладений на 117 сторінках друкованого тексту, містить 54 рисунки, 9 таблиць. Список використаних джерел складається зі 132 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, лістинг програмного продукту та список публікацій за темою дисертації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. Н. Дяченко, “Анализ рынка аналогово-цифровых преобразователей,” *«Техника средств связи»*, №7 (146), стр. 103-108., 2018.
- [2] Alan Hasting: *The Art of Analog Layout*: USA, New York, Boston Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [3] High Speed, High Accuracy, 14-Bit, 16-Bit, and 18-Bit PulSAR ADCs, *Analog Devices офіційний сайт*, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/PulSAR.pdf> Дата звернення: 16.11.2020.
- [4] Я. Мулявка: *Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами*. М.: Мир, 1992.
- [5] Walt Kester: *The Data Conversion Handbook*, 2005. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.analog.com/en/education/education-library/data-conversion-handbook.html> Дата звернення: 16.11.2020.
- [6] О. Д. Азаров, С.М. Захарченко, та О.М. Харьков: *Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення*, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [7] Albert O'Grady, “Getting 14-Bit Performance from a 32-Channel 14-Bit String DAC,” *Analog Devices офіційний сайт*, [Електронний ресурс]. Доступно: [www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-02/calibration.pdf](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-02/calibration.pdf). Дата звернення: 10.10.2020.
- [8] Phillip E. Allen and Douglas R. Holberg: *CMOS Analog Circuit Design*, Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [9] F. Goodenough, “Dual 18-bit ADC chip grabs 20-kHz audio,” *Electronic Design*, V. 14, 1989.
- [10] J. D. Mosley, “Self-calibrating 16-bit A/D converter guarantees no missing codes to 50 kHz,” *EDN*, V. 32, № 2, 1987.
- [11] Yuh-Min Lin, Beomsup Kim, and Paul R.Gray, “A 13-bit 2.5-MHz self-calibrated pipelined A/D converter in 3  $\mu\text{m}$  CMOS,” *IEEE J. Solid-State*

*Circuits*, Vol.26, N4, pp. 628-636, 1991.

- [12] K.S.Tan, "On board self-calibration of analog-to-digital and digital-to-analog converters," *U.S. Patent 4399426*, P.21-25, 16.08.1983.
- [13] Hae-Seung Lee, and David A.Hodges, "Self-calibration technique for A/D converters," *IEEE Transactions on circuits and systems*, Vol.30, №3, P.188-190, 1983, March.
- [14] Hae-Seung Lee, David A.Hodges, and Paul R. Gray, "A Self-calibrating 15-bit CMOS A/D Converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.19, №6, P.813-817, 1984, Dec.
- [15] Harlan Ohara, Hung W.Ngo, and M.J. Armstrong, "A CMOS programmable self-calibrating 13-bit eight-channel data acquisition peripheral," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.22, №6, pp. 930-938, 1987, Dec.
- [16] А.Д. Азаров, "Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления," автореф. дис. на здоб. ступ. д-ра техн. наук, Винница, 1994.
- [17] О.Д. Азаров, С.М. Захарченко, та М.О. Кравцов, "Підвищення точності та швидкодії аналого-цифрових перетворювачів методами інформаційної надлишковості," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, С. 78-83, 1998.
- [18] А.П.Стахов, "Избыточные двоичные позиционные системы счисления," *Однородные цифровые вычислительные и интегрирующие структуры*, №2, С. 5-41, 1974.
- [19] С.М.Захарченко, та Н.О. Біліченко, "Високоточні АЦП з перерозподілом заряду для систем контролю та керування," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №4, С. 65 – 67, 2000.
- [20] О. Д. Азаров: *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю: монографія*, Вінниця: ВНТУ, 2010.
- [21] О.Д.Азаров: *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення*, Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2004.
- [22] Л. В. Крупельницький, та О. Д. Азаров: *Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія*, Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005.

