

В. О. Яцук, М. М. Микийчук, Ю. В. Яцук
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедри метрології, стандартизації та сертифікації
і комп'ютеризованих систем автоматики

КАЛІБРУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ З ГАЛЬВАНІЧНО РОЗДІЛЕНИМИ КАНАЛАМИ

© Яцук В.О., Микийчук М.М., Яцук Ю.В. 2016

Дистанційне калібрування гальванічно розділених вимірювальних каналів запропоновано здійснювати в реальному масштабі часу та на місці експлуатації з використанням переносних кодо-керованих мір та подальшим опрацюванням проміжних кодів перетворення безпосередньо в контролері кіберфізичних систем. Для коригування похибок, пов'язаних з еквівалентними напругами зміщення активних компонентів як вимірювального, так і калібрувального каналів за різних кодів калібрування обґрунтовано застосування методу комутаційного інвертування з розміщенням перемикача полярності безпосередньо на виходах джерел вимірювальної і калібрувальної напруг. Запропоновано спосіб корекції мультиплікативних похибок кодо-керованого подільника, який полягає в опрацюванні згідно із запропонованим алгоритмом кодів проміжних результатів перетворення для різних значень коефіцієнтів передавання резистивного подільника. Подано також практичні умови реалізації запропонованого методу калібрування, метрологічної перевірки або ж оперативного контролю вимірювальних каналів з гальванічним розділенням.

Remote calibration of galvanic separated measuring channels is offered to carry out in real time and on situ by using portable code-controllable measures and further processing of intermediate code conversion directly in the controller cyber-physical systems. To correct errors related to equivalent offset voltage as active components both the measuring and calibration channels for different codes reasonably calibration of the inverting polarity method that switch placement directly on the outputs of sources of measuring and calibration voltages. A method multiplicative errors correction of code-controlled resistive divider, which is under the proposed processing algorithm codes interim results for different conversion coefficients of resistive divider. Posted as practical conditions of the proposed method of calibration, metrological checks or operational control of measurement channels with galvanic separation.

Вступ

Вимірювальні об'єкти зазвичай містять тисячі фізичних явищ, параметри яких постійно змінюються, що й спричинило появу на сучасному рівні кіберфізичних систем (КФС) [1]. Завдяки технологічним можливостям в царині мікроелектроніки та бурхливому прогресу в інформаційних технологіях сучасні КФС складаються з розпорошених апаратних компонентів і прикладного програмного забезпечення. Вони призначені для отримання вимірювальної інформації про перебіг фізичних процесів в контрольованих об'єктах, а також її зберігання, передавання, опрацювання та вироблення сигналів керування цими об'єктами. При цьому

вимірювальна інформація з контрольованих об'єктів повинна отримуватись із заданими метрологічними параметрами. Просторова розпорошеність вимірювальних каналів, можливі зміни в широких межах умов експлуатації та невідворотна деградація параметрів вимірювального кола призводять до суттєвого погіршення метрологічних властивостей вимірювальних каналів КФС. В цих умовах важливого значення набувають питання оперативного метрологічного забезпечення вимірювальних каналів КФС.

Кінцевою метою проведення оперативного контролю протікання процесів вимірювань в КФС є підвищення метрологічної надійності, реалізація якої пов'язана із достовірністю контролю, а також частотою його проведення. Достовірність контролю відображає ступінь об'єктивності результатів контролю і виражається через ймовірність прийняття правильного рішення із врахуванням ймовірностей неправильних рішень „поза межами допуску” та „в межах допуску” [2-5]. Відомо, що для забезпечення високої достовірності контролю на практиці слід забезпечувати симетричні межі допустимих значень похибок засобів вимірювань в реальних умовах експлуатації з математичним сподіванням рівним нулю, якого в реальних умовах експлуатації можна досягнути лише за умови коригування систематичної складової похибки.

Отже, питання комплексного підходу до калібрування вимірювальних каналів КФС потребує детальнішого розгляду.

