

Р. В. Кочан *, О. В. Кочан **, Г. І. Клим *, Н. Є. Гоц***

Національний університет “Львівська політехніка”,

* кафедра спеціалізованих комп’ютерних систем

** кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

*** кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

МЕТОД КОРЕКЦІЇ НЕЛІНІЙНОСТІ АЦП НА БАЗІ ДЖЕРЕЛА ПІДВИЩЕНОЇ НАПРУГИ

© Кочан Р. В., Кочан О. В., Клим Г. І., Гоц Н. Є., 2014

Розроблено метод формування тестових точок для визначення та корекції інтегральної нелінійності АЦП, який використовує багаторезисторний подільник напруги з усередненням спадів напруги на резисторах, що живиться напругою, значно вищою, ніж діапазон тестованого АЦП. Досліджено вплив похибки опору резисторів багаторезисторного подільника та випадкової похибки АЦП на невиключену похибку корекції інтегральної нелінійності.

Ключові слова: інтегральна нелінійність, невиключена похибка, багаторезисторний подільник напруги.

METHOD OF ADC'S NONLINEARITY CORRECTION BASED ON HIGH VOLTAGE SOURCE

© Kochan R., Kochan O., Klym H., Goc N., 2014

There is developed method of testing points generation for identification and correction of integral nonlinearity of high performance ADC. The developed method is based on averaging all voltages of multi-resistors voltage divider, which is powered by reference voltage source with output voltage higher than range of tested ADC. It is investigated influence of resistors' error and random error of ADC on residual error of integral nonlinearity correction for proposed method.

Key words: Integral Nonlinearity, Residual Error, Multi-Resistor Voltage Divider.

Вступ

Поширеність засобів обчислювальної техніки та алгоритмів цифрового опрацювання сигналів призвела до того, що аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) стали необхідним компонентом сучасних вимірювальних систем. Їхні метрологічні характеристики часто визначають метрологічні характеристики систем загалом. Особливо це твердження слушне для систем вимірювання електричних величин [1], тому покращення параметрів АЦП є актуальною задачею.

Огляд літературних джерел

Нішу прецизійних АЦП напруги постійного струму займають перетворювачі на базі сигма-дельта модулятора (СДМ) [2, 3]. Їх високу точність забезпечують структурно-алгоритмічні методи – встановлення нуля і калібрування, що зменшує вплив на результат перетворення адитивної та мультиплікативної складових похибки перетворення. Тому похибка результату перетворення визначається передусім похибками джерела напруги калібрування, комутувального пристрою і залишковою похибкою АЦП, в якій домінує похибка нелінійності функції перетворення (ФП) АЦП. Наприклад, для 24-розрядного АЦП типу AD7714 [4] нормоване значення похибки нелінійності становить 15 ppm., що відповідає лише 16-му двійковому розряду, отже, априорі молодші 8 розрядів

результату перетворення неточні та надлишкові. Тому, для підвищення точності перетворення АЦП понад 15 ppm., необхідно коригувати нелінійну складову його похибки. Крім того, існують методи вимірювання, наприклад, метод заміщення, точність яких визначається саме нелінійністю ФП АЦП [5]. У роботі [6] запропоновано метод визначення нелінійності ФП АЦП у тестових точках з високою точністю, що ґрунтується на усередненні спадів напруги на групах послідовно увімкнених резисторів багаторезисторного подільника напруги зі змінною кількістю резисторів у групі. Кількість тестових точок визначається кількістю резисторів у подільнику. Недоліком цього методу, який умовно названо “базовим”, є те, що всі сформовані тестові точки відповідають ряду $\frac{1}{N}$ і містяться в нижній половині діапазону перетворення АЦП. Крім того, в результаті дослідження базового методу виявлено залежність невиключеної похибки нелінійності від густини розміщення тестових точок. Це дало змогу, після корекції похибок за допомогою встановлення нуля, калібрування та базового методу, виділити в діапазоні перетворення АЦП два субдіапазони – нижню та верхню половини діапазону перетворення АЦП. При цьому невиключена похибка перетворення у цих субдіапазонах є різною, а невиключена нелінійна складова похибки верхнього субдіапазону приблизно на порядок перевищує невиключену нелінійну складову похибки нижнього субдіапазону.