- [23] О. Д. Азаров, та О. О. Коваленко: *Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів: монографія*, Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006.
- [24] О. Д. Азаров, та О. В. Кадук: *Багаторозрядні АЦП і ЦАП, із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія*, Вінниця : ВНТУ, 2010.
- [25] Z.Mychuda, and Zb.Szczesniak: *Analiza parametrów układów elektronicznych*, Warszawa : Wydawnictwo PAK, 2011.
- [26] Z. Mychuda, and A. Szczesniak, “A method of charge accumulation in the logarithmic analog-to-digital converter with a successive approximation,” *Przegląd elektrotechniczny* (Electrical Review), № 10, P. 336–340, 2010.
- [27] З. Мичуда, Л. Мичуда, У. Антонів, та А. Шиманський, “Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від’ємним зворотним зв’язком”, *Вимірювальна техніка і метрологія : Міжвідомчий зб.*, Л. : Вища школа, Вип.71, С. 13–19, 2010.
- [28] З. Р. Мичуда, та У. С. Антонів, “Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі з накопиченням заряду. Частина 2,” *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Автоматика, вимірювання та керування, Вип. 665, С. 3–11, 2010.
- [29] З. Р. Мичуда, та Б. О. Католик, “Підвищення точності та швидкодії логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів,” *Вісник Черкаського Державного технологічного університету*, № 3, С. 203–205, 2006.
- [30] З. Мичуда, У. Антонів, та А. Шиманський, “Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від’ємним зворотним зв’язком,” *Вимірювальна техніка і метрологія : міжвідомчий зб.*, Вип.71, С. 13–19, 2010.
- [31] Lesya Mychuda, “Development of Algorithms for Improving the Accuracy and Performance Speed of a Functional Analog-to-Digital Converter”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №3/9 (93), pp.58-69, 2018.



- [32] Л.З. Мичуда, “Вдосконалений рекурентний метод аналого-цифрового функціонального перетворення для підвищення точності та швидкодії”, *Збірник наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”*, № 1 (39), с. 73 – 92, 2018. Доступ: [http://www.ctp.uad.lviv.ua/images//ktd/39\\_8.pdf](http://www.ctp.uad.lviv.ua/images//ktd/39_8.pdf)
- [33] З.Р. Мичуда, Л.З. Мичуда, та Г.С. Єлісеєва, “Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі. Основа логарифма,” *Вісник НУЛП - Автоматика, вимірювання та керування*, Л.: НУЛП, вип. 907, с. 19-27, 2018.
- [34] *Вопросы проектирования преобразователей информации* Под общ.ред. А.И. Кондалева, К.: Наукова думка, 1977.
- [35] А.И. Кондалев, В.А. Багацкий, В.А. Романов, и В.А. Фабричев: *Преобразователи формы информации для малых ЭВМ*, К: Наукова думка, 1982.
- [36] А.И. Кондалев, В.А. Багацкий, В.А. Романов, и В.А. Фабричев: *Высокопроизводительные преобразователи формы информации*, К: Наукова думка, 1987.
- [37] В.А. Романов: *Аналого-цифровые микропроцессоры в информационно-вычислительных и управляющих системах*, К: Знание, 1984.
- [38] *Преобразователи формы информации с обработкой данных* под общ. ред. д.т.н. А.И. Кондалева, К.: Наукова думка, 1992.
- [39] А.И. Кондалев, П.С. Клочан, и В.Н. Лаврентьев, “Преобразователи формы информации для контрольно-измерительных систем и вычислительных комплексов,” *Проблемы создания преобразователей формы информации*. Ч.2, К.: Наук. думка, С. 12-20, 1980.
- [40] А.И.Кондалев, М.Е.Овчарук, и М.П.Сиверский, “Комбинированный аналого-цифровой преобразователь,” *Устройства и элементы систем автоматизации научного эксперимента*, Новосибирск: Изд-во СибГУ, С.331-335,1970.
- [41] А.И.Кондалев, В.А.Романов, В.А.Багацкий, и П.С. Клочан,“Вклад Украины в развитие системных преобразователей формы информации,” *Труды Междунар. симпозиума “Компьютеры в Европе. Прошлое, настоящее и будущее”*, Киев: ИК НАН Украины, С.34-39, 1998.

