

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ НЕЛІНІЙНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Кочан Р.В., 2010

Проведено аналіз причин виникнення та аналітичне дослідження параметрів методичної похибки під час визначення нелінійності функції перетворення аналого-цифрових перетворювачів, зумовленої процедурами встановлення нуля та калібрування.

There is presented analysis of the sources and analytical investigation of the parameters of methodology error of definition the nonlinearity of conversion function of analog to digital converters. This methodology error is caused by null setting and calibration procedures.

Вступ. Останнім часом набули широкого розповсюдження цифрові методи обробки вимірювальної інформації, які мають багато незаперечних переваг. Їх використання вимагає використання в складі вимірювальних каналів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Постійне ускладнення технологічного обладнання та зниження ціни засобів обчислювальної техніки призвело до різкого збільшення кількості експлуатованих АЦП. Найбільшого поширення набули АЦП напруги в інтегральному виконанні, які випускаються багатьма фірмами. Доволі часто нормування похибок таких АЦП є неповним, тому широкого розповсюдження набули структурно-алгоритмічні методи підвищення їх точності – автоматичне встановлення нуля і калібрування [1, 2], які дають змогу значно зменшити вплив на результат перетворення вхідної фізичної величини адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП. Підвищення вимог до точності вимірювання фізичних величин вимагає корегування також нелінійної складової похибки АЦП. Однак, як сказано в [2], “поки що не існує простого і зручного методу корегування нелінійної складової похибки АЦП”. Це вказує на недостатнє вивчення процесу корегування нелінійної складової похибки АЦП, першим етапом якого є її визначення з необхідною точністю та метрологічною надійністю.

Постановка задачі дослідження. Мета роботи – дослідити специфічну методичну похибку визначення нелінійної складової похибки функції перетворення (ФП) АЦП, яка виникає під час використання процедур автоматичного встановлення нуля і калібрування перед процедурами визначення нелінійної складової похибки АЦП. Для дослідження цієї методичної похибки необхідно знайти причини її виникнення, її вплив на результат корегування похибок аналого-цифрового перетворення і методи його усунення або зменшення до прийняттого рівня.

Виникнення методичної похибки під час визначення нелінійності ФП АЦП. Розглянемо детальніше процедури автоматичного встановлення нуля і калібрування. Під час виконання процедури встановлення нуля на вхід АЦП подають нульову напругу (вхід АЦП закорочують). Відхилення результату перетворення від нуля запам’ятовують як код U_0 . Під час виконання процедури калібрування на вхід АЦП подають напругу E_{REF} міри (зазвичай, прецизійного стабілізатора), значення якої відоме з високою точністю і наближається до 100 % діапазону перетворення. Результат перетворення запам’ятовують як код E_{REFADC} . Подальшу обробку результатів поточних перетворень переважно ведуть з використанням формули [2]:

$$U_X^K = E_{REF} \frac{U_{XADC} - U_0}{E_{REFADC} - U_0}, \quad (1)$$

де U_{XADC} – результат поточного аналого-цифрового перетворення у код вхідної напруги; U_X^K – скоригований, вільний від впливу адитивної та мультиплікативної похибки, результат поточного аналого-цифрового перетворення.

Формула (1) отримана шляхом розв'язання системи трьох рівнянь, два з яких описують вимірювальні перетворення під час виконання процедур встановлення нуля і калібрування, а третє – під час поточного перетворення. Часто використовують також різні модифікації (1), які не змінюють фізичну суть процесу корегування адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП.

Процес корегування адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП можна подати і графічно. Рис. 1 ілюструє поетапно процес корегування адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП. На першому етапі, який відповідає операціям віднімання в чисельнику і знаменнику в (1), відбувається усунення впливу адитивної похибки на результат перетворення. Графічно це відповідає зсуву дійсної ФП АЦП на рис. 1, згідно з лівою стрілкою. За такого зсуву жодна методична похибка виникнути не може.

На другому етапі, який відповідає операції множення в (1), відбувається усунення впливу мультиплікативної похибки на результат перетворення. Графічно це відповідає повороту дійсної ФП АЦП на рис. 1 стосовно початку координат, згідно з правою стрілкою. За такого повороту дійсна крива ФП АЦП змінюється, що викликає появу методичної похибки Δ_{MET} визначення нелінійної складової похибки ФП АЦП. Ця методична похибка з'являється у тому випадку, коли процедури корегування нелінійної складової похибки АЦП проходять після виконання процедур корегування адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП і використовують скориговані результати перетворення.

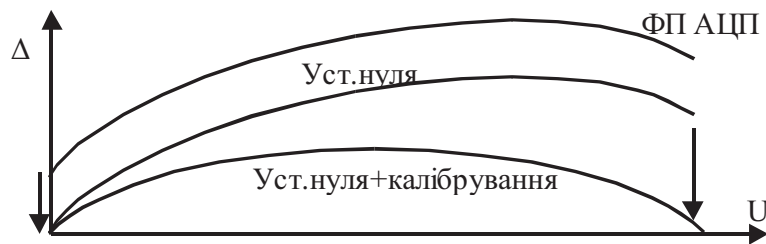


Рис. 1. Графічна ілюстрація поетапного процесу корегування адитивної та мультиплікативної складових похибки АЦП.

Для оцінки впливу цієї методичної похибки на результат корегування нелінійної складової похибки АЦП її необхідно подати аналітично.

Аналітичне визначення методичної похибки під час визначення нелінійності ФП АЦП. Подамо значення поточного результату аналого-цифрового перетворення U_{XADC} як суму U_X поданої на вхід АЦП напруги та відповідно адитивної Δ_A , мультиплікативної Δ_M та нелінійної Δ_{NL} складових похибки АЦП:

$$U_{XADC} = U_X + \Delta_A + \Delta_M \frac{U_X}{E_{REF}} + \Delta_{NL}. \quad (2)$$

Мультиплікативна складова Δ_M похибки АЦП в (2) представлена за умови, що напруга міри E_{REF} відповідає діапазону перетворення АЦП.

Тим самим представимо результат аналого-цифрового перетворення напруги міри E_{REFADC} , що слугує для калібрування АЦП, як суми дійсного значення E_{REF} , поданої на вхід АЦП напруги міри та відповідно адитивної Δ_A та мультиплікативної Δ_M складових похибки:

$$E_{REFADC} = E_{REF} + \Delta_A + \Delta_M \frac{E_{REF}}{E_{REF}}. \quad (3)$$

Нелінійна складова Δ_{NL} похибки АЦП в (3) не входить, тому що напруга міри E_{REF} відповідає діапазону перетворення АЦП.

Як було вже сказано вище, код N_0 відповідає адитивній складовій похибки Δ_A , при встановленні нуля ні мультиплікативна Δ_M , ні нелінійна Δ_{NL} складові похибки на цю процедуру фактично не впливають:

$$N_0 = \Delta_A. \quad (4)$$

Підставимо (2)...(4) в (1):

$$U_X^K = E_{REF} \frac{(U_X + \Delta_A + \Delta_M \frac{U_X}{E_{REF}} + \Delta_{NL}) - \Delta_A}{(E_{REF} + \Delta_A + \Delta_M \frac{E_{REF}}{E_{REF}}) - \Delta_A}. \quad (5)$$

Розкривши в (5) дужки та спростивши вираз, отримаємо

$$U_X^K = U_X \frac{1 + \Delta_M \frac{1}{E_{REF}} + \frac{\Delta_{NL}}{U_X}}{1 + \Delta_M \frac{1}{E_{REF}}}. \quad (6)$$

Член $\Delta_M \frac{1}{E_{REF}}$, що входить у знаменник рівності (6), набагато менший за одиницю, тому ним переважно нехтують. У такому разі спростивши, отримаємо

$$U_X^K = U_X (1 + \frac{\Delta_{NL}}{U_X}) = U_X + \Delta_{NL}. \quad (7)$$

Отже, згідно з (7), корегування нелінійної складової похибки АЦП можна вести незалежно від попереднього корегування адитивної та мультиплікативної складових його похибки. Таке розділення процедур корегування дуже вигідне, воно дає змогу істотно спростити необхідне програмне забезпечення і його відлагодження.

Однак власне останнє спрощення і веде до появи методичної похибки Δ_{MET} . Її значення можна оцінити в такий спосіб. Знайдемо різницю між (6) і (7):

$$\Delta_{MET} = U_X \frac{1 + \Delta_M \frac{1}{E_{REF}} + \frac{\Delta_{NL}}{U_X}}{1 + \Delta_M \frac{1}{E_{REF}}} - U_X (1 + \frac{\Delta_{NL}}{U_X}). \quad (8)$$

Винісши у (8) за дужки U_X , звівши до спільного знаменника і врахувавши, що $\Delta_M \frac{1}{E_{REF}}$ набагато менше за одиницю, отримаємо

$$\Delta_{MET} = U_X \left(\frac{-\Delta_M \Delta_{NL} \frac{1}{E_{REF} U_X}}{1 + \Delta_M \frac{1}{E_{REF}}} \right) \approx \frac{\Delta_M \Delta_{NL}}{E_{REF}}. \quad (9)$$

Для зручності аналізу похибок перейдемо від абсолютних похибок Δ_M , Δ_{NL} , Δ_{MET} до відносних. Для цього запишемо

$$\Delta_M = \frac{\delta_M \times E_{REF}}{100\%}, \quad \Delta_{NL} = \frac{\delta_{NL} \times E_{REF}}{100\%}, \quad (10)$$

і підставимо (10) в (9). Отримаємо

$$\Delta_{MET} = \frac{\delta_M E_{REF} \times \delta_{NL} E_{REF}}{100 \times 100 \times E_{REF}} = \frac{\delta_M E_{REF} \times \delta_{NL}}{10000}. \quad (11)$$

Врахувавши, що

$$\delta_{MET} = \frac{\Delta_{MET} \times 100\%}{E_{REF}}, \quad (12)$$

і підставивши (11) в (12), отримаємо

$$\delta_{MET} = \frac{\delta_M \times \delta_{NL}}{100}. \quad (13)$$

Отже, ми отримали аналітичний вираз, за яким можна оцінити відносне значення методичної похибки, яка виникає під час використання процедур традиційного автоматичного встановлення нуля і калібрування перед процедурами визначення нелінійної складової похибки АЦП.

Дослідження впливу методичної похибки на точність корегування нелінійності ФП АЦП. Як бачимо з (13), досліджувана методична похибка визначається добутком двох похибок, тобто є величиною другого порядку малості по відношенню до результату аналого-цифрового перетворення. Тому її вплив на похибку корегування нелінійної складової похибки АЦП для традиційних АЦП, які мають порівняно малу мультиплікативну похибку через використання апаратних засобів її корегування (змінні резистори для налаштування схеми), і для сучасних прецизійних АЦП достатньо малий і його можна не брати до уваги. Зокрема, перспективними елементами для побудови прецизійних АЦП низьких напруг є інтегральні мікросхеми 24-х розрядних сігма-дельта АЦП типу AD77xx [3]. Наприклад, для АЦП типу AD7712 [4] мультиплікативна похибка визначається похибкою підгонки вбудованого джерела опорної напруги, яка не перевищує 0,1 %. Максимальна похибка інтегральної нелінійності цих АЦП не перевищує 0,0015 %. У цьому випадку методична похибка від розділення процедур корегування не перевищуватиме $1,5 \times 10^{-6}$ %, чим можна знехтувати навіть для найточніших вимірювань.

Однак існує багато АЦП, виконаних як на дискретних компонентах, так і на інтегральних, що можуть бути використані тільки завдяки обробці результатів перетворення за допомогою формули (1) або аналогічної їй. Переважно такі АЦП для зменшення складності та собівартості шляхом економії комплектуючих, а також спрощення процедур налаштування не мають апаратних засобів корегування жодних похибок. Для таких АЦП методична похибка від розділення процедур корегування різних складових похибки перетворення може істотно обмежувати можливості підсистеми корегування похибки нелінійності АЦП. Наприклад, в шестиканальних модулях перетворення аналогових сигналів типу МПАС розробки ВО Хартрон [5] АЦП побудовані на основі перетворювачів напруга-частота, які використовують процеси заряду-розряду конденсатора. Використані конденсатори мають допустимі відхилення ± 20 %. При цьому в кожному вимірювальному каналі модуля є тільки один змінний резистор налаштування схеми – для налаштування вихідної напруги E_{REF} міри калібрування АЦП до номінального значення його діапазону перетворення. Отже, допустима мультиплікативна похибка такого АЦП буде перевищувати ± 20 %. Максимальна похибка інтегральної нелінійності такого АЦП не перевищує 0,2 %. Методична похибка від розділення процедур корегування у цьому випадку становитиме 0,04%, чим при корегуванні нелінійності нехтувати не можна, і що дуже істотно обмежує можливості корегування похибки нелінійності такого АЦП.

Для швидкої оцінки досліджуваної методичної похибки визначення нелінійної складової похибки ФП АЦП на рис. 2 зображено графік залежності максимального значення відносної методичної похибки δ_{MET} (апліката) від максимальної відносної мультиплікативної похибки δ_M (абсциса) і максимальної відносної похибки нелінійності δ_{NL} (ордината). Усі осі на графіку рис. 2 зображено в логарифмічному масштабі. Тому сам графік рис. 2 являє собою дві площини,

симетрично розміщені стосовно бісектриси кута між абсцисою і ординатою. Для прикладу на графіку показано визначену максимальну методичну похибку $\delta_{MET} = 0,01\%$ для максимальної відносної мультиплікативної похибки $\delta_M = 1\%$ і максимальної відносної похибки нелінійності $\delta_{NL} = 1\%$.

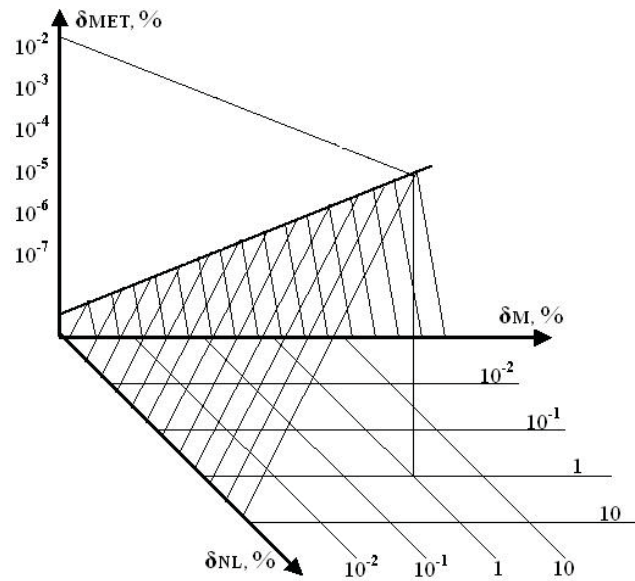


Рис. 2. Графік залежності максимального значення відносної методичної похибки δ_{MET} від максимальної відносної мультиплікативної похибки δ_M і максимальної відносної похибки нелінійності δ_{NL}

Висновки. Як показали проведені дослідження, за послідовного використання процедур корегування адитивної, мультиплікативної та нелінійної похибок виникає специфічна методична похибка визначення нелінійної складової похибки ФП АЦП. Значення цієї методичної похибки прямо пропорційне до значення мультиплікативної похибки і не залежить від значення адитивної похибки. Ця методична похибка може у деяких випадках істотно обмежити можливості методів визначення нелінійної складової похибки ФП АЦП, що робить неможливим її корегування з високою точністю. Для усунення цієї методичної похибки слід використовувати методи корегування, що передбачають одночасне (за виконання одних і тих самих процедур) визначення параметрів усіх складових похибки ФП АЦП – і адитивної, і мультиплікативної, і нелінійної. Відомі варіанти таких методів (наприклад, розв'язання системи багатьох нелінійних рівнянь з невідомими коефіцієнтами) вимагають використання складного програмного забезпечення, його відлагодження і мають значну обчислювальну складність. Тому доцільним є аналіз затрат на їх використання. Можливо економічно виправданим є зменшення впливу цієї методичної похибки на точність корегування зменшенням мультиплікативної похибки апаратними методами за рахунок додаткових змінних резисторів.

1. Земельман М.А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах // Измерительная техника. – 1964. – №9. 2. Кестлер У. Аналого-цифровое преобразование. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с. 3. Analog to Digital Converters. (Електронний ресурс) <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/products/index.html>. 4. AD7712: CMOS, 24-Bit Sigma-Delta, Signal Conditioning ADC with 2 Analog Input Channels. (Електронний ресурс) <http://www.analog.com/en/other-products/militaryaerospace/ad7712/products/product.html>. 5. Анализ схемотехнических решений и расчет метрологических характеристик измерительных каналов ПТК АСУ ТП АЭС. Этап 2: Технический отчет ВЕРЕС.01265.Б1.02.2-1.М. АО "ЛьвівОРГРЭС", 1996.