

УДК 621.317.7.089.6

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЦП, ОСНАЩЕНИХ ПІДСИСТЕМОЮ МЕТРОЛОГІЧНОЇ САМОПЕРЕВІРКИ

О Кочан Роман, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра спеціалізованих комп’ютерних систем,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Сформульовано проблему забезпечення єдності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах масового використання аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Запропоновано метод її вирішення за рахунок вбудованої підсистеми метрологічної самоперевірки, яка оснований на вимірюванні нелінійної складової систематичної похибки АЦП. Запропоновано структуру такої підсистеми для восьмидіапазонного АЦП. Сформульовано критерії оцінки похибок результатів аналого-цифрового перетворення за результатами самоперевірки АЦП.

Сформулировано проблему обеспечения единства результатов аналого-цифрового преобразования при условии массового использования аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Предложено метод её решения за счет встроенной подсистемы метрологической самопроверки, которая базируется на измерении нелинейной составляющей систематической погрешности АЦП. Предложено структуру такой подсистемы для восьмидиапазонного АЦП. Сформулированы критерии оценки погрешности результатов аналого-цифрового преобразования по результатам самопроверки АЦП.

There is formulated the problem of traceability of analog to digital conversion results in the condition of large-scale implementation of analog to digital converters (ADC). It is proposed the method of solving this problem by embedding the metrology testing subsystem into ADC, which is based on measurement the nonlinear component of systematic error of ADC. There is proposed the structure of such subsystem for eight-range ADC. Also there is formulated the approach of error evaluation of analog to digital conversion results by self testing results.

Вступ. Постійне вдосконалення та здешевлення пристроїв обчислювальної техніки привело до широкого їх застосування в найрізноманітніших галузях. Тому одним з найпоширеніших елементів каналів вимірювання, зв'язку, обробки сигналів став аналого-цифровий перетворювач (АЦП) [1], який перетворює аналогові інформаційні сигнали первинних перетворювачів (давачів, сенсорів) різноманітних фізичних величин на відповідний код (найчастіше двійковий). Більшість АЦП використовують у складі систем – інформаційно-вимірювальних, вимірювально-керуючих, технічної діагностики, технічного зору, розпізнавання та інших [2, 3]. Тому АЦП є однією з важливих ланок інформаційних технологій. Його діапазон перетворення має відповідати вхідному сигналу, тобто визначається зовнішніми відносно АЦП факторами. А поточна похибка великою мірою визначається властивостями самого АЦП.

Завдяки досягненням мікроелектроніки точність, чутливість, габарити, вартість, споживана енергія та інші технічні характеристики інформаційно-вимірю-

вальних і керуючих систем систем істотно покращилися. Розвиток технологій мікроелектроніки привів до широкого випуску АЦП в мікроелектронному виконанні. Сьогодні більшість мікроконтролерів, що тиражуються багатомільйонними партіями, мають вбудовані АЦП [4]. Переважно такі вбудовані АЦП мають порівняно низькі та ненормовані метрологічні параметри (8 – 12 розрядів, ненормована похибка перетворення, температурні та часові дрейфи), але деякі фірми, зокрема Analog Devices, випустили спеціальні базові вузли прецизійних вимірювальних приладів і блоків систем – мікроконвертори, в які входять мікроконтролери та прецизійні 24-розрядні АЦП. Тому виникає питання: чи відповідає нинішня система метрологічного забезпечення вимогам масового випуску АЦП?

1. Негативні наслідки масового випуску АЦП. Оскільки результати перетворення АЦП в процесі обробки потрібні для прийняття різноманітних рішень, важливо, щоби вони адекватно відображали фізичні величини, які надходять на вхід АЦП. Така необхідна

властивість АЦП тісно пов'язана з проблемою встановлення, зберігання та відтворення фізичних величин [5]. Отже, АЦП в більшості випадків використання є метрологічно значущим вузлом і має відповідати всім вимогам метрології [6]. Однією з фундаментальних вимог метрології є єдність вимірювань, яка, за ДСТУ 2681-94, визначається як стан вимірювань, за якого їх результати виражають в узаконених одиницях і похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю [7]. Щодо АЦП вимога єдності вимірювань полягає в тому, що їх параметри, зокрема функція перетворення (ФП), повинні завжди відповідати вимогам стандартів [8–10] і залишатися у допустимих межах під час експлуатації. Отже, показник якості АЦП – похибка перетворення – з огляду на необхідність дотримання єдності вимірювань, слід нормувати та контролювати як під час його випуску з виробництва, так і в процесі експлуатації. Тому широкомасштабне тиражування АЦП, особливо їх використання у вбудованих системах, суперечить вимогам забезпечення єдності вимірювань та їх метрологічної надійності. До того ж під час випуску мікроелектронних АЦП, за даними [11], трудомісткість тестування та підгонки досягає 60 % всієї трудомісткості випуску. Тому масовий випуск АЦП актуалізує питання відповідного метрологічного забезпечення як при випуску з виробництва, так і в процесі довготривалої експлуатації.

Звичайно, не всі АЦП, що входять до складу мікроконтролерів, справді використовуються, а серед тих, що використовуються, не всі потребують метрологічного обслуговування. Однак неможливо наперед визначити, які з АЦП (із тих, що входять до складу мікроконтролерів, і тих, що випускаються як окремі вузли) будуть використані як елементи пристроїв і систем, де метрологічна надійність результатів їх перетворення матиме вирішальне значення. Хоча це протиріччя існувало раніше, порівняно невеликі кількості АЦП в експлуатації істотно полегшували його вирішення. Сьогодні це протиріччя значно загострилося.

Часто, через складність доступу, масовість і трудомісткість проведення періодичної метрологічної перевірки та інших видів метрологічного обслуговування, цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, які входять у вбудовані вимірювально-керуючі системи автомобілів, автономних метеорологічних станцій тощо) не охоплені метрологічним наглядом, що призводить до ймовірного порушення єдності вимірювань.

Але, якщо жорстко ставити вимоги обов'язкового проведення періодичної метрологічної перевірки всіх АЦП, то пропускна здатність сучасної системи державної та відомчої метрологічної перевірки цілком недостатня – виникає суперечність між трудомісткістю перевірки маси АЦП та забезпеченням єдності вимірювань і метрологічної надійності цих АЦП. Тому забезпечення метрологічного обслуговування великої кількості АЦП, зокрема вбудованих в різні системи, є актуальним завданням. Однак, щоб вирішити цю проблему за допомогою автоматизації метрологічної перевірки, потрібні значні капіталовкладення і це екстенсивний шлях.

Крім трудомісткості перевірки з позиції органів метрологічного нагляду, існує трудомісткість з погляду користувачів інформаційно-вимірювальних і керуючих систем. Адже традиційна періодична метрологічна перевірка вимагає зупинки системи, вилучення АЦП, доставки до перевірної лабораторії, самої метрологічної перевірки, зворотної доставки, встановлення у систему та запуску системи. Це спонукає користувачів систем ухилятися від метрологічного нагляду, що, крім загрози втрати єдності вимірювань, підвищує небезпеку техногенних катастроф. Виникає наступна суперечність – між витратами на метрологічне обслуговування і забезпеченням єдності та метрологічної надійності вимірювань.

Ще одне протиріччя виникає між неперервним характером багатьох сучасних технологічних процесів та необхідністю вилучення АЦП зі складу відповідної вимірювально-керуючої системи на час періодичної метрологічної перевірки. Зупинка неперервного технологічного процесу призводить до матеріальних збитків, тому міжперевірний інтервал намагаються зробити якнайбільшим, що формує чергове протиріччя, адже збільшення міжперевірного інтервалу зменшує метрологічну надійність результату перетворення.

Поширення систем, в складі яких є АЦП, також викликає протиріччя, пов'язане з кваліфікацією обслуговуючого персоналу – систематично збільшується частка низькокваліфікованих, з погляду метрології, осіб (хоча висококваліфікованих в інших областях знань), які не можуть правильно оцінити небезпеку, пов'язану зі зростанням похибки перетворення АЦП. Навіть розробники електронної апаратури іноді не проявляють достатньої пильності, не враховують дії впливаючих величин, плутають точність з розрядністю [12], а головне – довіряють параметрам, вказаним у

рекламних матеріалах. Більшість фірм-виробників мікроелектронних АЦП не надають повного переліку їх параметрів (зокрема, практично жодна фірма не вказує параметрів часової стабільності своїх АЦП) і не зазначає, для яких умов експлуатації ці параметри дійсні. Виробники вбудованих у мікроконтролери АЦП вказують мінімум параметрів, який недостатній для розроблення АЦП із нормованими метрологічними характеристиками. В описі таких АЦП основна увага приділяється їх інтерфейсу (командам керування та отримання результату перетворення), а не метрологічним параметрам. Пристрій або систему часто проектують спеціалісти з програмного забезпечення, які на метрологічні характеристики просто не звертають уваги [13].

Як бачимо, масовий випуск і використання АЦП привів до загострення наявних і появи нових суперечностей, усунення яких вимагає розв'язання деяких науково-технічних задач. Ці задачі взаємно пов'язані, їх окреме розв'язання лише незначно покращить ситуацію, що склалася. Отже, розглянуті протиріччя формують проблему забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах обмеження трудомісткості метрологічного обслуговування АЦП.

Як видно з викладеного, ця проблема сьогодні значно загострилася. Її вирішення має цілий ряд аспектів – наукові, технічні, економічні, організаційні тощо. Зрозуміло, першими треба з'ясувати наукові та технічні аспекти. Відповідно до [14] спочатку сформулюємо ідеальне вирішення цієї проблеми – оснащення кожного АЦП простою та надійною вбудованою підсистемою метрологічної самоперевірки, що забезпечила би його бездемонтажну періодичну метрологічну перевірку в процесі експлуатації, без необхідності зупинки системи, в яку АЦП входить. Додатковою вимогою до такої підсистеми метрологічної самоперевірки є її економічна ефективність, під якою будемо розуміти порівняно незначне зростання собівартості вимірювального каналу, викликане наявністю підсистеми метрологічної самоперевірки.

2. Підхід до побудови підсистеми метрологічної самоперевірки. Конструктивно-технологічні методи підвищення точності та метрологічної надійності АЦП є дуже важливими і широко використовуються. Однак вони мають певні обмеження. Деградаційні процеси під час експлуатації АЦП в робочих умовах практично обов'язково призводять до зростання похибки пере-

творення АЦП. Тому ці методи доцільно доповнити іншими – організаційними (періодична метрологічна перевірка) та структурно-алгоритмічними (метрологічна самоперевірка, самотестування, самодіагностування).

Широко застосовують встановлення нуля і калібрування АЦП [15], які дають змогу визначити та відкоригувати адитивну і мультиплікативну похибки АЦП. Ці операції слід обов'язково включити до складу підсистеми метрологічної самоперевірки, вони повністю відповідають всім її вимогам. Однак вважати встановлення нуля і калібрування заміником періодичної метрологічної перевірки, як це зроблено в [16], не можна. Адже існує похибка нелінійності, яка може змінюватися під впливом температурних впливів, старіння елементів, змін опору ізоляції, несправності блока живлення тощо. Як правило, вказані причини ведуть до змін значень всіх складових похибки АЦП, однак встановлення нуля і калібрування відкоригує зростання адитивної та мультиплікативної похибки, а надмірна нелінійність залишиться невиявленою – встановлення нуля і калібрування її “сховають”. Цей варіант показано на рис. 1. Крива 1 відповідає похибці ФП АЦП. В результаті встановлення нуля АЦП відбувається адитивний зсув ФП АЦП згідно з лівою стрілкою, тоді ФП АЦП відповідає кривій 2. В результаті калібрування АЦП відбувається поворот ФП АЦП за правою стрілкою, тоді ФП АЦП відповідає кривій 3. Якщо похибка нелінійності ФП АЦП не перевищує допустимого значення (пряма 4), то похибка АЦП загалом не перевищує допустимої (пряма 5). Однак, якщо під дією умов експлуатації, несправності самого АЦП або елементів, що його оточують, нелінійна складова похибки АЦП зростає понад нормоване значення (крива 6), то, як видно з рис. 1, похибка результату перетворення може перевищувати допустиме значення, хоча цей факт не виявить підсистема метрологічної самоперевірки, яка базується лише на результатах встановлення нуля і калібрування.

Отже, встановлення нуля і калібрування для підсистеми метрологічної самоперевірки АЦП є операціями необхідними, але недостатніми. Їх слід доповнити операціями контролю похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП у межах всього діапазону перетворення. Для низькоточних АЦП такий контроль не викликає труднощів – досить доповнити схему подільником напруги, під'єднаним до джерела напруги калібрування, і ключами, що приєднують виходи

подільника до входу АЦП. Але похибка перевірки визначатиметься похибкою підгонки подільника та його дрейфом. Підвищити точність цього методу можна за рахунок періодичної автономної метрологічної перевірки подільника, для цього можна не зупиняти роботу АЦП. Аналогічним за суттю є метод [17], що

передбачає оснащення АЦП кодованою мірою електричної напруги, яку періодично перевіряють в лабораторних умовах. Ці методи, без використання спеціальних подільників з високою стабільністю коефіцієнта поділу в робочих умовах експлуатації, придатні тільки для АЦП низької точності.

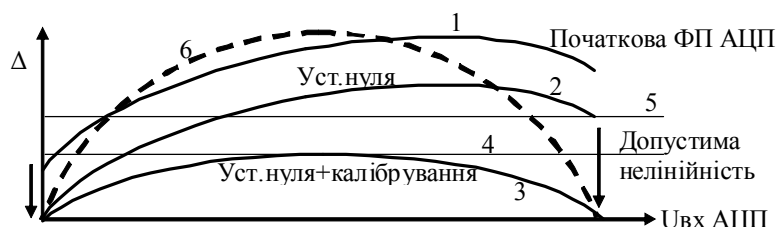


Рис. 1. Зміни похибки ФП АЦП при корекції адитивної та мультиплікативної складових похибки

Стандарт IEEE1241 [18] пропонує гістограмний метод як універсальний для визначення інтегральної та диференціальної складових систематичної похибки нелінійності АЦП. Однак, як показано в [19], необхідність численних аналого-цифрових перетворень не дає можливості використати його для метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП. Для 12–16-розрядних АЦП двотактного інтегрування час самоперевірки (від 1 до 20 годин при періоді тестового сигналу від 10 до 200 хвилин, під час якого можна виконувати тільки перетворення тестового сигналу і не можна “відволікатися” на виконання основних обов’язків) також практично неприйнятний.

У [20] запропоновано концепцію побудови підсистеми метрологічної самоперевірки АЦП на основі методів визначення нелінійності ФП АЦП [21–25], які базуються на методі відношення. Ці методи теж використовують під’єднаний до джерела напруги калібрування подільник напруги, але забезпечують високу точність у разі використання низькоточних резисторів. При їх реалізації перетворюють на код спади напруги на резисторах подільника. Тоді для лінійного АЦП сума кодів результатів перетворення напруги N_{Ri} на кожному з n резисторів подільника $R1...Rn$ (однакового номінального значення опору), дорівнює коду результату перетворення напруги $N_{\Sigma R}$ на всіх резисторах $R1...Rn$ разом. Але реально виникає відхилення Δ_N , яке відповідає сумі похибок нелінійності ФП АЦП при всіх перетвореннях. Звідси можна знайти похибку нелінійності ФП АЦП (значення відхилення ФП АЦП від лінійної)

$$\Delta_{NL} = \frac{1}{n} \Delta_N = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n N_{Ri} - N_{\Sigma R} \right). \quad (1)$$

Вимірюючи спади напруги на відповідних групах резисторів, знаходять значення відхилення ФП АЦП від лінійної для всіх дільників числа n . За отриманими значеннями похибки нелінійності ФП АЦП у ряді точок діапазону перетворення знаходять коригуючу функцію для цього діапазону перетворення. Наприклад, для $n=12$, маємо тестові точки 1/12 (перетворення на код спадів напруги на кожному резисторі), 1/6 (перетворення на код спадів напруги на групах з двох резисторів), 1/4 (перетворення на код спадів напруги на групах з трьох резисторів), 1/3 (перетворення на код спадів напруги на групах з чотирьох резисторів) і 1/2 (перетворення на код спадів напруги на групах з шести резисторів). Разом з результатами встановлення нуля та калібрування це дає змогу коригувати похибку нелінійності ФП АЦП в сімох точках діапазону, але всі тестові точки розміщені в нижній половині діапазону перетворення. В [24] показано, що відхилення опору резисторів від середнього $\pm 1\%$ веде до похибки знайдених значень нелінійності, не більшої за $10^{-5}\%$.

Метою роботи є аналіз функціонування АЦП, оснащених підсистемою бездемонтажної метрологічної самоперевірки, на основі пропонованих в [21–25] методів визначення похибки нелінійності їх ФП та формування вимог до методів метрологічного забезпечення таких АЦП. Для цього спочатку розглянемо приклад організації на базі пропонованих

методів підсистеми самоперевірки прецизійних 24-розрядних 8-діапазонних сигма-дельта АЦП, які входять до складу мікроконверторів серії ADUC8xx [26].

3. Приклад організації підсистеми самоперевірки прецизійних АЦП. Для усунення основного недоліку методу [21] – отримання тестових точок у верхній половині діапазону перетворення АЦП в [22] запропоновано використати подільник, в якому чотири резистори $R1...R4$ перемикаються, міняючись місцями (рис. 1). Тестова точка $1/4$ діапазону перетворення реалізується перетворенням на код спадів напруги на резисторах $R1, R2, R3, R4...R10$ окремо, тестова точка $1/2$ діапазону перетворення реалізується перетворенням на код спадів напруги на парах резисторів $R1 + R2$ і $R3 + R4...R10$, а тестова точка $3/4$ діапазону перетворення реалізується перетворенням на код спадів напруги на трійках резисторів $R1 + R2 + R3, R2 + R3 + R4...R10, R1 + R2 + R3$ і $R1 + R3 + R4...R10$. Для реалізації останніх двох варіантів резистори в парах $R1, R2$ і $R3, R4...R10$ за допомогою ключів міняються місцями, як це показано на рис. 2. Отже, з урахуванням встановлення нуля і калібрування, на основному діапазоні перетворення, згідно з вимогами [8–10], маємо п'ять тестових точок.

Якщо використати для такого АЦП зовнішнє джерело опорної напруги та налаштувати його на вихідну напругу $U_{REF} = 2,56V$, то діапазони перетворення АЦП будуть

2,56V; 1,28V; 0,64V; 0,32V; 0,16V; 0,08V; 0,04V; 0,02V.

На старшому (основному) діапазоні 2,56V

метрологічну самоперевірку виконуємо в п'яти точках (0, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % діапазону перетворення). На решті діапазонів метрологічну самоперевірку здійснюємо в трьох точках (0, 50 %, 100 % діапазону перетворення). В такому випадку подільник рис. 2, необхідний для проведення метрологічної самоперевірки, повинен складатися з 10 резисторів – $R1 = R2 = R3, R4 = R1/2, R5 = R1/4, R6 = R1/8, R7 = R1/16, R8 = R1/32, R9 = R10 = R1/64$.

Спочатку виконуємо метрологічну самоперевірку на старшому (основному) діапазоні. Для цього проводимо встановлення нуля та калібрування АЦП, потім визначаємо похибку нелінійності АЦП у точці 25 % діапазону перетворення – перетворюємо на код спади напруги на резисторах $R1, R2, R3, R4...R10$ (рис. 2) та обчислюємо похибку нелінійності згідно з (1). Далі визначаємо похибку нелінійності в точці 50 % діапазону перетворення, для чого перетворюємо на код спади напруги на резисторах $R1 + R2, R3...R10$ та знову обчислюємо похибку нелінійності згідно з (1). Останньою на старшому діапазоні визначаємо похибку нелінійності в точці 75 % діапазону перетворення, для чого спочатку перетворюємо на код спади напруги на резисторах $R1 + R2 + R3, R2 + R3 + (R4...R10)$, потім перемикаємо подільник $R1...R10$ так, щоби $R1$ і $R2$, а також $R3$ і $R4...R10$ помінялися місцями (ліве положення перемикачів на рис. 2) та перетворюємо на код спади напруги на резисторах $R2 + R1 + (R4...R10)$ і $R1 + (R4...R10) + R3$. Якщо необхідно, враховуємо спади напруги на опори контактів перемикачів згідно з [25].

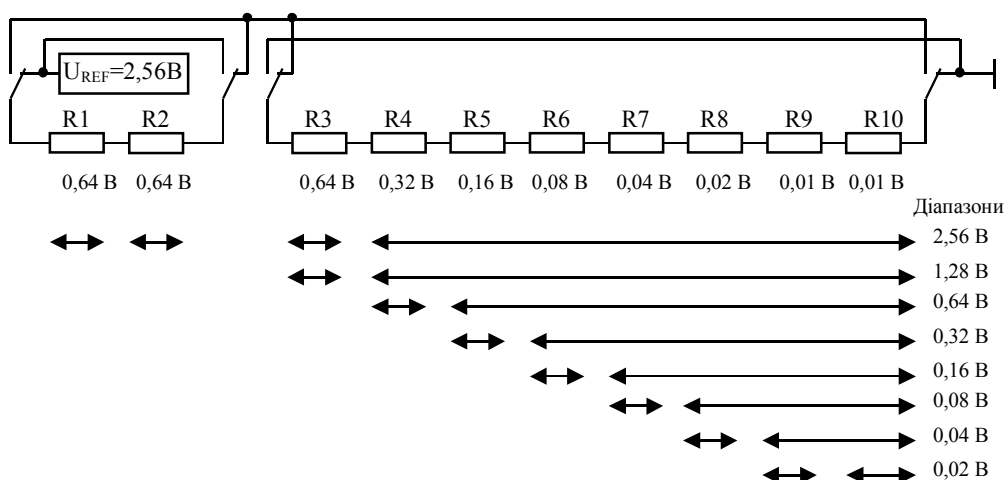


Рис. 2. Структура метрологічної самоперевірки АЦП на восьми діапазонах

Після визначення похибок у точках 0, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % старшого діапазону перетворення АЦП обчислюємо параметри функції корекції (наприклад, коефіцієнти полінома розв'язанням системи лінійних рівнянь), перетворюємо на код спад напруги на резисторах $R_3...R_{10}$ і коригуємо похибку АЦП. Надалі спад напруги на $R_3...R_{10}$ слугує напругою калібрування на діапазоні 1,28V. Переходячи на кожен новий діапазон, спочатку на ньому проводять корекцію адитивної та мультиплікативної похибки, потім – визначення нелінійності. На діапазоні 1,28V визначають нелінійність, перетворюючи на код спади напруги на резисторах R_3 і $R_4...R_{10}$ та обчислюючи похибку нелінійності згідно з (1).

Для метрологічної самоперевірки на подальших молодших діапазонах обчислюють параметри функції корекції на вже перевіреному старшому діапазоні, перетворюють на код, згідно з рис. 2, напругу на резисторах $R_i...R_{10}$ (яка повинна відповідати половині перевіреного діапазону), проводять корекцію похибки АЦП і застосовують скориговане значення напруги на резисторах $R_i...R_{10}$ для калібрування АЦП на молодшому діапазоні. Далі знову перетворюють на код спади напруги на резисторах R_i і $R_{i+1}...R_{10}$, обчислюють параметри функції корекції і використовують її для корекції результатів перетворення спаду напруги на наступних резисторах.

Як видно з наведеного опису, запропонований метод метрологічної самоперевірки АЦП на всіх діапазонах перетворення достатньо простий і не потребує, на відміну від попередніх, великої кількості обладнання – додатково потрібно лише 10 резисторів з відхиленнями від номінального значення 0,5...1 % і 27-канальний комутатор на КМОН транзисторах (не враховуючи комутатора вхідної напруги, який, згідно з [27], далеко не завжди можна виконувати на КМОН транзисторах).

4. Оцінка метрологічних характеристик АЦП за результатами самоперевірки. Результати метрологічної самоперевірки можна використати двома способами:

1. Прийняти рішення, чи похибка АЦП в заданих умовах експлуатації не перевищує допустимої.
2. За результатами метрологічної самоперевірки можуть бути нормовані межі поточної похибки АЦП на наступний інтервал між метрологічними самоперевірками.

Перший випадок простіший: потрібно прийняти однозначне рішення, чи отримані значення похибок не перевищують допустимих значень для всіх тестових точок. Визначаючи допустимі похибки, необхідно пам'ятати, що похибки АЦП, отримані під час метрологічної самоперевірки, не враховують похибки джерела напруги калібрування, тому їх слід обчислювати з відповідним запасом.

Другий випадок складніший, він вимагає формування за результатами метрологічної самоперевірки двочленної формули, яка коректно описуватиме похибку АЦП відповідно до вимог стандартів

$$d_{ADC} \leq \left(c + d \left(\frac{X_{MAX}}{X} - 1 \right) \right) \% , \quad (2)$$

де c , d – коефіцієнти; X_{MAX} , X – діапазон перетворення і поточна вхідна напруга АЦП відповідно.

Пряма (2) має “накрити” результати визначення похибки АЦП під час метрологічної самоперевірки. При цьому треба пам'ятати, що:

1. Крім нелінійності ФП АЦП, при визначенні c і d слід враховувати невиключену адитивну похибку АЦП, яка не менша за випадкову похибку під час встановлення нуля. Тому під час встановлення нуля треба виконати кілька перетворень, визначити випадкову складову похибки та порівняти її з допустимою. Слід також встановити деякий запас, що врахує обмежену кількість перетворень і майбутній дрейф АЦП за інтервал між метрологічними самоперевірками.

2. Якщо АЦП експлуатується за дії інтенсивних завад нормального і/або загального виду, то при оцінці похибки результату перетворення слід або врахувати дію цих завад, або під час визначення c і d врахувати випадкову похибку, визначену не під час встановлення нуля, а під час перетворення вхідної напруги. Зауважимо, що при перетворенні на код вхідної напруги в деяких випадках вплив завад на випадкову похибку домінує [27].

3. Крім нелінійності ФП АЦП, під час визначення c і d слід враховувати похибку джерела напруги калібрування, яка має суто мультиплікативний характер. Як показано в [20], її доцільно нормувати окремо. Однак, визначаючи c і d , необхідно враховувати подальшу обробку результатів перетворення. При прямих і непрямих вимірюваннях коефіцієнти c і d повинні враховувати похибку джерела напруги калібрування, а при сукупних та сумісних

вимірюваннях вплив похибки джерела напруги калібрування на похибку результату обробки даних не очевидний і потребує окремого розгляду. В разі використання методів відношення, заміщення та деяких інших c і d не повинні враховувати похибку джерела напруги калібрування – вона практично не впливає на результат обробки даних.

4. Співвідношення c і d за однакових результатів метрологічної самоперевірки можуть бути різні – визначаючи їх, слід враховувати режим експлуатації АЦП. Якщо вхідна напруга АЦП здебільшого мала, важливіша адитивна похибка, тому коефіцієнту d присвоюють мінімальне значення, потім підбирають коефіцієнт c з умови “накриття” похибки АЦП. Якщо вхідна напруга АЦП відповідає верхній половині діапазону перетворення, важливіша мультиплікативна похибка, тому спочатку задають бажане значення коефіцієнта c (не менше від максимальної похибки АЦП, визначеної під час метрологічної самоперевірки), потім підбирають коефіцієнт d (але слід забезпечити умову $c \geq d$).

5. Отримана за результатами метрологічної самоперевірки формула (2) відбиває реальну похибку АЦП для часу та умов експлуатації, у яких проведена метрологічна самоперевірка. Для коректної оцінки похибки поточного результату перетворення слід врахувати дрейф АЦП за час між самоперевірками, дію впливних величин, а також можливу дію завад різного виду. Однак, якщо дрейфом ФП АЦП за час між метрологічними самоперевірками та змінами умов експлуатації можна нехтувати, то коефіцієнт запасу під час визначення c і d може бути мінімальним.

6. Для підвищення метрологічної надійності метрологічної самоперевірки слід застосувати замкнутий цикл вимірювання, тобто після закінчення всіх необхідних перетворень повторити перші перетворення та оцінити зміну результатів перетворення за час самоперевірки. Якщо різниця перевищує оцінене під час встановлення нуля значення шумів АЦП більше ніж в 2–3 рази, то надто великий або час самоперевірки, або дрейф ФП АЦП. Такий АЦП не можна вважати справним.

Висновки. Як видно з викладеного, негативні наслідки масового випуску АЦП можна усунути за рахунок їх оснащення вбудованими підсистемами самоперевірки. Запропоновані в [21–25] методи дають змогу реалізувати підсистеми самоперевірки АЦП, які

мають малу складність, але дають змогу перевіряти прецизійні багаторозрядні багатодіапазонні АЦП з неперервною функцією систематичної похибки (наприклад, інтегруючі). Наявність такої підсистеми метрологічної самоперевірки створює умови для того, щоби АЦП (точніше, обчислювальний засіб, що обробляє результати аналого-цифрового перетворення) міг автоматично коректно оцінити похибку поточного результату перетворення, тобто, згідно з [28], дає змогу реалізувати у такому АЦП інтелектуальні функції.

1. *Аналого-цифровое преобразование* / под ред. Волта Кестера. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с. 2. Fowler K. Part 7: analog-to-digital conversion in real-time systems. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2003. Vol. 6. Issue 3. pp. 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 <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-06/architecture.pdf> 4. Precision Analog Microcontrollers [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/PrecisionMicrocontrollerOverview.pdf> 5. Проненко В.И., Якирин Р.В. Метрология в промышленности. – К.: Техника, 1979. – 223 с. 6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, Головное изд-во, 1983. – 455 с. 7. ДСТУ 2681-94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с. 8. ГОСТ 14014-91 Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1991. 9. ГОСТ 30605-98 Преобразователи измерительные напряжения и тока цифровые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1998. 10. МИ 118-78. Методика поверки цифровых вольтметров и аналого-цифровых преобразователей. – М.: Изд-во стандартов, 1978. 11. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. 12. 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 "ЛьвовОРГРЭС", 1996. 13. Сиромеха В. АСУТП: минимум затрат, максимум эффективности

- ти // Компьютерное обозрение. – 1997. – № 19(92). – С. 36–37. 14. Альтишлдер Г. С. Творчество как точная наука. – 2 изд., дополн. — Петрозаводск: Скандинавия, 2004. — 208 с. 15. Земельман М.А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах // Измерительная техника. – 1964. – № 9. 16. Ш711 Машенков В.М., Ноткин Ю.А. и др. Измерительные комбинированные цифровые приборы и преобразователи КЦ 7000, КЦ 7001 // Приборы и системы управления. – 1992. – № 5. – С. 23, 24. 17. Яцук В. Інформаційно-енергетичний підхід до оцінювання коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки. Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – Вип. 68. – С. 224–228. 18. IEEE Std 1241-2000, IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000. 19. R.Kochan, O.Kochan. Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing. Proc.of the 6-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2011). 15-17 September 2011, Prague, Czech Republic. pp. 43 – 49. 20. Кочан Р.В. Концепція самопіврки аналого-цифрових перетворювачів в процесі експлуатації // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2010. – № 71. – С. 25–33. 21. Кочан Р.В., Кочан О.В. Спосіб піврки аналого-цифрових перетворювачів на місці експлуатації. Пат. 200805621 Україна, МПК 7Н01Н51/00. Заявл. 29.04.2008. 22. Кочан Р.В., Кочан О.В. Пристрій визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів. Пат. 200703921 Україна, МПК 7Н01Н51/00. Заявл. 10.04.2007. 23. Кочан Р. Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2009. – № 2. – С. 7–12. 24. Кочан Р.В. Похибка методу корекції інтегральної нелінійності АЦП з допомогою багаторезистивного подільника // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. “Комп’ютерні системи та мережі”. – Львів, 2011. – № 688. – С. 69–75. 25. Кочан Р.В. Аналіз впливу опору перемикачів на похибку корекції інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2010. –Т.15, № 2. – С. 127–134. 26. ADUC845: Precision Analog Microcontroller: 12MIPS 8052 Flash MCU + 10-Ch 24-Bit ADC + 12-Bit DAC [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://www.analog.com/en/processors-dsp/analog-microcontrollers/aduc845/processors/product.html> 27. Kochan R., Berezky O., Karachka A., Bojko O., Maruschak I. Development of the integrating analog to digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51, №1. – Р. 96–101. 28. Березький О.М., Кочан В.В. Засоби вимірювання температури з елементами штучного інтелекту // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 1998. – № 53. – С.142–146.