

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

* Національний університет “Львівська політехніка”,
Кафедра спеціалізованих комп’ютерних систем

** Тернопільський національний економічний університет,
НДІ Інтелектуальних комп’ютерних систем

*** Національний університет “Львівська політехніка”,
Кафедра метрології стандартизації та сертифікації

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД КОРЕКЦІЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ДВОДІАПАЗОННИХ АЦП

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

Розроблено метод формування тестових точок для визначення та корекції інтегральної нелінійності багаторозрядних АЦП, що використовують багаторезисторний подільник напруги з усередненням спадів напруги на всіх резисторах. Проведено дослідження впливу похибки опору резисторів багаторезистивного подільника та випадкової похибки АЦП на невиключену похибку корекції інтегральної нелінійності.

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

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. It is investigated influence of resistors' error and random error of ADC on residual error of integral nonlinearity correction for method based on multi-resistor divider.

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

Вступ. Розповсюдження засобів обчислювальної техніки та алгоритмів цифрового опрацювання сигналів призвели до того, що аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) стали необхідним компонентом сучасних вимірювальних систем, а їх метрологічні характеристики часто визначають характеристики систем в цілому. Особливо це актуально у системах вимірювання електричних величин. Тому покращення параметрів АЦП є актуальною задачею.

Огляд літературних джерел.

Нішу прецизійних АЦП напруги постійного струму зайняли перетворювачі на базі сигма-дельта модулятора (СДМ) [1,2]. Їх високу точність забезпечують структурно-алгоритмічні методи підвищення точності – встановлення нуля і калібрування, що зменшує вплив на результат перетворення адитивної та мультиплікативної складових похибки перетворення. Тому похибка результату перетворення визначається в основному похибками джерела напруги калібрування, комутуючого пристрою і невиключеною похибкою АЦП. При використанні встановлення нуля та калібрування причиною невиключеної похибки АЦП є нелінійність його функції перетворення. Її рівень є досить значним для прецизійних АЦП, наприклад, нормоване значення похибки спричинене інтегральною нелінійністю для 24-х розрядного сигма-дельта АЦП типу AD7714 не перевищує 15 ppm. (0,0015%). Це відповідає лише 16-му розряду, отже априорі молодші 8 розрядів результату перетворення неточні та надлишкові. Тому, для підвищення точності перетворення АЦП понад 15 ppm., слід коригувати нелінійну складову його функції перетворення. Крім того, існують методи вимірювання (наприклад метод заміщення), точність яких визначається саме нелінійністю ФП АЦП [4]. В роботах [5] запропоновано метод визначення нелінійності функції перетворення (ФП) АЦП у тестових точках з високою точністю, що базується на усередненні спадів напруги на групах послідовно включених резисторів багаторезисторного подільника напруги. 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 знаходяться в нижній половині діапазону перетворення АЦП. Крім того в результаті дослідження базового методу виявлено залежність невиключеної похибки нелінійності від густини розміщення тестових точок. Це дозволило, після корекції похибок з допомогою встановлення нуля, калібрування та базового методу, виділити в діапазоні перетворення АЦП два субдіапазони – нижня та верхня 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 невиключена нелінійна складова похибки нижнього субдіапазону.

Запропонований у [6] метод формування тестових точок шляхом безпосереднього вимірювання спадів напруги на послідовно включених резисторах базується на корекції нелінійності ФП АЦП з допомогою базового методу в нижній половині діапазону перетворення де цей метод є ефективним. Похибка результатів вимірювання цих спадів напруги є відносно малою оскільки всі напруги попадають у нижній субдіапазон АЦП. В основному ці похибки визначається випадковою похибкою задіяного АЦП. Спади напруги на цих резисторах використовуються як тестові точки для всіх нижчих діапазонів перетворення АЦП. Такий метод хоча і забезпечує рівномірний розподіл тестових точок для нижніх діапазонів перетворення АЦП але точність кожної з них є значно нижчою, порівняно з базовим методом, через накопичення похибки при вимірюваннях.

У [7] 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 включених резисторів багаторезисторного подільника напруги, що відповідають базовому методу формування тестових точок найвищого діапазону. Це дозволило отримати значення тестових точок пропорційне напрузі калібрування найвищого діапазону зі строго відомим коефіцієнтом пропорційності. Зважаючи на те, що нижні діапазони перетворення АЦП принаймні в два рази 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 шляхом безпосереднього вимірювання спадів напруги на послідовно включених резисторах подільника. Недоліком цього методу є нерівномірний закон розподілу сформованих тестових точок по нижніх діапазонах АЦП.

Метою даної роботи є розробка та дослідження методу, який забезпечує поєднання вказаних методів з метою підвищення точності результатів аналого-цифрового перетворення.