Запропонований у [7] метод формування тестових точок безпосереднім вимірюванням спадів напруги на послідовно увімкнених резисторах ґрунтується на корекції нелінійності ФП АЦП за допомогою базового методу в нижній половині діапазону перетворення, де цей метод ефективний. Похибка результатів вимірювання цих спадів напруги порівняно мала, оскільки всі напруги потрапляють у нижній субдіапазон АЦП. В основному ці похибки визначаються випадковою похибкою задіяного АЦП. Спади напруги на цих резисторах використовуються як тестові точки для всіх нижчих діапазонів перетворення АЦП. Хоча такий метод і забезпечує рівномірний розподіл тестових точок для нижніх діапазонів перетворення АЦП, але точність кожної з них значно нижча, порівняно з базовим методом, через накопичення похибки під час вимірювань.

У [8] запропоновано метод з ітераційним використанням багаторезисторного подільника напруги, який передбачає формування тестових точок для визначення нелінійності АЦП нижніх діапазонів АЦП як середнє арифметичне спадів напруги на тих самих комбінаціях послідовно увімкнених резисторів багаторезисторного подільника напруги, що відповідають базовому методу формування тестових точок найвищого діапазону. Це дало змогу отримати значення тестових точок, пропорційне до напруги калібрування найвищого діапазону зі строго відомим коефіцієнтом пропорційності. Оскільки нижні діапазони перетворення АЦП принаймні удвічі менші, ніж вищі, значення напруг тестових точок розміщені значно рівномірніше по нижчих діапазонах порівняно з базовим методом, а їхня точність відповідає базовому методу і вища порівняно з методом формування безпосереднім вимірюванням спадів напруги на послідовно увімкнених резисторах подільника. Недоліком цього методу є нерівномірний закон розподілу сформованих тестових точок по нижніх діапазонах АЦП.

Запропонований у [9] метод є фактично комбінацією розглянутих вище методів. Він передбачає, що тестові точки, сформовані за методом [8], доповнюються точками, визначеними за методом [7], що забезпечує рівномірний розподіл сформованих тестових точок по нижньому діапазону та високу точність більшості з них.

Основним недоліком методів [7...9] є те, що вони не усувають основного недоліку методу [6], а орієнтовані лише на нижні діапазони.

Метою роботи є розроблення та дослідження методу, що забезпечує формування тестових точок, рівномірно розміщених по найвищому діапазону перетворення для багатодіапазонних АЦП, або рівномірно розміщених по діапазону перетворення для однодіапазонних АЦП.

Метод формування тестових точок

Пропонується жити багаторезисторний подільник напруги джерелом живлення зі значно більшою вихідною напругою, ніж діапазон перетворення тестованого АЦП, а тестові точки

формувані, аналогічно до “базового” методу, – на групах послідовно увімкнених резисторів зі змінною кількістю резисторів у групі. На відміну від “базового” методу, напруга калібрування АЦП знімається не безпосередньо з входу багаторезисторного подільника напруги, оскільки вона перевищує його діапазон перетворення, а формується як додаткова тестова точка. Додатковою умовою, яка накладається на розміщення сформованих тестових точок, може бути їхня відповідність вимогам [10], що забезпечить бездемонтажну метрологічну перевірку АЦП з використанням однозначної міри електричної напруги.

Нехай кількість резисторів, з яких складається подільник, дорівнює K , причому $K = M \times N$, де M, N – цілі числа. Приклад схеми подільника, що містить шість резисторів $R1...R6$, тобто $K = 2 \times 3 = 6$, подано на рис. 1. Спади напруги на M послідовно увімкнених резисторах перетворюються на код N разів так, щоби спад напруги на кожному резисторі в результаті перетворення ввійшов один раз. Наприклад, на рис. 1 показано варіант, коли $M = 2$, тобто перетворюються на код спади напруги $U_1...U_3$ на парах резисторів $R1, R2$; $R3, R4$ і $R5, R6$. Тоді кількість перетворень $N = 3$.

В загальному випадку кожен з N спади напруги U_i можна подати як

$$U_i = E_{REF} \times \frac{\sum_{j=1}^M R_{j+(i-1) \times M}}{\sum_{l=1}^K R_l}, \quad (1)$$

де $R_l, R_{i+(i-1) \times M}$ – значення опору відповідних резисторів подільника.

Ввівши середнє арифметичне спади напруги $\overline{U_i}$ як

$$\overline{U_i} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N}, \quad (2)$$

підставивши (1) в (2) та спростивши отримаємо

$$\overline{U_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[E_{REF} \frac{\sum_{j=1}^M R_{j+(i-1) \times M}}{\sum_{l=1}^K R_l} \right] = \frac{E_{REF}}{N} \frac{\sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^M R_{j+(i-1) \times M} \right]}{\sum_{l=1}^K R_l} = \frac{E_{REF} \sum_{l=1}^K R_l}{N \sum_{l=1}^K R_l} = \frac{E_{REF}}{N}. \quad (3)$$

Такий запис, по суті, є модифікованим записом другого закону Кірхгофа і вказує, що опори резисторів багаторезисторного подільника напруги, а тим більше їхні відхилення від номінальних значень, не впливають на середнє арифметичне спади напруги $\overline{U_i}$, яке, власне, і використовується як тестова точка.

Якщо K вибрати так, що воно є спільним кратним набору чисел $N_1...N_R$, то, вибираючи кількість послідовно з'єднаних резисторів по $K/N_1...K/N_R$, можна відтворити R напруг, що дорівнюватимуть $E_{REF}/N_1...E_{REF}/N_R$. Отже, вибираючи значення K таким, що має багато дільників, можна забезпечити кількість тестових точок, необхідну для перевірки АЦП. Наприклад, якщо вибрати $K = 12$ (тобто подільник напруги міри має 12 резисторів), то можна сформувані шість точок – $E_{REF}/12, E_{REF}/6, E_{REF}/4, E_{REF}/3, E_{REF}/2, E_{REF}$.

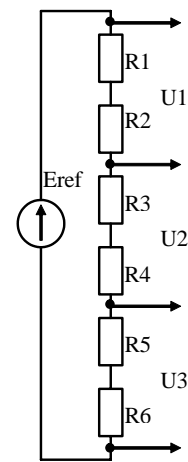


Рис. 1. Приклад схеми подільника для $K=3 \times 2=6$

Якщо вибрати напругу міри, яка забезпечує живлення багаторезисторного подільника, більшою, ніж діапазон АЦП, у такому випадку з виходу подільника необхідно отримати п'ять рівнів напруг $U^1 \dots U^5$, кожен з яких містить $M_1 \dots M_5$ точок, які розраховують згідно з

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i^1 = \frac{E_{REF}}{K} \times \sum_{j=1}^{M_1} R_{j+(i-1) \times M_1}; i = \overline{1, M_1} \\ U_i^2 = \frac{E_{REF}}{K} \times \sum_{j=1}^{M_2} R_{j+(i-1) \times M_2}; i = \overline{1, M_2} \\ U_i^3 = \frac{E_{REF}}{K} \times \sum_{j=1}^{M_3} R_{j+(i-1) \times M_3}; i = \overline{1, M_3} \\ U_i^4 = \frac{E_{REF}}{K} \times \sum_{j=1}^{M_4} R_{j+(i-1) \times M_4}; i = \overline{1, M_4} \\ U_i^5 = \frac{E_{REF}}{K} \times \sum_{j=1}^{M_5} R_{j+(i-1) \times M_5}; i = \overline{1, M_5} \end{array} \right. \quad (4)$$

Для забезпечення перевірки АЦП згідно з нормативними документами [10] необхідно вибрати напругу міри та параметри $M_1 \dots M_5, K, T$ так, щоби напруги $U^1 \dots U^5$ відповідали точкам перевірки $X_1 \dots X_5$. При цьому необхідно виконувати такі вимоги:

- $E_{REF} = T \times X_K$, де $T > 1$, причому T – раціональне число;
- $M_1 \dots M_5, K$ – цілі числа.

Систему рівнянь (4) можна перетворити на систему нерівностей, в яку входять п'ять пар нерівностей виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T}{K} \times M_i \geq K_i^{MIN} \\ \frac{T}{K} \times M_i \leq K_i^{MAX} \end{array} \right. \quad (5)$$

де $i = \overline{1, 5}$ – номер сформованої тестової точки; K_i^{MIN} та K_i^{MAX} – мінімальне та максимальне значення коефіцієнтів, які визначають відношення діапазону АЦП до напруги точки перевірки.

