

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КІНЦЕВОЇ РОЗРЯДНОСТІ НА ТОЧНІСТЬ АЦП

Національний авіаційний університет

sap@nau.edu.ua

Вступ

Сучасні цифрові засоби вимірювання, такі як цифрові осцилографи, мультиметри та аналізатори спектра, зазвичай включають аналого-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП виконує функцію перетворення аналогового сигналу в цифрову форму, яку можна обробити та проаналізувати за допомогою цифрових методів.

Проте важливо відзначити, що функція перетворення (ФП) реального АЦП може бути нелінійною. Це означає, що вхідний сигнал, який подаються на АЦП, і відповідний цифровий код, отриманий після перетворення, можуть не відповідати лінійній залежності. Нелінійність може проявлятися у вигляді недостатньої точності, спотворень або неоднорідності перетворення сигналу.

Нелінійність АЦП може бути спричинена різними факторами, такими як неточності в елементах перетворення, недосконалість операційних підсилювачів, шуми та інші ефекти. Виробники вимірювальних приладів зазвичай вказують специфікації, які описують нелінійність АЦП, щоб користувачі могли врахувати цей фактор при проведенні вимірювань та аналізі даних.

Важливо враховувати нелінійність АЦП при виборі та використанні цифрових засобів вимірювання, особливо при виконанні точних вимірювань або при роботі з широким динамічним діапазоном сигналів.

Основна частина

З літературних джерел відомо, що функція перетворення (ФП) реального АЦП нелінійна [1-4]. Для ідеального АЦП, справедливо: $y_{ideal} = x$, де y_{ideal} –

значення вихідного сигналу (коду) ідеального АЦП, наведене до його входу. Для випадку реального АЦП функція перетворення неідеальна, а саме:

$$y = x + \Delta_{LIN}(x), \quad (1)$$

де $\Delta_{LIN}(x)$ – похибка лінійності функції перетворення АЦП; y – реальне значення вихідного сигналу (коду) АЦП, наведене для його входу.

Дану похибку не можна компенсувати жодним засобом, ні нульовою установкою, ні калібруванням [5]. З цієї причини представляє велику важливість розробка ефективного методу оцінки впливу нелінійності функції перетворення АЦП на похибку вимірювання спектру.

На рис. 1 показані ідеальна та реальна ФП АЦП. Штрихові залежності втрачують кінцеву розрядність АЦП та пов'язану з нею похибку квантування.

Сучасні виробники АЦП у технічних описах нормують такі параметри, пов'язані з явищем нелінійності [1-2, 6]:

- інтегральна нелінійність ФП АЦП (ІНЛ, INL),
- диференційна нелінійність ФП АЦП (ДНЛ, DNL),
- динамічні характеристики АЦП (THD, THDN, SINAD, SFDR, SNR, SNDR, ENOB).

У деяких випадках у технічних описах АЦП наводиться типова залежність ФП АЦП від вхідного сигналу. Однак застосування цієї залежності для оцінки похибки вимірювання необхідних параметрів сигналу важко, оскільки немає жодної гарантії, що конкретна мікросхема АЦП має форму ФП, що відповідає типовій з технічного опису.