Аналітичний огляд існуючих методів та засобів підвищення метрологічної надійності вимірювальних каналів КФС. Одним з найефективніших способів підвищення якості експлуатації КФС є підвищення частоти калібрування його вимірювальних каналів шляхом звірення з точнішим засобом чи калібратором з метою визначення і виключення систематичної похибки. Як систематична у вимірювальних колах найчастіше впливає адитивна складова похибки (АСП), за умови, що вихідні сигнали більшості сенсорів мають низькі рівні [6]. Її значення обумовлюється залишковими параметрами ліній зв'язку (ЛЗ) і комутаторів каналів (КМТ) та еквівалентних напруг зміщення і вхідних струмів пристроїв масштабного (МП) та аналого-цифрового перетворень АЦП [7]. важливого значення набуває задача Багатоканальні вимірювання сигналів низьких рівнів суттєво ускладнюються, особливо в умовах дії значних міжканальних завад та необхідності дотримання вимог іскро- та вибухобезпеки, наприклад, нафтогазові, енергетичні та хімічні виробництва [8-18]. Використання з цією метою гальванічно розділених підсилювачів призводить не тільки до суттєвого здорожчання усього тракту вимірювань, але й до необхідності коригування АСП в кожному з вимірювальних каналів. У ряді випадків гальванічно розділені підсилювачі мають недостатню електричну міцність ізоляції. Це з урахуванням вимог вибухобезпеки обумовлює використання в кожному з вимірювальних каналів бар'єрів іскрозахисту (БІ). Окремо слід наголосити на складності побудови багатоканальних термоелектричних термометрів, подовжувальні лінії в яких виготовляються з дорогих термоелектродних матеріалів, за одночасного забезпечення автоматичного коригування впливу зміни температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів (ТТ) [8-18].

Метрологічні характеристики гальванічно ізольованих каналів в основному визначаються параметрами пристроїв гальванічного розділення і точність типових промислових зразків знаходиться в межах декількох відсотків $\pm(0,5 \dots 2) \%$, що в багатьох випадках не задовольняє сучасних вимог [8-12].

Всі вимірювальні задачі незалежно від їх точності в конкретному випадку повинні бути здійснені із забезпеченням простежуваності [19, 20]. На практиці в сучасних вимірювальних системах, з огляду на велику кількість типів і масовість використовуваних вимірювальних пере-

творювачів та трудомісткість метрологічних процедур, простежуваність вимірювань фізичних величин не завжди забезпечується, як того вимагають нормативні документи [2, 21, 22].

На практиці дуже важливо досягти потрібної точності, стабільності та метрологічної надійності вимірювань в умовах експлуатації КФС.

Вибір методу корекції адитивної складової похибки

Промислові вимірювання супроводжуються суттєвим впливом АСП та завод нормального та спільного виду. Для зменшення впливу завод спільного виду використовується екранування і гальванічне розділення джерел вимірювального сигналу із пристроями опрацювання вимірювальної інформації та еквівалентний захист вимірювальних кіл. Загально прийнятим методом послаблення впливу завод є використання усереднювальних способів перетворення, особливо інтегровальних або дельта-сигма АЦП. Традиційно для корекції адитивної та мультиплікативної складових використовують періодичне автокалібрування за методом зразкових сигналів з від'єднанням вимірюваної величини від входу власне АЦП на час калібрування. Зазвичай після автокалібрування максимальне значення похибки коефіцієнта передачі не перевищує лише $\pm 0,5$ одиниць молодшого розряду, а максимальне значення АСП, зведеної до входу, не більше 10 мкВ [23]. Оскільки при цьому калібруванням не охоплене вхідне вимірювальне коло, яке включає в себе КМТ, ЛЗ, пристрої гальванічного розділення, то стає очевидною необхідність зменшення похибок, особливо при перетворенні сигналів малих рівнів.

Проведений аналіз показав, що теоретично мінімальне нескориговане значення АСП притаманне методу комутаційного інвертування з часовим розділенням вимірювального та коригувального завдяки практичній незмінності конфігурації вхідного кола під час вимірювання сигналів обох полярностей [7, 19]. нескориговане значення АСП практично визначатиметься тільки розкидом параметрів пар електронних ключів вхідного перемикача полярності – різницею опорів обох пар замкнених ключів перемикача полярності, а також зворотних струмів їх pn переходів. Для зменшення значення цієї похибки доцільно прагнути до ідентичності впливу параметрів ключів конструктивно-технологічними способами.