Значення коефіцієнта T визначається параметрами міри та діапазону АЦП. Розв'язок системи нерівностей (5) відносно K та $M_i, i = \overline{1, 5}$ визначає конфігурацію подільника та комутатора. Спростити схему перевірки можна, якщо для точки перевірки X_1 вибрати канал встановлення нуля, тобто розмірність системи рівнянь (4) зменшується до чотирьох, а у системі нерівностей (5) $M_1 = 0$.

Схему, що реалізує запропонований метод формування тестових точок, подано на рис. 2. Вона складається з міри напруги E_{REF} , K резисторів подільника $R_1 \dots R_k$ і $2 \times (K + 1)$ ключів – $SP_0 \dots SP_k$ і $SN_0 \dots SN_k$, що відповідно комутують плюсовий та мінусовий входи АЦП, який перевіряють. Всі ключі комутатора повинні мати незалежне керування, причому в один момент часу лише один з ключів SPX та один з ключів SNX може бути замкненим. Така конструкція

комутатора допускає їх керування від двох дешифраторів, не вимагає надлишкової кількості ключів і забезпечує можливість формування тестових точок як додатної, так і від'ємної полярності.

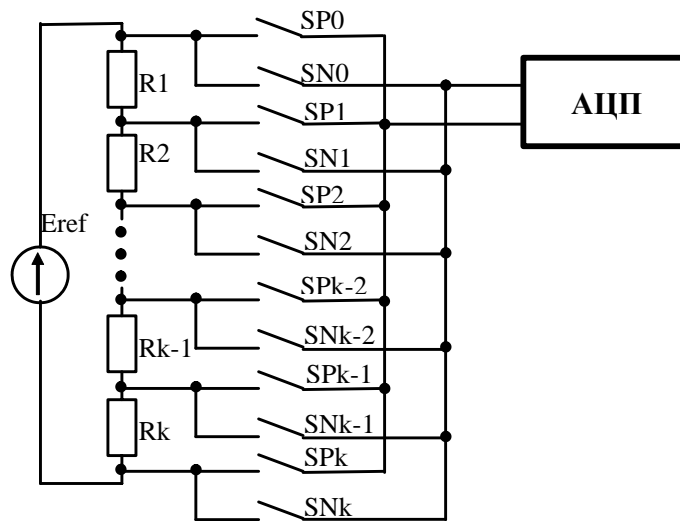


Рис. 2. Схема перевірки АЦП за допомогою подільника з K резисторів

Розглянемо можливу схему перевірки з допомогою пропонованого методу на прикладі перевірки основного діапазону АЦП типу AD7714 [4]. Напряга його основного діапазону перетворення 2.5 В. Результати розв'язання системи нерівностей (5) для перевірки АЦП згідно з вимогами [10] зведено у таблицю. Необхідно сформувати п'ять точок перевірки – рядки X1...X5 з напругами, які лежать в межах між мінімальним та максимальним значеннями, вказаними в стовпцях X_{\min} та X_{\max} . Представлено результати аналізу для міри, напругою 7,5 В (міра на базі прецизійного стабілізатора AD584 [11]). Кількість резисторів подільника вказана у стовпці K . Ввімкнення по M резисторів подільника послідовно забезпечує відтворення напруги в точці перевірки, яка вказана у стовпці U . Процедура перевірки у цій точці вимагає проведення N аналого-цифрових перетворень так, щоби спад напруги на кожному резисторі подільника в результаті цих перетворень ввійшов один раз. Потім результати цих N аналого-цифрових перетворень усереднюють. Як видно, вибрані параметри подільника забезпечують знаходження відтворюваних значень напруги в точках перевірки – вихідні напруги подільника, вказані у стовпці U , лежать у допустимому проміжку, вказаному в стовпцях X_{\min} та X_{\max} .

Параметри схеми формування тестових точок

T	X_{\min}	X_{\max}	E_{ref}	N	U	K	M
X1	0	0,25	7,5	1	0	12	0
X2	0,5	0,75	7,5	12	0,625	12	1
X3	1	1,5	7,5	6	1,25	12	2
X4	1,75	2	7,5	4	1,875	12	3
X5	2,25	2,5	7,5	3	2,5	12	4

Дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності АЦП

Експериментальні дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності вимагають вірцевого обладнання, похибка якого в 3...5 разів менша за очікувану залишкову нелінійність. Однак рівень нелінійності прецизійних АЦП утруднює експериментальні дослідження, тому для

дослідження використано імітаційне моделювання, що дає змогу оцінити пропонований метод за різних типів ФП АЦП і параметрів подільника. Методика дослідження аналогічна до методики дослідження базового методу, описаної в [6], і містить такі етапи:

- довільно задають криві, які імітують нелінійність функції перетворення АЦП на вищому та нижчому діапазонах перетворення та опори резисторів R_1, R_2, \dots, R_K ;
- розраховуються результати аналого-цифрового перетворення на відповідних комбінаціях резисторів для реалізації базового методу на вищому діапазоні АЦП;
- до цих результатів перетворення додається випадкова складова похибки АЦП;
- за цими результатами обчислюють параметри розрахованої функції нелінійності вищого діапазону перетворення АЦП;
- похибку обчислюють як різницю між заданою та розрахованою кривими на нижчому діапазоні перетворення АЦП.

Отже, набираючи статистику, перевіряють твердження про придатність цього методу до використання в умовах дії випадкової похибки АЦП та розхилу опорів резисторів. Криві, що імітують нелінійність на двох діапазонах перетворення АЦП, аналогічно, як і в [6], брали на базі полінома четвертого степеня з випадковими коефіцієнтами, причому критерієм придатності було неперевищення максимального значення нелінійності за модулем 250 квантів (максимально допустима нелінійність АЦП типу AD7714). Приклади кривих, що імітують нелінійність, подано на рис. 3. Також показано обвідні, що являють собою максимальні та мінімальні значення для 500 реалізацій експерименту.

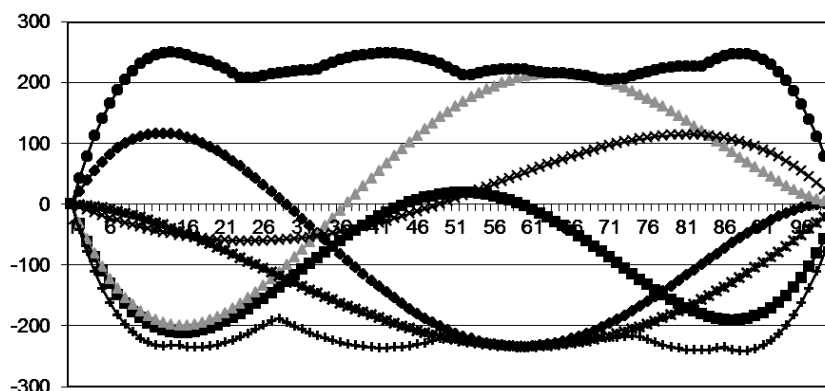


Рис. 3. Імітована нелінійність ФП АЦП

Верифікацію програмного забезпечення здійснено підстановкою “ідеальних” резисторів у подільник і моделі АЦП без випадкової похибки. Отримане значення похибки не перевищувало 0,05 кванта, що можна пояснити похибкою заокруглення під час обчислень. Отже, розроблені моделі працюють коректно, їх можна використати для аналізу впливу параметрів компонентів схеми на невиключену похибку корекції нелінійності ФП АЦП.

Моделювання проведено для резисторів з максимальним відхиленням опору від номінального 1 та 2 %. Результати дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності від вхідної напруги для резисторів з відхиленням опору ± 1 % подано на рис. 4. Аналогічно, як і для рис. 3, представлено обвідні для 500 реалізацій обчислювального експерименту, а також кілька отриманих кривих. Отже, максимальне значення невиключеної похибки не перевищує 0,5 кванта, що є меншим, ніж дискретність АЦП. Отже, пропонований метод, як і базовий, нечутливий до відхилень опорів резисторів від номінального значення.

Результати дослідження випадкової складової похибки АЦП (шуму) на невиключену похибку для амплітуди шуму ± 6 квантів подано на рис. 5. Нижчий рівень невиключеної похибки, ніж рівень шуму АЦП, можна пояснити його зменшенням за усереднення.

