

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-4>

УДК 621.335

### БОРТНИК ГЕННАДІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>

e-mail: [bgen88@gmail.com](mailto:bgen88@gmail.com)

### БОРТНИК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [alex.bortnik.it@gmail.com](mailto:alex.bortnik.it@gmail.com)

### ЧУБАТЮК СЕРГІЙ

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [ppifoxtrout@gmail.com](mailto:ppifoxtrout@gmail.com)

## БАГАТОКАНАЛЬНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПАРАЛЕЛЬНОГО ТИПУ З КОРИГУВАННЯМ ЗМІЩЕННЯ ОПОРНОЇ НАПРУГИ ТА КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону багатоканальних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) паралельного типу. Встановлено, що аналого-цифрове перетворення сигналів в багатоканальних АЦП виконується в окремих каналах з неідентичними коефіцієнтами підсилення та зміщеннями опорної напруги. В кінцевому результаті це призводить до звуження динамічного діапазону багатоканальних АЦП.

Запропоновано здійснювати коригування коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги окремих каналів АЦП. Розроблено структурну схему багатоканального АЦП паралельного типу з коригуванням коригування коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги окремих каналів АЦП.

Аналіз ефективності розробленого методу підтвердив, що запропонований метод дає змогу розширити динамічний діапазон багатоканальних АЦП на 12 – 15 дБ залежно від значення частоти вхідного сигналу перетворювача.

**Ключові слова:** багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, мультиплексор, зміщення опорної напруги, коефіцієнт підсилення, динамічний діапазон.

**BORTNYK GENNADIY, BORTNYK OLEKSANDR, CHUBATIUK SERHIJ**

Vinnitsia National Technical University

## MULTICHANNEL PARALLEL ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER WITH REFERENCE VOLTAGE OFFSET AND GAIN CORRECTION

The paper presents a method for expanding the dynamic range of multichannel analog-to-digital converters (ADC) of parallel type. It is indicated that the analog-to-digital conversion method, which is based on the multichannel architecture of the parallel ADC, allows improving the frequency characteristics of radio engineering systems with digital processing of radio signals.

The qualitative indicators of multichannel ADC will depend on the identity of the ADC parameters in each of the conversion channels. The non-identity of the ADC reference voltage offset values is associated with the spread of the parameters of the built-in operational amplifiers and comparators and the asymmetry of the ADC conversion stages. The non-identity of the gain coefficients in the ADC channels is due to the parasitic capacitances and inductances of the operational amplifiers, as well as the differences in the input parameters of analog comparators.

To find the offset value of the reference voltage, it is necessary to choose the reference voltage of one of the ADC channels as an example. Then the averaged root mean square deviation of the digital signal from the outputs of the parallel ADCs relative to the exemplary ADC will determine the offset of the reference voltage value. The difference in the gain coefficients of the parallel ADCs can be found in a similar way, except that instead of the deviation of the digital signal, it is necessary to determine the modulus of this signal at the output of each ADC channel.

It is proposed to adjust the gain coefficients and reference voltage offsets of individual ADC channels. A structural diagram of a multichannel parallel ADC with adjustment of the gain coefficients and reference voltage offsets of individual ADC channels has been developed.

An analysis of the effectiveness of the developed method confirmed that the proposed method allows to expand the dynamic range of the ADC by 12 - 15 dB depending on the frequency value of the ADC input signal.

The proposed multi-channel parallel ADC can be used in modern digital radio engineering systems.

**Keywords:** multichannel analog-to-digital converter, multiplexer, reference voltage offset, gain, dynamic range.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бортник Геннадій, Бортник Олександр Чубатюк Сергій

### Постановка проблеми

Застосування цифрових методів оброблення радіосигналів дозволяє розв'язувати задачі по розширенню робочої смуги частот з одночасним покращенням енергетичних та масогабаритних характеристик радіотехнічних систем. Ефективність розв'язання цих задач безпосередньо пов'язана з використанням мікросхем високошвидкісних перетворювачів форм інформації. Створення сучасних швидкодіючих цифрових пристроїв виявлення та аналізу параметрів радіосигналів неможливе без використання швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що здатні працювати з частотами дискретизації 1 - 5 ГГц [1, 2].

Метод аналого-цифрового перетворення, що базується на багатоканальній архітектурі АЦП паралельного типу дозволяє покращити частотні характеристики радіотехнічних систем з цифровим обробленням радіосигналів [3]. Однак, практична реалізація цього методу аналого-цифрового перетворення ускладнюється, тому що реальні зразки АЦП характеризуються розкидом параметрів. Це стосується

неідентичності: коефіцієнтів підсилення, зміщень опорної напруги, смуг пропускання та часових затримок окремих зразків АЦП. В результаті ці чинники призводять до звуження динамічного діапазону пристроїв цифрового оброблення радіосигналів. Для зменшення похибок неідентичності каналів аналого-цифрового перетворення використовують різноманітні методи коригування параметрів АЦП паралельного типу [4, 5].

Розробка цифрових радіотехнічних засобів, що призначені для аналізу радіосигналів, зумовлює актуальність дослідження методів коригування неідентичності параметрів багатоканальних АЦП паралельного типу.

**Аналіз останніх джерел**

Результати дослідження похибок нестабільності у багатоканальних АЦП паралельного типу наведено у роботах [6-8], у яких зокрема доведено, що неідентичність параметрів окремих каналів паралельних АЦП впливає на динамічний діапазон АЦП і зі збільшенням частот дискретизації погіршується відношення сигнал/шум трактів аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів. У роботах [9-11] наведено методи коригування неідентичності смуг пропускання та часових затримок багатоканальних АЦП. Для того, щоб компенсувати вплив неідентичних параметрів окремих зразків АЦП використовують різноманітні способи калібрування каналів паралельних АЦП.

Останнім часом набули широкого поширення цифрові способи калібрування смуг пропускання та часових затримок між каналами АЦП [12, 13]. Водночас, питанням коригування коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги в паралельних АЦП приділяється менша увага. Натомість методологія коригування цих параметрів в окремих каналах АЦП паралельного типу видається перспективною і може забезпечити ширший динамічний діапазон багатоканальних АЦП.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону багатоканальних АЦП паралельного типу за рахунок коригування коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги окремих каналів.

**Виклад основного матеріалу**

Структурну схему багатоканального АЦП (БАЦП) паралельного типу представлено на рис. 1. Аналоговий сигнал  $U_{in}$ , що підлягає перетворенню, подається на аналогові входи всіх  $N$  каналів АЦП (ADC1 ... ADCN). Тактові входи кожного каналу АЦП під'єднано до відповідних виходів синтезатора тактових сигналів (CS), що формує імпульси дискретизації з періодом  $NT_s$  та відповідним фазовим зсувом. На виході мультиплексора (MPX) формується вихідний сигнал БАЦП  $D_{out}$  з періодом дискретизації  $T_s$ , що в  $N$  разів менший періоду дискретизації в окремому каналі БАЦП [14]. Це дозволяє покращити частотні характеристики засобів цифрових методів оброблення радіосигналів.

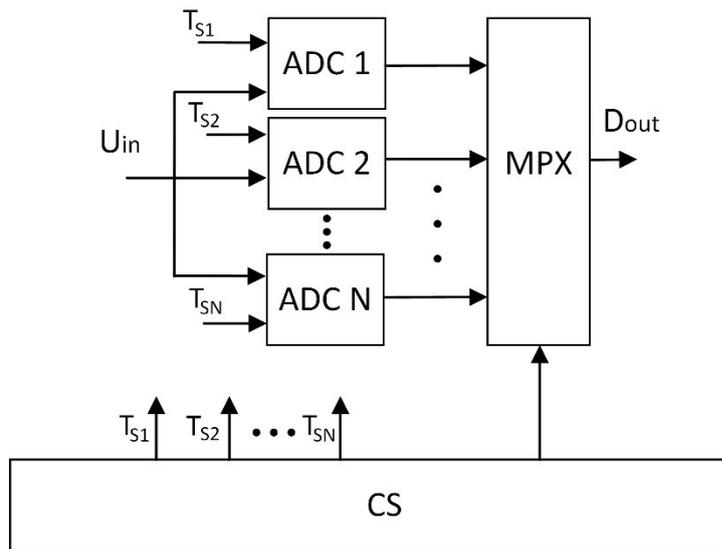


Рис. 1. Структурна схема багатоканального АЦП паралельного типу

Якісні показники БАЦП будуть залежати від ідентичності параметрів АЦП у кожному з каналів перетворення. Неідентичність значень зміщення опорної напруги АЦП пов'язана з розкидом параметрів вбудованих операційних підсилювачів і компараторів та асиметрією каскадів перетворення АЦП. Неідентичність коефіцієнтів підсилення в каналах АЦП обумовлена паразитними ємностями та індуктивностями операційних підсилювачів, а також відмінностями вхідних параметрів аналогових компараторів.

Для вхідного синусоїдального сигналу БАЦП  $U_{in}(t) = U_m \sin(2\pi f_{in}t + \phi_{in})$  з частотою  $f_{in}$  вихідний сигнал  $i$ -го каналу АЦП зі зміщення значення опорної напруги можна представити так:

$$U_{out_i}(n) = U_{off_i} + U_m \sin[2\pi f_{in}(nMT_s + (i - 1)T_s)], \tag{1}$$

де  $U_{off_i}$  – значення зміщення опорної напруги  $i$ -го каналу АЦП.

Вихідний сигнал АЦП  $i$ -го каналу з відповідним коефіцієнтом підсилення  $K_i$  цього каналу має такий вигляд:

$$U_{out_i}(n) = U_m K_i \sin[2\pi f_{in}(nMT_s + (i-1)T_s)]. \quad (2)$$

Для знаходження значення  $U_{off_i}$  необхідно обрати опорну напругу одного з каналів АЦП як зразкову. Тоді усереднене середньоквадратичне відхилення цифрового сигналу з виходів паралельних АЦП відносно зразкового АЦП буде визначати зміщення значення опорної напруги. Відмінність коефіцієнтів підсилення паралельних АЦП можна знайти аналогічним способом, за винятком того, що замість відхилення цифрового сигналу потрібно визначити модуль цього сигналу на виході кожного каналу АЦП.

Вихідний сигнал АЦП за наявності обох складових неідентичності каналів для вхідного тестового сигналу з частотою  $f_{cal}$  можна записати у такому вигляді:

$$U_{ADC_i}(n) = U_{off_i} + U_m K_i \sin[2\pi f_{cal}(nMT_s + (i-1)T_s)]. \quad (3)$$

Використання ітеративного алгоритму на базі методу найменших квадратів створює умови для знаходження та коригування зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення окремих каналів БАЦП. Для цього необхідно один з каналів БАЦП, наприклад перший, позначити як зразковий. Тоді застосування ітеративного алгоритму дає змогу знайти зміщення опорної напруги  $i$ -го каналу БАЦП відносно зразкового каналу БАЦП таким чином:

$$U_{off_i}(n) = U_{off_i}(n-1) + q_u [U_{ADC_i}(n-1) - U_{ADC_1}(n-1)], \quad (4)$$

де  $U_{ADC_1}(n)$  – значення вихідного сигналу зразкового каналу БАЦП;  $U_{ADC_i}(n)$  – значення вихідного сигналу  $i$ -го каналу БАЦП;  $q_u$  – значення кроку адаптації.

Вираз для знаходження неідентичності коефіцієнтів підсилення окремих каналів БАЦП має такий вигляд:

$$g_i(n) = g_i(n-1) + h_k [U_{ADC_i}(n-1) - U_{ADC_1}(n-1)], \quad (5)$$

де  $g_i(n)$  – параметр, що характеризує відмінність коефіцієнта підсилення  $i$ -го каналу БАЦП відносно зразкового каналу БАЦП;  $h_k$  – значення кроку адаптації.

Параметр  $g_i(n)$  визначається таким співвідношенням:

$$g_i(n) = \frac{K_1}{K_i}, \quad (6)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення зразкового (першого) каналу БАЦП;  $K_i$  – коефіцієнт підсилення  $i$ -го каналу БАЦП.

Для підвищення точності калібрування БАЦП, значення  $U_{off_i}$  та  $g_i$ , що отримані за допомогою виразів (4) і (5), необхідно усереднювати.

На рис. 2 представлено структурну схему БАЦП паралельного типу з коригуванням зміщення опорної напруги та коефіцієнта підсилення.

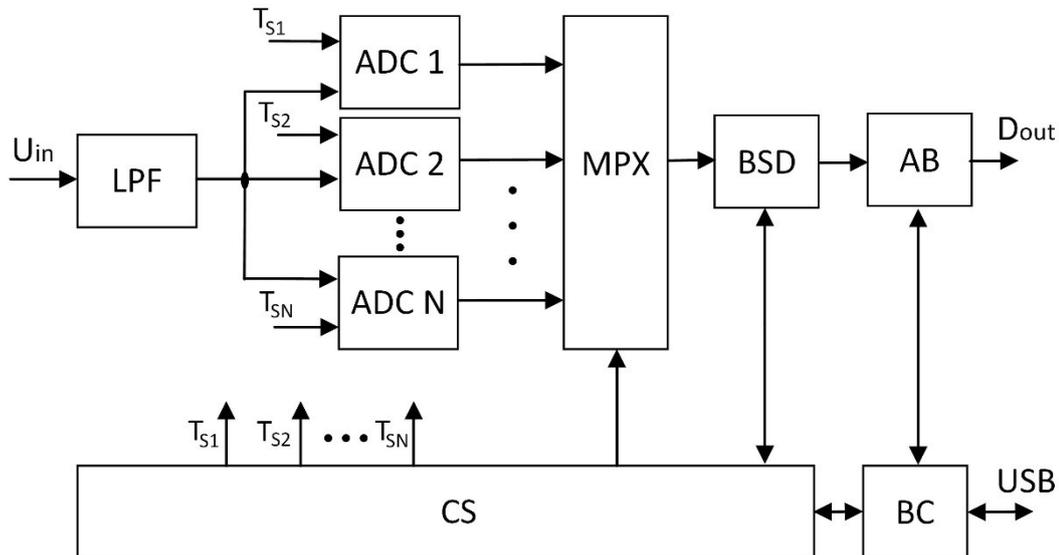


Рис. 2. Структурна схема БАЦП паралельного типу з коригуванням зміщення опорної напруги та коефіцієнта підсилення

БАЦП функціонує у двох режимах: калібрування та у робочому режимі з коригуванням вихідного сигналу. У режимі калібрування через фільтр нижніх частот (LPF) на входи усіх каналів БАЦП подається тестовий сигнал синусоїдальної форми. Цифрові сигнали з виходу мультиплексора (MPX) накопичуються у буферному запам'ятовуючому блоці (BSD). Накопичений масив даних через контролер шини USB (BC) подається в комп'ютер, де виконується розрахунок коригувальних коефіцієнтів окремих каналів БАЦП. У робочому режимі вихідний сигнал БАЦП формується на виході блоку коригування (AB).

Для аналізу ефективності запропонованого методу коригування зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення розроблено імітаційну модель БАЦП. Розроблена модель БАЦП містить чотири канали паралельно ввімкнених 14-розрядних АЦП, мультиплексор і блок коригування зміщення

опорної напруги та коефіцієнта підсилення окремих каналів. На рис. 3 наведено спектр сигналу на виході першого каналу БАЦП для вхідного тестового сигналу синусоїдальної форми з частотою 10 МГц.

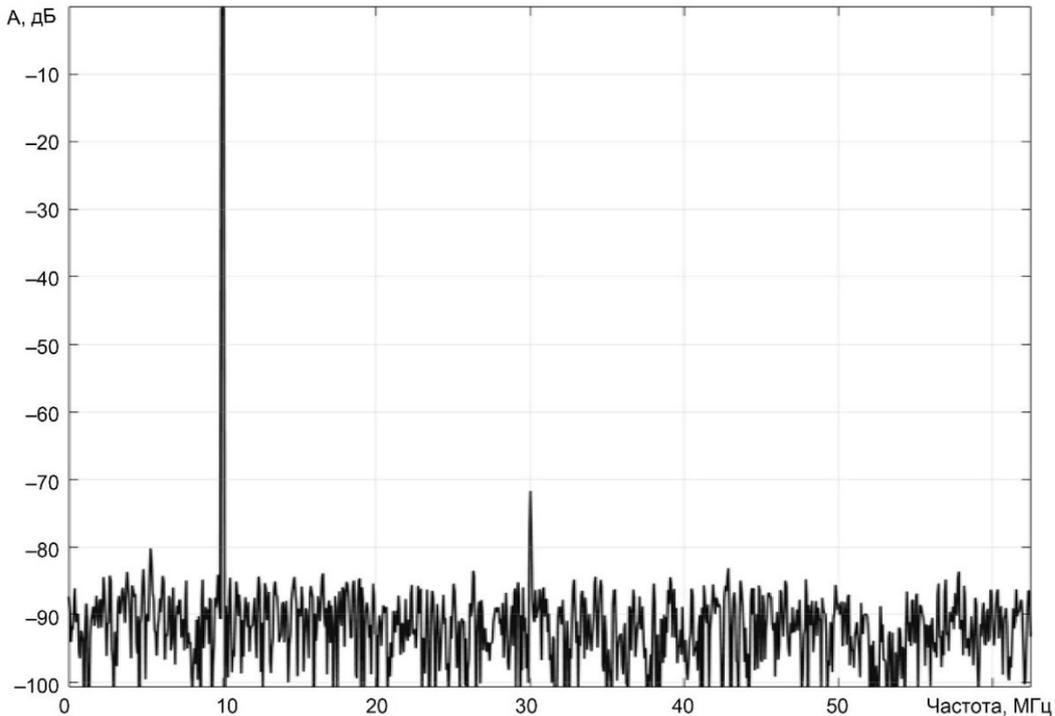


Рис. 3. Спектр вихідного сигналу першого каналу БАЦП

На рис. 4 наведено спектр сигналу на виході БАЦП, що функціонує без коригування зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення.

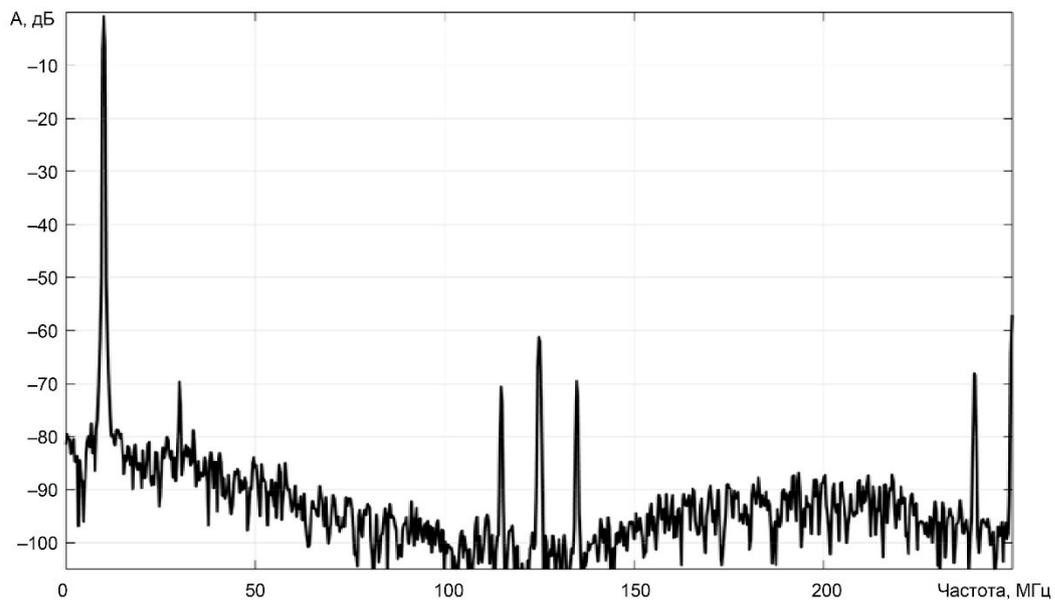


Рис. 4. Спектр вихідного сигналу БАЦП без коригування

Як видно з рис. 4 у спектрі вихідного сигналу присутні паразитні складові, що звужують динамічний діапазон БАЦП. На рис. 5 наведено спектр сигналу на виході БАЦП, що функціонує у режимі коригування зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення.

Як видно з рис. 5 рівень паразитних складових у спектрі вихідного сигналу БАЦП, що функціонує в режимі з коригуванням, значно знизився.

Виконаємо аналіз динамічного діапазону розробленого БАЦП, який у частотній області знаходиться згідно виразу [15]

$$D = 20 \lg \left( \frac{U_1}{U_{\max}} \right), \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

де  $U_1$  – амплітуда основної гармоніки вихідного сигналу БАЦП;  $U_{\max}$  – максимальна амплітуда по усім складовим спектра вихідного сигналу БАЦП, окрім основної гармоніки.

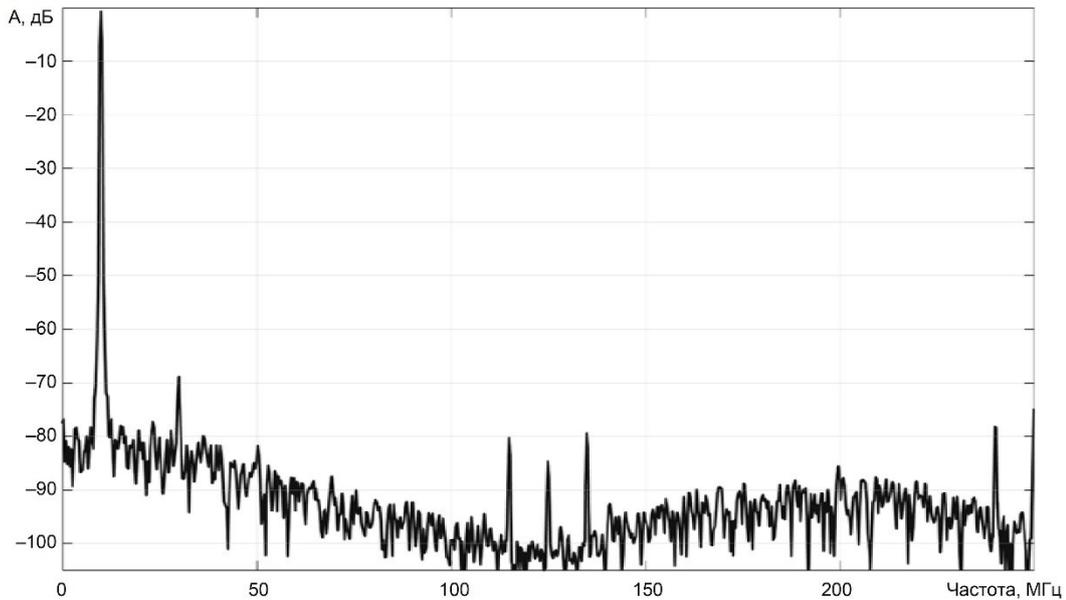


Рис. 5. Спектр вихідного сигналу БАЦП з коригуванням

Використовуючи процедуру визначення  $U_1$  та  $U_{\max}$  для кількох значень частоти вхідного сигналу синусоїдальної форми, можна отримати залежність динамічного діапазону БАЦП від частоти вхідного сигналу. На рис. 6 наведено залежність динамічного діапазону 14-розрядного БАЦП від частоти вхідного сигналу, яка змінювалась у смузі від 1 до 25 МГц. Верхня крива відповідає режиму функціонування БАЦП з коригуванням зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення, а нижня – без коригування.

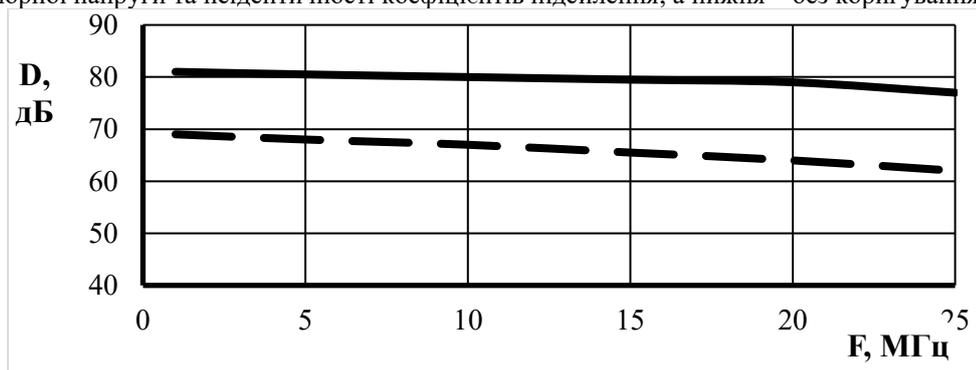


Рис. 6. Залежність ефективного числа розрядів ПАЦП від розрядності ЦАП СВЗ

Як видно з графіків, у смузі нижніх частот вигравш від коригування зміщення опорної напруги та неідентичності коефіцієнтів підсилення БАЦП знаходиться у межах 12 дБ, а зі збільшенням частоти вхідного сигналу цей вигравш зростає і на частоті 25 МГц досягає значення 15 дБ.

#### Висновки

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону багатоканальних АЦП паралельного типу. Встановлено, що аналого-цифрове перетворення сигналів в БАЦП виконується в окремих каналах з неідентичними коефіцієнтами підсилення та зміщеннями опорної напруги. В кінцевому результаті це призводить до звуження динамічного діапазону багатоканальних АЦП.

Запропоновано здійснювати коригування коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги окремих каналів БАЦП. Розроблено структурну схему багатоканального АЦП паралельного типу з коригуванням коефіцієнтів підсилення та зміщень опорної напруги окремих каналів БАЦП.

Аналіз ефективності розробленого методу підтвердив, що запропонований метод дає змогу розширити динамічний діапазон 14-розрядного БАЦП на 12 – 15 дБ залежно від значення частоти вхідного сигналу АЦП.

Запропонований багатоканальний АЦП паралельного типу можна використовувати в сучасних цифрових радіотехнічних системах.

#### Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. - Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с.
2. Бортник Г.Г. Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В.М. Кичак, О.В. Стальченко. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 140 с.

3. M. Tamba, A. Shimizu, H. Munakata, and T. Komuro, "A method to improve SFDR with random interleaved sampling method," in *International Test Conference, 2001, Proceedings.*, October 2001, pp. 512–520.
4. A. Salib, M. F. Flanagan, and B. Cardiff, "A High-Precision Time Skew Estimation and Correction Technique for Time-Interleaved ADCs", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 66, no. 10, pp. 3747–3760, Oct. 2019.
5. Бортник Г.Г. Швидкодійний пристрій аналого-цифрового перетворення сигналів з цифровим коригуванням похибок часової невизначеності / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, М.Р. Бриль, О.Г. Бортник. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2024, № 2. – С. 107-111.
6. J. Matsuno, T. Yamaji, M. Furuta, and T. Itakura, "All-digital background calibration technique for time-interleaved ADC using pseudo aliasing signal", *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 60, pp.1113–1121. 2013.
7. Бортник Г.Г. Паралельний аналого-цифровий перетворювач з часовим ущільненням сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, М.Р. Бриль, О.Г. Бортник. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2025, № 6. – С. 83-88.
8. H. Mafi, M. Yargholi, and M. Yavari, "Digital Blind Background Calibration of Imperfections in Time-Interleaved ADCs", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 6, pp. 1504–1514, Jun. 2017.
9. B. T. Reyes, R. M. Sanchez, A. L. Pola, and M. R. Hueda, "Design and Experimental Evaluation of a Time-Interleaved ADC Calibration Algorithm for Application in High-Speed Communication Systems", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 5, pp. 1019–1030, May 2017.
10. C. Vogel, "The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, February 2005, pp. 415–427.
11. Бортник Г.Г. Паралельний аналого-цифровий перетворювач з коригуванням часової невизначеності вихідного сигналу / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, С.О. Кирилюк. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023, № 4. – С. 46-52
12. Бортник Г.Г. Швидкодійний пристрій аналого-цифрового перетворення сигналів з коригуванням часової нестабільності у частотній області / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, С.О. Кирилюк. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023, № 6. – С. 70-76.
13. Бортник Г.Г. Паралельний аналого-цифровий перетворювач з випадковим перемикуванням каналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, М.Р. Бриль, О.Г. Бортник. – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2024, № 4. – С. 43- 48.
14. Black, William and David Hodges. "Time Interleaved Converter Arrays," *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, Vol. SC-15, No. 6, 1980.
15. Бортник Г.Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– 2013, № 2. – С. 82-85.

### References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obroblynnia radiosyhnaliv : monohrafiia / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, V.M. Kychak. - Vinnytsia: VNTU, 2016. – 168 s.
2. Bortnyk H.H. Analoho-tyfrovoyi traktu kompiuternykh system z tsyfrovym obroblynniam vysokochastotnykh syhnaliv : monohrafiia / H. H. Bortnyk, V.M. Kychak, O.V. Stalchenko. – Vinnytsia: VNTU, 2016. – 140 s.
3. M. Tamba, A. Shimizu, H. Munakata, and T. Komuro, "A method to improve SFDR with random interleaved sampling method," in *International Test Conference, 2001, Proceedings.*, October 2001, pp. 512–520.
4. A. Salib, M. F. Flanagan, and B. Cardiff, "A High-Precision Time Skew Estimation and Correction Technique for Time-Interleaved ADCs", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 66, no. 10, pp. 3747–3760, Oct. 2019.
5. Bortnyk H.H. Shvydkodiinyi prystrii analoho-tyfrovoho peretvorennia syhnaliv z tsyfrovym koryhuvanniam pokhybok chasovoi nevyznachenosti / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, M.R. Bryl, O.H. Bortnyk. – Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2024, № 2. – S. 107-111.
6. J. Matsuno, T. Yamaji, M. Furuta, and T. Itakura, "All-digital background calibration technique for time-interleaved ADC using pseudo aliasing signal", *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 60, pp.1113–1121. 2013.
7. Bortnyk H.H. Paralelnyi analoho-tyfrovoyi peretvoriuvach z chasovym ushchilnenniam syhnaliv / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, M.R. Bryl, O.H. Bortnyk. – Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2025, № 6. – S. 83-88.
8. H. Mafi, M. Yargholi, and M. Yavari, "Digital Blind Background Calibration of Imperfections in Time-Interleaved ADCs", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 6, pp. 1504–1514, Jun. 2017.
9. B. T. Reyes, R. M. Sanchez, A. L. Pola, and M. R. Hueda, "Design and Experimental Evaluation of a Time-Interleaved ADC Calibration Algorithm for Application in High-Speed Communication Systems", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 5, pp. 1019–1030, May 2017.
10. C. Vogel, "The impact of combined channel mismatch effects in time-interleaved ADCs," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 1, February 2005, pp. 415–427.
11. Bortnyk H.H. Paralelnyi analoho-tyfrovoyi peretvoriuvach z koryhuvanniam chasovoi nevyznachenosti vykhidnoho syhnalu / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, S.O. Kyryliuk. – Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2023, № 4. – S. 46-52.
12. Bortnyk H.H. Shvydkodiinyi prystrii analoho-tyfrovoho peretvorennia syhnaliv z koryhuvanniam chasovoi nestabilnosti u chastotnii oblasti / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, S.O. Kyryliuk. – Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2023, № 6. – S. 70-76.
13. Bortnyk H.H. Paralelnyi analoho-tyfrovoyi peretvoriuvach z vypadkovym peremykanniam kanaliv / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, M.R. Bryl, O.H. Bortnyk. – Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2024, № 4. – S. 43- 48.
14. Black, William and David Hodges. "Time Interleaved Converter Arrays," *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, Vol. SC-15, No. 6, 1980.
15. Bortnyk H.H. Prystrii analoho-tyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko. – Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2013, № 2. – S. 82-85.