- [42] В.А.Багацкий:*Современные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи*, К.: О-во “Знание” УССР, 1980.
- [43] А.Ю.Вонятыцкий, и А.И.Кондалев:*Статистические модели ЦАП на источниках тока*, Препр. АН УССР, К.: Ин-т кибернетики, 1988.
- [44] А.И.Кондалев:*Преобразователи формы информации компьютерного типа*, Препр. АН УССР, К.: Ин-т кибернетики, 1990.
- [45] В.А.Багацкий, “Теория построения, проектирование и практическая реализация аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей общего применения,” автореф. дис. на здоб. ступ. д-ра техн. наук, К., 1994.
- [46] В.А.Фабричев, “Теория и практика создания методов и средств электромагнитной совместимости устройств преобразования формы информации,” автореф. дис. на здоб. ступ. д-ра техн. наук, К., 1994.
- [47] В.А.Романов, “Теория, методы построения и техническая реализация микропроцессорных преобразователей формы информации с повышенной надежностью и производительностью,” автореф. дис. на здоб. ступ. д-ра техн. наук, К., 1994.
- [48] П.П. Орнатский: *Автоматические измерения и приборы*, К.: Вища школа, 1973.
- [49] П.П. Орнатский: *Теоретические основы информационно-измерительной техники*, К.: Вища школа, 1976.
- [50] П.П. Орнатский: *Автоматические измерения и приборы*, К.: Вища школа, 1980.
- [51] П.П. Орнатский: *Теоретические основы информационно-измерительной техники*, К.: Вища школа, 1983.
- [52] П.П. Орнатский: *Автоматические измерения и приборы*, К.: Вища школа, 1986.
- [53] П.П. Орнатский, и Н.Ф. Пономаренко: *Измерительный эксперимент: Учебное пособие*, Киев: КПИ, 1979.
- [54] Н.В.Алипов, “Помехоустойчивые алгоритмы функционирования преобразователей формы информации,” Сборник тезисов докладов V

- Всесоюзного симпозиума «Проблемы создания преобразователей формы информации», К.: Наук. Думка, Ч. 1, С. 107-109, 1984.
- [55] Н.В.Алипов, «Алгоритмы функционирования параллельно-последовательных преобразователей формы информации, корректирующих динамические ошибки», *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*, Харьков: Вища школа, С. 57-64, 1985.
- [56] Б.И.Швецкий: *Электронные цифровые приборы*, К.: Техника, 1991.
- [57] М.Л. Петришин, Л.Б. Петришин, «Метод субтрактивно-адитивного преобразования формы информации», Розділ в монографії *Информационные технологии в управлении, образовании, науке и промышленности*, монографія под.ред. В.С.Пономаренко, Харків, Издатель Рожко С.Г., С.142-160, 2016. Доступ: [https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/10803/1/Razdel\\_35\\_Lomonosov\\_mon.pdf](https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/10803/1/Razdel_35_Lomonosov_mon.pdf)
- [58] Л.Б. Петришин, «Аналіз системних властивостей та обґрунтування ефективності методів перетворення форми інформації», Розділ в монографії *Інформаційні технології: проблеми та перспективи*, монографія під ред. В.С.Пономаренка, Харків, Вид. Рожко С.Г., С. 269-280., 2017. Доступ <http://194.44.152.155/elib/local/r568.pdf>
- [59] Р.И.Грушвицкий, А.Х.Мурсаев, и В.Б. Смоллов: *Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем*, Л.: Энергоатомиздат, 1989.
- [60] В.Б. Смоллов, Е.П. Угрюмов, и В.К. Шмидт: *Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации* под ред. В.Б. Смоллова, Л.: Энергия, 1976.
- [61] В.Б. Смоллов: *Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями*, М.: Госэнергоиздат, 1961.
- [62] В.Б. Смоллов, и Н.А. Смирнов: *Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи*, Л.: Энергия, 1967.
- [63] В.Б. Смоллов, В.К. Шмидт, Н.Н. Варлинский, В.О. Молодцов, С.М. Павлов, и В.А. Немнонов, «Вопросы построения интегральных преобразователей

