

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЛІНІЙНОСТІ ІМПУЛЬСНО-КОДОВИХ МОДУЛЯТОРІВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ

У роботі представлено метод підвищення лінійності імпульсно-кодових модуляторів (ІКМ) високочастотних сигналів на базі спектрального аналізу вихідного сигналу ІКМ. Доведено, що даний метод характеризується високою ефективністю при коригуванні нелінійності характеристики перетворення ІКМ у базисі дискретних функцій Фур'є.

Ключові слова: імпульсно-кодовий модулятор, високочастотні сигнали, спектральний аналіз.

G.G. BORTNYK, M.L. MINOV, N.O. PUNCHENKO

Vinnitsa National Technical University, Ukraine

### METHOD OF INCREASE OF LINEARNESS PULSE CODE MODULATORS OF HIGH-FREQUENCY SIGNALS

The method of increase of linearness is in-process presented pulse-code modulator (PCM) of high-frequency signals on the base of spectral analysis of initial PCM-signal.

It is set that non-linearity PCM distorts the frequency spectrum of initial signal of transformer in the base of discrete functions of Fourier. Analysing the frequency spectrum of initial PCM-signal, it is possible to estimate his non-linearity.

Spectral analysis of initial PCM-signal enables to execute diagnosing of separate digits PCM and to carry out the correction of non-linearity of description of transformation of quantizer of high-frequency signals.

The offered method is characterized high efficiency at the correction of non-linearity of description of transformation PCM in the base of discrete functions of Fourier.

It is well-proven that in the mode of functioning without a correction discriminability PCM goes down on 3,2 bits depending on the value of the rationed non-linearity. In the case of correction of non-linearity is there an improvement of dynamic properties PCM on 2,5 ÷ 2,7 bits depending on the set level of introduction of amendments in initial PCM-signal.

Key words: pulse-code modulator, high-frequency signals, spectral analysis.

### Вступ

Імпульсно-кодові модулятори (ІКМ) є обов'язковими компонентами сучасних комп'ютерних систем передачі інформації. Властивості та характеристики ІКМ безпосередньо впливають на ефективність функціонування цих систем [1].

Незважаючи на ряд вже вирішених питань, при застосуванні ІКМ існує ще багато проблем, які стримують широке використання ІКМ в комп'ютерних системах. А саме: низька лінійність характеристики перетворення у діапазоні високих частот вхідних сигналів (від 5 МГц і вище), недостатньо розроблені теоретичні аспекти та методи імпульсно-кодової модуляції з коригуванням нелінійності, що спричиняє обмеження ефективної розрядності ІКМ. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення змінних у часі високочастотних сигналів, математичний опис яких у часовому і частотному вимірі є досить складним [2]. Таким чином, сучасна схемотехніка ІКМ не забезпечує реалізації потенційної точності, що обмежує ефективність використання комп'ютерних систем у цифровому зв'язку.

Характеристика перетворення (ХП) ІКМ та її параметри нелінійності дають найбільш вичерпну інформацію про властивості модулятора. Поряд з диференціальною нелінійністю, яка є мірилом відхилення кожного кроку квантування від номінального, для ІКМ нормують також інтегральну нелінійність (або просто нелінійність), яка є мірилом кривизни ХП ІКМ [2]. Найбільш відомими методами дослідження нелінійності ІКМ є метод гістограм та спектральний метод. Метод дослідження гістограм густини вихідних кодів ІКМ характеризується високою чутливістю при визначенні диференціальної нелінійності. Спектральний метод ефективніший при визначенні інтегральної нелінійності ІКМ [3]. Основою цього методу є спектральний аналіз вихідних сигналів ІКМ на основі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [4]:

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

де  $N$  - число дискретних значень сигналу;  $x(m)$  - вибірка сигналу у часовій області;

$e^{-j \frac{2\pi km}{N}}$  - повертальні множники ДПФ.

