

УДК621.317.7.089.6

СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ АНАЛОГО- ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Кочан Роман, Кочан Орест, 2008

НДІ Інтелектуальних комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету
rk@tanet.edu.te.ua

Запропоновано метод визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення (ХП) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), який використовує програмне опрацювання результатів аналого-цифрового перетворення спадів напруг на послідовно увімкнених резисторах подільника напруги, підімкненого до джерела взірцевої напруги АЦП, що забезпечує високу точність визначення значення інтегральної нелінійності ХП АЦП у точках діапазону, сформованих подільником напруги. Запропонований метод може використовуватися для формування поправки результату аналого-цифрового перетворення в інформаційно-вимірювальних системах.

Предложено метод определения интегральной нелинейности характеристики преобразования (ХП) аналого-цифровых преобразователей (АЦП), который использует программную обработку результатов аналого-цифрового преобразования падений напряжения на последовательно соединенных резисторах делителя напряжения, подключенного к источнику опорного напряжения АЦП, что обеспечивает высокую точность определения интегральной нелинейности ХП АЦП в точках диапазона измерения, сформированных делителем напряжения. Предложенный метод может использоваться для формирования поправки результатов аналого-цифрового преобразования в информационно-измерительных системах.

There is proposed method of integral nonlinearity of conversion characteristic (CC) of analog to digital converters (ADC) identification in this paper. Proposed method uses software processing of results of analog to digital conversion of voltages of connected in series with resistors of resistive voltage divider, which is connected to reference voltage of ADC. It provides high precision of integral nonlinearity identification of ADC's CC in the points generated by voltage divider. Proposed method could be applied for conversion result correction in precision measurement systems.

Вступ. Нелінійність характеристики перетворення (ХП) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) є доміантною складовою інструментальної похибки у разі вимірювання з використанням методу заміщення. Тому для підвищення точності вимірювання необхідно її компенсувати. Для цього спочатку необхідно ідентифікувати дійсну характеристику перетворення АЦП, після чого можна, власне, компенсувати її нелінійність. Компенсація нелінійності може здійснюватися як аналоговими, так і цифровими методами. Аналогові методи компенсації нелінійності полягають у введенні нелінійних схем у вхідні кола АЦП [1]. Такі методи потребують прецизійного і, як правило, багатокрокового підлаштування компонентів, які задають нелінійні властивості. Крім того, такі схеми мають високу чутливість до зовнішніх впливних факторів і, як наслідок, низькі метрологічні характеристики у всьому діапазоні робочих умов. Розвиток

мікроелектроніки та мікропроцесорної техніки привів до поширення цифрових методів оброблення даних. Власне корекція нелінійності цифровими методами зводиться до програмної адитивної корекції результату перетворення АЦП. Тому для цифрової корекції ключовою є задача ідентифікації нелінійності, оскільки вона вимагає додаткового взірцевого обладнання та методики її визначення. Сама ідентифікація нелінійності поділяється на два етапи:

1. Визначення дійсної ХП АЦП у взірцевих точках.
2. Інтерполяція результатів.

У математичній статистиці широко відомими є методи інтерполяції функцій різного виду. Вони широко описані в літературі [2, 3, 4] тому розглянемо методи визначення дійсної ХП АЦП у взірцевих точках та оцінимо їхню похибку.

Огляд методів визначення нелінійності ХП АЦП. Найпростішим методом генерації взірцевих напруг для АЦП з метою визначення його ХП є використання резистивного подільника напруги (рис. 1).

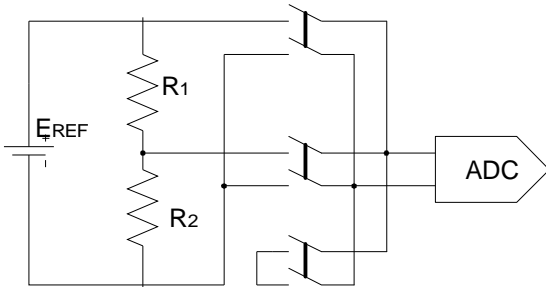


Рис. 1. Визначення нелінійності ХП АЦП за допомогою резистивного подільника напруги

У такому разі закорочений канал призначений для компенсації адитивної складової ХП АЦП, канал вимірювання E_REF призначений для калібрування АЦП, а вимірюючи напругу на резисторі R2, можна визначити дійсне значення ХП АЦП в точці U_{R2}. Якщо номінальні значення резисторів R1 та R2 рівні, то у такий спосіб визначимо нелінійність ХП АЦП в половині його шкали. Приймаючи, що ХП АЦП має вигляд:

$$N = k * U + b + f^n(U), \tag{1}$$

де N – результат перетворення АЦП; U – вхідна напруга АЦП; k – коефіцієнт перетворення; b – зміщення ХП АЦП; fⁿ(U) – нелінійність ХП АЦП.

Оцінимо похибку такого методу визначення нелінійності. Для цього розглянемо як впливає похибка резисторів подільника напруги на похибку ідентифікації нелінійності. Нехай:

$$\begin{cases} R_1 = \bar{R} \pm d_R * \bar{R} \\ R_2 = \bar{R} \pm d_R * \bar{R} \end{cases}$$

де \bar{R} – номінальне значення опору резисторів подільника, d_R – їхня відносна похибка.

Тоді згідно з законом Ома:

$$\begin{cases} U_{R1} = \frac{E_{REF}}{2} * (1 \pm d_R) \\ U_{R2} = \frac{E_{REF}}{2} * (1 \pm d_R) \end{cases} \tag{2}$$

Для оцінки похибки методу запишемо залежність результату перетворення АЦП (1) від вхідної напруги для вказаних випадків:

$$\begin{cases} N_0 = N(0) = k * 0 + b + f^n(0) \\ N_{REF} = N(E_{REF}) = k * E_{REF} + b + f^n(E_{REF}), \\ N_{R2} = N(U_{R2}) = k * U_{R2} + b + f^n(U_{R2}) \end{cases} \tag{3}$$

де N₀, N_{REF}, N_{R2} – результат перетворення АЦП при вхідних напругах 0, E_{REF} та U_{R2} відповідно.

Враховуючи, що при вхідних напругах 0 та E_{REF} нелінійність ХП АЦП дорівнює нулю, систему рівнянь (3) можна переписати у вигляді:

$$\begin{cases} b = N_0 \\ k = \frac{(N_{REF} - N_0)}{E_{REF}} \\ f_2^n = \frac{1}{2} (2 * N_{R2} - N_{REF} - N_0) \end{cases}$$

де f₂ⁿ – номінальне значення нелінійності ХП АЦП у половині шкали.

Враховуючи (2) та (3), можемо записати:

$$f_2^{n*} = f_2^n \pm \frac{d_R}{2} (N_{REF} - N_0),$$

де f₂^{n*} – дійсне значення нелінійності ХП АЦП в половині шкали. У такому разі похибка цього методу Δⁿ становить:

$$\Delta^n = \frac{d_R}{2} (N_{REF} - N_0).$$

Отже, методична похибка Δⁿ є більшою, ніж визначене значення нелінійності f₂ⁿ.

Для зменшення похибки визначення нелінійності використовується метод, описаний в [5]. Його схема аналогічна до схеми рис.1, однак використовується додатковий канал для вимірювання спаду напруги на резисторі R1. Суть цього методу полягає у використанні залежностей:

$$E_{REF} = U_{R1} + U_{R2}$$

$$N_{REF} - N_0 = N_{R1} - N_0 + f_{R1}^n + N_{R2} - N_0 + f_{R2}^n,$$

де U_{R1}, U_{R2} – спади напруг на резисторах R1 та R2; N_{R1}, N_{R2} – результати аналого-цифрового перетворення напруг U_{R1} та U_{R2}; f_{R1}ⁿ, f_{R2}ⁿ – нелінійність ХП АЦП під час вимірювання напруг U_{R1} та U_{R2} відповідно.

Враховуючи залежність (2) та те, що d_R << 1, отримаємо:

$$f_2^n = \frac{1}{2} * (N_{REF} - N_{R1} - N_{R2} + N_0).$$

Похибка визначення нелінійності становить:

$$\Delta^n \approx f_2^n * d_R^2. \quad (4)$$

Ця похибка є нехтовно малою величиною. Основним недоліком цього методу визначення нелінійності є можливість її визначення лише в одній точці, і як наслідок – можливість корекції лише квадратичної складової нелінійності ХП АЦП.

Для підвищення ступеня коригованої нелінійності необхідно збільшити кількість точок ідентифікації нелінійності.

Пропонований метод визначення нелінійності ХП АЦП. Для збільшення кількості точок ідентифікації нелінійності ХП АЦП пропонується за основу взяти описаний вище підхід, але збільшити кількість резисторів подільника та вимірювати спад напруги на декількох резисторах одночасно. Причому кількість резисторів, охоплених входним колом АЦП, передбачити змінною для формування набору точок, в яких здійснюється ідентифікація нелінійності ХП АЦП.

Нехай ми маємо подільник напруги, складений з m послідовно з'єднаних резисторів – $(R_0, R_1, \dots, R_{m-1})$, причому m є найменшим спільним кратним чисел n_0, n_1, \dots, n_{k-1} , тоді, подаючи на вхід АЦП напруги:

$$U_j^{n_i} = \frac{E_{REF}}{\sum_{t=0}^{m-1} R_t} * \left(\sum_{l=0}^{m/n_i-1} R_{l+j*m/n_i} \right), \quad (5)$$

де $U_j^{n_i}$ – напруга на m/n_i послідовно з'єднаних резисторах подільника напруги.

Та, задаючи $i \in [0, k-1]$ та $j \in [0, n_i-1]$, на вході АЦП отримаємо розріджену матрицю напруг:

$$\begin{pmatrix} U_{0,0} & \dots & U_{0,n_0-1} & \approx E_{REF}n_0/m \\ \dots & \dots & \dots & \\ U_{i,0} & \dots & U_{i,n_i-1} & \approx E_{REF}n_i/m \\ \dots & \dots & \dots & \\ U_{k-1,0} & \dots & U_{k-1,n_{k-1}-1} & \approx E_{REF}n_{k-1}/m \end{pmatrix}.$$

У результаті аналого-цифрового перетворення цієї матриці отримаємо таку розріджену матрицю результатів:

$$\begin{pmatrix} N_{0,0} & \dots & N_{0,n_0-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ N_{i,0} & \dots & N_{i,n_i-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ N_{k-1,0} & \dots & N_{k-1,n_{k-1}-1} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

За нею можна визначити рядок значень нелінійності ХП АЦП f^n у точках $E_{REF}/n_0, E_{REF}/n_1, \dots, E_{REF}/n_{k-1}$ з похибкою, яка відповідає (4):

$$f_i^n = \frac{1}{n_i} * \left(N_{REF} + (n_i - 1) * N_0 - \sum_{j=0}^{n_i-1} N_{i,j} \right). \quad (7)$$

Кількість каналів комутатора M , необхідних для подання цієї матриці на вхід АЦП, дорівнює

$$M = \sum_{i=0}^{k-1} n_i.$$

Крім вказаних точок ідентифікації нелінійності ХП АЦП n_0, n_1, \dots, n_{k-1} , є додаткові в діапазоні $[0, E_{REF}]$, в яких можна аналогічно визначити нелінійність ХП АЦП. Це точки виду N_0, \dots, N_{t-1} , які є дільниками m . Причому множина точок $n_0, \dots, n_{k-1} \in N_0, \dots, N_{t-1}$. У такому разі кількість точок ідентифікації нелінійності зростає, а напруга у них буде відповідати значенням

$E_{REF}/N_0, E_{REF}/N_1, \dots, E_{REF}/N_{t-1}$, кількість необхідних каналів комутатора $M = \sum_{i=0}^{t-1} N_i$.

Наприклад, для 12 резисторів подільника напруги ($m=12$) можна записати рядок дільників $N=(2, 3, 4, 6, 12)$, тобто можна реалізувати 5 точок ідентифікації нелінійності, які відповідають значенням напруг: $E_{REF}/12, E_{REF}/6, E_{REF}/4, E_{REF}/3, E_{REF}/2$.

Експериментальні дослідження інтегральної нелінійності ХП АЦП. Експериментальні дослідження пропонованого методу було здійснено з використанням АЦП, вбудованих у мікроконвертори типу ADuC834 виробництва Analog Devices [6]. Для експерименту було використано відлагоджувальну плату (Evaluation board) для цих мікроконверторів [7] з зовнішнім комутатором на герконових реле [8]. Схема експериментальної установки для 12-резистивного подільника напруги подано на рис. 2. Вона містить: подільник напруги – елементи $R_0 \dots R_{11}$, два комутатори по 13 каналів – $C[1,0] \dots C[1,12]$ та $C[2,0] \dots C[2,12]$, під'єднаних до входів AIN1 та AIN2 АЦП мікроконвертора – ADuC834. Керування ключами комутатора здійснюється дешифраторами – DC, під'єднаними до портів мікроконвертора. Встановлюючи коди на цих портах, під'єднують відповідний канал комутатора до входів АЦП.

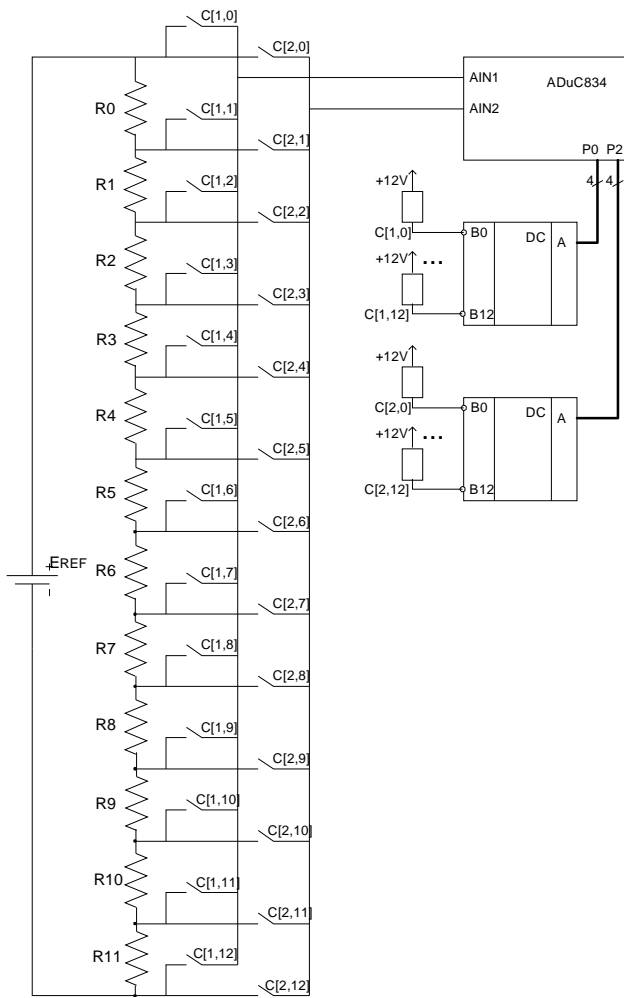


Рис. 2. Схема експериментальної установки

Результати вимірювального експерименту зведені у табл. 1. Колонка 1 вказує номер перетворення, колонка 2 вказує напругу, яка подається на вхід АЦП, колонки 3 та 5 – замкнені ключі, які забезпечують подавання цієї напруги на вхід АЦП, колонки 4 та 6 – значення кодів, які формуються мікроконвертором для керування комутатором. У колонці 7 подано результати аналого-цифрового перетворення у гекса-децимальному форматі. Результати аналого-цифрового перетворення в лінійках 0 та 28 відповідають циклам встановлення нуля та калібрування. Результати у лінійках 1 ... 12 – визначенню нелінійності в точці $E_{REF}/12$. Результати в лінійках 13 ... 18 – визначенню нелінійності у точці $E_{REF}/6$. Результати у лінійках 19 ... 22 – визначенню нелінійності в точці $E_{REF}/4$. Результати в лінійках 23 ... 25 – визначенню

нелінійності в точці $E_{REF}/3$. Результати у лінійках 26 та 27 – визначенню нелінійності у точці $E_{REF}/2$. Значення з лінійок 1 ... 27 формують розріджену матрицю (7) та згідно з (8) дають змогу сформувати рядок результатів визначення значення інтегральної нелінійності характеристики перетворення АЦП.

Таблиця 1

Результати аналого-цифрового перетворення

N	U	AIN1	P0	AIN2	P2	ADC
0	0	C[1,0]	0	C[2,0]	0	0x000008
1	U(R0)	C[1,0]	1	C[2,1]	1	0x15557B
2	U(R1)	C[1,1]	2	C[2,2]	2	0x15556A
3	U(R2)	C[1,2]	3	C[2,3]	3	0x15556B
4	U(R3)	C[1,3]	4	C[2,4]	4	0x15557B
5	U(R4)	C[1,4]	4	C[2,5]	5	0x15557F
6	U(R5)	C[1,5]	5	C[2,6]	6	0x15557A
7	U(R6)	C[1,6]	6	C[2,7]	7	0x155579
8	U(R7)	C[1,7]	7	C[2,8]	8	0x155585
9	U(R8)	C[1,8]	8	C[2,9]	9	0x155581
10	U(R9)	C[1,9]	9	C[2,10]	10	0x155570
11	U(R10)	C[1,10]	10	C[2,11]	11	0x155571
12	U(R11)	C[1,11]	11	C[2,12]	12	0x15556D
13	U(R0,R1)	C[1,0]	0	C[2,2]	2	0x2AAAAA
14	U(R2,R3)	C[1,2]	2	C[2,4]	4	0x2AAA89
15	U(R4,R5)	C[1,4]	4	C[2,6]	6	0x2AAA8A
16	U(R6,R7)	C[1,6]	6	C[2,8]	8	0x2AAA9B
17	U(R8,R9)	C[1,8]	8	C[2,10]	10	0x2AAA9E
18	U(R10,R11)	C[1,10]	10	C[2,12]	12	0x2AAA9E
19	U(R0...R2)	C[1,0]	0	C[2,3]	3	0x40004E
20	U(R3...R5)	C[1,3]	3	C[2,3]	6	0x400066
21	U(R6...R8)	C[1,6]	6	C[2,3]	9	0x40004F
22	U(R9...R11)	C[1,9]	9	C[2,3]	12	0x40006D
23	U(R0...R3)	C[1,0]	0	C[2,4]	4	0x5555BB
24	U(R4...R7)	C[1,4]	4	C[2,8]	8	0x5555D2
25	U(R8...R11)	C[1,8]	8	C[2,12]	12	0x5555C2
26	U(R0...R5)	C[1,0]	0	C[2,6]	6	0x80009D
27	U(R6...R11)	C[1,6]	6	C[2,12]	12	0x800089
28	Eref	C[1,0]	0	C[2,12]	12	0xFFFFF

Отже, результати визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення АЦП, вбудованого у мікроконвертор типу ADuC834, подано у табл. 2. Графічно ці результати наведено на рис. 3.

Таблиця 2

Нелінійність характеристики перетворення АЦП

Range	Nonlin bit
Eref/12	34
Eref/6	-20
Eref/4	93
Eref/3	112
Eref/2	144

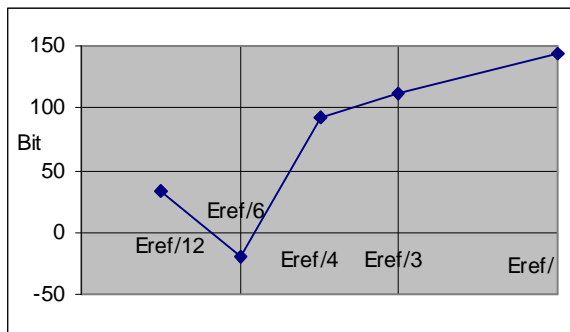


Рис. 3. Залежність нелінійності характеристики перетворення АЦП від вхідної напруги

Висновки. Запропоновано метод ідентифікації нелінійності ХП АЦП, який ґрунтується на вимірюванні спаду напруги на послідовно увімкнених резисторах багаторезисторного подільника напруги та програмному обробленні результатів аналого-цифрового перетворення. Описаний метод забезпечує збільшення кількості точок ідентифікації нелінійності у діапазоні перетворення АЦП без втрати точності цієї ідентифікації і може використовуватися для корекції систематичної складової похибки, викликані нелінійністю ХП, у прецизійних аналого-цифрових перетворювачах.

1. Пащенко В.В., Маланин В.П. Измерительные цепи датчиков систем автоматики: Учебное пособие. – Пенза, ППИ, 1990. – 68 с.
2. Обробка сигналів: Підручник / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.
3. George M. Interpolation and Approximation by Polynomials (Series: CMS Books in Mathematics). ISBN: 0-387-00215-4.
4. Bergh J., Lofstrom J. Interpolation Spaces (Grundlehren der mathematischen Wissenschaften). ISBN: 0-387-07875-4.
5. Kochan R., Kochan O., Chyrka M., Vasylykiv N. Precision Data Acquisition (DAQ) Module with Remote Reprogramming. Proc. of third IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2005), September 5 – 7, 2005, Sofia, Bulgaria, pp. 279 – 282.
6. ADUC834 Precision Analog Microcontroller. Data Sheet (URL: http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADUC834.pdf).
7. QuickStart Kits for ADuC800-series (URL: <http://www.analog.com/en/content/0,2886,762%255F%252D1%255F66633%255F0,00.html>).
8. Кочан Р., Кочан В. Комутатор сигналів низького рівня. Заявка на патент України № 2004032136.