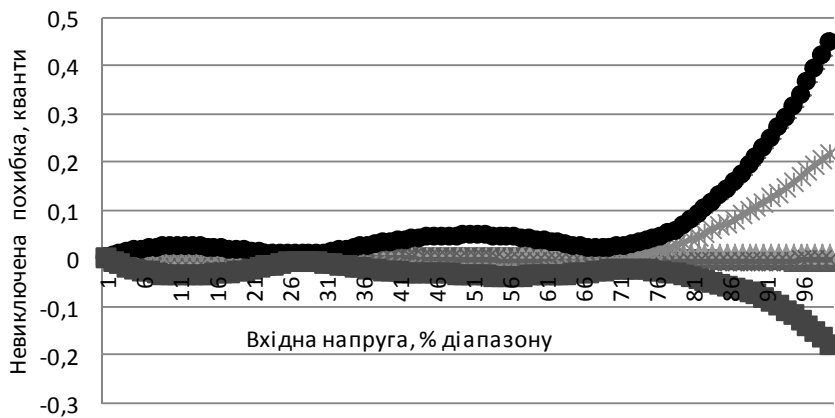


Рис. 4. Залежність невиключеної похибки нелінійності АЦП від вхідної напруги для відхилення резисторів $\pm 1\%$ від номінального значення



Рис. 5. Залежність невиключеної похибки від вхідної напруги для шуму АЦП ± 6 квантів

Залежність максимальної невиключеної похибки нижчого діапазону перетворення АЦП від величини випадкової похибки наведено на рис. 6. Із лінійності цієї залежності можна зробити висновок, що для запропонованого методу за умови використання дванадцятирезисторного подільника напруги невиключена похибка нелінійності ФП АЦП не перевищує амплітуди його шуму.



Рис. 6. Залежність максимального значення невиключеної похибки від амплітуди шуму АЦП

Висновки

У результаті дослідження запропонованого методу формування тестових точок для визначення нелінійності ФП АЦП можна зробити висновки:

- вплив відхилення опору резисторів від середнього значення на невиключену похибку співмірний з дискретністю АЦП;
- домінує вплив на невиключену похибку випадкової складової похибки АЦП, а її рівень не перевищує рівня випадкової складової похибки АЦП;
- вибором параметрів схеми можна забезпечити формування тестових точок з напругами, що відповідають напругам перевірки АЦП згідно з чинними стандартами [10], що дає змогу перевіряти АЦП на місці експлуатації з використанням однозначної міри електричної напруги.

1. *The measurement, instrumentation, and Sensors Handbook / ed. John G. Webster, CRC Press, 1999.*
2. Fowler K. Part 7: analog-to-digital conversion in real-time systems // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2003. vol. 6. issue 3. P. 58–64.
3. Kester W. Which ADC Architecture Is Right for Your Application? // *Analog Dialogue*. – 2005. – Vol. 39. – № 2. – P.11–19 [Електронний ресурс] – Режим доступу url: <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-06/architecture.pdf>.
4. 24-Bit Sigma-Delta, Signal Conditioning ADC with 2 Analog Input Channels - AD7714 Data Sheets [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad7714/products/product.html>.
5. Кочан Р.В. Використання АЦП для вимірювання за методом заміщення // *Український метрологічний журнал*. – Харків. – 2010. – № 3. – С. 11–16.
6. Кочан Р. В. Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою: монографія / Р. В. Кочан. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 252 с.
7. Кочан Р. В., Кочан О. В., Клим Г. І. Метод коригування нелінійності дводіапазонних АЦП з безпосереднім вимірюванням спадів напруги на резисторах багаторезисторного подільника напруги // *Вісник Національного університету Львівська політехніка “Комп’ютерні системи та мережі”*. – Львів. – 2013. – № 773. – С. 59 – 63.
8. Кочан Р., Клим Г., Гоц Н. Метод корекції нелінійності дводіапазонних АЦП з ітераційним використанням багаторезисторного подільника напруги // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – Львів. – 2014. – № 75. – С. 11–18.
9. Кочан Р. В., Кочан О. В., Клим Г. І., Гоц Н. С. Комбінований метод корекції нелінійності дводіапазонних АЦП // *Вісник Національного університету Львівська політехніка “Автоматика, вимірювання та керування”*. – Львів. – 2014. – № 781. – С. 68–73.
10. ДСТУ 3744-98. Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні умови. Чинний від 01.07.2000 – К.: Держстандарт України, 1998. – 10 с.
11. AD584: Pin Programmable Precision Voltage Reference (Електронний ресурс) – <http://www.analog.com/en/references/voltage-references/ad584/products/product.html>.