Частотний спектр вихідного сигналу ІКМ окрім складових тестового сигналу містить гармоніки, що характеризують спотворення сигналу за рахунок нелінійності модулятора. В [3] представлено аналіз параметрів ІКМ та формули для визначення нелінійних спотворень модулятора на базі спектрального методу. Але аналіз спотворень спектра вихідного сигналу ІКМ залежно від нелінійності ХП модулятора, який би дав можливість визначити вклад кожного з розрядів ІКМ у загальну нелінійність, не проводився.

На основі вищевикладеного актуальною задачею є розвиток теоретичних основ для розробки нових ІКМ з коригуванням нелінійності, які дозволяють виконувати оброблення складних сигналів у смузі високих частот і характеризуються високою лінійністю характеристики перетворення.

Метою роботи є підвищення лінійності характеристики перетворення імпульсно-кодового

модулятора височастотних сигналів за рахунок коригування нелінійності ХП у частотній області.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити визначення нелінійності ІКМ у базисі дискретних функцій Фур'є;
- розробити принцип коригування похибок лінійності ІКМ;
- виконати аналіз ефективності запропонованого методу.

**Визначення нелінійності ІКМ у базисі дискретних функцій Фур'є**

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

Нехай усі вихідні розряди мають деякі відхилення від номінального рівня, тоді при деяких спрощеннях 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 наведено реальну характеристику перетворення (РХП) ІКМ та ідеальну (ІХП) і відповідну їй інтегральну нелінійність.

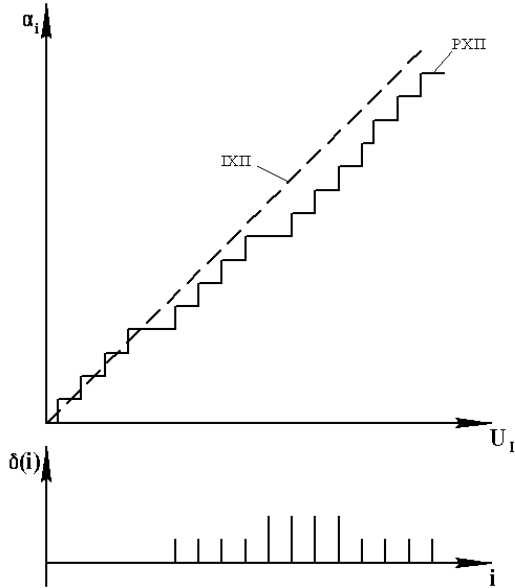


Рис. 1. Передатна характеристика ІКМ та відповідна їй нелінійність

З рис. 1 видно, що для аналізу підпослідовностей у частотній області, які 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

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

де  $k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ .

Враховуючи, що вираз під знаком суми є табличним значенням кінцевого тригонометричного ряду, нелінійність старшого розряду ІКМ у частотній області буде мати вигляд

$$|X_{n-1}(k)| = \frac{2\delta_{n-1}}{N} \cdot \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{\pi k}{N}\right)}. \quad (3)$$

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

$$|X_{n-2}(k)| = \frac{2\delta_{n-2}}{N} \cdot \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}, \quad (4)$$

де  $1 \leq k \leq \frac{N}{4}$ .

Аналіз виразів (3) і (4) показує, що вони представляють собою рекурентну формулу для оцінювання частотних складових, що виникають внаслідок порушень у будь-якому з розрядів вихідного коду ІКМ. Тому узагальнений вираз для оцінювання нелінійності ІК у разі помилок вихідних розрядів має вигляд

$$|X_{n-i}(k)| = \frac{2\delta_{n-i}}{N} \cdot \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{m\pi k}{N}\right)}, \quad (5)$$

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

На рис. 2 представлено узагальнений спектр, що утворений з частотних спектрів підпоследовностей, які відображають нелінійності за рахунок впливу різних розрядів для 4-розрядного ІКМ.