1. Комбінований метод формування тестових точок

Зважаючи на ідентичність апаратного забезпечення, необхідного для реалізації методів [6, 7] пропонується поєднати їх для підвищення точності корекції нелінійної складової похибки АЦП. Для цього пропонується доповнити тестові точки сформовані з допомогою методу з ітераційним використанням багаторезисторного подільника напруги тестовими точками сформованими з допомогою методу з безпосереднім вимірюванням спадів напруги на послідовно включених резисторах багаторезисторного подільника напруги. Це дозволить одночасно отримати рівномірний розподіл сформованих тестових точок та підвищення точності більшості з них. Реалізація такого підходу вимагає зміни алгоритму керування ключами комутатора, а також опрацювання результатів перетворення. Алгоритм передбачає наступні кроки:

- реалізація методу з ітераційним використанням багаторезисторного подільника напруги [6];
- розрахунок відрізків діапазону, які можна заповнити додатковими тестовими точками з допомогою методу з безпосереднім вимірюванням спадів напруги на послідовно включених резисторах багаторезисторного подільника напруги;
- реалізація методу з безпосереднім вимірюванням спадів напруги на послідовно включених резисторах багаторезисторного подільника напруги [7] для додаткових тестових точок;
- розрахунок коригуючої функції.

2. Методика дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності АЦП

Експериментальні дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності вимагають збірцевого 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 дозволяє оцінити пропонований метод при різних типах ФП АЦП і параметрах подільника. Методика дослідження аналогічна до методики дослідження методів корекції описаних в [5...7].

В результаті дослідження, набираючи статистику, перевіряється 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 бралися на базі поліному четвертого степеня з випадковими коефіцієнтами, при чому критерієм придатності було неперевикнення максимального значення нелінійності по модулю 250 квантів. Приклади кривих, що імітують нелінійність, представлені на рис. 1. Також показано огинаючі, які представляють собою максимальні та мінімальні значення для 500 реалізацій експерименту.

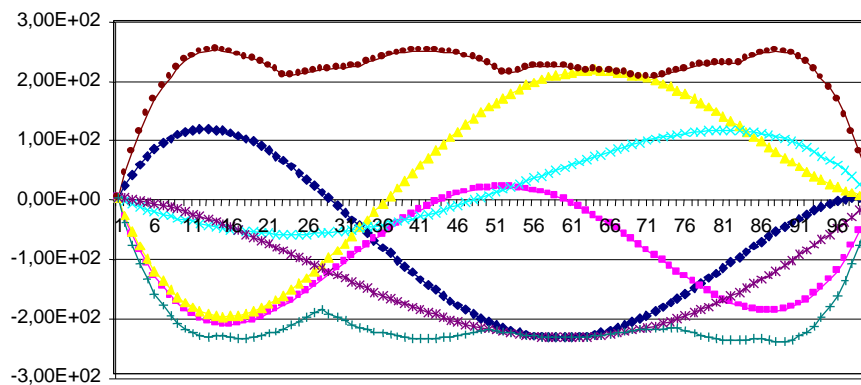


Рис. 1. Імітована нелінійність ФП АЦП

Верифікація програмного забезпечення здійснювалася шляхом підстановки «ідеальних» резисторів у подільник, і моделі АЦП без випадкової похибки. Отримане значення похибки не перевищувало 0,05 кванта, що можна пояснити похибкою заокруглення при обчисленнях. Отже розроблені моделі працюють коректно, їх можна використати для аналізу впливу параметрів компонентів схеми на невиключену похибку корекції нелінійності ФП АЦП.

Моделювання проводилося для подільника на 12 резисторів і максимальним відхиленням опору кожного резистора від номінального 1 та 2 %. Результати дослідження невиключеної похибки корекції нелінійності від вхідної напруги для резисторів з відхиленням опору $\pm 1\%$ представлено на рис. 2. Аналогічно як і для рис. 1 представлено огинаючі для 500 реалізацій обчислювального експерименту, а також кілька отриманих кривих. Отже максимальне значення невиключеної похибки не перевищує 2,5 кванти, що є значенням співмірним з дискретністю АЦП. Отже пропонований метод, як і базовий, є нечутливим до відхилень опорів резисторів від номінального значення.

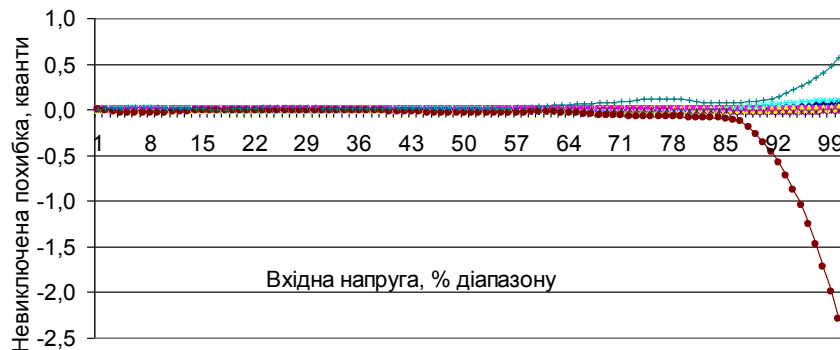


Рис. 2 Залежність невиключеної похибки нелінійності АЦП від вхідної напруги для відхилення

резисторів $\pm 1\%$ від номінального значення

Результати дослідження випадкової складової похибки АЦП (шуму) на невиключену похибку для амплітуди шуму ± 6 квантів представлена на рис.3. Загалом ці результати подібні до результатів дослідження методів [5...7], але максимальна невиключена похибка є дещо меншою.

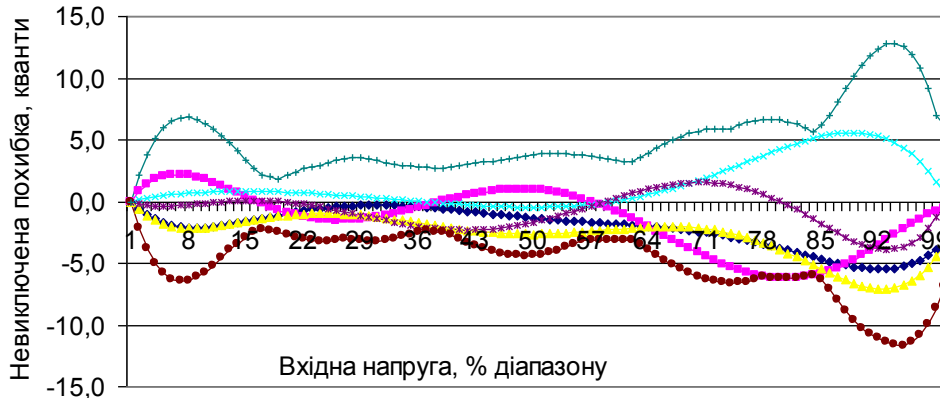


Рис. 3 Залежність невиключеної похибки від вхідної напруги для шуму АЦП ± 6 квантів

Залежність максимальної невиключеної похибки нижчого діапазону перетворення АЦП від величини випадкової похибки представлено на рис.4. Виходячи з лінійності цієї залежності можна зробити висновок, що для запропонованого методу при умові використання дванадцятирезисторного подільника напруги коефіцієнт впливу шуму АЦП не перевищує трьох, а його середнє значення становить 2,26.

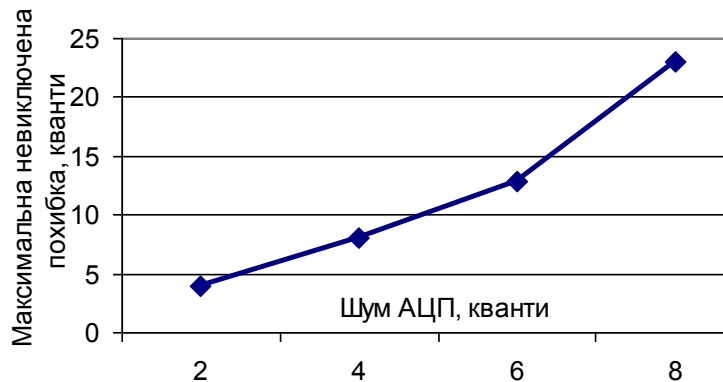


Рис.4. Залежність максимального значення невиключеної похибки АЦП від амплітуди шуму АЦП

Висновки

В результаті дослідження запропонованого методу формування точок визначення нелінійності ФП нижчого діапазону перетворення дводіапазонних АЦП можна зробити висновки:

- вплив відхилення опору резисторів від середнього значення на невиключену похибку є співмірний з дискретністю АЦП;
- домінуючий вплив на невиключену похибку має випадкова складова похибки АЦП з коефіцієнтом, який не перевищує 3;
- рівномірний розподіл сформованих тестових точок на нижньому діапазоні АЦП забезпечує відповідність до діючих стандартів на повірку АЦП [8], що дозволить повірять АЦП на нижньому діапазоні перетворення з використанням еталонної однозначної міри електричної напруги.

1. Fowler K. Part 7: analog-to-digital conversion in real-time systems. IEEE Instrumentation &

Measurement Magazine. 2003. Vol. 6. Issue 3. pp. 58-64. 2. 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>). 3. 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> . 4. Кочан Р.В. Використання АЦП для вимірювання за методом заміщення. Український метрологічний журнал. – Харків, 2010, № 3, ст. 11-16. 5. Кочан Р.В. Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою: монографія / Р.В. Кочан. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 252 с. 6. 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. Секція комп'ютерні системи та мережі. – Львів, 2013, № 773, ст. 59 – 63. 7. Кочан Р., Клим Г., Гоц Н. Метод корекції нелінійності дводіапазонних АЦП з ітераційним використанням багаторезисторного подільника напруги // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2014, № 75, ст. 11 – 18. 8. ДСТУ 3744-98. Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні умови. Чинний від 01.07.2000 – К.: Держстандарт України, 1998. – 10 с.