- напряжения в код,” *Вопросы преобразования информации*, Вып. 6, С. 3-9 Таганрог, 1972.
- [64] Е.П. Угрюмов: *Время-импульсные вычислительные устройства*, М.: Радио и связь, 1983.
- [65] В.Б. Смоллов: *Функциональные преобразователи информации*. Л.: Энергоиздат, 1981.
- [66] Е.А. Чернявский, В.Б. Смоллов, и А.В. Минаев: *Системы автоматизированного проектирования средств ИИТ: Учеб. Пособие*, Л.: ЛЭТИ, 1988.
- [67] В.Б. Смоллов, А.В. Анисимов, Р.Ш. Исмаилов и др.: *Аналого-цифровые комплексы: Учеб. Пособие*, Л.: ЛЭТИ, 1980.
- [68] Э.И. Гитис: *Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств*, М.: Энергия, 1970.
- [69] Э.И. Гитис: *Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств*, М.: Энергия, 1975.
- [70] Э.И. Гитис, и Е.А. Пискулов: *Аналого-цифровые преобразователи*, М.: Энергоатомиздат, 1981.
- [71] Э.И. Гитис, Б.Л. Собкин, А.Н. Подколзин и др.: *Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств* под ред. Э.И. Гитиса, М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [72] Hank Zumbahlen: *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006.
- [73] P.C. Yu, and H.S. Lee A 2.5-V, “12-b, 5-Msamples/s pipelided CMOS ADC,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 31, P. 1854–1861, Dec. 1996.
- [74] D. Y. Chang, and H. S. Lee, “Design techniques for a low-power low-cost CMOS A/D Converter,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 33, P. 1244–1247, Aug. 1998.
- [75] P. C. Yu, and H. S. Lee “A 2.5-V, 12-b, 5-Msamples/s pipelided CMOS ADC,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 31, P. 1854 – 1861, Dec. 1996.
- [76] P. C. Yu, and H. S. Lee, “A pipelined A/D conversion technique with near-inherent monotonicity,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, V. 42, P. 500–502, July 1995.

- [77] H. S. Lee, "A 12-b, 600-ks/s Digital Self-Calibrated Pipelined Algorithmic ADC," *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 29, № 4, P. 509–515, Apr. 1994.
- [78] K. Nagaraj, H. S. Fetterman, and J. Anidjar, "250-mW, 8-b, 52-Msamples/s parallel-pipelined A/D converter with reduced number of amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 32, P. 312 – 320, Mar. 1997.
- [79] K. Nagaraj, "Efficient circuit configuration for algorithmic analog to digital converters," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, V. 40, P. 777–785, Dec. 1993.
- [80] M. K. Mayes, and S. W. Chin, "A low-power 14-bit 2-Msamples/s pipelined ADC with on-chip 32-bit correction processor," *National Semiconductor: офіційний сайт*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.imec.be/esscirc/papers-96/198.pdf>.
- [81] M. K. Mayes, and S. W. Chin, "Monolithic low-power 16b 1Msamples/s self-calibration pipelined ADC," *IEEE J. Solid-State Circuits*, № 2, P. 312–313, Feb. 1996.
- [82] I. E. Opris, B. C. Wong, and S. W. Chin, "A pipelined A/D converter architecture with low DNL," *IEEE J. Solid-State Circuits*, V. 35, P. 281–285, Feb. 2000.
- [83] M. Hesener, T. Eichler, A. Hanneberg, D. Herbison, F. Kuttner, and H. Wenske, "A 14b 40MS/s Redundant SAR ADC with 480MHz Clock in 0.13 $\mu$ m CMOS," *Tech. Digest of ISSCC* (Feb. 2007).
- [84] F. Kuttner, "A 1.2V 10b 20MS/S Non-Binary Successive Approximation ADC in 0.13 $\mu$ m CMOS," *Tech. Digest of ISSCC* (Feb. 2002).
- [85] T. Ogawa, H. Kobayashi, M. Hotta, Y. Takahashi, H. San, N. Takai, "SAR ADC Algorithm with Redundancy", *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Macao, China, pp.268-271 (Dec. 2008).
- [86] T. Ogawa, H. Kobayashi, Y. Takahashi, N. Takai, M. Hotta, H. San, T. Matsuura, A. Abe, K. Yagi, T. Mori, "SAR ADC Algorithm with Redundancy and Digital Error Correction", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E93-A, no.2 (Feb. 2010).