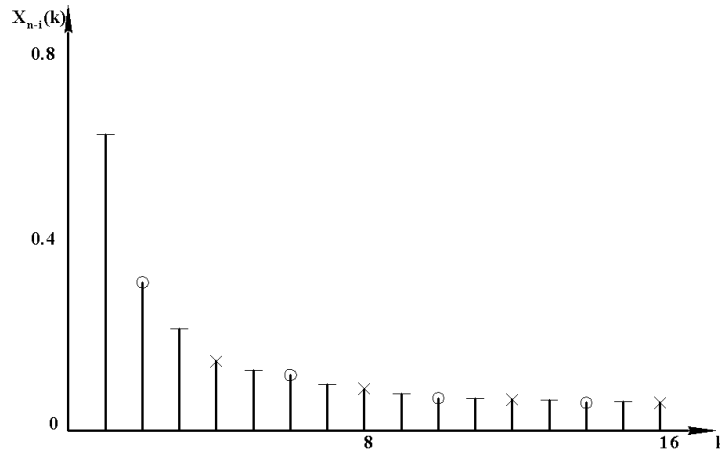


Рис. 2. Частотні спектри підпоследовностей, що відображають нелінійності 4-розрядного ІКМ

З рис. 2 видно, що помилки у різних розрядах ІКМ спричиняють відповідний вплив на частотний спектр, що характеризує нелінійність модулятора. Таким чином, спектральний аналіз вихідного сигналу ІКМ дає змогу виконати діагностування ІКМ та здійснити коригування лінійності модулятора.

#### Принцип коригування похибок лінійності ІКМ при перетворенні високочастотних сигналів

Головний принцип автоматичного коригування лінійності ІКМ у динамічному режимі з тестовим контролем полягає в ідентифікації параметрів ХП ІКМ, що відображає із заданою точністю поведінку функцій похибки перетворення для широкого класу вхідних сигналів.

Для запропонованого методу коригування передбачаються наступні етапи:

- визначення ХП ІКМ у динамічному режимі для заданого тестового сигналу;
- ідентифікація параметрів ІКМ шляхом обчислення їх відхилень від номінальних значень;
- обчислення коригувальних поправок для заданих перетворюваних сигналів ІКМ;
- формування коригувальних сигналів ІКМ.

Перші два етапи процесу коригування є етапи контролю параметрів ІКМ. Третій і четвертий етап відносяться до робочого режиму перетворення сигналів. Для реалізації цих етапів в ІКМ вводять додаткові блоки. Одним з найбільш ефективних принципів реалізації третього та четвертого етапу коригування є табличний, що базується на зберіганні в пам'яті таблиць значень коригувальних коефіцієнтів. Для запропонованого методу коригування узагальнена структура представлена на рис. 3.

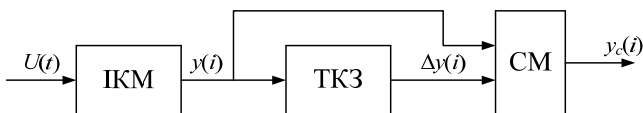


Рис. 3. Структура адитивного процесу коригування лінійності ІКМ

При цьому коригувальні значення, які записуються в таблицю коригувальних значень (ТКЗ), підлягають підсумовуванню з вихідним кодом ІКМ згідно виразу

$$y_c(i) = y(i) + \Delta y(i). \quad (6)$$

Для цього використовується цифровий суматор (СМ). Таким чином, скориговане значення процесу аналого-цифрового перетворення є результатом додавання коригувального члена до вихідного коду ІКМ.

Для цього методу розрядність коригувальних значень  $n_{\Delta}$  менша, ніж розрядність ІКМ  $n_{PKM}$ , тобто  $n_{\Delta} < n_{PKM}$ . Таким чином, обсяг пам'яті, у якій зберігаються коригувальні члени зменшується. Це є важливим при реалізації адитивного методу коригування для багаторозрядних ІКМ (12÷16) біт. Таким чином, такий принцип коригування є ефективним при побудові ІКМ у комп'ютерних системах.

#### Аналіз ефективності методу коригування нелінійності ІКМ

При розробленні методу коригування нелінійності в ІКМ було висунуто вимоги щодо забезпечення високої лінійності його ХП. Узагальненим критерієм ефективності методу є значення ефективної кількості розрядів ІКМ. Даний параметр є найбільш наочним і дає змогу визначити якість функціонування ІКМ з високочастотними сигналами. Загальний вираз для ефективної кількості розрядів досліджуваного ІКМ, за умови відомих значень кроку квантування  $h$ , має вигляд

$$n_{ef} = \frac{\log_2 10}{20} S / N + \log_2 \frac{U_{PDCm}}{\sqrt{6} \cdot U}, \quad (7)$$

де  $U_{PKMm}$  – максимальне значення вхідного сигналу ІКМ.

Якщо значення вхідного сигналу  $U = 10^{\frac{U_{in}}{20}} \cdot 0,5U_{PKMm}$ , то підставивши його у (7), отримуємо

$$n_{ef} = n - 0,5 \cdot \log_2 \left( 1 + 3 \frac{\delta_D^2}{h^2} + a_\tau^2 \cdot 2^{-m} \right). \quad (8)$$

Уведемо у вираз (8) коригувальну складову методу. При виконанні умови (5) здійснюється компенсація нелінійності до заданого рівня. Тоді ефективна кількість розрядів ІКМ з коригуванням у базисі Фур'є та з урахуванням розрядності коригувальних членів дорівнює:

$$n_{efc} = n - 0,5 \log_2 \left( 1 + 3 \frac{(\delta_D - \Delta y)^2}{h^2} + a_\tau^2 \cdot 2^{-m} \right). \quad (9)$$

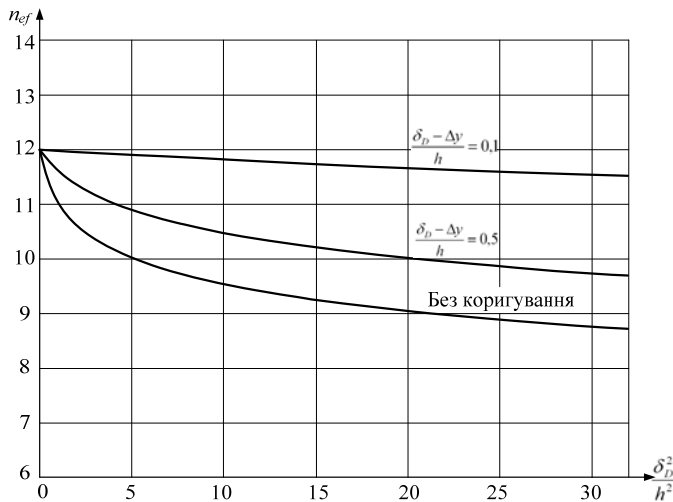


Рис. 4. Залежність ефективної кількості розрядів ІКМ від значення нормованої не лінійності ХП

Спектральний аналіз вихідного сигналу ІКМ дає змогу виконати діагностування окремих розрядів ІКМ та здійснити коригування нелінійності ХП імпульсного модулятора височастотних сигналів.

### Література

1. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи / И.Г.Бакланов.– М.: Эко-Трендз, 1999. – 195с.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.
3. Кичак В.М. Метод визначення динамічних характеристик імпульсно-кодових модуляторів на базі взаємних спектральних перетворень / В.М.Кичак, Н.О.Пунченко, О.Г.Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 2. – С. 64–68.
4. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.

### References

1. Baklanov I.G. Methods of measurements in the systems of communication/ I.G. Baklanov.– М.: Эко-Trendz, 1999.– 195p.
2. Sergienko A.B. Digital signals processing/ A.B. Sergienko – SPb.: Piter, 2003. – 604 p.
3. Kichak V.M. Method of determining the dynamic characteristics of pulse-code modulators based on mutual spectral transformations/ V.M.Kichak, N.O.Pynchenko, O.G.Bortnik// МСТТР.– 2012.– № 2.– P.64–68.
4. Rabiner L. Theory and application of digital signal processing / L. Rabiner, B. Gold. – М.: Mir, 1978. – 848 p.

Рецензія/Peer review : 24.10.2014 р.

Надрукована/Printed :29.10.2014 р.