Коригування мультиплікативної складової похибки вимірювальних каналів напруги в умовах експлуатації. У загальному випадку похибка вимірювальних каналів (ВК) КФС описується многочленною моделлю [19]. Для переважної більшості промислових засобів вимірювань з огляду на межі нормованих значень їх метрологічних характеристик можна обмежитися тільки двома складовими та врахувати окремо часовий дрейф та зміну значень її складових при змінах параметрів довкілля в умовах експлуатації

$$\Delta_x = \Delta_{x0} + \Delta_{xt} + \Delta_{xp} = \Delta_0 + d_s X + \Delta_{0t} + d_{st} X + \Delta_{0p} + d_{sp} X, \quad (1)$$

де Δ_x – абсолютна похибка ВК в момент часу t в умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких змінювався як функція часу $\overline{p}_t = F(p, t)$; $\Delta_{x0} = \Delta_0 + d_s X$ – абсолютна похибка ВК в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градування) в нормальних умовах експлуатації; $\Delta_{xt} = \Delta_{0t} + d_{st} X$ – зміна абсолютної похибки за час $t-t_0$, який пройшов після проведення метрологічної перевірки або градування за умови роботи ВК в нормальних умовах експлуатації; $\Delta_{xp} = \Delta_{0p} + d_{sp} X$ – зміна абсолютної похибки за час $t-t_0$, який пройшов після проведення метрологічної перевірки або градування за умови роботи ВК в робочих умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких змінювався як функція часу $\overline{p}_t = F(p, t)$; $\Delta_0, \Delta_{0t}, \Delta_{0p}$ – відповідно АСП ВК в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градування) в нормальних

умовах експлуатації і її можливі зміни в момент часу t та в робочих умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких становив $\overline{p}_t = F(p, t)$; d_s – мультиплікативний коефіцієнт багаточленної моделі похибки ВК в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градування) в нормальних умовах експлуатації; d_{st}, d_{sp} – відповідно мультиплікативні коефіцієнти багаточленної моделі похибки ВК в момент часу t в робочих умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких становив $\overline{p}_t = F(p, t)$; X – значення вимірюваної величини.

Аналіз співвідношення (1) показує, що на основі нагромадження та опрацювання (апроксимації) масивів експериментальних даних, за аналогією до існуючих методів [4-6], можливо коригувати часові зміни похибки ВК даного типу. При цьому слід враховувати різноманіття впливних факторів, відносно великі діапазони зміни параметрів довкілля в робочих умовах експлуатації та відсутність прогнозованої інформації про можливий характер їх зміни. Тому на сьогоднішньому рівні розвитку вимірювальної техніки практично неможливо розроблення загальних методів корекції часових змін похибок ВК в робочих умовах експлуатації. Однак сучасний рівень розвитку мікроелектронних та інформаційних технологій принципово змінює підхід до структури вимірювального кола ВК, в якому загалом будь-які фізичні величини перетворюються в електричні сигнали. У першу чергу це пов'язано з інтелектуалізацією ВК та можливістю коригувань похибок вимірювального тракту з використанням відомих методів. Теоретично показано, що під час використання методу комутаційного інвертування нескориговане значення АСП, зведене до входу вольтметра, не перевищуватиме (у випадку реалізації перемикача полярності на основі серійних електронних МДН-ключів) [6, 7] $\Delta_{0ki} = 2R_x \Delta I_{bk} + (4I_{bk} + I_{bx}) \Delta R_k$, де Δ_{0ki} – нескориговане значення АСП; $R_x, \Delta R_k$ – опір джерела сигналу та максимальна різниця опорів ключів перемикача полярності; $I_{bk}, \Delta I_{bk}$ – максимальні значення відповідно струмів витоку та різниці струмів витоку ключів перемикача полярності (при найнесприятливіших значеннях параметрів впливних факторів в робочих умовах експлуатації); I_{bx} – максимальне значення вхідного струму ВК.

Багаторічний досвід експлуатації (з 1983 р. до сьогодні) серійних цифрових приладів типів А565 та ЦР7701 (приладобудівний завод “Мукачівприлад”) показав, що нескориговане значення адитивної складової їх похибки в робочих умовах експлуатації не перевищує декількох десятків мікрвольт. Отже, під час корекції похибок ВК за методом комутаційного інвертування їх часова та температурна стабільність в основному визначатиметься тільки стабільністю масштабних елементів.

Традиційно підвищують стабільність ВК КФС на основі використання найстабільнішої елементної бази, методу допоміжних вимірювань або конструктивно-технологічних методів усунення впливних факторів довкілля (екранування, термостатування, герметизація, тощо). Вказані шляхи забезпечення метрологічної надійності ВК є еволюційними і їх реалізація обмежується сучасними технічними, технологічними та економічними чинниками [6]. Принципово нові можливості відкриваються у випадку використання автоматичного калібрування з допомогою тільки одного прецизійного і стабільного блоку масштабування в ВК, особливо виконаного в інтегральній технології [23, 24]. Як відомо, за умови автоматичного коригування АСП, метрологічні властивості ВК з періодичним калібруванням в основному визначатимуться точністю і стабільністю зразкових мір напруги та кодо-керованих подільників. З урахуванням цього, під час реалізації високо стабільних ВК напруги перевагу слід віддати методу побудови з корекцією похибок комутаційним