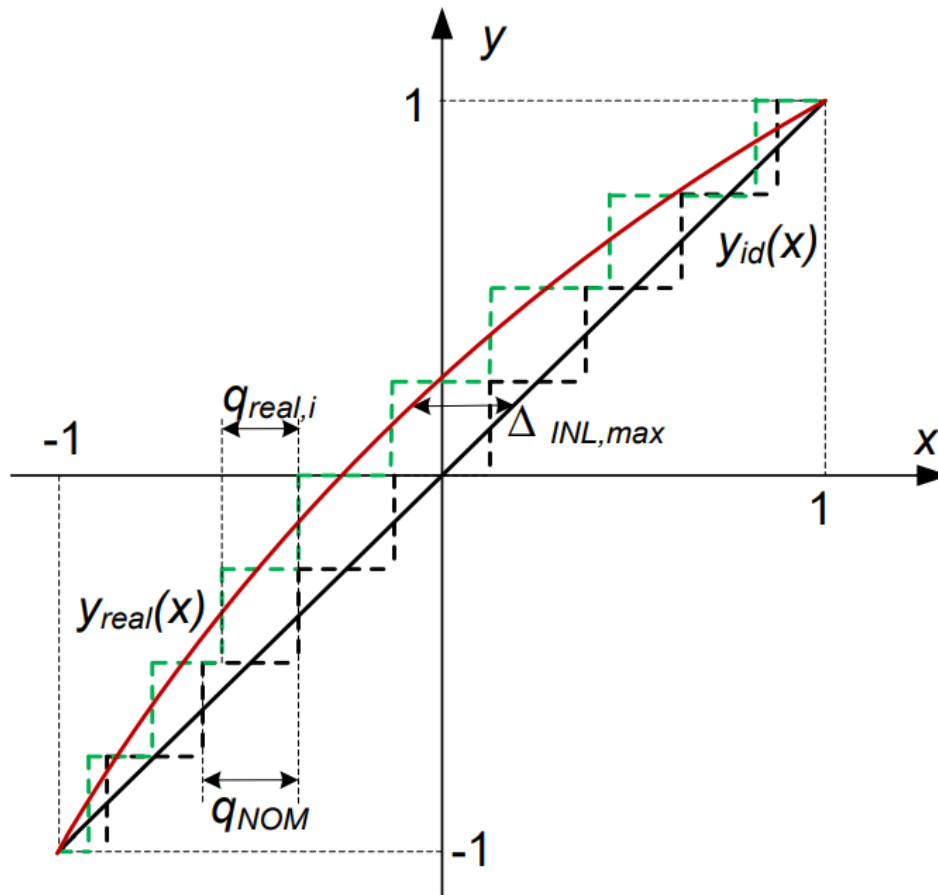


Рис. 1. Ідеальна та реальна функція перетворення АЦП (з урахуванням нелінійності та похибки квантування).

У технічних описах АЦП нормується максимальне значення інтегральної нелінійності (INL), що у одиницях молодшого розряду (о.м.р., LSB) АЦП. Відповідно до прийнятих вище позначень:

$$INL \cdot q = \max(\Delta_{INL}(x)) \quad (2)$$

де $q = \frac{U_{REF}}{2^{N_{ADC}-1}}$ – значення одиниці молодшого розряду (вираз записано для біполярного АЦП); N_{ADC} – число розрядів АЦП, включаючи знаковий; INL -значення інтегральної нелінійності з технічного опису АЦП.

Під диференціальною нелінійністю розуміється:

$$\Delta_{DNL}[i] = \frac{(q_i - q_{nom})}{q_{nom}} \quad (3)$$

де i - номер кодового переходу; q_{nom} - номінальне значення кванта АЦП; q_i - значення кванта АЦП, що відповідають i -му кодовому переходу.

У технічних описах АЦП нормується максимальне значення диференціальної

нелінійності діапазону зміни вхідного сигналу, тобто:

$$DNL = \max(\Delta_{DNL}[i]), i = 1 \div (2^{N_{ADC}} - 1) \quad (4)$$

де DNL – значення диференціальної нелінійності з технічного опису АЦП.

Відомо, що наявність нелінійності ФП АЦП призводить до спотворення спектра вихідного сигналу. Спотворення спектра проявляється у відхиленні амплітудних значень всіх спектральних складових наявних у спектрі вхідного сигналу та виникненні додаткових спектральних складових [7-9].

Таким чином, для користувача невідома форма функції перетворення конкретного АЦП без проведення додаткових досліджень, до яких відносяться гістограмний [10-13] та спектральний аналіз [5, 14] вихідного сигналу АЦП. За отриманою формою функції перетворення АЦП з метою зниження її нелінійності може бути виконано компенсацію.

