

ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОРЕЗИСТОРНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

© Кочан Р.В.

Проведено аналіз вимог до формування точок метрологічної перевірки вимірювальних каналів кібер-фізичних систем на базі аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Проведено аналіз похибки точки метрологічної перевірки сформованої з використанням багаторезисторного подільника напруги з усередненням спадів напруги на всіх резисторах. Запропоновано підходи до реалізації джерела напруги живлення багаторезисторного подільника напруги, що дозволяють звести метрологічну перевірку навіть багато діапазонних АЦП до метрологічної перевірки цього джерела напруги.

Ключові слова: багаторезисторний подільник напруги, метрологічна перевірка, повірка.

Вступ. Не є перебільшенням твердження, що аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є необхідним компонентом вимірювального каналу кібер-фізичних систем (КФС) [1], які переважно виготовляються у вигляді інтегральної схеми або компонента системи на кристалі. Збільшення кількості вимірювальних каналів різного функціонального призначення, що знаходяться в експлуатації, їх інтеграція у комп’ютерні та комунікаційні мережі в складі розподілених та ієрархічних КФС [2] призводить до того, що збільшується і кількість АЦП, які підлягають державному метрологічному контролю [3]. Однією з ключових вимог державного метрологічного контролю є єдність результатів вимірювань, яка забезпечується організаційно-технічними засобами, зокрема, періодичними метрологічними перевірками (повірками). Але широкомасштабне тиражування АЦП, що вимагають метрологічної перевірки, зважаючи на її високу трудомісткість, а також обмежені ресурси уповноважених метрологічних лабораторій, вступає в протиріччя з вимогою забезпечення єдності результатів вимірювань і сприяє зменшенню метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення. Це протиріччя гостро ставить питання відповідного метрологічного забезпечення АЦП на всіх етапах життєвого циклу. Слід відзначити, що це протиріччя існувало завжди, однак відносно невелика кількість та низька точність АЦП, що знаходилися в експлуатації, а також їхня концентрація на підприємствах з розвинутою метрологічною базою полегшували його вирішення. На сьогодні це протиріччя значно загострилося через відсутність вказаних передумов. Це призводить до того, що цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять в склад систем керування автомобіля) взагалі випадають з поля зору державного метрологічного нагляду, що веде до ймовірного порушення єдності вимірювань та зниження метрологічної надійності результатів вимірювання такими вимірювальними каналами. Метрологічна перевірка є трудомістким процесом не тільки для органів метрологічного нагляду, а і для обслуговуючого персоналу, а навіть і користувачів систем. Адже метрологічна перевірка традиційно проводиться в метрологічній лабораторії і вимагає: зупинки системи, демонтажу АЦП, транспортування до/від лабораторії, власне метрологічної перевірки, монтажу та запуску системи. Це спонукає користувачів ухилятися від метрологічної перевірки, що, крім загрози втрати єдності вимірювань, підвищує небезпеку техногенних катастроф. Крім того деякі процеси, що обслуговуються з допомогою вимірювальних каналів є неперервними, що додатково ускладнює вилучення АЦП із складу системи на час перевірки. Тому інтервал між метрологічними перевірками стараються

максимізувати, що формує чергове протиріччя, адже збільшення цього інтервалу веде до зменшення метрологічної надійності результату перетворення.

Отже, масовий випуск і використання АЦП привів до загострення наявних і появи нових протиріч, усунення яких вимагає вирішення ряду науково-технічних задач. Ці задачі взаємно пов'язані, їх окреме вирішення не дозволить значно покращити ситуацію, а, як правило, здійснюється за рахунок інших. Таким чином, розглянуті протиріччя формують проблему забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення на всіх етапах життєвого циклу в умовах масового використання АЦП. Її вирішення має цілий ряд аспектів: наукові, технічні, економічні, організаційні. Очевидно, що первинними є наукові аспекти, вирішенню яких для одного з класів АЦП, а саме АЦП з неперервною функцією систематичної похибки, і присвячена дана робота. Необхідно відзначити, що саме такі АЦП є найточнішими на сьогоднішній день.

Аналіз методів забезпечення єдності результатів аналого-цифрового перетворення.

Під час експлуатації АЦП єдність їх результатів перетворення забезпечується шляхом проведення періодичних перевірок, процедура яких строго регламентована діючими нормативними документами [3, 4]. Згідно цих документів визначені класи засобів вимірювальної техніки, що повинні проходити метрологічну перевірку в уповноважених метрологічних лабораторіях. Метою метрологічної перевірки є встановлення придатності засобів вимірювальної техніки до застосування шляхом визначення їх дійсних метрологічних характеристик і порівняння з допустимими межами. Вимоги до перевірки власне АЦП регламентуються у [5...9], де всі АЦП поділяються на наступні види:

АЦП з неперервною функцією систематичної похибки, зокрема, інтегруючі;

АЦП з функцією систематичної похибки, що може мати розриви, зокрема, порозрядного зрівноваження.

Для АЦП першого виду кількість точок перевірки повинна бути не меншою п'яти. Згідно [4, 6], напруги точок метрологічної перевірки цих АЦП вибираються за формулами $X_1 = (0,1...0,15)X_D$, $X_2 = (0,2...0,3)X_D$, $X_3 = (0,4...0,6)X_D$, $X_4 = (0,7...0,8)X_D$, $X_5 = (0,9...1,0)X_D$, де X_D – діапазон перетворення АЦП. Згідно [6] напруги точок метрологічної АЦП $X_2...X_5$ вибираються аналогічно до [5, 7], змінено тільки значення точки $X_1 = (0,0...0,1)X_D$. Отже основні вимоги щодо метрологічної перевірки АЦП з неперервною функцією систематичної похибки є усталеними на протязі більш, ніж тридцяти років.

Всього передбачено два методи метрологічної:

Порівняння, при якому вхідна величина одночасно подається на АЦП, що повіряють, і на взірцевий засіб вимірювання, похибка якого є суттєво меншою. Похибку АЦП знаходять як різницю результатів перетворення АЦП, що повіряють, і результатів вимірювання взірцевим засобом.

Калібрування, при якому на вхід АЦП, що повіряють, подають взірцеві сигнали (значення яких відомо з похибкою, яка є суттєво меншою) і порівнюють результати перетворення із значеннями вхідного сигналу.

Перший метод передбачає паралельне включення до АЦП, що повіряють, значно точнішого АЦП, що повинен бути повірений як взірцевий засіб вимірювання, тобто також вимагає метрологічної перевірки.

Другий метод вимагає менше обладнання, простіше автоматизується. Зазвичай його реалізують з допомогою калібраторів електричних величин [10] або кодокерованих мір [11]. Такі прилади складніші за АЦП і повинні бути повірені як взірцеві засоби вимірювання, тобто також вимагають метрологічного обслуговування.

Пропозиції включення в склад програмного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи підсистеми, що забезпечує метрологічне супроводження [12...14] не вирішують проблеми пов'язаної з відсутністю в складі системи відповідних взірцевих засобів. Пропозиції включення в склад системи відповідних еталонних засобів, що забезпечують автоматичну метрологічну перевірку [15, 16], зважаючи на складність таких взірцевих

засобів та невирішеність питання їх власного метрологічного обслуговування, можуть вирішити лише проблему метрологічної перевірки АЦП в складі системи. Тому впровадження таких методів лише частково вирішує деякі з вказаних протиріч і в той самий час вимагає значно точніших взірцевих засобів для метрологічної перевірки вже самих вбудованих взірцевих засобів.

Пропонується включити в склад АЦП підсистему його повірки (самоповірки), що забезпечить бездемонтажну періодичну перевірку АЦП в процесі його експлуатації та буде мати спрощене власне метрологічне обслуговування.

Метою даної роботи є розробка та дослідження принципів реалізації такої підсистеми самоповірки прецизійних АЦП та оцінка похибки метрологічної перевірки. Очевидно, що ці принципи не повинні суперечити вимогам чинних нормативних документів до метрологічної перевірки АЦП.

Похибка вимірювального перетворювача на базі багаторезисторного подільника напруги

Нехай подільник напруги, що складається з N резисторів R_1, \dots, R_N , підключено до джерела напруги калібрування АЦП U_{REF} (див. рис. 1). В такому випадку, згідно II закону Кірхгофа, можна записати

$$U_{REF} = \sum_{i=1}^N U_{Ri} , \quad (1)$$

де: U_{Ri} , $i = \overline{1, N}$ – спади напруги на відповідних резисторах подільника.

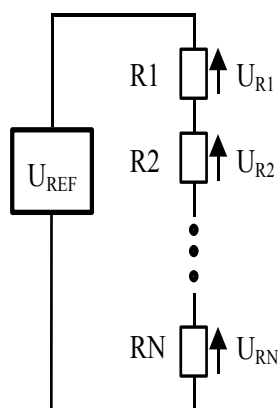


Рис. 1. Схема подільника напруги

Математичне сподівання спадів напруги на всіх резисторах – \overline{U} визначається як

$$\overline{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{Ri} . \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2), отримаємо

$$\overline{U} = U_{REF} / N . \quad (3)$$

Це означає, що математичне сподівання спадів напруги на всіх резисторах подільника \overline{U} не залежить від спадів напруги на окремих резисторах подільника, тобто, з врахуванням закону Ома, опори окремих резисторів подільника не впливають на \overline{U} . Через те, що N – натуральне число, відносна похибка $\delta_{\overline{U}}$ значення \overline{U} буде

$$\delta_{\overline{U}} = \delta_{REF} + \delta_{NOISE} , \quad (4)$$

де δ_{REF} - похибка джерела напруги живлення подільника, в нашому випадку напруги калібрування АЦП, δ_{NOISE} - тепловий шум напруги резисторів подільника [17].

Аналіз теплового шуму резисторів загального призначення у смузі частот прецизійних АЦП для робочих умов експлуатації показав, що його рівень не перевищує 5 нВ, що

відповідає ефективній розрядності АЦП 29 біт. Таким чином, багаторезисторний подільник напруги є вимірювальним перетворювачем, який він вносить у вимірювальний канал похибку нехтовно малу навіть для найточніших АЦП. Зважаючи, що ця похибка не прогресує з плином часу для метрологічної перевірки цього вимірювального перетворювача достатньо провести його опробування. Саме цю властивість багаторезисторного подільника напруги пропонується використати для побудови вбудованої системи метрологічної перевірки АЦП.

Висновки

Похибка вихідного сигналу вимірювального перетворювача на базі багаторезисторного подільника напруги при усередненні спадів напруги на всіх його резисторах рівна похибці джерела напруги живлення цього подільника і не залежить від значень опорів самих резисторів, тобто вклад такого подільника в бюджет похибки його вихідного сигналу прямує до нуля і визначається тепловим шумом спадів напруг на резисторах. Зважаючи на то, що тепловий шум резисторів з часом не прогресує для метрологічної перевірки такого подільника достатньо провести його апробування, тобто метрологічне обслуговування системи формування точок метрологічної перевірки зводиться до метрологічної перевірки джерела напруги живлення подільника, що є незрівнянно менш трудомістким процесом порівняно з метрологічною перевіркою АЦП в лабораторних умовах чи з використанням переносних калібраторів напруги. Зважаючи на вартість прецизійних джерел напруги доступних на ринку доцільно джерела напруги живлення подільників реалізувати взаємозамінним, та оснащеним електронним паспортом, в якому зберігаються результати його власної метрологічної перевірки, і експлуатувати разом з АЦП. Це дозволить проводити метрологічну перевірку АЦП в автоматичному режимі на місці експлуатації під час нетривалих перерв у процесі вимірювання. Така метрологічна перевірка проводитиметься в робочих умовах та дозволяє значно скоротити періодом порівняно з вимогами чинних нормативних документів, що підвищить метрологічну надійність результатів аналого-цифрового перетворення, та, при потребі, дозволить значно швидше виявити метрологічну або функціональну відмову вимірювального каналу кібер-фізичної системи.

1. Jiafu Wan, Nehua Yan, Hui Suo and Fang Li. *Advances in Cyber-Physical Systems Research. KSII TRANSACTIONS ON INTERNET AND INFORMATION SYSTEMS VOL. 5, NO. 11, November 2011, pp. 1891 – 1908.* 2. Мельник А. О. Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Секція комп'ютерні системи та мережі. – Львів, 2014, № 806, ст. 154 – 161. 3. Закон України про метрологію та метрологічну діяльність. [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/113/98-вр> . 4. ДСТУ 2709:2006 Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення. 5. ДСТУ 3744-98 - Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні умови. 6. ГОСТ 14014-91 Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. 7. ГОСТ 30605-98 Преобразователи измерительные напряжения и тока цифровые. Общие технические условия. 8. МИ 118-78. Методика поверки цифровых вольтметров и аналого-цифровых преобразователей. 9. МИ 1202-86. ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки. 10. Fluke Corporation 5720A (Multifunction Calibrator). [Електронний ресурс] – Режим доступу [http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU\(5720A\)](http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU(5720A)) . 11. Яцук В. Інформаційно-енергетичний підхід до оцінювання коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки. Вимірювальна техніка та метрологія. Випуск 68, 2008. с. 224-228. 12. Кондрашов С.І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.05 /НТУ“ХП”. – Харків, 2004. – 38 с. 13. Балев В.М. Методи та засоби контролю похибок вимірювальних каналів автоматизованих систем контролю та керування: Автореф. дис. к-та техн. наук: 05.11.05 /НТУ“ХП”. – Харків, 1999. – 23 с. 14. Соболев В.С. Метрологическое автосопровождение результатов измерений в интеллектуальных измерительных системах: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.16 /СПГЭТУ (ЛЭТИ). – Санкт-Петербург, 1999. – 36 с. 15. Микитин М., Стадник Б. Метрологічна перевірка інтелектуального термометра. Тези доповідей ІХ міжнародної науково-технічної конференції “Методи і засоби вимірювань фізичних величин” – “Температура–2012”, Львів, 25–28 вересня, 2012,

ст. 121–122. 16. Микийчук М.М. Актуальні питання метрологічної надійності промислових ЗВТ. Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2009, № 23. [Електронний ресурс] – Режим доступу http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/metody/2009_23/09mmmpz.pdf. 17. Давенпорт В.Б., Рут В.Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. М.: ИЛ, 1960. - 467 с.

Roman Kochan

Lviv National Polytechnical University,
Dept. of Specialized Computer Systems

Multi-Resistors Voltage Divider Implementation for Providing Metrology Reliability of Measurement Channels of Cyber-Physical Systems

There is analyzed requirements to testing points generation for metrology verification of measurement channels of cyber-physical systems based on analog to digital converters (ADC). The analysis of error was done of testing point generated by multi-resistors voltage divider with averaging of voltages of all resistors. There are proposed approaches of reference voltage source design, which simplify metrology verification of multi-range ADC to metrology verification of this reference voltage source.

Key words: Multi-Resistor Voltage Divider, metrology verification, verification.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 - 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.