

УДК 681.335

Г.Г. БОРТНИК, М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, О.Г. БОРТНИК  
Вінницький національний технічний університет, Україна

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

*У роботі представлено статистичний метод оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що базується на використанні чотиритонального тестового сигналу. Розроблено апаратно-програмну реалізацію автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП. Дослідження ефективності запропонованої системи підтвердили її високу точність при оцінюванні динамічних параметрів АЦП.*

*Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, автоматизована система, динамічні параметри.*

G.G. BORTNYK, M.V. VASYLKIVSKIY, O.G. BORTNYK  
Vinnitsa National Technical University, Ukraine

### **AUTOMATED SYSTEM EVALUATION OF DYNAMIC PARAMETERS ANALOG TO DIGITAL CONVERTER**

*The paper presents a statistical evaluation method of dynamic parameters of analog-to-digital converters (ADC), based on the use of multitone test signal. This signal allows the ADC to ensure modes of operation that adequate real and characterized by simplicity of implementation.*

*Developed hardware and software implementation of an automated evaluation system ADC dynamic parameters using built-in digital test signals generator which operates in opportunistic real time. The system performs the evaluation of dynamic parameters of the ADC: the differential non-linearity, signal-to-noise ratio, the effective number of bits.*

*The study confirmed the effectiveness of the proposed system of high accuracy in assessing the dynamic parameters of ADC. When the sample size source ADC values greater than  $10^6$ , error estimation of the dynamic parameters ADC are within 0,01-0,05%.*

*Key words: analog-digital converter, automated system, dynamic parameters.*

### **Вступ**

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) знаходять широке використання у галузі первинних і вторинних перетворень форми інформації. Властивості та характеристики АЦП безпосередньо впливають на ефективність функціонування інформаційно-вимірювальних систем, а також комп'ютерних систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, засобів ідентифікації сигналів та пристроїв контролю технологічних процесів [1, 2].

Специфічною особливістю АЦП є нелінійний вид функції перетворення, що проявляється як в статичному, так і в динамічному режимах функціонування. Якщо проблеми аналізу поведінки АЦП в статичному режимі функціонування достатньо добре вивчені та відповідна методологія відома широкому колу спеціалістів, то проблеми оцінювання динамічних параметрів (ДП) з урахуванням нелінійних і стохастичних властивостей продовжують інтенсивно досліджуватись [3, 4].

Засоби контролю параметрів АЦП випускають багато відомих фірм і характеристики цієї апаратури визначені відповідними рекомендаціями. Однак розвиток спеціалізованих засобів визначення ДП АЦП для оцінювання якості функціонування цих перетворювачів з широкосмуговими сигналами у значній мірі відстає від розвитку самих мікросхем АЦП та не задовольняє сучасні вимоги до точності та адекватності процесу визначення ДП АЦП у широкій смузі робочих частот [1, 5].

Таким чином, створення методу оцінювання ДП АЦП з урахуванням адекватності процесів функціонування перетворювачів з реальними вхідними сигналами, а також розробка на його основі ефективних засобів, що характеризується високою точністю є актуальною науковою задачею.

Метою роботи є підвищення ефективності оцінювання динамічних параметрів АЦП за рахунок використання статистичного методу оброблення сигналів та застосування псевдовипадкових тестових впливів, що гарантують високу точність та адекватність отриманих результатів.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати оцінювання ДП АЦП на базі спотворення функції розподілу тестового сигналу;
- здійснити аналіз статистичних характеристик тестових сигналів АЦП;
- розробити структуру автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП;
- проаналізувати ефективність системи оцінювання динамічних параметрів АЦП.

### **Оцінювання ДП АЦП на базі спотворення функції розподілу тестового сигналу**

Визначення ДП АЦП можна здійснювати шляхом оцінювання спотворень функції розподілу або спектра потужності тестового сигналу. Інтегральні методи, до яких відноситься спектральне оцінювання, компенсують окремі похибки і не дають можливості виявлення всіх особливостей динамічних властивостей АЦП на базі спектральної густини потужності вихідного сигналу АЦП [6].