- [87] О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, та С. М. Захарченко: *Високолінійні порозрядні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються* : монографія, Вінниця : ВНТУ, 2016.
- [88] John McNeill, Michael C. W. Coln, and Brian J. Larivee, “Split ADC Architecture for Deterministic Digital Background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 40, N12, pp. 2437-2445, 2005 Dec.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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), p. 29–32, 2020.
- [93] 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>.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] Walt Kester, "Which ADC Architecture Is Right for Your Application?", *Analog Dialogue*, Vol 39, №2, pp. 11-19, 2005
- [97] А.Данилов, "Микросхеми інструментальних АЦП," *Электронные компоненты*, № 3/4, С.8-19, 2005.
- [98] J.L.McCreary, and P.R.Gray, "All-MOS charge redistribution analog-to-digital conversion techniques - Part 1," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.10, P.371-379, 1975.
- [99] Khen-Sang Tan, Sami Kiriaki, and Michiel de Wit, "Error correction techniques for high-performance differential A/D Converters," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol.25, №6, P.1318-1327, 1990, Dec.
- [100] W.Kester: *Analog-Digital Conversion*, USA: Analog Devices, Inc, 2004.
- [101] C. Kaya, "Polyside/metal capacitors for high precision A/D converters," *IEDM Tech. Dig.* (San Francisco, CA), P.782-785, 1988.
- [102] S. Harward, and D. Harward, "Gate array ties 16-bit DAC into MP based system," *Electronic Design*, Vol.32, №5, P.25-30, 1984.
- [103] J.R. Nailor, "A complete high speed voltage output monolith DAC," *IEEE Journal of solid state circuits*, Vol.CS-18, P.729-735, 1983.
- [104] Т.М. Алиев, Т.Р. Сейдель: *Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов*, М.: Энергия, 1975.
- [105] Р.Е.Кромьер, Л.В.Оппенгейм, "Анализ линейных цифровых цепей," *ТИИЭР*, Т.63, №4, С. 45-61, 1980.
- [106] Г.Д.Бахтиаров, В.В.Малинин,и Школин В.П: *Аналого-цифровые преобразователи* под ред. Г.Д. Бахтиарова, М.: Советское радио, 1980.