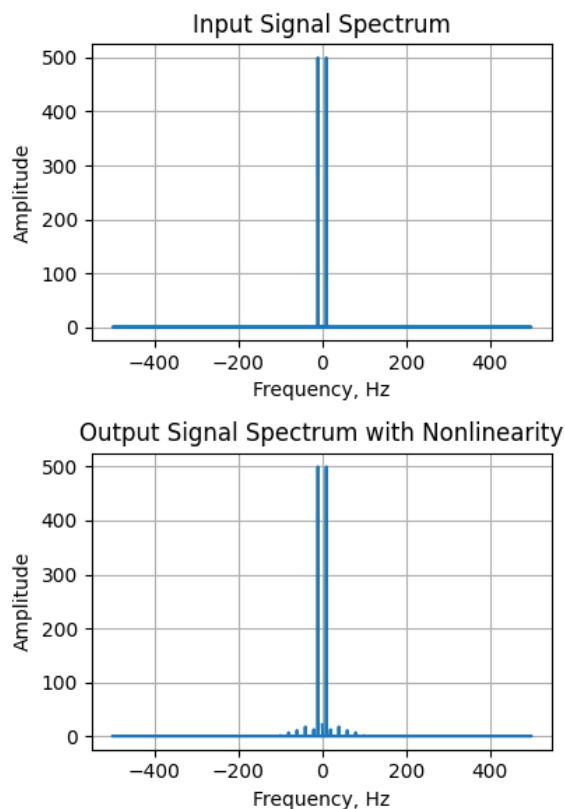


Рис. 2. Ідеальна та реальна функція перетворення АЦП (з урахуванням нелінійності та похибки квантування).

Було проведено імітаційне моделювання для дослідження не лінійності функції перетворення АЦП (рис. 2). Залежності ідеальної та реальної функції перетворення АЦП отримані шляхом імітаційного моделювання із застосуванням наступних параметрів: вхідний синусоїдальний сигнал - з частотою 10 Гц, тривалість сигналу – 1 секунда, частота дискретизації – 1000 Гц, кількість квантових бітів АЦП – 12 біт. До вхідного сигналу була застосована нелінійність функції перетворення АЦП, а також враховано вплив похибки квантування, що викликало спотворення спектра вихідного сигналу, яке ми спостерігаємо на другому графіку рисунка 2.

Результат моделювання допомагає проілюструвати вплив нелінійності на спектр вихідного сигналу та демонструє, як додаткові спектральні складові можуть з'явитися через цю нелінійність. Залежно від конкретних параметрів АЦП та вхідного сигналу, можуть спостерігатися різні

рівні спотворень та зміни спектральних складових.

Додаткові спектральні складові, що виникають через нелінійність, можуть збільшити загальне спектральне забруднення вихідного сигналу, можуть призводити до появи небажаних ефектів при обробці сигналу, а також, може вплинути на взаємодію з іншими елементами системи, яка обробляє вихідний сигнал. Це може вплинути на якість та точність обробки сигналу або спотворити результуючі дані, результати аналізу, вимірювань або подальше використання сигналу або створити перешкоди чи спотворити взаємодію між системами.

У деяких випадках, при наявності додаткових спектральних складових, може виникати потреба в додатковій обробці, наприклад, додаткового аналізу амплітуди та фази сигналів, що допоможе визначити точні характеристики нових гармонік та їх вплив на сигнал або застосування методів корекції та компенсації, щоб знизити їх вплив або відновити оригінальний сигнал. Це може включати калібрування, корекційні фільтри чи інші методи для відновлення спотвореного сигналу.

Висновки

Дослідження нелінійності аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в цифрових засобах вимірювання виявило, що нелінійність може суттєво впливати на точність результатів вимірювань. Фактори, такі як неточності в елементах перетворення, недосконалість операційних підсилювачів, шуми та інші ефекти, можуть призводити до нелінійності в функції перетворення АЦП. Це може проявлятися у вигляді недостатньої точності, спотворень або неоднорідності перетворення сигналу.

Для коректної обробки та аналізу даних важливо враховувати нелінійність АЦП, особливо при вимірюваннях з високою точністю або при роботі з широким динамічним діапазоном сигналів. Виробники вимірювальних приладів надають специфікації, які описують нелінійність АЦП, що дозволяє користувачам оцінити

рівень нелінійності та врахувати його при обробці та аналізі даних.

Дослідження також показало, що існують параметри, пов'язані з нелінійністю АЦП, які нормуються у технічних описах, наприклад, інтегральна нелінійність ФП АЦП (ІНЛ) і диференціальна нелінійність ФП АЦП (ДНЛ). Ці параметри дозволяють кількісно оцінити рівень нелінійності та використовувати їх для корекції результатів вимірювань.

Для поліпшення точності вимірювань і забезпечення надійності результатів рекомендується розробити ефективні методи оцінки впливу нелінійності функції перетворення АЦП на похибку вимірювання спектру. Ці методи допоможуть врахувати нелінійність при обробці результатів вимірювань і покращити точність і достовірність отриманих даних.

Отже, враховуючи нелінійність АЦП та її вплив на результати вимірювань, дослідження спрямоване на розробку стратегій та методів корекції, що дозволять досягти більш точних і надійних вимірювань у цифрових засобах вимірювання.

