

УДК 621.385

Г. Г. Бортник, к. т. н., доц.; С. Г. Бортник, студ.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА У БАЗИСІ ДИСКРЕТНИХ ФУНКЦІЙ ФУР'Є

*Наведено аналіз інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів з використанням дискретного перетворення Фур'є. Отримано вирази для оцінювання похибки у разі аналого-цифрового перетворення сигналів.*

### Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є одними з найважливіших складових перспективних систем оброблення інформації, і в значній мірі визначають їх граничні можливості як за швидкодією, так і за динамічним діапазоном [1].

Передатна характеристика АЦП та її параметри нелінійності дають найвичерпнішу інформацію про властивості перетворювача. Поряд з диференціальною нелінійністю, яка є мірою відхилення кожного кроку квантування від номінального, для АЦП нормують також інтегральну нелінійність (або просто нелінійність), яка є мірою кривизни передатної характеристики АЦП у цілому [2]. Інтегральна нелінійність сильніше проявляється у разі перетворення сигналів, близьких за динамічним діапазоном та частотним спектром до номінальних для даного типу АЦП.

### Основна частина

Найвідомішими методами дослідження нелінійності АЦП є метод гістограм та спектральний метод. Метод дослідження гістограм густини вихідних кодів АЦП характеризується високою чутливістю для визначення диференціальної нелінійності [3]. Спектральний метод ефективніший для визначення інтегральної нелінійності АЦП [4]. Основою цього методу є спектральний аналіз вихідних сигналів АЦП на основі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [5]

$$x(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j \frac{2\pi km}{N}}, \quad (1)$$

де  $N$  — число дискретних значень сигналу;  $e^{-j \frac{2\pi km}{N}}$  — поворотальні множники ДПФ;  $x(m)$  — вибірка сигналу у часовій області.

Частотний спектр вихідного сигналу АЦП окрім складових тестового сигналу містить гармоніки, що характеризують спотворення сигналу за рахунок нелінійності АЦП. В [6] описано методику дослідження динамічних параметрів АЦП та формули для визначення нелінійних спотворень АЦП на основі спектрального методу. Для двотонального вхідного сигналу, коефіцієнт інтермодуляційних спотворень АЦП визначається амплітудами складових комбінаційних частот  $\omega_{mn} = \pm m\omega_1 \pm n\omega_2$ , ( $m, n = 1, 2, \dots$ ) і розраховується за формулою

$$K_{IH} = 10 \lg \frac{U_{11}^2 + U_{12}^2 + \dots + U_{MN}^2}{U_1^2 + U_2^2}, \quad \text{дБ}. \quad (2)$$

Коефіцієнти гармонічних спотворень для двочастотного вхідного сигналу та для окремо взятих основних складових тестового сигналу можна визначити за формулами

$$K_{HD1} = 10 \lg \frac{U_{20}^2 + U_{30}^2 + \dots + U_{N0}^2}{U_1^2}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

$$K_{HD2} = 10 \lg \frac{U_{02}^2 + U_{03}^2 + \dots + U_{0M}^2}{U_2^2}, \text{ дБ}. \quad (4)$$

Але аналіз спотворень частотного спектра вихідного сигналу АЦП в залежності від нелінійності передатної характеристики перетворювача, який би дав можливість визначити вклад кожного з двійкових розрядів АЦП в загальну нелінійність, не проводився.

В роботі досліджується вплив інтегральної нелінійності на форму частотного спектра вихідного сигналу АЦП у базисі дискретних функцій Фур'є. Для  $n$ -розрядного АЦП існує  $N = 2^n$  вихідних кодових комбінацій. У відповідності з визначенням інтегральної нелінійності, порушення в  $i$ -му вихідному розряді (з вагою  $2^i$ ) вносить додаткову нелінійність  $\delta_i$  в загальну нелінійність АЦП. Ця складова, що виникає в  $i$ -му розряді перетворювача є періодичною послідовністю з частотою  $2^{n-i-1}$  у масиві вихідних даних АЦП об'ємом  $N$ .

Нехай усі вихідні розряди мають деякі відхилення від номінального рівня, тоді з деякими спрощеннями загальну картину розподілення інтегральної нелінійності можна створити на основі суперпозиції періодичних підпослідовностей, кожна з яких характеризує нелінійність відповідного розряду зі значенням  $\delta_i$ . На рис. 1 показано реальну характеристику перетворення (РХП) АЦП та ідеальну (ІХП) і відповідну їй інтегральну нелінійність.

З рис. 1 видно, що для аналізу підпослідовностей у частотній області, що характеризують інтегральну нелінійність, необхідно виконати  $(i + 1)$ -точкове ДПФ. Таким чином, використання ДПФ різної довжини для аналізу конкретної підпослідовності спрощує кінцеве оброблення сигналів.

Якщо оцінюється вклад у нелінійність старшого розряду, тобто  $i = n - 1$ , то ДПФ такої підпослідовності дорівнює

$$x_{n-1}(k) = \frac{2\delta_{n-1}}{N} \sum_{m=\frac{N}{2}}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi km}{N}}, \quad (5)$$

де  $k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ .

Враховуючи, що вираз під знаком суми є табличним значенням кінцевого тригонометричного ряду [7], інтегральна нелінійність старшого розряду АЦП у частотній області буде мати вигляд

$$|X_{n-1}(k)| = \frac{2\delta_{n-1}}{N} \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{\pi k}{N}\right)}. \quad (6)$$

Аналогічно можна отримати частотний спектр, що характеризує нелінійність за рахунок наступного розряду. Але при цьому, кількість частотних складових спектра буде у 2 рази меншою

$$|X_{n-2}(k)| = \frac{2\delta_{n-2}}{N} \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}, \quad (7)$$

де  $1 \leq k \leq \frac{N}{4}$ .

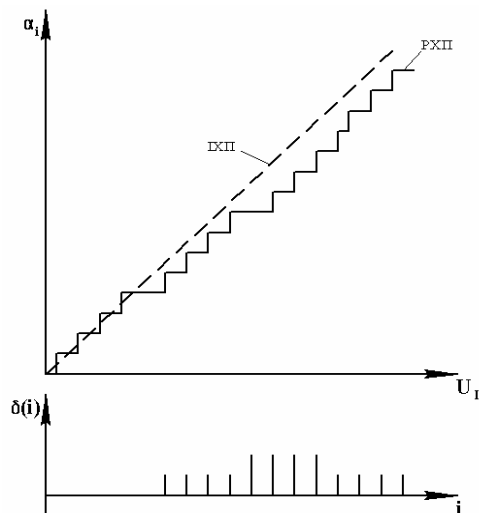


Рис. 1. Передатна характеристика АЦП та відповідна їй інтегральна нелінійність

Аналіз виразів (6) і (7) показує, що вони представляють собою рекурентну формулу для оцінювання частотних складових, що виникають внаслідок порушень у будь-якому з розрядів вихідного коду АЦП. Тому узагальнений вираз для оцінювання нелінійності АЦП у разі помилок вихідних розрядів має вигляд

$$|X_{n-i}(k)| = \frac{2\delta_{n-i}}{N} \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{m\pi k}{N}\right)}, \quad (8)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $m = 2^{n-i-1}$ .

На рис. 2 показано узагальнений спектр, який утворений з частотних спектрів під-послідовностей, що відображають нелінійності за рахунок впливу різних розрядів для 4-розрядного АЦП.

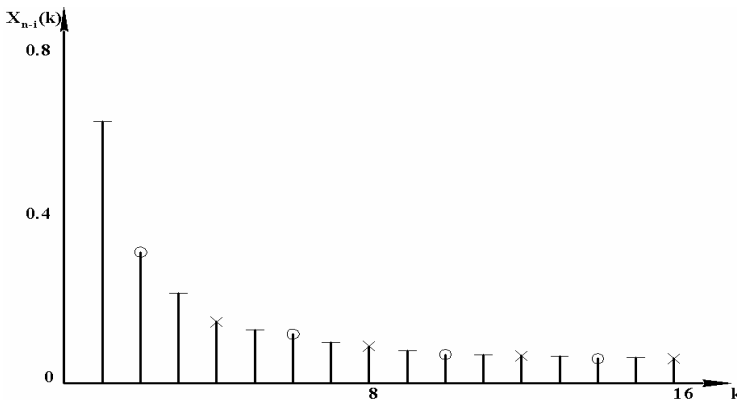


Рис. 2 . Частотні спектри підпослідовностей, що відображають інтегральні нелінійності 4-розрядного АЦП

З рис. 2 видно, що помилки у різних розрядах АЦП спричиняють відповідний вплив на частотний спектр, що характеризує інтегральну нелінійність АЦП.

### Висновки

Інтегральна нелінійність АЦП спотворює частотний спектр вихідного сигналу перетворювача у базисі дискретних функцій Фур'є.

Грунтуючись на аналізі частотного спектру вихідного сигналу АЦП з відповідною інтегральною

нелінійністю, можна оцінити похибки в результаті перетворення аналог-код.

**Перспективи.** Спектральний аналіз вихідного сигналу АЦП дасть змогу виконати діагностування АЦП та здійснити коригування нелінійності аналого-цифрового перетворення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Советское радио, 1980. — 280 с.
2. Брагин А. А., Семенюк А. Л. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 164 с.
3. Аминев А. М., Бахтиаров Г. Д., Тимофеев А. Л. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП // Зарубежная радиоэлектроника. — 1989. — № 4. — С. 36—55.
4. Руднев П. И., Хаджи Б. А., Чернышов В. Ю., Шилиев С. И. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений // Радиотехника и электроника. — 1993. — Т. 38. — № 10. — С. 1868—1876.
5. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 848 с.
6. Кичак В. М., Бортник Г. Г., Семенюк О. А. Система динамичних параметрів аналого-цифрових перетворювачів для радіовимірювальних засобів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1998. — № 2. — С. 70—74.
7. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Физматгиз, 1963. — 1100 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5.07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05  
Рекомендована до друку 21.07.05

**Бортник Геннадій Григорович** — доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення;  
**Бортник Сергій Геннадійович** — студент Інституту радіотехніки, зв'язку та приладобудування.

Вінницький національний технічний університет