Для статистичного методу необхідно обчислити густину ймовірності миттєвих значень тестового

сигналу  $\omega(U)$ . На базі відомої густини ймовірності миттєвих значень тестового сигналу  $U(t)$  можна знайти ймовірність появи  $i$ -того коду  $p(i)$ , яка може слугувати мірилом диференціальної нелінійності АЦП, оскільки  $\omega(U)$  в інтервалі  $[U_i, U_{i+1}]$  практично не змінюється:

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

Враховуючи, що диференціальна нелінійність АЦП для кроку квантування  $h$  дорівнює

$$\Delta_{dn}(i) = h - (U_{i+1} - U_i), \quad (2)$$

з урахуванням (1) можна записати

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

Ймовірність появи вихідного коду  $i < j$  дорівнює

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

Відповідно до (1), якщо  $U_j^0$  – номінальне значення  $j$ -го відліку:

$$\Delta_n(j) = U_j^0 - U_j = \frac{1}{\omega(U_j + \varepsilon)} \int_{U_j}^{U_j^0} \omega(U) dU = \frac{1}{\omega(U_j + \varepsilon)} [p_0(i < j) - p_0(i < j)]. \quad (5)$$

Розглянемо перетворення сигналу  $U(t)$  у зоні рівня квантування  $U_j$  з урахуванням його можливого зміщення в динамічному режимі. Інтервали часу, протягом яких сигнал знаходиться між  $j$ -м та  $j+1$ -м рівнями квантування, представляють мірилом ймовірності  $p(j)$ . Оцінкою ж її слугує число відліків, що збігаються з вказаним інтервалом часу, тобто число  $M_j$  відліків з кодом  $j$ , віднесене до загального числа  $M$  відліків за час дослідження

$$\tilde{p}(j) = \frac{M_j}{M}. \quad (6)$$

Для визначення нелінійності АЦП за відомою густиною ймовірності миттєвих значень тестового сигналу розраховується розподіл ймовірностей  $p(i)$  у межах характеристики перетворення (ХП) АЦП. Потім визначають обсяг вибірки  $M$  та виконують експериментальне дослідження АЦП. Накопичений масив вихідних даних АЦП у вигляді  $M_j$  використовується при обчисленнях таким чином. Спочатку визначається оцінка  $\tilde{p}(i)$ , потім знаходиться оцінка нелінійності з урахуванням (5) і (6) за формулою

$$\tilde{\Delta}_n[j] = \frac{h}{p(j)} \sum_{i=0}^{j-1} [p(i) - \tilde{p}(i)]. \quad (7)$$

Аналіз нелінійності ХП АЦП у динамічному режимі на базі експериментальних результатів аналого-цифрового перетворення здійснюється після попереднього калібрування АЦП, тобто, врахування кроку квантування  $h$  і зміщення нуля  $\Delta_0$ . Після знаходження значень  $h_r$  і  $\Delta_{r0}$  можна розрахувати  $p_r(i)$ .

Тоді нелінійність знаходиться на базі виразу (7) таким чином

$$\Delta_n[j] = \frac{h_r}{p_r(N)} \sum_{i=0}^{j-1} [p_r(i) - \tilde{p}(i)]. \quad (8)$$

Неідеальність ХП АЦП представимо в одиницях молодшого розрядку (ОМР) нелінійності.

Нехай різниця кроків квантування визначається згідно з виразом

$$\Delta U_i = U_{i+1} - U_i - h, \quad (9)$$

де  $U_i, U_{i+1}$  – сусідні квантовані відліки.

Тоді диференціальна нелінійність через різницю кроків квантування та пронормована в ОМР

$$\Delta_{dnn} = \frac{\Delta U_i}{h}. \quad (10)$$

Тепер перейдемо до аналізу інших динамічних параметрів АЦП. Відношення сигнал/шум характеризує сумарний рівень шумів перетворення АЦП і для ідеального АЦП дорівнює [7]:

$$\frac{S}{N} = 20 \lg \frac{\sqrt{6,02} \cdot U_m}{h} \quad (11)$$

Ефективне число розрядів є узагальненим динамічним параметром АЦП. Це число завжди менше номінального числа розрядів АЦП  $n$  і є параметром, що визначає якість функціонування перетворювача в динамічному режимі. Ефективне число розрядів пов'язане з відношенням сигнал/шум:

$$n_{ef} = \frac{S}{N} + n \cdot \log_2 \frac{h}{\sqrt{6,02} \cdot U_m} \quad (12)$$

