

БОРТНИК ГЕННАДІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>e-mail: bgen88@gmail.com**БОРТНИК СЕРГІЙ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4290-1750>e-mail: sbortnyk@gmail.com**КИРИЛЮК СЕРГІЙ**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: kso1996.08@gmail.com

ШВИДКОДІЙНИЙ ПРИСТРІЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ ЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

У роботі запропоновано метод розширення динамічного діапазону швидкодіючого пристрою аналого-цифрових перетворення сигналів на базі коригування часової нестабільності вихідного сигналу. Доведено, що часова нестабільність вихідного сигналу перетворювача проявляється у вигляді паразитних складових у спектрі вихідного сигналу, при чому амплітуда і форма цих складових залежить від самого вхідного сигналу та від значення часової нестабільності. Компенсація похибок часової нестабільності виконується у частотній області. Наведена структура швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення сигналів, що базується на паралельному нарощуванні декількох каналів аналого-цифрових перетворювачів. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон 14-розрядного швидкодіючого пристрою на 22-36 дБ у смузі робочих частот.

Ключові слова: пристрій аналого-цифрового перетворення, паралельні аналого-цифрові перетворювачі, часова нестабільність, динамічний діапазон.

BORTNYK GENNADIY, BORTNYK SERHII, KYRYLYUK SERHII
Vinnytsia National Technical University

HIGH-SPEED DEVICE FOR ANALOG-DIGITAL CONVERSION OF SIGNALS WITH CORRECTION OF TIME INSTABILITY IN THE FREQUENCY DOMAIN

The paper proposes a method of expanding the dynamic range of a high-speed analog-to-digital signal conversion device based on the correction of the temporal instability of the output signal. It was established that the discretization of the input signal in parallel analog-to-digital converters (PADC) is accompanied by a deviation of the actual moments of formation of signal readings from their nominal position on the time axis. As a result, the phenomenon of temporal instability of the PADC output signal occurs. This leads to the appearance of parasitic frequency components in the frequency spectrum of the output signal of the converter, which narrow the dynamic range of the analog-to-digital conversion device.

The adjustment process consists of two stages: evaluation and compensation. At the first stage, the value of temporal instability is evaluated. The temporal instability of the PADC output signal is a difficult dynamic parameter to control. This is due to extremely small numerical values of this parameter, which in modern integrated PADC is within picosecond units. To assess temporal instability, it is suggested to synchronize the frequency of the input test signal of a sinusoidal form with the frequency of the formation of output readings. Then, diluted output readings are used, corresponding to the transitions of the sinusoid through zero, that is, at the moments of maximum steepness of the input signal. In contrast to the general sampling rule, in this case, the period of the sinusoidal test signal must be a multiple of the sampling period. Time instability error compensation is performed in the frequency domain. The structure of a high-speed analog-to-digital conversion device based on the parallel expansion of several PADC channels is given. Analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that thanks to the developed method, it is possible to expand the dynamic range of a 14-bit high-speed device by 22-36 dB in the operating frequency band.

Keywords: analog-digital conversion device, parallel analog-digital converters, temporal instability, dynamic range.

Постановка проблеми

Швидкодіючі паралельні аналого-цифрові перетворювачі (ПАЦП) знаходять широке використання в цифрових радіотехнічних системах. Для підвищення швидкодії ПАЦП використовують структурне розпаралелювання каналів аналого-цифрового перетворення сигналів з розгортанням у часі. Такий підхід передбачає використання багатофазної дискретизації паралельно ввімкнених M каналів ПАЦП, що призводить до підвищення частоти дискретизації пристрою аналого-цифрового перетворення сигналів в M разів [1].

У реальному пристрої аналого-цифрового перетворення побудованому на базі ПАЦП процес дискретизації вхідного сигналу супроводжується відхиленням фактичних моментів формування цифрових відліків сигналу від їх номінального положення на часовій осі. В результаті виникає явище часової нестабільності вихідного сигналу ПАЦП [2]. При спектральному аналізі спостерігаються паразитні частотні складові у спектрі вихідного сигналу пристрою аналого-цифрового перетворення, що призводить до звуження динамічного діапазону ПАЦП [3]. Розробка цифрових радіотехнічних систем з розширеною частотною смугою підвищує вимоги до динамічного діапазону оброблюваних сигналів, що обумовлює

актуальність дослідження швидкодіючих пристроїв аналого-цифрового перетворення з розширеним динамічним діапазоном.