Література

1. Kester W. MT-001 TUTORIAL Taking the Mystery out of the Infamous Formula, "SNR = 6.02N + 1.76dB," and Why You Should Care. Norwood : Analog Devices, 2009. 7 p.

2. Kester W. Analog-digital conversion. Norwood : Analog Devices, 2004. 1138 p.

3. Michaeli L., Michalko P., Šaliga J. Unified ADC nonlinearity error model for SAR ADC. *Measurement*. 2008. V. 41, No. 2. P. 198–204.

4. Wagdy M.F., Ng W.-M. Validity of uniform quantization error model for sinusoidal signals without and with dither. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1989. V. 38, Iss. 3. P. 718–722.

5. Brandolini A., Gandelli A. Testing methodologies for analog-to-digital converters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1992. V. 41, Iss. 5. P. 595–603.

6. Kester W. MT-003 TUTORIAL Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor. Norwood : Analog Devices, 2009. 8 p.

7. Suchanek P., Slepicka D., Haasz V. Several approaches to ADC transfer function approximation and their application for ADC nonlinearity correction. *Metrology and Measurement Systems*. 2008. V. 15, No. 4. P. 501–511.

8. Suchanek P., Slepicka D., Haasz V. Experimental Verification of Different Models of the ADC Transfer Function. *13th Workshop on ADC Modelling and Testing / Florence, Italy, 2008*. P. 22–24.

9. Kim K. Analog-to-digital conversion and harmonic noises due to the integral nonlinearity. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1994. V. 43, No. 2. P. 151–156.

10. Flores M. da Gloria, Negreiros M., Carro L., Susin A. INL and DNL estimation based on noise for ADC test. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2004. V. 53, Iss. 5. P. 1391–1395.

11. Flores M. da Gloria, Negreiros M., Carro L., Susin A. INL and DNL estimation based on noise ADC test. *Proceedings of the 20th IEEE Instrumentation Technology Conference / Vail, CO, USA, 2003*. V. 2. P. 1350–1353.

12. Flores M. da Gloria, Negreiros M., Carro L., Susin A. A noise generator for analog-to-digital converter testing. *Proceedings 15th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design / Porto Alegre, Brazil, 2002*. P. 135–140.

13. Šaliga J., Michaeli L., Holcer R. Noise sensitivity of the exponential histogram ADC test. *Measurement*. 2006. V. 39, No. 3. P. 238–244.

14. Cruz Serra A., Da Silva M.F., Ramos P., Michaeli L. Fast ADC testing by spectral and histogram analysis. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference / Como, Italy, 2004*. V. 2. P. 823–828.

Стахова А.П., Квасніков В.П.

АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНОСТІ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Дослідження спрямоване на аналіз нелінійності аналого-цифрового перетворювача (АЦП) у цифрових засобах вимірювання, таких як осцилографи, мультиметри та аналізатори спектра. Нелінійність АЦП може призводити до недостатньої точності, спотворень та неоднорідності перетворення сигналу. У дослідженні розглядаються фактори, які спричиняють нелінійність АЦП, та методи оцінки її впливу на результати вимірювань. Також розглядаються параметри, пов'язані з нелінійністю АЦП, які нормуються у технічних описах, що дозволяють оцінити рівень нелінійності та зробити відповідні корекції під час обробки даних.

Ключові слова: функція перетворення, аналого-цифровий перетворювач, інтегральна нелінійність (ІНЛ), диференціальна нелінійність (ДНЛ), динамічні характеристики АЦП.

Stakhova A.P., Kvasnikov V.P.

ANALYSIS OF THE CONVERSION FUNCTION NONLINEARITY OF THE ANALOG-DIGITAL CONVERTER

The study aims to analyze analog-to-digital converter (ADC) nonlinearity in digital measuring instruments such as oscilloscopes, multimeters, and spectrum analyzers. The non-linearity of the ADC can lead to insufficient accuracy, distortion and inhomogeneity of the signal transformation. The research examines the factors that cause the nonlinearity of the ADC and the methods of evaluating its influence on the measurement results. Also considered are the parameters related to the nonlinearity of the ADC, which are standardized in the technical descriptions, allowing to assess the level of nonlinearity and make appropriate corrections during data processing.

Keywords: conversion function, analog-digital converter, integral nonlinearity (INL), differential nonlinearity (DNL), dynamic characteristics of ADC.