Виконавши нормування середньоквадратичних значень в ОМР та виразивши реальний рівень шумів через нормовану диференціальну нелінійність  $\Delta_{dnn}$ , отримаємо

$$n_{ef} = n - \log_2 3,46 \cdot \Delta_{dnn} \quad (13)$$

На базі виразу (13) можна побудувати графіки залежностей ефективної розрядності від диференціальної нелінійності АЦП.

### Аналіз статистичних характеристик тестових сигналів АЦП

Статистична методологія забезпечує необхідну точність оцінювання характеристик АЦП залежно від точності відтворення тестового сигналу. Тому синтез тестових сигналів заданої форми з необхідною точністю та аналіз їх статистичних властивостей є важливою науковою задачею, яку необхідно розв'язати при розробленні системи оцінювання ДП АЦП [8]. Найбільш поширеним тестовим сигналом АЦП є синусоїдальний. Такий сигнал не відображає реальні умови функціонування АЦП, тому що містить у спектрі лише одну потужну складову, що відповідає синусоїдальному коливанню.

Для підвищення адекватності оцінювання ДП АЦП пропонується як тестовий використовувати багатотональний сигнал, що має збагачений основними складовими спектр і тому функція розподілу такого процесу може відрізнятись від гауссового закону. Відомо, що пошук законів розподілу негауссового характеру є складною задачею. Один з методів розв'язання такої задачі базується на використанні характеристичних функцій  $\theta_U(V)$  випадкового процесу  $U$  та відомих співвідношень між характеристичною функцією та моментами розподілу процесу.

Багатотональний сигнал можна представити як суму деякого числа  $m$  взаємно незалежних складових  $U_1, U_2, \dots, U_l$ . Для випадку багатотонального сигналу, коли всі складові мають однакові розподіли та відповідно однакові характеристичні функції, маємо

$$\theta_l(V) = [\theta_1(V)]^l \quad (14)$$

Знайдемо густину ймовірності суми кількох синусоїдальних сигналів з випадковими фазами. На базі виразу для густини ймовірності гармонічного коливання [8] знаходимо характеристичну функцію

$$\theta_1(V) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{e^{i \cdot V \cdot U}}{\sqrt{1-U^2}} dU \quad (15)$$

Якщо в (15) підставити  $e^{i \cdot V \cdot U} = \cos(VU) + i \sin(VU)$  та скориставшись [7], можна отримати

$$\theta_1(V) = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\cos(VU)}{\sqrt{1-U^2}} dU = J_0(V), \quad (16)$$

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

Для багатотонального сигналу, що містить  $l$  гармонічних коливань з однаковими амплітудами  $\frac{U_m}{l}$  та випадковими взаємозалежними фазами, характеристична функція відповідно до (14) знаходиться як

$$\theta_l(V) = \left[ J_0\left(\frac{V}{\sqrt{l}}\right) \right]^l \quad (17)$$

Тоді густина ймовірності багатотонального сигналу дорівнює

$$\omega_l(U) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[ J_0\left(\frac{V}{\sqrt{l}}\right) \right]^l \cdot \cos(VU) \cdot dV \quad (18)$$

На рис. 1 наведено розподіл густин імовірностей багатотональних тестових сигналів з різним  $l$ .

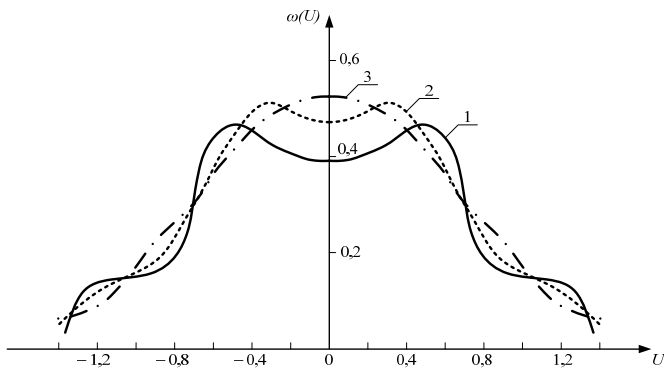


Рис.1. Густина ймовірностей двотонального (1), тритонального (2) та чотиритонального сигналу (3)

### Структура автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП

На базі запропонованого статистичного методу оцінювання ДП АЦП з багатотональним тестовим сигналом розроблено структуру автоматизованої системи, що наведена на рис. 2.

