

УДК 681.325

Г. Г. Бортник, Т. Б. Мартинюк

АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ ПОХИБОК ЛІНІЙНОСТІ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Широке застосування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у комп'ютерних системах стримується низькою роздільною здатністю при перетворенні сигналів у широкій смузі частот. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення випадкових у часі широкопasmових сигналів, математичне представлення яких у часовому і частотному вимірі є досить складним. Наслідком цього є високі похибки лінійності АЦП, що знижують ефективність функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів у складі комп'ютерних систем. Запропоновано розв'язання задачі підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів можна здійснювати за рахунок підвищення лінійності АЦП. Наведено модифікований метод підвищення лінійності АЦП шляхом її коригування у динамічному режимі. Таке коригування виконується шляхом використання статистичної методології оцінювання характеристик широкопasmових сигналів. Обґрунтовано використання при калібруванні АЦП тестового впливу у вигляді багатотонального сигналу. Запропонований тестовий сигнал має збагачений основними гармоніками частотний спектр і його можна реалізувати при використанні широкого класу стандартних генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими метрологічними характеристиками. Водночас такий тестовий сигнал дає змогу забезпечити режими роботи АЦП, що адекватні реальним умовам функціонування перетворювачів аналог-код. З метою збереження високої швидкодії АЦП запропоновано коригування здійснювати шляхом заміни вихідного коду АЦП скоригованим кодом. Розроблено структурну схему пристрою аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів з коригуванням похибок лінійності, в якій застосовуються цифро-аналогове формування тестового сигналу і табличне формування скоригованих кодів. Виконано аналіз динамічних параметрів АЦП з коригуванням похибок лінійності, який підтвердив високу ефективність запропонованого методу статистичного оцінювання та коригування похибок і високу роздільну здатність побудованої структури АЦП.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, широкопasmові сигнали, похибки лінійності, роздільна здатність.

Abstract. The widespread use of analog-to-digital converters (ADC) in computer systems is hindered by low resolution when converting signals in a wide frequency band. These problems are related both to the lack of the necessary elementary base and to the complexity of the processes of analog-digital conversion of broadband signals random in time, the mathematical representation of which in the time and frequency dimensions is quite complex. This results in high linearity errors of the ADC, which reduce the efficiency of the analog-to-digital conversion of broadband signals in computer systems. It is proposed to solve the problem of increasing the resolution of broadband analog-to-digital conversion devices by increasing the linearity of the ADC. A modified method of increasing the linearity of the ADC by adjusting it in the dynamic mode is presented. Such adjustment is performed by using a statistical methodology for evaluating the characteristics of broadband signals. The use of a test effect in the form of a multi-tone signal during calibration of the ADC is justified. The proposed test signal has a frequency spectrum enriched with fundamental harmonics and can be implemented using a wide class of standard sinusoidal signal generators with normalized metrological characteristics. At the same time, such a test signal makes it possible to ensure the operation modes of the ADC that are adequate to the real conditions of operation of analog-to-code converters. In order to maintain the high speed of the ADC, it is proposed to perform the adjustment by replacing the source code of the ADC with the corrected code. A structural diagram of the device for analog-to-digital conversion of broadband signals with correction of linearity errors has been developed, in which digital-to-analog formation of the test signal and tabular formation of corrected codes are used. An analysis of the dynamic parameters of the ADC with linearity error correction was performed, which confirmed the high efficiency of the proposed method of statistical evaluation and error correction and the high resolution of the constructed ADC structure.

Key words: analog-to-digital converter, broadband signals, linearity errors, resolution.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-52-57>.

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є обов'язковими компонентами комп'ютерних систем різноманітного призначення. Параметри та характеристики АЦП безпосередньо впливають на ефективність функціонування автоматизованих систем діагностування та контролю технологічних процесів, систем вимірювання параметрів випадкових процесів і полів, засобів ідентифікації сигналів та пристроїв розпізнання зображень [1]. Ефективність практичного застосування сучасних комп'ютерних систем і компонентів у різних галузях визначається як рівнем, так і перспективами розвитку таких АЦП, що є перетворювачами форми інформації та виконують з високою точністю перетворення неперервних сигналів у цифрові.

Актуальність

Проблема розробки теорії АЦП з високими точнісними характеристиками є актуальною на даний час, тому що від її вирішення безпосередньо залежать технічні характеристики різновидів комп'ютерних систем: інформаційно-вимірювальних і контрольно-діагностичних.

Широке застосування АЦП у комп'ютерних системах стримується низькою роздільною здатністю при перетворенні сигналів у широкій смузі частот [2]. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення випадкових у часі широкопasmових сигналів, математичне представлення яких у часовому і частотному вимірі є досить склад-

ним. Наслідком цього є високі похибки лінійності АЦП, що знижують ефективність функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів у складі комп'ютерних систем [3]. Отже, існує необхідність у підвищенні роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів.

Мета

Метою роботи є підвищення роздільної здатності аналого-цифрових перетворювачів шляхом коригування похибок лінійності, що виникають при перетворенні ширококутових сигналів.

Задачі

1. Виконати розробку модифікованого методу коригування похибок лінійності АЦП.
2. Розробити структуру пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів.
3. Проаналізувати ефективність АЦП ширококутових сигналів з коригуванням похибок лінійності.

Розв'язання задач

Розв'язання задачі підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів можна здійснювати за рахунок підвищення лінійності АЦП. Тому пропонується на базі результатів аналізу нелінійності АЦП, розробити модифікований метод підвищення лінійності АЦП шляхом її коригування у динамічному режимі. Таке коригування можна виконати шляхом використання статистичної методології оцінювання характеристик ширококутових сигналів.

Основний принцип коригування похибок АЦП у динамічному режимі функціонування з тестовим контролем полягає в ідентифікації параметрів характеристики перетворення (ХП) АЦП. Такий контроль відображає із заданою точністю властивості функцій похибок перетворення для широкого класу вхідних сигналів АЦП. Для запропонованого методу коригування необхідно реалізувати такі етапи:

- 1) визначення ХП АЦП у динамічному режимі для заданого вхідного сигналу;
- 2) ідентифікація параметрів досліджуваного АЦП;
- 3) визначення коригувальних поправок для заданих вхідних сигналів АЦП;
- 4) формування коригувальних сигналів АЦП.

Перший та другий етапи процесу коригування вважаються етапами контролю параметрів АЦП. Третій і четвертий етапи відносяться до робочого режиму АЦП. Для реалізації усіх цих етапів в АЦП необхідно ввести додаткові блоки.

Узагальнена структурна схема процесу коригування вихідного коду АЦП містить послідовно ввімкнені АЦП і таблицю скоригованих кодів (ТСК). Згідно такого підходу вихідний код АЦП, що підлягає коригуванню є адресою скоригованого коду АЦП. Таким чином, виконується заміна коду АЦП $y(i)$ скоригованим кодом $y_c(i)$: $y(i) \rightarrow y_c(i)$. Якщо в АЦП виникла похибка $\Delta y(i)$, то в ТСК записується код $y_c(i)$. Отже, коригування результатів аналого-цифрового перетворення виконується шляхом зіставлення вихідного коду АЦП $y(i)$ з відповідною адресою таблиці $A(i)$. Такий принцип коригування використовує одну послідовну ввімкнену ланку оброблення вихідного коду АЦП, що дає змогу покращувати характеристики швидкодійних АЦП. Тому коригування із заміною при реалізації ТСК на базі ПЗП створює умови для збереження високої швидкодії АЦП.

Визначення похибок лінійності досліджуваного АЦП при перетворенні ширококутових сигналів пропонується здійснювати шляхом оцінювання спотворень функції розподілу тестового сигналу. Для цього потрібно визначити густину ймовірності миттєвих значень тестового сигналу $\omega(U)$. На базі відомої густини ймовірності миттєвих значень тестового сигналу $U(t)$ можна знайти ймовірність появи i -го коду [4]:

$$p(i) = \int_{U_i}^{U_{i+1}} \omega(U) dU. \quad (1)$$

Ймовірність $p(i)$ є мірилом диференціальної нелінійності досліджуваного АЦП, оскільки $\omega(U)$ в інтервалі $[U_i, U_{i+1}]$ майже не змінюється. Вираз (1) можна записати у такому вигляді

$$p(i) = \omega(U_i + \varepsilon)(U_{i+1} - U_i); \quad U_i \leq \varepsilon < U_{i+1}. \quad (2)$$

Диференціальна нелінійність з урахуванням виразу (2) для кроку квантування h дорівнює

$$\Delta_{dn}(i) = h - (U_{i+1} - U_i) = h - \frac{p(i)}{\omega(U_i + \varepsilon)}. \quad (3)$$

Імовірність появи вихідного коду $i < j$, що знаходиться як

$$p(i < j) = \sum_{i=0}^{j-1} p(i) = \sum_{i=0}^{j-1} \int_{U_i}^{U_{i+1}} \omega(U) dU = \int_0^{U_j} \omega(U) dU, \quad (4)$$

може слугувати мірилом похибки лінійності досліджуваного АЦП. Звідси можна записати:

$$\Delta_n(j) = \frac{1}{\omega(U_j + \varepsilon)} [p_0(i < j) - p_0(i < j)]. \quad (5)$$

За відомою густиною ймовірності миттєвих значень тестового сигналу розраховується дискретний розподіл ймовірностей $p(i)$ для номінальної ХП досліджуваного АЦП. Потім визначається обсяг вибірки M та здійснюється експериментальне дослідження АЦП. Накопичений масив вихідних кодів АЦП у вигляді $M_j; \{i = 0, N - 1\}$ використовується для подальшого оцінювання диференціальної нелінійності. Спочатку визначається оцінка $\tilde{p}(i)$, а потім знаходиться оцінка динамічної похибки лінійності АЦП за таким виразом

$$\tilde{\Delta}_n[j] = \frac{h}{p(j)} \sum_{i=0}^{j-1} [p(i) - \tilde{p}(i)]. \quad (6)$$

Для випадкового тестового сигналу, що має рівномірну густину розподілу доля кодів M_j у загальному обсязі кодів M є мірилом диференціальної нелінійності Δ_{dn} . Після накопичення M_j і M оцінка диференціальної нелінійності АЦП знаходиться за виразом: $\tilde{\Delta}_{dn}(j) = h - U_m \frac{M_j}{M}$.

З метою підвищення адекватності процесу коригування лінійності АЦП при перетворенні широко-смугових сигналів пропонується як тестовий використовувати багатотональний сигнал. Такий сигнал має збагачений основними гармоніками частотний спектр і тому функція розподілу такого процесу відрізняється від гауссового закону. Багатотональний тестовий сигнал можна представити як суму деякого числа m взаємно незалежних складових U_1, U_2, \dots, U_l . У випадку багатотонального сигналу, для якого всі складові характеризуються однаковими розподілами та відповідно однаковими характеристичними функціями $\theta_1(V)$, можна записати [4]

$$\theta_l(V) = [\theta_1(V)]^l. \quad (7)$$

Для багатотонального сигналу, що містить l гармонічних складових з однаковими амплітудами та випадковими взаємозалежними фазами, характеристична функція з урахуванням (7) знаходиться як

$$\theta_l(V) = \left[J_0 \left(\frac{V}{\sqrt{l}} \right) \right]^l, \quad (8)$$

де $J_0(V)$ – функція Бесселя нульового порядку першого роду.

Знаходження густини ймовірності багатотонального сигналу виконується шляхом обчислення інтегралу відповідно до виразу (8)

$$\omega_l(U) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[J_0 \left(\frac{V}{\sqrt{l}} \right) \right]^l \cdot \cos(VU) \cdot dV. \quad (9)$$

Такий сигнал можна вважати оптимальним типом тестового сигналу досліджуваного АЦП. Багатотональний тестовий сигнал можна реалізувати при використанні широкого класу стандартних генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими метрологічними характеристиками. Водночас такий тестовий сигнал дає змогу забезпечити режими роботи АЦП, що адекватні реальним умовам функціонування перетворювачів аналог-код.

Структурна схема пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів на базі методу статистичного оцінювання і коригування похибок лінійності наведена на рис. 1.

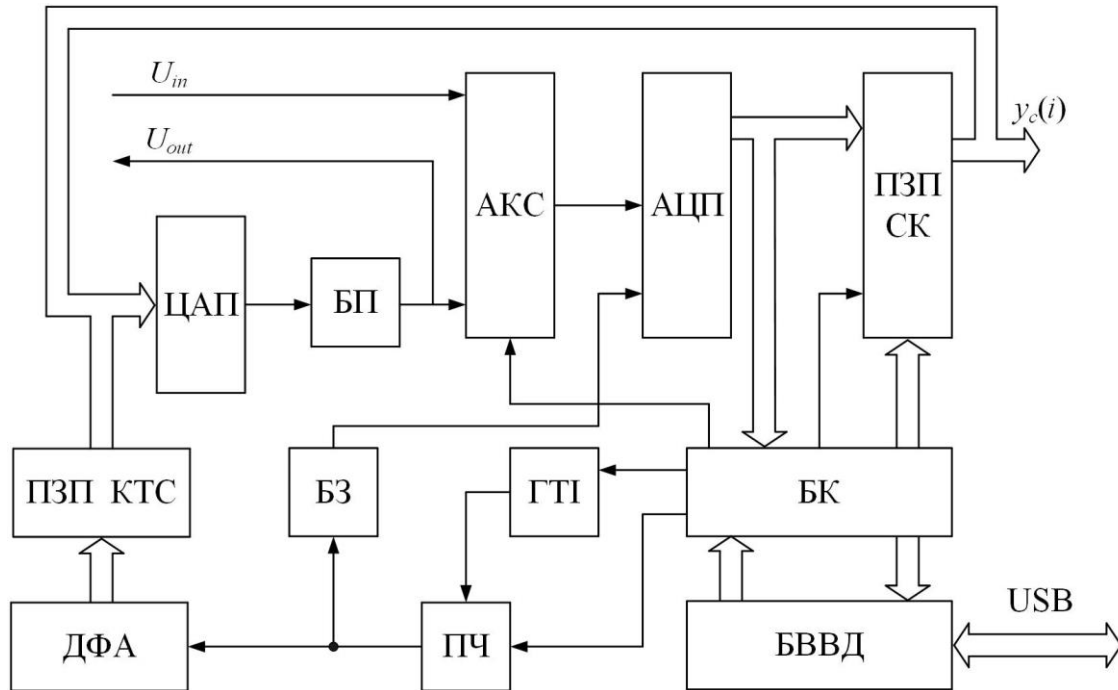


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів з коригуванням похибок лінійності

Наведена вище структура містить: вхідну шину U_{in} , вихідну цифрову шину $y_c(i)$, вихідну аналогову шину U_{out} , шину інтерфейсу USB, буферний підсилювач (БП), аналоговий комутатор сигналів (АКС), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), базовий АЦП, постійний запам'ятовувальний пристрій скоригованих кодів (ПЗП СК), постійний запам'ятовувальний пристрій кодів тестового сигналу (ПЗП КТС), генератор тактових імпульсів (ГТІ), блок керування (БК), блок затримки (БЗ), двійковий формувач адреси (ДФА), подільник частоти (ПЧ), блок введення-виведення даних (БВВД).

Пристрій аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів працює у двох режимах. Спочатку в режимі калібрування відбувається формування псевдовипадкового тестового сигналу за допомогою внутрішнього цифро-аналогового генератора. Генерація тестового сигналу у заданій частотній смузі базується на формуванні адрес відліків сигналу. Блок ПЗП зберігає цифрові еквіваленти тестових сигналів заданої форми. ЦАП відповідної розрядності та швидкодії перетворює цифровий сигнал в аналоговий, який додатково підсилюється за допомогою буферного підсилювача.

Потім у робочому режимі відбувається коригування результатів аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів шляхом заміщення вихідних кодів АЦП, які є адресами комірок скоригованих кодів. Тобто, в ПЗП СК зберігається результат $y_c(i) = y(i) + \Delta y(i)$. Залежно від режиму роботи через АКС за сигналом керування з БК подається чи тестовий сигнал з вхідної шини чи вхідний сигнал U_{in} з виходу БП.

Виконаємо аналіз ефективності запропонованого АЦП з коригуванням похибок лінійності. Ефективне число розрядів n_{ef} вважається узагальненим динамічним параметром АЦП. Цей параметр є завжди меншим, ніж номінальне число розрядів АЦП n і характеризує якість функціонування перетворювача аналог-код у заданому динамічному режимі. Ефективне число розрядів АЦП пов'язане з відношенням сигнал/шум таким виразом [5]

$$n_{ef} = \frac{S/N}{6,02} + n \cdot \log_2 \frac{h}{\sqrt{6,02} \cdot U_m}, \quad (10)$$

де S/N – відношення сигнал/шум АЦП.

Різниця між ефективним числом розрядів ідеальної моделі АЦП та ефективним числом розрядів досліджуваного АЦП з коригуванням похибок лінійності дорівнює

$$\Delta n_{ef} = n_{ef_{id}} - n_{ef_c} = 0,5 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{3\sigma_B^2}{h^2} \right), \quad (11)$$

де σ_B^2 – дисперсія диференціальної нелінійності ХП АЦП.

Отримані параметри наочніше характеризують динамічні властивості та точність АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів. На рис. 2 наведено графіки залежностей $\Delta S/N$ і Δn_{ef} від співвідношення $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$, що характеризує динамічну похибку АЦП.

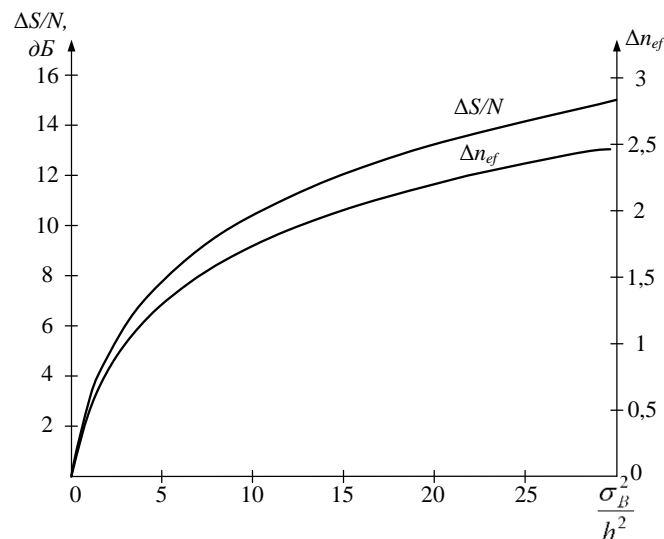


Рисунок 2 – Залежність втрати відношення сигнал/шум і ефективного числа розрядів від динамічної похибки АЦП

Аналіз графіку дозволяє зробити висновок, що отримання максимальної ефективності коригування АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів на базі методу статистичного оцінювання та коригування похибок можливе у діапазоні значень дисперсії диференціальної нелінійності базового АЦП від 1 до 15 одиниць молодшого розряду.

Висновки

1. Удосконалено метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів, який на відміну від існуючих, базується на процедурі оцінювання спотворень функції розподілу багатотонального тестового сигналу у режимі калібрування перетворювача. Це дає можливість повніше

оцінити динамічні властивості контрольованого АЦП, що створює умови для підвищення роздільної здатності АЦП у режимі коригування.

2. Розроблено структуру пристрою аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів з коригуванням похибок лінійності, в якій застосовуються цифро-аналогове формування тестового сигналу і табличне формування скоригованих кодів.

3. Виконано аналіз динамічних параметрів АЦП з коригуванням похибок лінійності, який підтвердив високу ефективність запропонованого методу статистичного оцінювання та коригування похибок і високу роздільну здатність побудованої структури АЦП.

Список літератури

- [1] Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, та В. М. Кичак, *Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014.
- [2] P. E. Pasaquian, J. M. Dela Cruz, "High Speed Data Converters", *Analog Dialogue*, № 2, p. 1-7. 2021.
- [3] M. Looney, "Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems", *Analog Dialogue*, № 8, p. 1-5. 2018.
- [4] A. Veloni, N. Miridakis, and E. Boukouvala, *Digital and Statistical Signal Processing*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, та Р. М. Вітер, "Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення високочастотних сигналів", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 1, с. 48-51. 2020.

Стаття надійшла: 25.02.2023.

References

- [1] G. G. Bortnyk, S. G. Bortnyk, ta V. M. Kychak, *Metody ta zasoby analoho-tyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv*. Vinnytsia, Ukraine: VNTUY, 2014 [in Ukrainian].
- [2] P. E. Pasaquian, J. M. Dela Cruz, "High Speed Data Converters", *Analog Dialogue*, № 2, p. 1-7. 2021.
- [3] M. Looney, "Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems", *Analog Dialogue*, № 8, p. 1-5. 2018.
- [4] A. Veloni, N. Miridakis, and E. Boukouvala, *Digital and Statistical Signal Processing*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] G. G. Bortnyk, M. V. Vasylykivskyi, ta R. M. Viter, "Metod rozshyrennia dynamichnoho diapazonu analoho-tyfrovyykh traktiv zasobiv tyfrovoho obrobлення vysokochastotnykh syhnaliv", *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, № 1, s. 48-51. 2020 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Бортник Геннадій Григорович – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Мартинюк Тетяна Борисівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки.

G. G. Bortnyk, T. B. Martyniuk

ANALOG-DIGITAL CONVERTER OF WIDEBAND SIGNALS WITH CORRECTION OF LINEARITY ERRORS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia