

УДК 621.317.7.089.6

КОНЦЕПЦІЯ САМОПЕРЕВІРКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Роман Кочан, 2010

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

Проаналізовано стан єдності вимірювань вимірювальними каналами на базі аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), обґрунтовано доцільність розроблення вбудованої системи самоперевірки таких вимірювальних каналів. Здійснено аналіз вимог до самоперевірки вимірювальних каналів на базі АЦП, який дає змогу оцінити придатність відомих методів тестування, діагностики та перевірки АЦП та дав змогу розробити концепцію побудови та треструктурні схеми систем самоперевірки.

Проанализировано состояние единства измерений измерительными каналами на базе аналого-цифровых преобразователей (АЦП), обоснована целесообразность разработки встроенной системы самоперевірки таких измерительных каналов. Проанализированы требования к самоперевірки измерительных каналов на базе АЦП, что позволило оценить пригодность известных методов тестирования, диагностики и проверки АЦП и разработать концепцию построения и три структурные схемы систем самоперевірки таких измерительных каналов.

The article analyzes the state of the art of providing the unification of measurement channels based on analog-digital converters (ADC). Also there is justified the expediency of development the embedded self-testing subsystem of such measurement channels. The analysis of the requirements to self-testing subsystem for measurement channels based on ADC allow us to evaluate the applicability of existed methods of ADC testing and to develop the concept and three structural schemes of self-testing subsystem.

Вступ. Швидкий розвиток засобів обчислювальної техніки привів до їх широкого застосування в різних галузях. Своєю чергою, це зумовило різке зростання кількості вимірювальних каналів як джерела інформації для обчислювальних систем. Одним з основних метрологічно значущих вузлів таких вимірювальних каналів є аналого-цифровий перетворювач (АЦП) [1]. Розвиток мікроелектроніки привів до того, що сьогодні майже всі сім’ї мікроконтролерів мають вбудовані АЦП [2, 3]. Тому загострилося питання забезпечення точності та єдності вимірювань за допомогою великої кількості АЦП, тим більше, що при випуску трудомісткість тестування мікроелектронних АЦП становить до 60 % всієї трудомісткості випуску [4].

Звичайно, не всі ці АЦП вимагають метрологічного обслуговування. Однак часто через масовість, складність доступу і трудомісткість виконання, зокрема, періодичної перевірки та інших видів метрологічного обслуговування, а також через інші причини, цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять у

вбудовані вимірювальні системи автомобілів) не охоплені метрологічним наглядом. Така ситуація може призвести до порушення єдності вимірювань. Тому забезпечення метрологічного обслуговування вбудованих у різні системи АЦП є актуальним завданням.

Одним з можливих варіантів вирішення проблеми забезпечення єдності вимірювань при масовому використанні АЦП було б оснащення кожного з них вбудованою підсистемою самоперевірки, яка би забезпечила його автоматичне метрологічне обслуговування в процесі експлуатації упродовж всього життєвого циклу. Однак сьогодні на ринку таких систем немає. Наявні методи і засоби самотестування, самодіагностики та самоперевірки АЦП мають різні недоліки. Однак головним їх недоліком є те, що вони призначені для розв’язання деяких окремих задач, а не створюють достатньо універсальну систему.

Метою роботи є формування загальної концепції створення вбудованої підсистеми самоперевірки АЦП та вимірювальних каналів напруги постійного струму, що

містять АЦП. Для цього попередньо необхідно сформулювати загальні вимоги до методів самоперевірки АЦП і проаналізувати властивості методів і засобів само-тестування, самодіагностики та самоперевірки АЦП.

1. Вимоги до методів самоперевірки АЦП. Одним з основних завдань метрологічного обслуговування засобів вимірювання, зокрема АЦП, є забезпечення єдності вимірювань. Для цього методи і засоби метрологічного обслуговування АЦП регламентуються низкою метрологічних документів – стандартами, методиками, технічними умовами. Основною особливістю цих документів є те, що вони є узгодженими між собою і затвердженими у встановленому законом порядку. Під час їх розроблення було вжито заходів щодо забезпечення вимог достатньої якості метрологічного обслуговування, зокрема, точності та метрологічної надійності його результатів.

Вбудована підсистема самоперевірки АЦП повинна бути так само регламентована метрологічними документами – вона повинна стати частиною діючого метрологічного забезпечення АЦП. І якщо ми визнаємо, що діюча система метрологічного обслуговування АЦП відповідає вимогам достатньої якості метрологічного обслуговування, то вбудована підсистема самоперевірки АЦП повинна відповідати аналогічним вимогам. З цього випливає, що однією з основних вимог до вбудованої підсистеми самоперевірки АЦП є її відповідність нині чинним правилам метрологічного забезпечення АЦП, або, щонайменше, ця підсистема не повинна їм суперечити.

Вбудована підсистема самоперевірки АЦП повинна забезпечити достатню метрологічну надійність – вона повинна забезпечити визначення придатності АЦП до подальшої експлуатації з нормованими метрологічними характеристиками з ризиками споживача і виробника, аналогічними до прийнятих у діючій системі метрологічного обслуговування АЦП. Зазначимо, що діюча система періодичних перевірок АЦП не гарантує певної відповідності їх метрологічних характеристик нормованим упродовж міжперевірничого інтервалу. Насправді, в результаті успішної періодичної перевірки АЦП можна ствердити, що:

1. Перевірений АЦП, з великою імовірністю (хоча не цілком 100 %), за минулий міжперевірничий інтервал мав метрологічні характеристики, відповідні до нормованих за нормальних умов експлуатації. На питання, як АЦП вів себе в робочих умовах експ-

луатації, традиційна періодична перевірка відповіді не дає.

2. Прогнозується, що перевірений АЦП матиме метрологічні характеристики, відповідні до нормованих за нормальних умов експлуатації, за увесь майбутній міжперевірничий інтервал. На питання, як він вестиме себе за робочих умов експлуатації, періодична перевірка не відповідає.

3. Чому цей АЦП не повинен вийти з ладу (у цьому випадку маємо на увазі метрологічну відмову) перед кінцем наступного міжперевірничого інтервалу періодична перевірка відповіді не дає.

4. Який час пройде після метрологічної відмови до моменту її виявлення, періодична перевірка відповіді теж не дає.

Якщо періодична перевірка виявила несправний в метрологічному аспекті АЦП, вона, зазвичай, не дає відповіді на питання, коли виникла несправність, і тільки іноді можна оцінити наслідки цієї несправності з достатньою повнотою. Тому вбудована підсистема самоперевірки АЦП, яка забезпечить періодичну перевірку на місці експлуатації, відповідну до вимог нормативних документів без необхідності переривання експлуатації АЦП, дасть змогу значно підвищити метрологічну надійність самого АЦП, а разом з тим, і вимірювального каналу, елементом якого є такий АЦП. Можливість значно зменшити міжперевірничий інтервал веде до значного зменшення негативних наслідків метрологічної відмови АЦП і різко зменшує ризик споживача.

Більшість методів періодичної перевірки в лабораторних умовах дає можливість отримати значення похибки в явному вигляді, тобто у вигляді набору значень абсолютної похибки перетворення у цей момент. Такі результати перевірки можна використати для корекції похибок АЦП, тобто перейти до індивідуальної функції перетворення (ФП) АЦП. Однак за річного міжперевірничого інтервалу підвищення точності за рахунок такого переходу практично неможливе через дію впливних величин і часовий дрейф ФП АЦП. Якщо вбудована підсистема самоперевірки АЦП теж дасть можливість отримати значення похибки в явному вигляді (а це необхідно для порівняння поточної похибки АЦП з допустимими значеннями, чого вимагає процедура перевірки), то, при малих міжперевірничих інтервалах, перехід до індивідуальної ФП АЦП дає змогу істотно підвищити його точність та точність вимірювального каналу загалом.

Додатковими вимогами до вбудованої підсистеми самоперевірки АЦП є її технічна та економічна ефективність. Під технічною ефективністю розумітимемо невисоку складність підсистеми та відсутність великої кількості високоякісних елементів, зокрема, елементів високої точності та стабільності. Ця вимога є досить складною у виконанні, особливо, коли ставиться вимога достатньо повної періодичної перевірки на місці експлуатації. Крім того, вбудована підсистема самоперевірки повинна мати невеликі габарити і масу для того, щоби не збільшувати істотно розміри і масу вимірювальних модулів. Ідеально, якби підсистема самоперевірки була інтегрована в кристал АЦП.

З вимогою технічної ефективності тісно пов'язана вимога економічної ефективності, яка полягає в тому, що собівартість підсистеми самоперевірки АЦП повинна бути не вищою від самого АЦП. Через те, що ціна мікросхем, навіть прецизійних 16...24-розрядних АЦП, сьогодні не перевищує 25 доларів США, вимога економічної ефективності також є доволі жорсткою.

2. Аналіз відомих методів тестування, діагностики та перевірки АЦП. Багато пристроїв обчислювальної техніки, зокрема всі процесори, мають вбудовані підсистеми самотестування або самодіагностики. Аналогічні підсистеми має ряд засобів вимірювальної техніки, зокрема процесорних. Однак основною функцією підсистем самотестування і самодіагностики є оцінка працездатності засобу вимірювання, а не визначення його похибки та її відповідності допустимим значенням. Це відповідає етапу "опробування" процесу перевірки. Водночас деякі підсистеми самотестування і самодіагностики мають можливість оцінки похибки в явному або неявному вигляді. Тому, хоча формально методи самотестування і самодіагностики не відповідають вимогам, сформульованим в розділі 1, ці методи та їх компоненти слід аналізувати також, як і відомі методи самоперевірки.

Зазначимо, що методи корекції похибок засобів вимірювання спираються на методи визначення цих похибок, які, своєю чергою, можуть слугувати меті самоперевірки. Зокрема, давно відомі методи зменшення впливу на результат перетворення АЦП адитивної та мультиплікативної похибки [5, 6] – встановлення нуля і калібрування, на нашу думку, повинні обов'язково увійти до складу підсистеми самоперевірки, як методи, що повністю відповідають всім вимогам розділу 1. Однак вважати встановлення

нуля і калібрування заміником періодичної перевірки, як це зроблено в [7], не можна. Адже навіть для АЦП, що мають функцію похибки без розривів та стрибків, існує похибка нелінійності, яка може змінюватися під впливом старіння елементів, змін опору ізоляції, несправності блока живлення тощо. Як правило, вказані несправності ведуть до змін значень всіх складових похибки (адитивної, мультиплікативної та нелінійної). Однак встановлення нуля і калібрування коригує зростання адитивної та мультиплікативної похибок, а надмірна нелінійна складова похибки АЦП залишиться не виявленою. Тобто встановлення нуля і калібрування її "сховають".

Так само слід проаналізувати на придатність для використання у підсистемі самоперевірки АЦП відомі методи їх лабораторної перевірки. Останні діляться на дві групи [8]:

1. Зрівняння – порівняння результатів перетворення АЦП з результатами перетворення взірцевого засобу вимірювання, коли приблизно відома вхідна величина одночасно або за малий проміжок часу подається на взірцевий засіб вимірювання і на АЦП, який перевіряють.

2. Калібрування – подавання на вхід АЦП, який перевіряють, взірцевого сигналу і порівняння результатів перетворення АЦП із відомим значенням взірцевого сигналу.

Відомі модифікації цих методів щодо перевірки на місці експлуатації пов'язані з можливістю їх адаптації до умов експлуатації та економічною доцільністю.

Реалізацією методу зрівняння є відомий метод визначення похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП, що оснований на увімкненні взірцевого АЦП паралельно до робочого АЦП [9]. При цьому взірцевий АЦП може мати істотно нижчу швидкість, бо він слугує, згідно з [9], тільки для корекції похибки основного АЦП. Через те, що в цьому випадку похибка робочого АЦП визначається в явному вигляді (через різницю кодів між ним і взірцевим АЦП), метод [9] цілком придатний для підсистеми самоперевірки АЦП. Взірцевий АЦП можна від'єднати від робочого і перевіряти окремо без зупинки роботи системи. Недоліком методу [9] є сумнівна економічна доцільність через необхідність використання прецизійних АЦП та їх традиційної перевірки в лабораторних умовах. Крім того, цей метод доцільно використовувати тільки в умовах експлуатації, що відповідають лабораторним, точніше тим, на які розраховано взірцевий АЦП. Такий

метод непридатний для прецизійних АЦП, для яких відповідно точніші АЦП не існують.

Реалізацією методу калібрування є метод визначення похибки при подаванні на вхід АЦП, який перевіряють, вихідного сигналу взірцевого цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). При традиційній перевірці АЦП, які мають функцію похибки без розривів та стрибків, взірцевий ЦАП може мати низьку розрядність і швидкодію. Однак вимога високої точності залишається. В [10] описано саме такий метод самоперевірки вимірювальних каналів, де запропоновано оснащувати нове покоління засобів вимірювальної техніки кодокерованими мірами електричних величин, які забезпечать оперативний контроль вимірювань. Однак конкретні технічні рішення не наводяться, а метрологічне забезпечення вимірювальних каналів зводиться, як і у методі [9], до лабораторної перевірки кодокеріваних мір електричних величин, які повинні бути легкозамінними. Всі недоліки методу [9] повністю притаманні методу [10].

Для того, щоби обійти вимогу високої точності взірцевого ЦАП (замінивши її вимогою великої розрядності, яку легше виконати, наприклад, за допомогою запропонованого в [11] каскадування малорозрядних ЦАП), запропоновано багато методів непрямой оцінки похибки АЦП. Це методи дослідження окремих квантів [12], густини імовірності [13], гістограмний метод [14], які докладно розглянуті в [15].

У [12] запропоноване рішення, за яким диференційна нелінійність визначається як спотворення окремих квантів АЦП. Вивчивши це спотворення в різних точках діапазону перетворення, роблять висновки про диференційну нелінійність АЦП. Однак при цьому також можна оцінити максимальне значення похибки інтегральної нелінійності. Недоліками запропонованого в [12] методу є складність обробки результатів і апаратного забезпечення процедури дослідження квантів. Також недослідженою є похибка визначення ФП АЦП за допомогою цього методу.

У [13] запропоновано для оцінки диференційної нелінійності використати густину імовірності випадкового значення цієї похибки для множини всіх точок діапазону перетворення. Вхідна величина АЦП теж визначається як випадкова величина зі своїм законом розподілу. Запропонований математичний апарат дає змогу оцінити в цьому випадку вплив похибки від інтегральної нелінійності АЦП на імовірнісні параметри похибки результату перетворення. Однак похибка АЦП в явному вигляді не визначається, а методика виконання досліджень є доволі складною і

вимагає порівняно високоякісного апаратного забезпечення.

Розвитком методів [12, 13] є запропонований у стандарті IEEE1241 [16] і досліджений в [14] гістограмний метод, який дає змогу дослідити диференціальну та інтегральну нелінійність ФП АЦП з використанням ЦАП високої розрядності, але невисокої точності. В поєднанні з встановленням нуля і калібруванням, гістограмний метод давав би змогу створити підсистему самоперевірки АЦП. Однак дослідження впливу нелінійних спотворень та процесу накопичення похибки квантування показали значні похибки під час обчислення інтегральної нелінійності. Крім того, час дослідження для самоперевірки прецизійних 16-ти ... 24-х розрядних АЦП становить десятки годин, що неприйнятно для практики.

Як основа підсистеми самоперевірки не можуть бути використані методи, які визначають похибки АЦП тільки в неявному вигляді. Зокрема, таку властивість мають методи, основані на перетвореннях Фур'є [17]. За їх результатами не можна однозначно оцінити значення похибок ФП АЦП, тому вони не відповідають вимогам п. 1.

Особливе місце займають АЦП, принцип дії яких передбачає "внутрішнє" самотестування, зокрема, АЦП порозрядного зрівноваження на кодах Фібоначчі [18, 19]. Такі АЦП дають змогу здійснити порівняння окремих розрядів між собою, що дає змогу оцінити відхилення їх ФП від лінійності та виконати корекцію. Якщо такі АЦП оснащені підсистемою встановлення нуля і калібрування, то вони фактично мають апаратні засоби самоперевірки. Для реалізації останньої необхідне лише відповідне програмне забезпечення. Однак процедура оцінки відхилення їх ФП від лінійності у відомих варіантах таких АЦП починається з молодших розрядів та іде до старших розрядів (за наростанням). При цьому накопичується похибка самоперевірки, тому необхідний детальний метрологічний аналіз похибок такої підсистеми самоперевірки. Крім того, така підсистема самоперевірки не універсальна, вона доцільна тільки для цього виду АЦП.

Спрощеним варіантом методу калібрування за допомогою ЦАП можна вважати створення тестових сигналів за допомогою резисторного подільника напруги, під'єданого до джерела напруги калібрування. Таке рішення ніби нескладне, але похибка визначення інтегральної нелінійності ФП АЦП визначатиметься похибками резисторів подільника. Це вимагає вико-

ристання дорогих резисторів з високою стабільністю і на практиці придатно тільки для АЦП невисокої точності. Однак використання методів відношення та протиставлення дає змогу значно знизити вимоги до резисторів подільника.

У [20, 21] досліджено метод, оснований на взаємному протиставленні двох резисторів подільника. Метод дає змогу визначити інтегральну нелінійність АЦП посередині шкали з похибкою, значно меншою від похибки самих резисторів. У [20, 21] показано, що похибка методу Δ_{MET} в цьому випадку не перевищує $\Delta_{MET} \approx \Delta_{NLI} \times \delta_{R1}^2$, де Δ_{NLI} – похибка нелінійності АЦП; δ_{R1}^2 – відхилення опору резисторів подільника від середнього значення. Наприклад, при використанні АЦП з похибкою нелінійності 0,1% і резисторів з допустимим відхиленням від номінального значення 1% отримаємо похибку визначення інтегральної нелінійності 0,0001%. Відносно вимог, сформульованих в п. 1, досліджений в [20, 21] метод не виконує вимог метрологічних документів [22...24] щодо кількості точок перевірки. Однак цього недоліку не мають методи, запропоновані в [25...27], які теж основані на методі протиставлення резисторів подільника. Вони дають змогу в явному вигляді отримати значення інтегральної нелінійності АЦП у трьох і п'яти точках діапазону перетворення АЦП. У поєднанні з підсистемою встановлення нуля і калібрування методи, запропоновані в [25...27], можуть слугувати основою для універсальної підсистеми самоперевірки АЦП.

3. Концепція побудови підсистеми самоперевірки АЦП. Як показали результати аналізу відомих методів тестування, діагностики та перевірки АЦП, наведені в попередньому розділі, найкращою базою для підсистеми самоперевірки АЦП може бути поєднання методів встановлення нуля і калібрування з методами визначення інтегральної нелінійності АЦП, які використовують метод протиставлення резисторів у подільнику напруги [25...27]. Вони найкраще відповідають вимогам, сформульованим у п. 1. Деякі з них детальніше досліджені в [28, 29]. Однак методи визначення інтегральної нелінійності АЦП, запропоновані в [25...27], вимагають подальшого детального дослідження притаманних їм інструментальних і методичних похибок, розроблення алгоритмів самоперевірки різних видів АЦП, а також

оцінки похибки перевірки, якої можна з їх допомогою досягти. Для перевірки АЦП, що мають функцію похибки без розривів та стрибків, тобто розгортаючих, двотактного інтегрування, сигма-дельта, а також перетворювачів напруга-частота більшості типів, доцільно використати методи, запропоновані в [25, 26]. Для перевірки АЦП, функція похибки яких може мати стрибки, тобто порозрядного зрівноваження та конвеєрних, доцільно використати метод, запропонований в [27]. Останній метод дає змогу мати велику кількість точок перевірки, що дає можливість оцінити похибку в критичних точках, вказаних в [22...24], розв'язавши системи рівнянь. Однак відповідні алгоритми перевірки та обробки її результатів необхідно розробити.

Забезпечити єдність вимірювань при поєднанні методів встановлення нуля і калібрування з методами визначення інтегральної нелінійності АЦП, запропонованими в [25...27], можна заміною джерела напруги калібрування. Такий метод пропонувався у [7], однак він передбачав приведення вихідної напруги джерела до номінального значення. Це погано узгоджується з вимогою простоти і універсальності, а також може знизити стабільність джерела напруги калібрування через підвищений дрейф елементів підгонки. Кращим рішенням є використання запропонованого в серії стандартів IEEE1451 [30] електронного паспорта (Transducer Electronic Data Sheet, TEDS). Під час перевірки джерела напруги калібрування в його електронний паспорт повинні бути записані унікальний номер, дійсне значення вихідної напруги, границя допустимої похибки, дата перевірки і міжперевірний інтервал для цієї допустимої похибки, а також, можливо, і функції впливу зовнішніх умов на значення вихідної напруги. Така інформація дасть змогу програмному забезпеченню, що виконує самоперевірку АЦП, зчитати дійсне значення напруги калібрування (або обчислити його значення для заданих умов експлуатації за записаними в TEDS функціями впливу) і визначити поправки АЦП. Надалі можна оцінити похибку перевіреного АЦП, визначити час наступної перевірки і сформувати протокол виконання періодичної перевірки, а навіть, при роботі в складі вимірювально-керуючої мережі, відправити на сервер мережі протокол успішної перевірки або повідомлення про перевищення заданого значення допустимої похибки.

Зазначимо, що при корекції похибок АЦП за результатами його самоперевірки можливе значне

підвищення його точності. Не завжди необхідно й економічно доцільно використовувати джерела напруги калібрування найвищої точності. Наприклад, під час прецизійних вимірювань температури термометром опору, у разі використання методу заміщення, немає необхідності у високоточному джерелі напруги калібрування. Тому доцільно нормувати похибку АЦП, оснащених підсистемою самоперевірки, результати якої застосовують для корекції похибок АЦП, окремо для самого АЦП (без урахування похибки джерела напруги калібрування). Тоді похибку перетворення вхідної напруги оцінюють як суму похибок АЦП і джерела напруги калібрування. Це дасть змогу істотно збільшити гнучкість використання прецизійних АЦП. Прецеденти такого нормування похибок прецизійних засобів вимірювання вже є – наприклад, фірма Fluke власне так нормує похибки свого прецизійного мультиметра типу 8508А. Тому такий спосіб нормування похибки слід просто ввести у чинні стандарти.

Можливі три варіанти побудови підсистеми самоперевірки АЦП. Перший варіант (рис. 1) передбачає введення до складу АЦП всіх вузлів, що реалізують самоперевірку: по-перше, апаратного забезпечення – джерела напруги калібрування ДНК, резисторів подільника, засобів його комутації та під'єднання до входу АЦП, а також мікроконтролера (або розширення можливостей вже вбудованого); по-друге, програмного забезпечення ПЗ самоперевірки – програм керування апаратними засобами (комутаторами, що забезпечують реалізацію алгоритму самоперевірки), зчитування електронного паспорта джерела напруги калібрування, накопичення проміжних даних, тобто результатів вимірювань, отриманих в процесі виконання самоперевірки, обробки результатів самоперевірки, корекції похибки АЦП, визначення залишкової похибки АЦП (після корекції похибок за результатами перевірки) та, можливо, інших метрологічних характеристик АЦП, формування протоколу перевірки, а також передавання сформованого протоколу серверу вимірювально-керуючої мережі (за власною ініціативою чи запитом сервера). Такий варіант найдосконаліший, але і найскладніший. Його доцільно використовувати у нових, спеціально розроблених інтелектуальних прецизійних засобах вимірювання, де вже передбачено застосування розвинутого апаратного і програмного забезпечення.

Другий варіант (рис. 2) передбачає введення до складу АЦП тільки всіх апаратних вузлів, що ре-

лізують самоперевірку. Програмна підтримка самоперевірки виконується на сервері. Це різко знижує вимоги до мікроконтролера, що обслуговує під'єднання АЦП до мережі. Додатковими функціями останнього будуть тільки функції керування апаратним забезпеченням (за командами сервера мережі) та передавання результатів перетворення під час виконання самоперевірки на сервер. Такий варіант значно простіший, однак він придатний тільки для АЦП, які працюють у складі ієрархічної мережі з можливістю введення у програму роботи сервера особливих задач.

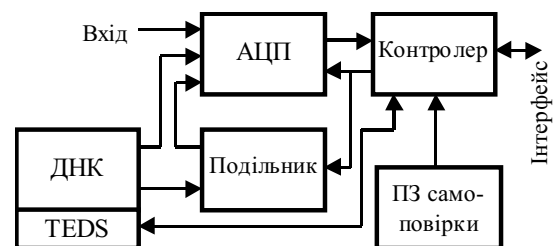


Рис. 1. Найскладніший варіант підсистеми самоперевірки АЦП

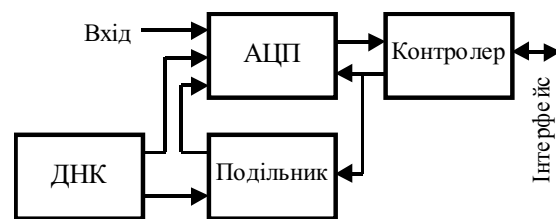


Рис. 2. Спрощений варіант підсистеми самоперевірки АЦП

Третій варіант (рис. 3) – найпростіший – передбачає тільки забезпечення можливості доступу із спеціального зовнішнього додаткового роз'єднання до входу АЦП і можливість тимчасового від'єднання всіх вимірювальних каналів. Варіантом реалізації такого способу є передбачення додаткового каналу в комутаторі багатоточкового АЦП, однак при цьому похибка комутатора ввійде в похибку перевірки, тобто похибка комутатора повинна бути нехтовно малою порівняно з похибкою АЦП. Тоді підсистема самоперевірки виконується зовнішньою до АЦП, що перевіряється, і під'єднується до додаткового роз'єднання. Також до підсистеми самоперевірки під'єднується кодвий вихід АЦП. На час самоперевірки АЦП фактично перестає функціонувати в складі засобу

вимірювання. Цей варіант має істотні недоліки – він фактично виконує перевірку на місці експлуатації за допомогою зовнішніх спеціалізованих засобів, але не в процесі експлуатації (тобто цей варіант не є самоперевіркою). Однак його достатньо просто впровадити у вже наявні прилади і системи. Крім того, він може бути економічно ефективний – за допомогою одного пристрою перевірки можна обслужити множини АЦП, а сам пристрій на базі методів, запропонованих в [25...27], буде досить простим. Його вартість буде невисокою за рахунок того, що в ньому не потрібне використання прецизійних елементів.

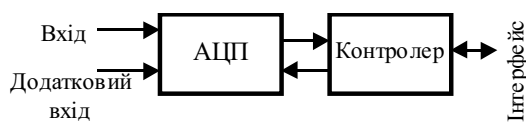


Рис. 3. Найпростіший варіант підсистеми самоперевірки АЦП

4. Визначення міжперевірних інтервалів. Наявність у складі АЦП вбудованої підсистеми самоперевірки цілком змінює підхід до визначення міжперевірних інтервалів. За низьких вимог до продуктивності вимірювального каналу і значному надлишку швидкодії АЦП самоперевірку останнього доцільно робити якнайчастіше. Така ситуація доволі поширена – вона характерна для багатьох систем, які вимірюють фізичні величини за допомогою різноманітних датчиків з порівняно великою інерцією, наприклад, системи вимірювання температури. Самоперевірку у таких випадках зазвичай можна виконувати як окрему процедуру, на час якої контроль за станом об'єкта вимірювання припиняється. У таких випадках часта самоперевірка дає змогу забезпечити: (i) високу точність навіть за порівняно низької стабільності АЦП або жорстких умов експлуатації; (ii) високу метрологічну надійність АЦП; (iii) малий інтервал між метрологічною відмовою АЦП та її виявленням. У такому разі ризик споживача стає мінімальним.

З дещо жорсткіших вимогах до періоду визначення стану об'єкта вимірювання доцільно процедуру самоперевірки розкласти на окремі вимірювання, що виконуються між вимірюваннями стану об'єкта. Тут можливий широкий вибір співвідношень між періодами опитування каналів вимірювання стану об'єкта і самоперевіркою – від почергового опитування обох типів каналів до одного каналу самоперевірки на всі

канали вимірювання стану об'єкта. Останній варіант визначає максимальну частоту вимірювань при рівномірному опитуванні каналів.

Часто необхідна максимальна продуктивність АЦП за великий проміжок часу. В такому випадку процедуру самоперевірки АЦП необхідно виконувати якнайрідше. Однак за нечастої самоперевірки зростає вплив процесів наростання різних складових похибки АЦП на результат перетворення. В такому випадку оптимального компромісу між вимірюваннями стану об'єкта і самоперевіркою можна досягти адаптивним налаштуванням міжперевірних інтервалів під швидкість зростання похибки цього АЦП в його умовах експлуатації, згідно з методом, запропонованим у [31]. При цьому можна виконувати перевірку та корекцію різних складових похибки (адитивної, мультиплікативної, нелінійної) окремо, з індивідуальним міжперевірним інтервалом. У такому випадку самоперевірка АЦП як окрема процедура ніби і не виконується, але метрологічні характеристики АЦП залишаються не гіршими від заданих, що і є метою періодичної перевірки. Протокол самоперевірки в цьому випадку можна формувати з періодом перевірки тієї складової, для якої міжперевірний інтервал є найбільшим.

За необхідності забезпечення максимальної швидкодії АЦП за порівняно малий проміжок часу (наприклад, при дослідженні швидкоплинних процесів) можна використати результати багатьох його попередніх самоперевірок для навчання нейронної мережі з подальшою корекцією похибок за допомогою їх прогнозу за допомогою ансамблю навчених нейронних мереж [32]. Для контролю якості прогнозу і оцінки похибки АЦП доцільно забезпечити замкнений цикл вимірювання – після закінчення дослідження виконати самоперевірку і порівняти отримані дійсні значення похибок з результатом прогнозу.

За дуже жорстких вимог до метрологічної надійності міжперевірний інтервал АЦП може бути вибраний з урахуванням максимального часу прийняття рішення на підставі результатів поточних аналого-цифрових перетворень. Такий варіант ставить жорсткі вимоги до тривалості процедури самоперевірки АЦП, однак цілком можливий для реалізації.

Висновки. Як видно з виконаного аналізу, сьогодні створюються можливості оснащення АЦП вбудованою підсистемою самоперевірки, яка дасть

зможу реалізувати його бездемонтажну перевірку в процесі експлуатації, тобто без вилучення зі складу засобу вимірювання і навіть не перериваючи його експлуатації. Розроблена концепція самоперевірки АЦП спирається на нові методи визначення його інтегральної нелінійності, метрологічні властивості яких ще досліджуються. Однак сьогодні зрозуміло, що є можливість створення підсистем самоперевірки АЦП, які матимуть достатньо високу технічну і економічну ефективність.

Оснащення АЦП вбудованою підсистемою самоперевірки дасть змогу одночасно забезпечити єдність вимірювань і зниження вартості його метрологічного обслуговування. Найближчими завданнями є повне дослідження метрологічних властивостей пропонованих методів самоперевірки АЦП і розроблення метрологічних документів, які дали би змогу вести метрологічне обслуговування АЦП з вбудованими підсистемами самоперевірки АЦП. Однією з особливостей таких АЦП є те, що в них основна увага під час метрологічних досліджень та атестації повинна бути звернена не на дослідження самого АЦП, а на дослідження якості його підсистеми самоперевірки через те, що, власне, вона визначатиме метрологічні властивості АЦП.

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с. 2. ADUC845: Precision Analog Microcontroller Data Sheet URL: www.analog.com/en/analog-microcontrollers/analog-microcontrollers/aduc845/products/product.html. 3. PIC18F2423/2523/4423/4523 Data Sheet www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en026425#1 4. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. 5. Земельман М.А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах // Измерительная техника. – 1964. – № 9. 6. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972. 7. 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. 8. Проненко В.И., Якирин Р.В. Метрология в промышленности. – К.: Техника, 1979. – 223 с. 9. Larsson, A.; Sonkusale, S. A background calibration scheme for pipelined ADCs including non-linear operational amplifier

gain and reference error correction. Proc. of IEEE International Systems-on-Chip Conference, 2004. 12–15 Sept. 2004. – P.37–40. 10. Яцук В. Інформаційно-енергетичний підхід до оцінювання коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 68. – 2008. – С. 224–228. 11. Паньків Р.С. Структурні методи збільшення розділової здатності цифро-аналогового перетворювача // Вісник Держ ун-ту “Львівська політехніка”. – 1998. – № 350. – С. 6770. 12. Шлыков Г.П. Аппаратурное определение погрешностей цифровых приборов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 13. Толпыга С.М. Метод автоматизированного измерения дифференциальной и интегральной нелинейности аналого-цифровых преобразователей // В кн.: Методы и средства преобразования сигналов в научном приборостроении. Красноярск: Институт физики СО АН СССР, 1979. 14. Vladimir Haasz. Testing of High-Resolution / Middle-Speed A/D Converters and Modules – Problems and Ways of their Solving. Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 8-10 September 2003, Lviv, Ukraine. pp 7 – 12. 15. Уолт Кестлер. Аналого-цифровое преобразование. М.: Техносфера, 2007. – 1016 с. 16. 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. 17. US Patent No 6,516,290 B1. H04B 15/00 Method for measuring the nonlinearity of an Analog Front End System. Yung Chow Peng. Aug. 20, 1999. 18. Авторское свидетельство СССР № 1547062. H03M 13/53. Аналого-цифровой преобразователь. Соавторы Стахов А.П., Квитка Н.А., Лужецкий В.А., Квитка С.Н., Петросюк Ю.А., БИ, 10, 1989 г. 19. А.С. СССР № 1571761. H03M 13/53. Аналого-цифровой преобразователь. Соавторы Стахов А.П., Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., БИ, 18, 1990. 20. Кочан Р.В., Кочан О.В. Прецизионный блок збору даних з дистанційним перепрограмуванням // Міжн. науково-техн. журнал “Комп’ютинг”. – 2004. – Т. 3. – № 3. – С. 82–92. 21. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.16 – “Інформаційно-вимірювальні системи”, Львів, 2005. 22. МИ118. Методика поверки цифровых вольтметров и аналого-цифровых преобразователей. – М.: Изд-во

- Стандартов, 1978. 23. МИ 1202-86. ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки. Изд-во стандартов. –М., 1986. 24. ГОСТ 14014-91 Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. Изд-во стандартов. –М., 1991. 25. Кочан Р.В., Кочан О.В. Пристрій визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів. Пат. 200703921 Україна, МПК G01D 3/02. Заявл. 10.04.2007. 26. Кочан Р.В., Кочан О.В. Спосіб перевірки аналого-цифрових перетворювачів на місці експлуатації. Пат. 200805621 Україна, МПК G01D 3/02. Заявл. 29.04.2008. 27. Кочан Р.В. Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 2. – С. 7–12. 28. R. Kochan, O. Kochan. Method of ADC's Nonlinearity Identification. Proc. of the IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007), Dortmund, Germany, September 6 – 8, 2007, pp. 14 – 17. 29. Кочан Р.В. Метод корекції інтегральної нелінійності характеристики перетворення прецизійних аналого-цифрових перетворювачів / Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2009. – № 70. – С. 18–26. 30. "IEEE Std 1451.2-1997, Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats" Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey 08855, September 26, 1997. 31. А.С. СССР № 1402980. Устройство для автоматической коррекции погрешностей измерительного преобразователя. Изаков Е.Т., Кочан В.В., Саченко А.А., Чирка М.И., Ноткин Ю.А. БИ,22, 1988, с.159. 32. A.Sachenko, V.Kochan, V.Turchenko, V.Golovko, T.Laopoulos. Using Neural Networks for Decreasing ADC Error. Proceedings of 4th IMEKO International Workshop on ADC Modeling and Testing, Bordeaux, France, September 9-10, 1999, pp. 78-81.

УДК 621.317

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУР АКТИВНИХ ІМІТАТОРІВ ОПОРУ ЯК ОСНОВИ ПРОМИСЛОВИХ КАЛІБРАТОРІВ

© Микола Микійчук, 2010

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто способи побудови засобів оперативного контролю метрологічних характеристик промислових засобів вимірювання на основі активних імітаторів опору

Рассмотрены пути построения средств оперативного контроля метрологических характеристик промышленных средств измерений на основе активных имитаторов сопротивления

The ways of constructing the effective control devices of industrial measuring means metrological characteristics based on active imitator resistance

Актуальність. Одним з основних факторів, що визначає ефективність промислових засобів вимірювань (ЗВ), є наявність продуктивного метрологічного забезпечення [1–3]. Однак, поряд з удосконаленням промислових ЗВ, останніми роками помітнішою стала неефективність наявних засобів їх метрологічного забезпечення [4–6]. Ця неефективність зумовлена

специфікою метрологічних досліджень промислових ЗВ, яка полягає в тому, що:

по-перше, діапазони відтворення електричних сигналів наявних калібраторів не адаптовані до діапазонів вимірювання ЗВ, що зумовлює використання калібраторів зі значною метрологічною надлишковістю;