- [107] T. C. Verster, "A Method to Increase the Accuracy of FastSerial-Parallel Analog-to-Digital Converters," *IEEE Trans. on Electronic Computers*, vol. EC-13, no. 4, pp. 471–473, Aug. 1964.
- [108] G.A. Bergman, "Number system with an irrational base," *Mathematics Magazine*, №3, P.98-119, 1957.
- [109] А.П. Стахов, *Коды золотой пропорции*, М.: Радио и связь, 1984.
- [110] Н.Н. Воробьев, *Числа Фибоначчи*, М.: Наука, 1978.
- [111] А. П.Стахов, *Введение в алгоритмическую теорию измерения*, М.: Сов. радио, 1977.
- [112] А. П.Стахов, "Алгоритмическая теория измерений и основания компьютерной арифметики," *Измерение, контроль, автоматизация*, №2, С. 64-89, 1988.
- [113] А.П.Стахов, и В.А. Лужецкий: *Машинная арифметика ЦВМ в кодах Фибоначчи и "золотой" пропорции: Предварительная публикация*, М.: Академия Наук СССР, 1981.
- [114] А.П.Стахов, А.Д.Азаров, и В.П.Марценюк, "Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления," К.: УМКВО, С. 42-50, 1988.
- [115] А.Д. Азаров, "Исследование принципов построения и разработка преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями," автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, Харьков, 1980.
- [116] Л.В. Крупельницкий, "Аналоговые устройства самокорректирующихся АЦП для систем измерения и обработки низкочастотных сигналов," автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, Винница, 1994.
- [117] A.D.Azarov, N.A.Bilichenko, S.M.Zakharchenko, "Improvement of the Characteristics of Analog-to-Digital Converters of Methods of Information Redundancy," *Development and Application Systems DAS-2000*, p. 47-51, 2000.
- [118] А.Д.Азаров, В.И.Моисеев, и В.П.Марценюк, "Семнадцатиразрядный самокорректирующийся АЦП," *Приборы и системы управления*, №1, С. 34-42, 1986.



- [119] А.П.Стахов, А.Д.Азаров, В.И. Моисеев, “Высокоточный АЦП, сопряженный с микро-ЭВМ,” *Управляющие системы и машины*, №5, С. 56-63, 1985.
- [120] А.П.Стахов, В.И.Моисеев, В.Я.Стейскал, “Высокоточный самокорректирующийся микропроцессорный преобразователь САЦП-МКЗ,” *Информационный листок №88-006 о научно-техническом достижении*, Винницкий МТЦНТИ, С. 3-6, 1988.
- [121] О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. А. Архипчук, “АЦП порозрядного врівноваження з самокалібруванням за стратегією згори-донизу,” *Вісник вінницького політехнічного інституту*, № 6, С. 41-45, 2003.
- [122] С. М. Захарченко, “Підвищення точності АЦП із перерозподілом заряду за рахунок використання вагової надлишковості,” *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, С. 57-62, 2008.
- [123] Z.Boyacigiller, S.Socketlov, “Increase analog system accuracy with a 14-bit monolithic ADC,” *EDN*, №18, P.137-144, 1982, Aug.
- [124] F. Kuttner, “A 1.2V 10b 20MS/S Non-Binary Successive Approximation ADC in 0.13 $\mu$ m CMOS,” *Tech. Digest of ISSCC* (Feb. 2002).
- [125] J. Biveroni and H.-A. Loeliger, “On sequential analog-to-digital conversion with low-precision components,” in 2008 *Information Theory and Applications Workshop*, 2008.
- [126] T. Ogawa, H. Kobayashi, Y. Takahashi, N. Takai, M. Hotta, H. San, T. Matsuura, A. Abe, K. Yagi, and T. Mori, “SAR ADC Algorithm with Redundancy and Digital Error Correction,” *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E93.A, no. 2, pp. 415–423, Feb. 2010.
- [127] О.Д.Азаров, “Прискорення аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення,” *Вісник ВПИ*, №1, С. 22-27, 1993.
- [128] Г.Б. Ракитянська, “Моделювання та оптимізація швидкодії та алгоритмічної надійності надлишкових АЦП порозрядного

врівноваження,” автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, Вінниця, 1998.

- [129] С. М. Захарченко, А. В. Росощук, М. Г. Захарченко, “Метод оперативного контролю лінійності АЦП послідовного наближення,” *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія «Теплоенергетик. Інженерія докiлля. Автоматизація»*, № 792, С. 21-28, 2014.
- [130] J. Thelin: *Foundations of Qt Development*, NY:Apress, 2007.
- [131] Jasmin Blanchette, Mark Summerfield: *C++ GUI Programming with Qt 4 (2nd Edition)*, Prentice Hall, 2008.
- [132] M. Summerfield: *Advanced Qt Programming: Creating Great Software with C++ and Qt 4*, NJ: Prentice Hall, 2010.