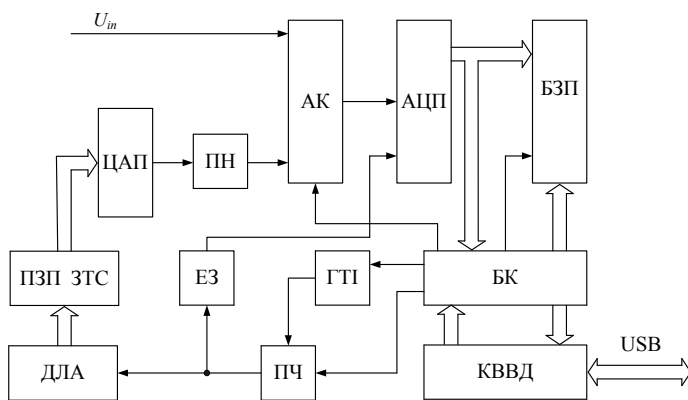


Рис. 2. Структура автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП

побудований на базі принципу прямого цифрового синтезу. В БЗП накопичується масив даних з АЦП, який через КВВД шиною USB передається в комп'ютер, де відбувається кінцеве оброблення сигналів та визначення ДП АЦП. Залежно від режиму роботи через АК за сигналом керування з БК подається чи сигнал з вхідної шини  $U_{in}$  чи тестовий сигнал з виходу ПН.

### Аналіз ефективності системи оцінювання динамічних параметрів АЦП

Для оцінювання досягнутої точності відтворення тестового сигналу легко отримуються прості співвідношення, які ґрунтуються на центральній граничній теоремі Муавра–Лапласа [8]. При розрядності АЦП  $n \geq 8$  та для середнього числа вибірок вихідного коду  $N$  можна отримати вирази для досягнення заданої точності при фіксованому рівні довірчої ймовірності. Нехай  $p = 95,45\%$ . У цьому випадку відносна похибка

$$\varepsilon \approx \frac{2\sqrt{N}}{N}. \text{ Звідки можна отримати } N \approx \frac{4}{\varepsilon^2}.$$

Для випадку, коли  $p = 99,73\%$ , маємо, що

$$\varepsilon \approx \frac{3\sqrt{N}}{N}, \text{ а } N \approx \frac{9}{\varepsilon^2}.$$

На рис. 3 наведено залежність похибки оцінювання ДП АЦП від обсягу вибірки тестового сигналу (крива 1 – для  $p = 99,73\%$ , а крива 2 – для  $p = 95,45\%$ ).

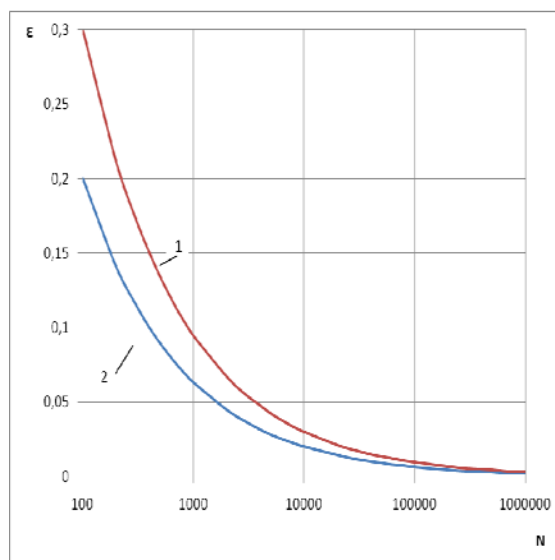


Рис. 3. Залежність похибки оцінювання ДП АЦП від обсягу вибірки

Як видно з графіків, при обсягах вибірки вихідних кодів АЦП, що перевищують значення  $10^6$ , похибки оцінювання ДП АЦП знаходяться у межах