Аналіз останніх джерел

Дослідженню часової нестабільності швидкодіючих пристроїв аналого-цифрового перетворення присвячені роботи [4, 5], в яких зокрема доведено, що часова невизначеність вихідних сигналів впливає на динамічний діапазон ПАЦП і з розширенням смуги робочих частот погіршується відношення сигнал/шум швидкодіючих перетворювачів аналог-код. У роботах [6, 7] наведено методи коригування часової нестабільності ПАЦП. Слід зазначити, що точність коригування фазових зсувів у часовій області є недостатньо високою. Натомість методологія коригування у частотній області видається перспективнішою і може забезпечити вищу ефективність швидкодіючих пристроїв аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів у широкому динамічному діапазоні.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону швидкодіючих пристроїв аналого-цифрового перетворення за рахунок коригування часової нестабільності вихідного сигналу у частотній області.

Виклад основного матеріалу

У M -канальному швидкодіючому пристрої аналого-цифрового перетворення часові вибірки кожного каналу ПАЦП можна записати як

$$t_k = (nM + k) \cdot T_s, \quad (1)$$

де k – номер каналу ПАЦП ($k = 0, 1, \dots, M - 1$);

T_s – період дискретизації пристрою аналого-цифрового перетворення.

Структурна схема процесу аналого-цифрового перетворення вхідного сигналу $X(t)$ в такому M -канальному пристрої представлена на рис. 1.

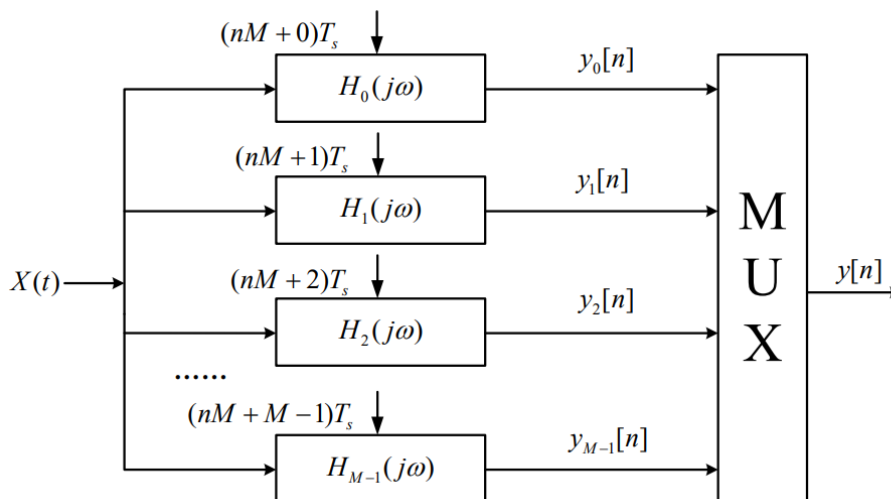


Рис. 1. Структурна схема аналого-цифрового перетворення сигналів в M -канальному пристрої

У цій структурі передатну функцію k -го каналу ПАЦП подано як $H_k(j\omega)$. Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) вихідного сигналу k -го каналу ПАЦП можна записати у такому вигляді [7]:

$$Y_k(j\omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} H_k \left[j \left(\omega - \frac{2\pi i}{M} \right) \right] \cdot X \left[j \left(\omega - \frac{2\pi i}{M} \right) \right], \quad (2)$$

де $X[j\omega]$ – ДПФ вхідного сигналу ПАЦП.

З урахуванням впливу часової нестабільності вихідний сигнал пристрою аналого-цифрового перетворення можна записати у такому вигляді

$$Y(j\omega) = \sum_{k=0}^{M-1} Y_k(j\omega) = X(j\omega) + \sum_{i=0}^{M-1} R_i(j\omega), \quad (3)$$

де $R_i(j\omega)$ – паразитні компоненти в спектрі вихідного сигналу, що спричинені часовою нестабільністю.

Амплітуда і форма паразитних складових у спектрі вихідного сигналу ПАЦП залежить від самого вхідного сигналу та від значення часової нестабільності σ_k :

$$R_i(j\omega) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} e^{-j\frac{2\pi k}{M}} e^{j\left(\omega - \frac{2\pi i}{M}\right)\sigma_k} X\left[j\left(\omega - \frac{2\pi i}{M}\right)\right]. \quad (4)$$

Вираз (4) представляє амплітудну модуляцію, що відтворює частотний зсув і збагачення паразитними складовими вхідний сигнал. Коефіцієнт амплітудної модуляції з виразу (4) можна записати таким чином:

$$C_i = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} e^{-j\frac{2\pi k}{M}} e^{j\left(\omega - \frac{2\pi i}{M}\right)\sigma_k}. \quad (5)$$

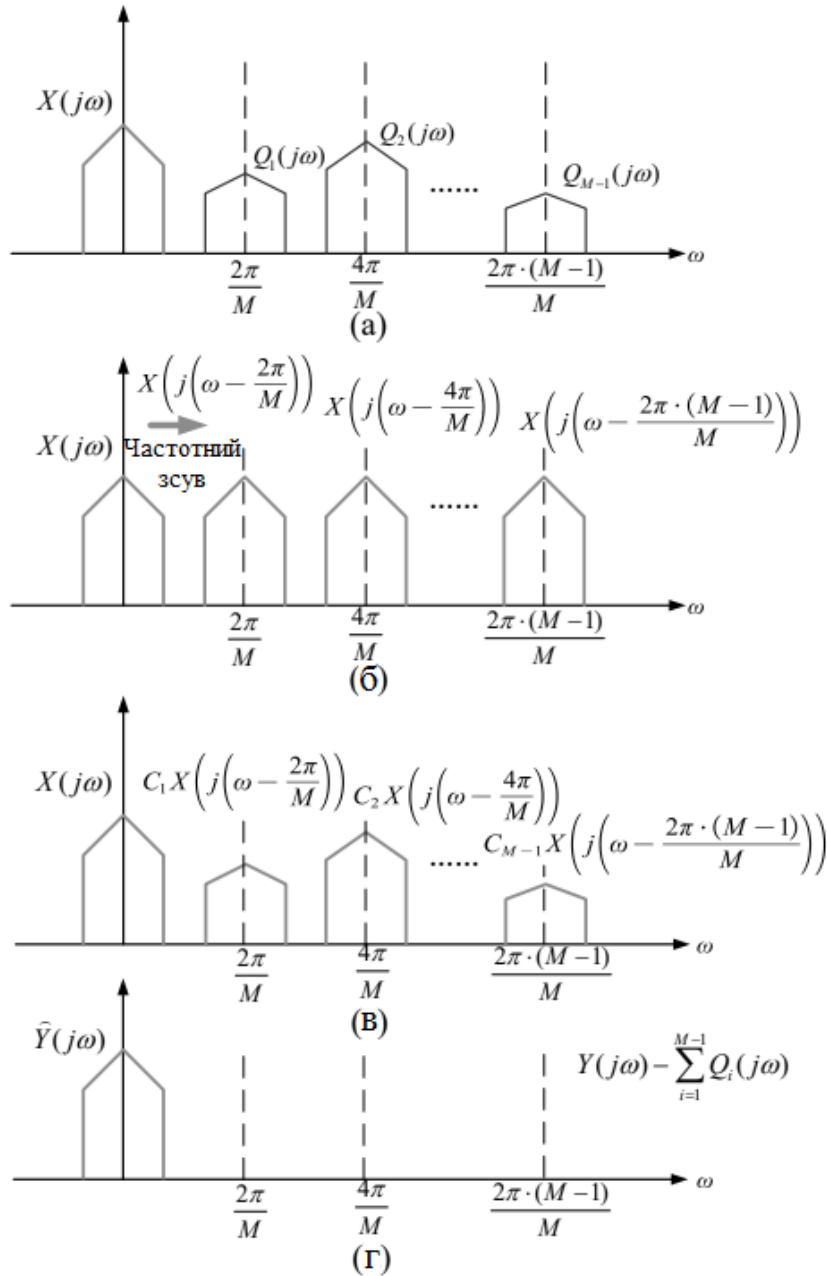


Рис. 2. (а) Спектр вихідного сигналу з часовою нестабільністю; (б) спектр вхідного сигналу та його копії, що зсунені за частотою; (в) амплітудна модуляція зсунених копій вхідного сигналу; (г) спектр скоригованого вихідного сигналу

Спектр вихідного сигналу М-канального пристрою аналого-цифрового перетворення з часовою нестабільністю вихідного сигналу представлено на рис. 2,а. В ідеальному випадку, коли похибки часового зсуву однакові у кожному каналі ПАЦП, усі компоненти $R_i(j\omega)$ можуть бути повністю компенсовані. На практиці значення часової нестабільності σ_k є різними у кожному каналі ПАЦП. З виразу (4) видно, що паразитні компоненти $R_i(j\omega)$ пов'язані з вхідним сигналом. Теоретично, якщо точно оцінити значення σ_k , то добуток

коефіцієнта модуляції та зсуненого за частотою вхідного сигналу $C_i \cdot X \left[j \left(\omega - \frac{2\pi i}{M} \right) \right]$ дорівнює $R_i(j\omega)$, як показано на рис. 2,б і 2,в. Таким чином, скоригований вихідний сигнал можна записати у такому вигляді

$$\tilde{Y}(j\omega) = Y(j\omega) - \sum_{i=0}^{M-1} R_i(j\omega). \quad (6)$$

Спектр скоригованого вихідного сигналу $\tilde{Y}(j\omega)$ представлено на рис. 2,г. Ефективність коригування вихідного сигналу залежить від точності оцінювання значень σ_k .

Часова нестабільність вихідного сигналу ПАЦП є важко контрольованим динамічним параметром швидкодіючих перетворювачів. Це пов'язано з надзвичайно малими числовими значеннями цього параметру, який у сучасних мікросхемах ПАЦП знаходиться у межах одиниць пікосекунд. Для оцінювання часової нестабільності пропонується синхронізувати частоту вхідного тестового сигналу синусоїдальної форми з частотою формування вихідних відліків. Потім використовуються проріджені вихідні відліки (з періодом синусоїдального сигналу), що відповідають переходам синусоїди через нуль, тобто в моменти максимальної крутості вхідного сигналу. На відміну від загального правила дискретизації в даному випадку період тестового сигналу синусоїдальної форми T_t повинен бути кратним періоду дискретизації T_s . Відношення цих періодів

повинне бути цілим числом, причому $\frac{T_t}{T_s} \geq 20$. Такий режим дискретизації забезпечує формування

виборок в моменту максимальної крутості тестового сигналу. Слід зазначити, що розкид відліків залежить як від часової нестабільності вихідного сигналу, так і від фазової нестабільності джерела тестового сигналу. Окрім того, цей розкид пропорційний крутості сигналу в моменти формування відліків. Тому визначене середньоквадратичне відхилення відліків для даної амплітуди U_{\max} і частоти f тестового сигналу дорівнює

$$\sigma_m^2 = \sigma_n^2 + \sigma_\tau^2 (2\pi f U_{\max})^2, \quad (7)$$

де σ_n – фазова нестабільність джерела тестового сигналу;

σ_τ – часова нестабільність, що пронормована до одиничної крутості сигналу.

Якщо здійснити декілька таких вимірювань для різної амплітуди тестового сигналу, то можна окремо обчислити значення σ_n і σ_τ . Звідси, знаючи коефіцієнт p перетворення напруги сигналу ΔU в цифрові відліки ΔN :

$p = \frac{\Delta N}{\Delta U}$, можна дуже просто отримати значення часової нестабільності вихідного сигналу ПАЦП:

$$\sigma_k = \frac{\sigma_\tau}{p}. \quad (8)$$

Слід зазначити, що при оцінюванні часової нестабільності вихідного сигналу ПАЦП рівень фазового шуму генератора тестового сигналу не повинен перевищувати значення σ_k досліджуваного пристрою аналого-цифрового перетворення.

Структура швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення на базі ПАЦП, який реалізує запропонований метод коригування часової нестабільності вихідного сигналу у частотній області представлено на рис.3.

Пристрій аналого-цифрового перетворення містить M паралельно ввімкнених каналів ПАЦП. Відцифровані значення вхідного сигналу $X(t)$ з кожного ПАЦП надходять у відповідні блоки спектральних перетворень (БСП), де виконується коригування сигналів кожного ПАЦП у частотній області. Для формування сигналів у часовій області слугують блоки оберненого швидкого перетворення Фур'є (БОШПФ). На виході пристрою використовується мультіплексор (МП), який об'єднує M сигналів ПАЦП у вихідний сигнал $Y(n)$.

Пристрій аналого-цифрового перетворення функціонує у двох режимах. У режимі калібрування на вхід пристрою подається тестовий сигнал синусоїдальної форми. Масив цифрових виборок ПАЦП з МП через адаптер зв'язку (АЗ) та шину USB подаються в комп'ютер, де відбувається розрахунок значень часової нестабільності вихідного сигналу ПАЦП.

Етап калібрування виконується в умовно-реальному масштабі часу, тобто, накопичення масиву даних здійснюється з робочою швидкістю передачі без втрати інформації, а розрахунок значень часової нестабільності та їх запис у блоці керування (БК) виконується з частотою, доступною для функціонування

комп'ютера. У робочому режимі на вхідну шину пристрою подається реальний аналоговий сигнал. Скоригований вихідний сигнал ПАЦП з виходу МП подається на вихідну шину пристрою. За допомогою БК формуються імпульси дискретизації та значення часової нестабільності для кожного каналу ПАЦП.

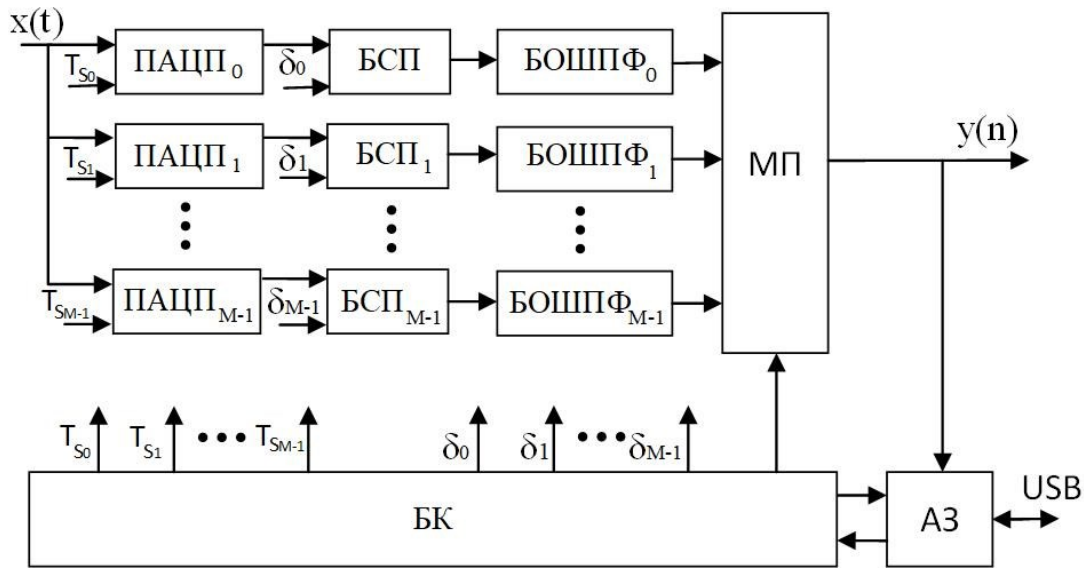


Рис. 3. Структура швидкодійного пристрою аналого-цифрового перетворення на базі ПАЦП з коригування часової нестабільності вихідного сигналу

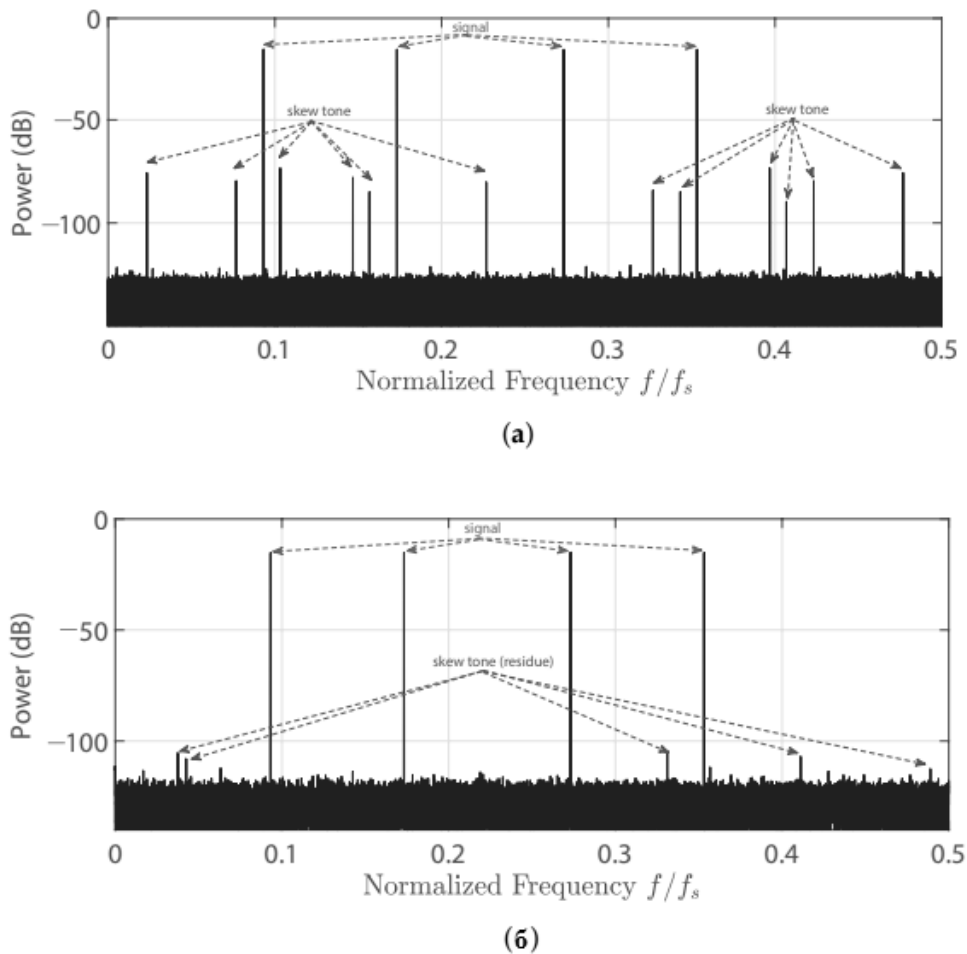


Рис. 4. Спектри вихідного сигналу пристрою аналого-цифрового перетворення для багатотонального вхідного сигналу: а) без коригування; б) після коригування

Виконаємо аналіз ефективності запропонованого швидкодійного пристрою аналого-цифрового перетворення сигналів. Вищерозглянутий спосіб оцінювання значень σ_k базуються на застосуванні

односигнальної методики визначення динамічних параметрів перетворювачів. Водночас ПАЦП в цифрових радіотехнічних системах функціонують з широкосмуговими сигналами, тому значення динамічних параметрів ПАЦП при роботі зі спектрально насиченими сигналами за результатами вимірювань на одночастотних сигналах є некоректними [9]. З метою отримання адекватних умов функціонування радіоприймальної апаратури параметрів ПАЦП, пропонується використовувати багатотональні сигнали при дослідженні динамічного діапазону пристрою аналого-цифрового перетворення [9]. Визначення динамічного діапазону пристрою виконується за спектральною методикою згідно виразу

$$D_{ADC} = 10 \lg \frac{\sum_{l=1}^L U_l^2}{\sum_{p=1}^N U_p^2}, \quad (9)$$

U_l – амплітуди основних складових спектра вихідного сигналу пристрою;

U_p – амплітуди інтермодуляційних і гармонічних складових спектра вихідного сигналу пристрою.

Спектри вихідного сигналу швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення без і після коригування часової нестабільності представлені на рис. 4.

Змінюючи частоту вхідного сигналу можна отримати залежність динамічного діапазону пристрою аналого-цифрового перетворення від частоти вхідного сигналу. На рис. 5 представлено залежність динамічного діапазону 14-розрядного АЦП в режимі без коригування (нижня крива) і з коригуванням (верхня крива) від пронормованої частоти вхідного сигналу.

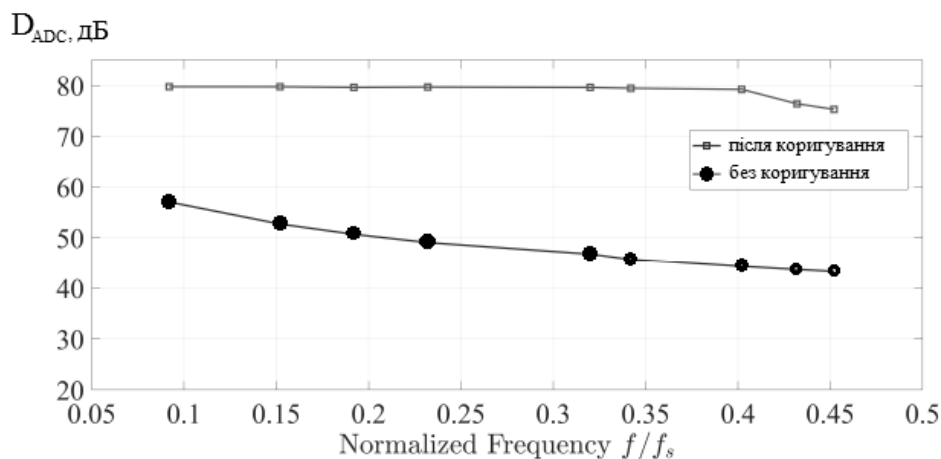


Рис. 5. Залежність динамічного діапазону пристрою аналого-цифрового перетворення від пронормованої частоти вхідного сигналу

Як видно з графіків у режимі з коригуванням динамічний діапазон пристрою аналого-цифрового перетворення обмежується лише розрядністю використаних ПАЦП. Водночас динамічний діапазон пристрою без коригування часової нестабільності демонструє зниження у смузі робочих частот на 22-36 дБ порівняно з пристроєм, що використовує запропонований метод коригування.

Висновки

У роботі запропоновано метод розширення динамічного діапазону швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення на базі коригування часової нестабільності вихідного сигналу. Встановлено, що дискретизація сигналу в паралельних аналого-цифрових перетворювачах супроводжується відхиленням фактичних моментів формування відліків сигналу від їх номінального положення на часовій осі. В результаті виникає явище часової нестабільності вихідного сигналу ПАЦП. Це призводить до появи у спектрі частот вихідного сигналу перетворювача паразитних частотних складових, які звужують динамічний діапазон пристрою аналого-цифрового перетворення.

Процес коригування складається з двох етапів: оцінювання та компенсації. На першому етапі виконується оцінювання значення часової нестабільності. Знаходження похибки, обумовленої часовою невизначеністю здійснюється для вхідного тестового сигналу ПАЦП синусоїдальної форми. Компенсація похибки часової нестабільності виконується у частотній області.

Наведена структура швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення, що базується на паралельному нарощуванні декількох каналів ПАЦП.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон 14-розрядного швидкодіючого пристрою на 22-36 дБ у смузі

робочих частот.

Запропонований швидкодійний пристрій аналого-цифрового перетворення можна використовувати в аналого-цифрових трактах сучасних радіотехнічних систем.

Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, С.Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.
2. Бортник Г. Г. Аналого-цифрові тракты комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В.М. Кичак, О.В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 140 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. A. M. A. Ali, H. Dinc, P. Bhoraskar, S. Bardsley, C. Dillon, M. McShea, J. P. Periathambi, and S. Puckett, “A 12-b 18-GS/s RF Sampling ADC With an Integrated Wideband Track-and-Hold Amplifier and Background Calibration”, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 12, pp. 3210–3224, Dec. 2020.
7. 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.
8. Бортник Г.Г. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності / Г.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 47-50.
9. 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. – № 3. – С. 82-85.

References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv : monohrafiia / H. H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, V. M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2013. – 128 s.
2. Bortnyk H. H. Analoho-tsyfrovi trakty kompiuternykh system z tsyfrovym obroblienniam vysokochastotnykh syhnaliv : monohrafiia / H. H. Bortnyk, V.M. Kychak, O.V. Stalchenko. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 140 s.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. A. M. A. Ali, H. Dinc, P. Bhoraskar, S. Bardsley, C. Dillon, M. McShea, J. P. Periathambi, and S. Puckett, “A 12-b 18-GS/s RF Sampling ADC With an Integrated Wideband Track-and-Hold Amplifier and Background Calibration”, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 12, pp. 3210–3224, Dec. 2020.
7. 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.
8. Bortnyk H.H. Shvydkodiuychi analoho-tsyfrovoyi peretvoriuvach pidvyshchenoi tochnosti / H.H. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2002. – № 5. – S. 47-50.
9. Bortnyk H.H. Prystrii analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko // Vymiryuvalna ta obchyslyuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2013. – № 3. – S. 82-85.