інвертуванням вимірюваної та зразкової напруг (див. рис. 1). В режимі вимірювання з допомогою перемикача ПХН до входу ІП під'єднується вимірювана напруга U_{Xj} . Ізолювальний масштабний перетворювач забезпечує гальванічне розділення та масштабування вимірюваних напруг U_{Xj} до рівня, достатнього для зменшення похибок, зумовлених ЛЗ та КМТ, до рівня в декілька разів меншого від межі допустимих значень похибок вимірювального каналу. Вихідний сигнал U_{Xjs} ІП багатоканальних засобів вимірювань при цьому має рівень достатній для безпосереднього спряження із стандартними мікроелектронними АЦП, тому як КМТ можна використовувати й релейні ключі. Значення вихідної напруги U_{Xjs1} ІП₁ за певного стану перемикача ППХ знайдемо за співвідношенням [23]:

$$U_{Xjs1} = (U_{Xj} + e_{jAe1} + U_{jCA1})k_{jA}(1 + \delta_{jZA}) + e_{j0A1} + U_{jiXA1} + U_{jiCA1} + U_{jne1}, \quad (2)$$

де $e_{jAe1} = e_{jA} + e_{jBI} + e_{jPI1} + I_{jA}Z_{jXA}$ – еквівалентна напруга зміщення ІП_j для вхідної напруги U_{Xj} ; e_{jA} , e_{jBI} – відповідно напруги зміщення вхідних каскадів ІП_j та залишкова напруга бар'єрів іскрозахисту; $\delta_{jZA} @ Z_{jXA}/Z_{jA}$, I_{jA} , Z_{jA} – вхідний струм та опір ІП_j відповідно; Z_{jXA} – еквівалентний опір кола між входами ІП_j; $U_{jne} = I_{j11}Z_{jLL} + \left(I_{j12} + I_{jn} + \sum_{i=1}^{n-1} I_{i12} \right) (Z_{1jCC} + Z_{jLL})$ – еквівалентна напруга зміщення вхідного масштабувального блоку в АЦП; e_{j0A} – напруга зміщення вихідного каскаду ІП_j, U_{jCA} – еквівалентна вхідна напруга j -того увімкнутого каналу, зумовлена його еквівалентною напругою спільного виду $U_{jc} = U_{jcm} + U_{jG}$; U_{jiXA} – еквівалентна вхідна напруга j -того каналу, зумовлена проникненням вимірюваних напруг решти i -тих розімкнених каналів, U_{jiCA} – еквівалентна вхідна напруга j -того каналу, зумовлена проникненням еквівалентних напруг спільного виду $U_{ic} = U_{icm} + U_{iG}$ решти i -тих каналів, $e_{j0A} = e_{j0} + e_{jLZ}$; Z_{jG} , U_{jG} – опір та напруга між точками заземлення j -того вимірюваного об'єкту та ІП_j відповідно, k_{jA} коефіцієнт передачі ІП_j.

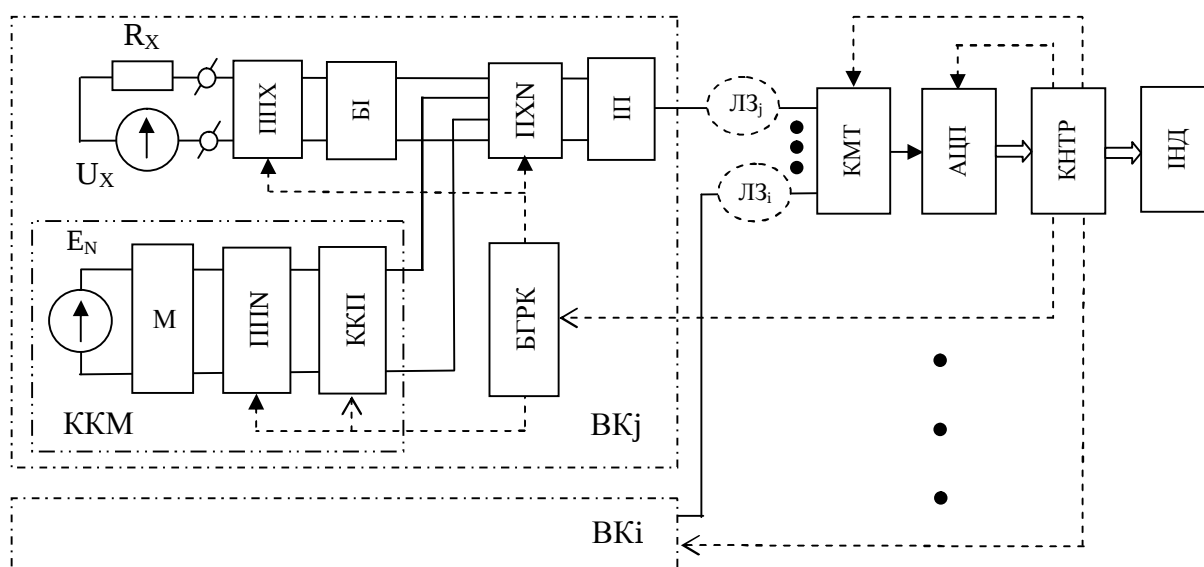


Рис. 1. Функціональна схема кіберфізичної системи з гальванічно розділеними вимірювальними каналами та автокалібруванням

ППХ, ППН – перемикачі полярності вимірювального та калібрувального каналів відповідно; ПХН – перемикач вимірювального та калібрувального сигналів відповідно; М – масштабувальний подільник зразкової напруги; ККП – кодо-керований подільник; ІП – ізолювальний масштабний перетворювач; ККМ – кодо-керована міра напруги; БГРК – блок гальванічного розділення та керування вимірювальним каналом; ВК_j, ВК_i – j -тий та i -тий

вимірювальні канали відповідно; КНТР – контролер кіберфізичної системи; ІНД – пристрій відображення інформації

За іншого положення перемикача ППХ значення вихідної напруги U_{Xjs2} ІП_i дорівнюватиме

$$U_{Xjs2}=(-U_{Xj}+e_{jAe2}+U_{jCA2})k_{jA}(1+\delta_{jZA})+e_{j0A2}+U_{jiXA2}+U_{jiCA2}+U_{jne2}, \quad (3)$$

де $e_{jAe2}=e_{jA}+e_{jBI}+e_{jII2}+I_{jA}Z_{jXA}$ – еквівалентна напруга зміщення ІП_j для вхідної напруги $-U_{Xj}$.

З допомогою АЦП вихідні напруги перетворюватимуться в цифрові коди $N_{Xj1}=k_{AD}U_{Xjs1}$, $N_{Xj2}=k_{AD}U_{Xjs2}$, а код результату вимірювання в j -тому вимірювальному каналі буде дорівнювати $N_{Xj}=N_{Xj1}-N_{Xj2}$

$$N_{Xj}=k_{AD}[(2U_{Xj}+\Delta e_{jAX})k_{jA}(1+d_{jZA})+\Delta U_{jAX}], \quad (4)$$

де $\Delta e_{jAX}=(e_{jAe1}-e_{jAe2})-(U_{jCA1}-U_{jCA2})$ – нескориговане значення еквівалентної напруги зміщення ІП_j; $\Delta U_{jAX}=(e_{j0A1}+U_{jiXA1}+U_{jiCA1}+U_{jne1})-(e_{j0A2}+U_{jiXA2}+U_{jiCA2}+U_{jne2})$ – нескориговане значення похибок, зумовлених впливними параметрами ЛЗ, КМТ та еквівалентної напруги зміщення вхідного масштабувального блоку в АЦП.

Нескориговане значення Δe_{jA} еквівалентної напруги зміщення ІП_j визначатиметься виразом подібним до класичних реалізацій методу комутаційного інвертування та залежатиме від опору джерела сигналу та максимальної різниці опорів ключів, максимальних значень відповідно струмів витоку та різниці струмів витоку ключів перемикача полярності. За найнесприятливіших значеннях параметрів впливних факторів в робочих умовах експлуатації значення цієї похибки може не перевищувати десятих часток мікрівольта [6, 19].

У режимі калібрування з допомогою перемикача ПХН вимірюваний сигнал відмикається та до входу ІП_j під'єднується калібрувальний сигнал з виходу кодо-керованої міри напруги ККМ. Значення результату вимірювання знаходиться як алгебрична сума кодів двох результатів проміжних перетворень при додатній та від'ємній полярностях опорної напруги. Значення вихідної напруги U_{Njs1} та U_{Njs2} ІП_i за обох станів перемикача ППН знайдемо за співвідношеннями:

$$U_{Njs1}=(0,5mE_{Nj}+e_{jANe1}+U_{jNA1})\mu k_{jA}(1+\delta_{jZA})+e_{j0A1}+U_{jiXA1}+U_{jiCA1}+U_{jne1}, \quad (5)$$

$$U_{Njs2}=(-0,5mE_{Nj}+e_{jANe2}+U_{jNA2})\mu k_{jA}(1+\delta_{jZA})+e_{j0A2}+U_{jiXA2}+U_{jiCA2}+U_{jne2}, \quad (6)$$

де $e_{jANe1}=e_{jA}+e_{jIIN1}+I_{jA}Z_{jNA1}$, $e_{jANe2}=e_{jA}+e_{jIIN2}+I_{jA}Z_{jNA2}$ – еквівалентні напруги зміщення ІП_j для вхідних напруг $0,5E_{Nj}$ та $-0,5E_{Nj}$; e_{jIIN1} , e_{jIIN2} – відповідно напруги зміщення калібруатора при одному та іншому положеннях ППХ; Z_{jNA1} , Z_{jNA2} – еквівалентні опори кола між входами ППХ.

Напруги U_{Njs1} , U_{Njs2} перетворюватимуться в цифрові коди $N_{Nj1}=k_{AD}U_{Njs1}$, $N_{Nj2}=k_{AD}U_{Njs2}$, а код результату калібрування в j -тому вимірювальному каналі буде дорівнювати $N_{Tj}=N_{Nj1}-N_{Nj2}$

$$N_{Nj}=k_{AD}[(mE_{Nj}+\Delta e_{jAN})\mu k_{jA}(1+d_{jZA})+\Delta U_{jAN}], \quad (7)$$

де $\Delta e_{jAN}=(e_{jANe1}-e_{jANe2})-(U_{jCA1}-U_{jCA2})$ – нескориговане значення еквівалентної напруги зміщення ІП_j $\Delta U_{jAN}=(e_{j0A1}+U_{jiXA1}+U_{jiCA1}+U_{jne1})-(e_{j0A2}+U_{jiXA2}+U_{jiCA2}+U_{jne2})$ – нескориговане значення похибок, зумовлених впливними параметрами ЛЗ, КМТ та еквівалентної напруги зміщення вхідного масштабувального блоку в АЦП.

У першому наближенні вважатимемо, що за час проведення калібрувань значення еквівалентних напруг зміщення ІП_j та значення похибок, зумовлених впливними параметрами ЛЗ, КМТ та еквівалентної напруги зміщення вхідного масштабувального блоку в АЦП практично не змінилось $\Delta e_{jAN} \approx \Delta e_{jAX}$. Аналіз співвідношення (7) показує, що мультиплікативна складова похибки під час калібрування вимірювальних каналів КФС залежатиме від низки чинників: похибок δ_N ДОН, масштабувального подільника δ_m , кодо-керованого подільника δ_μ , коефіцієнтів перетворення ІП_j δ_{jA} , АЦП δ_{AD} , методичної похибки δ_{jZA} . Основною вимогою до проведення операції калібрування в робочих умовах експлуатації

є незмінність значень калібрувальних величин. Тому під час вибору методів та розроблення методик калібрування необхідно зменшувати кількість стабільних величин, оскільки від цього залежить не тільки зменшення похибки калібрування, але загалом й собівартість, трудомісткість метрологічного обслуговування і конкурентоспроможність засобу вимірювань.

З огляду на викладене пропонується вдосконалена методика калібрування вимірювальних каналів КФС, яка полягає у визначенні поточних значень коефіцієнта перетворення вимірювального каналу КФС з використанням як зразкових лише значень E_{Nj} ДОН та m масштабувального подільника. При цьому поточні значення коефіцієнта перетворення вимірювального каналу підраховуються безпосередньо в контролері КФС. Методом комутаційного інвертування визначаються коди проміжних перетворень при двох значеннях μ_1 та μ_2 кодів керування ККП та отримуються два значення калібрувальних кодів

$$N_{1Nj} = k_{AD} [(mE_{Nj} + \Delta e_{jAN}) m_1 k_{jA} (1 + d_{jZA}) + \Delta U_{jAN}], \quad (8)$$

$$N_{2Nj} = k_{AD} [(mE_{Nj} + \Delta e_{jAN}) m_2 k_{jA} (1 + d_{jZA}) + \Delta U_{jAN}], \quad (9)$$

де $\mu_1 = \mu_{1H}(1 + \delta_{\mu 1})$, $\mu_2 = \mu_{2H}(1 + \delta_{\mu 2})$; μ_{1H} , μ_{2H} , $\delta_{\mu 1}$, $\delta_{\mu 2}$ – номінальні значення та відносні похибки коефіцієнтів передавання ККП.

Метою калібрування вимірювального каналу є визначення дійсного значення коефіцієнта перетворення вимірювального каналу КФС в даний момент часу та при даних умовах експлуатації. Для його визначення перетворимо вираз (7), нехтуючи складовими другого порядку малості, і знайдемо відношення кодів N_{1Nj}/N_{2Nj} та різницю $N_{1Nj} - N_{2Nj} \mu_{1H}/\mu_{2H}$

$$N_{Nj} \cong k_{AD} k_{jA} m E_{Nj} (1 + d_{jZA}) \left(1 + \frac{\Delta e_{jAN}}{m E_{Nj}} + \frac{\Delta U_{jAN}}{k_{jA} m E_{Nj}} \right), \quad (10)$$

$$\frac{N_{1Nj}}{N_{2Nj}} \cong \frac{m_{1H}}{m_{2H}} \left[1 + (d_{m1} - d_{m2}) + \frac{\Delta U_{jAN}}{k_{jA} m E_{Nj}} \left(\frac{1}{m_{1H}} - \frac{1}{m_{2H}} \right) \right], \quad (11)$$

$$N_{1Nj} - N_{2Nj} \frac{m_{1H}}{m_{2H}} \cong k_{AD} k_{jA} m E_{Nj} (1 + d_{jZA}) \left[(d_{m1} - d_{m2}) + \frac{\Delta U_{jAN}}{k_{jA} m E_{Nj}} \left(\frac{1}{m_{1H}} - \frac{1}{m_{2H}} \right) \right]. \quad (12)$$

З виразу (11) визначимо похибку

$$(d_{m1} - d_{m2}) + \frac{\Delta U_{jAN}}{k_{jA} m E_{Nj}} \left(\frac{1}{m_{1H}} - \frac{1}{m_{2H}} \right) = \frac{N_{1Nj}}{N_{2Nj}} \cdot \frac{m_{2H}}{m_{1H}} - 1 \quad (13)$$

та підставляючи її у вираз (12) отримаємо співвідношення для визначення дійсного значення коефіцієнта перетворення вимірювального каналу КФС в даний момент часу та при даних умовах експлуатації

$$k_{AD} k_{jA} (1 + d_{jZA}) = \frac{N_{2Nj}}{m E_{Nj}} \cdot \frac{m_{1H}}{m_{2H}}. \quad (14)$$

Як показує аналіз співвідношення (14), під час калібрування вимірювальних каналів КФС у першому наближенні АСП коригуватиметься до значень, що залежать лише від неідентичності ключів перемикача полярності опорної напруги, мультиплікативна складова похибки визначатиметься лише інструментальною похибкою ДОН та масштабувального подільника та їх часовими змінами та змінами, зумовленими мінливістю умов експлуатації.

Як видно із співвідношення (14), з похибкою до членів другого порядку малості, значення коду результату вимірювання визначатиметься похибкою міри зразкової напруги. Очевидно, що така міра за структурою дуже подібна до схеми серійно виготовлюваних ЦАП напруги і її можна виготовляти як окрему інтегральну мікросхему. Однак вона може бути виготовлена й у вигляді резистивного подільника з електронною комутацією виходів. Таку міру напруги шляхом екранування можна захистити від впливу електромагнітних полів та

радіаційних випромінювань, герметизацією – від впливу вологості та шкідливої дії агресивних хімічних сполук тощо.

Висновки

Зроблений аналіз показав, що традиційні методи забезпечення та оперативного контролю метрологічних властивостей вимірювальних каналів КФС практично важко застосувати через їх просторову розпорошеність. Обґрунтовано використання методу комутаційного інвертування під час побудови вимірювальних каналів КФС в реальному масштабі часу з розміщенням перемикачів полярності обох сигналів вимірювального та калібрувального безпосередньо на виходах відповідно джерел вимірювального сигналу та зразкової напруги. Обґрунтовано, що під час здійснення калібрування принципово можливо визначати їх результати безпосередньо в контролері КФС. Запропонована вдосконалена методика коригування мультиплікативної складової похибки, яка полягає в опрацюванні кодів проміжних результатів перетворення при двох різних значеннях коду кодо-керованого подільника, який з метою спрощення реалізації може складатися лише з трьох резисторів та двох вихідних ключів. Показано, що таке технічне рішення дає змогу здійснювати оперативне контролювання метрологічних характеристик вимірювальних каналів КФС, якщо кодо-керована міра напруги виготовлюється як малогабаритний та знімний блок.

1. Yatsyshyn S, *Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 1. Challenge of Modernity* / S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Y. Lutsyk, V. Yatsuk // *Sensors and Transducers*, Vol. 186, Issue 3, March 2015, pp. 1-11. 2. ISO 10012:2003. *Measurement management systems – Requirements for measurement process and measuring equipment*. 3. Орнатский П.П. *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с. 4. ГОСТ 8.565-99. ГСИ. Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов. 5. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. 6. Яцук В.О., Малахівський П.С. *Методи підвищення точності вимірювань: Підручник для ВНЗ*. – Львів: Вид-во «БЕСКІД-біт», 2008. – 368 с. 7. Yatsuk Yu. *Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 7. Additive Error Correction for Measuring Instrument* / Yu. Yatsuk, M. Mykyjchuk, R. Yanovych, V. Yatsuk // *Sensors & Transducers*, Vol. 189, Issue 6, June 2015, pp. 107-115. 8. *Data-Acquisition-Handbook, A Reference For DAQ And Analog & Digital Signal Conditioning, Third Edition, 2012* by Measurement Computing Corporation, USA: available [<http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf>]. 9. *Data Acquisition Systems*, Omega Company Products, One Omega Drive, Stamford, CT 06907, 1-888-TC-OMEGAUSA: available [<http://www.omega.com/techref/pdf/dasintro.pdf>]. 10. *Data Acquisition (DAQ) Fundamentals, Application Note 007*, National Instruments Corporation, August 1999: available [http://physweb.bgu.ac.il/COURSES/SignalNoise/data_aquisition_fundamental.pdf]. 11. *Instrumentation and Measurement, 2015 Analog Devices, Inc.*: available [<http://www.analog.com/en/applications/markets/instrumentation-and-measurement.html>]. 12. *Finding the Needle in a Haystack: Measuring small differential voltages in the presence of large common-mode voltages* by Scott Wayne. – *Analog Dialogue* 34-1 (2000), available [<http://www.analog.com/>]. 13. *DORII – Deployment of Remote Instrumentation Infrastructure* [<http://www.nm.ifi.lbk.de/pub/Publikationen/abcd09/PDF-Version/abcd09.pdf>]. 14. F. Davoli, N. Meyer, R. Pugliese, S. Zappatore, Eds., *Grid-Enabled Remote Instrumentation*, Springer, New York, NY, 2008; ISBN 978-0-387-09662-9. 15. *Remote Instrumentation Infrastructure for e-Science. Approach of the DORII project* IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 21-23 September 2009, Rende (Cosenza), Italy [http://www.researchgate.net/publication/224085483_Remoteinstrumentation_infrastructure_for_eScience_Approachof_the_DORII_project]. 16. *Generic System for Remote Testing and Calibration of Measuring Instruments: Security Architecture* M. Jurčević, H. Hegeduš, M. Golub, *MEASUREMENT SCIENCE*

REVIEW, Volume 10, No. 2, 2010, pp. 50-55 doi:10.2478/v10048-010-0012-8. 17. Calibration and Verification of Remote Sensing Instruments and Observations, Richard Müller, Remote Sens. 2014, 6, 5692-5695; doi:10.3390/rs6065692. 18. Remote Calibration Using Mobile, BKtiagent Technology, M. M. Albu, Member, A. Ferrero, F. Mihai, and S. Salicone, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, NO. 1, February 2005. – pp. 24-30. 19. Метрологія та вимірювальна техніка, підручник / Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г.; за ред. проф. Поліщука Є.С. – 2-е вид., доп. та переробл. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 544 с. 20. Measurement Uncertainties in Science and Technology, M. Grabe, Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-20944-7, DOI 10.1007/b138915, 2005, 230 p. 21. ISO 9001:2000 Quality management systems – Requirement. 22. ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories 23. Yatsuk Yu. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 11. Error Correction of Measuring Channel / Yu. Yatsuk, M. Mykyjchuk, R. Yanovych, V. Zdeb // Sensors & Transducers, Vol. 192, Issue 9, September 2015, pp. 22-29. 24. Яцук В.О., Здеб В.Б. Віддалене коригування похибок багатоканальних кіберфізичних вимірювальних систем // Матеріали І-го наукового семінару. – 25-26 червня 2015 р., Львів, Україна. – Сс. 172-176.

Наукові результати, представлені в цій статті, були отримані в рамках дослідницького проекту 0115U000446, 01.01.2015 – 31.12.2017, за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.