Отриманні результати дають можливість стверджувати, що густина ймовірності сигналу, який містить чотири синусоїдальних складових з випадковими фазами відображає криву, подібну до гауссового процесу, незважаючи на те, що окремі синусоїди характеризуються зовсім іншою густиною ймовірності. Цей сигнал є найоптимальнішим типом тестового впливу АЦП, який дає змогу забезпечити режими функціонування АЦП, що адекватні реальним, а також просто реалізується при використанні широкої номенклатури генераторів сигналів з нормованими метрологічними характеристиками.

### Висновки

Запропоновано статистичний метод оцінювання динамічних параметрів АЦП, що базується на використанні чотиритонального тестового сигналу. Цей сигнал дає змогу забезпечити режими функціонування АЦП, що адекватні реальним, а також характеризується простотою реалізації.

Розроблено апаратно-програмну реалізацію автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП з використанням вбудованого цифрового генератора тестових сигналів, яка функціонує в умовно-реальному масштабі часу.

Дослідження ефективності запропонованої системи підтвердили її високу точність при оцінюванні динамічних параметрів АЦП.

### Література

1. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
2. Бортник Г.Г. Швидкодієний аналого-цифровий перетворювач з розширеним динамічним діапазоном / Г.Г. Бортник, О.Г. Бортник, Н.О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 3. – С. 95-99.
3. Бортник Г.Г. Методи та пристрої оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів широкосмугових сигналів: монографія / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, Н.О. Пунченко. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 147 с. – ISBN 978-966-641-581-6
4. Бортник Г.Г. Автоматизований пристрій оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, Н.О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 2. – С. 90-93.
5. Бортник Г.Г. Автоматизированный измеритель параметров аналого-цифровых преобразователей / Г.Г. Бортник // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 1. – С. 227-228.
6. Бортник Г.Г. Спектральный метод оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 1. – С. 63-67.
7. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 128 с. – ISBN 978-966-641-537-3.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

### References

1. Kester W. Analogo-cifrovoe preobrazovsnie / Walt Kester. – M.: Technosphere, 2007. – 1016 s.
2. Bortnyk G.G. Shvydkodiinyi analoho-tsyfrovyi peretvoriuvach z rozshyrenym dynamichnym diapazonom / G.G. Bortnyk, O.G. Bortnyk, N.O. Puchenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015. – № 3. – S. 95-99.
3. Bortnyk G.G. Metody ta prystroi otsiniuvannia kharakterystyk impulsno-kodovykh modulatoriv shyrokosmuhovykh syhnaliv: monohrafiia / G.G. Bortnyk, V.M. Kychak, N.O. Puchenko. – Vinnytsia: VNTU, 2014. – 147 s.
4. Bortnyk G.G. Avtomatyzovanyi prystrii otsiniuvannia kharakterystyk impulsno-kodovykh modulatoriv vysokochastotnykh syhnaliv / G.G. Bortnyk, M.L. Minov, N.O. Puchenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2014. – № 2. – S. 90-93.
5. Bortnyk G.G. Avtomatyzovannyi izmeritel parametrov analoho-tsyfrovykh preobrazovatelei / G.G. Bortnyk // Pribory i Tekhnika Eksperimenta. – 1992. – №1. – S. 227-228.
6. Bortnyk G.G. Spektralnyi metod otsiniuvannia dynamichnykh parametrov analoho-tsyfrovykh peretvoriuvachiv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.G. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2016. – № 1. – S. 63-67.
7. Bortnyk G.G. Metodu ta zasobu analogo-cifrovogo peretvoreny vusokochastotnuh signaliv / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk, V.M. Kuchak. – Vinnytsya: VNTU, 2013. – 128 s. – ISBN 978-966-641-537-3.
8. Levyn B.R. Teoretycheskye osnovy statystycheskoi radyotekhniky / B.R. Levyn. – M.: Radyo y sviaz, 1989. – 656 s.

Рецензія/Peer review : 8.5.2016 р. Надрукована/Printed :27.6.2016 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією