

ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ У РЕАЛЬНОМУ МАСШТАБІ ЧАСУ

PROVIDING METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING SYSTEMS IN REAL TIME

*Яцук В. О., д-р техн. наук, проф., Яцук Ю. В., канд. техн. наук, доц.
Національний університет "Львівська політехніка", Україна; e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com*

*Vasyl Yatsuk, Dr. Sc., Prof.; Yuriy Yatsuk, PhD., Ass.-Prof.,
Lviv Polytechnic National University; e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.02.064>

Анотація. Для забезпечення придатності методів вимірювання та вимірювального обладнання кіберфізичних систем на основі мереж фізичних та обчислювальних компонентів, які взаємодіють, упроваджують системи керування вимірюваннями. Реалізувати методи оперативного контролювання параметрів вимірювальних каналів розпорознених кіберфізичних систем на основі традиційних підходів практично неможливо через необхідність демонтажу та повторного монтажу їх вимірювальних компонентів. Окрім того, не перевіряються метрологічно з'єднувальні лінії між сенсорами та вимірювальними каналами та між вимірювальними пристроями різної ієрархії. Реалізація ж методу оперативного контролювання на основі переносних кодокерованих мір пов'язана із необхідністю автоматичного коригування похибок для кожного зі значень встановлюваних кодів та суттєвим впливом параметрів комутаційних елементів; це можливо тільки за умови наявності прецизійної елементної бази для відтворення величини, однорідної з вимірюваною.

Запропоновано реалізувати оперативне контролювання вимірювальних каналів кіберфізичних систем на основі тестових методів, що дає можливість відстежувати зміни вимірюваної величини. Для швидкодії доцільно застосовувати просторове розділення вимірювальних каналів із коригуванням похибок. Запропоновано тривходову структуру вимірювального каналу напруги постійного струму та подано її функцію перетворення. Показано, що у випадку незначних змін вимірюваної величини результат вимірювання можна отримати за час одного циклу перетворення. Під час істотних змін вимірюваної величини за умови необхідності регулювання параметрів технологічного процесу в реальному масштабі часу можна визначати швидкість її зміни протягом трьох послідовних циклів перетворення та вибирати будь-яке із отриманих значень.

Здійснений аналіз похибок показав, що метрологічні властивості вимірювальних каналів кіберфізичних систем визначаються лише параметрами однозначних зразкових мір електричних величин. Наголошено на можливості реалізації віддаленого калібрування у реальному масштабі часу каналів вимірювання напруги постійного струму за умови, що однозначна міра напруги є знімною та переносною і можна виконати корекцію її додаткових похибок.

Ключові слова: кіберфізичні системи, метрологічне забезпечення, коригування похибок, тестові методи, просторове розділення вимірювальних каналів.

Abstract. In order to ensure the suitability of measurement methods and measuring equipment of cyber-physical systems based on the interacting networks of physical and computing components, measuring-management subsystems are implemented. Realization of operational-checking methods of parameters of measurement channels of scattered cyber-physical systems on the basis of traditional approaches is practically impossible due to the necessity of dismantling and re-installation of their measuring units. In addition, no metrological checks of connecting lines between sensors and measuring channels, and between measuring devices of different hierarchies are foreseen. Implementation of the mentioned methods on the basis of portable code-managed measures is related to the need for automatic error adjustment for each of the values of the set codes and the significant influence of the parameters of switching elements; this becomes possible only if there is a precision element base for reproduction of value homogeneous with a measurable one.

It is proposed to carry out operational control of measuring channels of cyber-physical systems on the basis of test methods, which makes it possible to track changes in the measured value. For speed, spatial separation of measuring channels with error correction should be used. Three input structures of the measuring channel of DC voltage are proposed and their transformation function is given. It is shown for minor changes in the measured value the result of the measurement can be obtained during one conversion cycle. During significant changes in the measured value, if it is necessary to adjust the parameters of the technological process in real time, one can determine the rate of its change during 3 successive conversion cycles and choose any of the obtained values.

Analysis of errors has exemplified that the metrological properties of measuring channels of cyber-physical systems are defined only by parameters of single-valued measures of the certain electrical quantities. The possibility of realizing remote calibration in real time of measurement channels of DC voltage is emphasized, provided that the unambiguous voltage measure is made the removable and portable, and it is possible to make correction of its additional errors.

Key words: Cyber-Physical Systems, Metrological support, Error adjustment, Test methods, Spatial separation of measuring channels.

Вступ

Одним зі шляхів розвитку сучасної вимірювальної техніки є тенденція до її інтелектуалізації та реалізації здебільшого як малогабаритних або вбудованих функціонально та конструктивно завершених блоків і модулів. Цього вдається досягти завдяки бурхливому розвитку мікроелектроніки та інформаційних технологій, які уможливають серійне виготовлення прецизійних перетворювальних еле-

ментів. Це дає можливість реалізувати вимірювання в реальному масштабі часу на основі портативних кодкерованих мір. Реалізація ж методу оперативного контролювання на основі переносних кодокерованих мір пов'язана із необхідністю автоматичного коригування похибок для кожного зі значень встановлюваних кодів та суттєвим впливом параметрів комутаційних елементів; це можливо тільки за умови наявності прецизійної елементної бази для відтворення величини, однорідної з вимірюваною.

ментів із широкими функціональними можливостями та зазвичай невеликої вартості [1]. Наприклад, мікросхема AD4110-1 – це повний, одноканальний, універсальний АЦП для систем управління промисловими процесами, особливо для застосувань, у яких потрібна гнучкість до типу використовуваного сенсора, та за ціною, не вищою за 10 \$ [2, 3]. На основі таких АЦП можна побудувати розпорошені інформаційно-вимірвальні системи для практичної реалізації сучасної промислової революції, так званої Industry 4.0, та Інтернету речей IoT. Очевидно, що реалізація таких розпорошених систем – кіберфізичних систем (КФС) – вимагає й розроблення нових методів і пристроїв вимірювання та їх метрологічного забезпечення Metrology 4.0 [4]. Спостерігати за віддаленими фізичними явищами та контролювати їх параметри можна завдяки розробкам нових сенсорів, методів отримання і вдосконалення систем збирання даних тощо [5].

Фундаментом забезпечення якості є необхідність підтримування потрібних співвідношень між точністю параметрів технологічних процесів та точністю їх контролю, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність продукції, економію паливно-енергетичних ресурсів, матеріалів, рівень упровадження ресурсозберігальних технологій у сучасних виробництвах [6, 7]. У вимірвальних каналах (ВК) КФС виникають систематичні та випадкові складові похибок, з адитивною та мультиплікативною складовими [8]. Їх значення зазвичай великі та мають великі часові та температурні дрейфи [9–11]. Сучасні нормативні документи рекомендують впроваджувати такі системи керування вимірюваннями, які забезпечують придатність вимірвального обладнання та методів вимірювання до використання за призначенням та заданий рівень ризиків отримання невірогідних результатів вимірювання [12].

Тому доцільно здійснювати метрологічне обслуговування ВК КФС безпосередньо на місці експлуатації. Запропоновано практично реалізувати таку концепцію на основі переносних калібраторів фізичних величин з можливістю їх розміщення безпосередньо в технологічних об'єктах [8]. Для забезпечення потрібної метрологічної надійності такі калібратори необхідно перевіряти в спеціальних лабораторіях та переміщати безпосередньо на вимірювані об'єкти.

На місці експлуатації можливі істотні зміни неінформативних параметрів довкілля, тому в таких калібраторах необхідно передбачити низку конструктивно-технологічних, захисних та запобіжних заходів. Традиційно коригування похибок переносних калібраторів здійснює оператор у ручному режимі. Однак зміна температури довкілля спричиняє значні зміни й похибок таких калібраторів.

Недоліки

У багатьох практичних випадках ручне коригування похибок є трудомістким або й неможливим, наприклад, на атомних електростанціях [8]. Оперативне контролювання ВК КФС за допомогою переносних калібраторів зазвичай потребує встановлення декількох значень зразкових відтворюваних величин. Суттєві зміни адитивних складових похибки (АСП) на місці експлуатації ВК КФС сигналів низького рівня призводять до необхідності коригування адитивних зміщень калібраторів для всіх встановлюваних значень кодів, оскільки їх АСП трансформуються у мультиплікативні складові похибки (МСП) [10, 11]. У результаті процедура обслуговування ВК КФС істотно ускладнюється та стає практично непридатною. Тому автоматизація процесів метрологічного обслуговування ВК підвищує продуктивність та дає змогу значно поліпшити метрологічні показники калібраторів. Для цього доцільно застосовувати калібратори активних величин з автоматичним коригуванням адитивних зміщень методом подвійного інвертування сигналів [11, 13]. Зважаючи на невелику вартість сучасної елементної бази, увагу дослідників привертають методи автоматичної корекції похибок, спрямовані на зниження рівня похибок, що вже існують, і тому можуть бути використані для тестування будь-яких ВК КФС. Не завжди можна відключити фізичну величину від входу приладу або створити набір її мір, тому дуже привабливим є використання тестових методів, які формують з участю як вимірюваних, так і зразкових величин.

З урахуванням досягнень сучасних мікроелектронних та інформаційних технологій ВК електричних величин повинні мати схемотехніку, придатну для виготовлення у вигляді інтегральної мікросхеми або на мікросхемах високого ступеня інтеграції, наприклад, програмованих системах на чипі.

Отже, розроблення, вдосконалення і широке впровадження методів і засобів для оперативного контролювання каналів вимірювання електричних величин на місці експлуатації в широкому діапазоні зміни неінформативних параметрів довкілля є актуальним завданням.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження можливостей вдосконалення і впровадження методів і засобів для оперативного контролювання каналів вимірювання електричних величин на місці експлуатації у широкому діапазоні зміни параметрів довкілля.

Вдосконалення методів та засобів оперативного контролювання вимірювальних каналів розпорощених систем

Насичення ринку доступними за ціною і малогабаритними мікроелектронними виробами та однокристальними мікро-ЕОМ із широкими функціональними можливостями якісно змінює підхід до проектування і використання засобів вимірювання. Сучасне виробництво є практично автоматизованим і сьогодні легко реалізується концепція побудови розпорощених вимірювальних систем, склад і місце розташування яких можуть гнучко змінюватись (як у часі, так і в просторі) залежно від зміни структури й обсягів виробництва. У ВК таких КФС доцільно застосовувати якомога вищий рівень автоматизації, метрологічну надійність і задану точність у робочих умовах експлуатації. Тому й засоби їх метрологічного забезпечення повинні бути вбудованими й багатфункціональними.

1.1. Принцип побудови вбудованих засобів тестування

Тестові методи вимірювань застосовують для отримання як вимірювальної інформації, так і параметрів функції перетворення ВК. Усі тести реалізують обов'язково із вимірюваною величиною. До переваг тестових методів вимірювань першочергово зарахуємо відсутність втрат вимірювальної інформації, можливість використання невеликої кількості тестів та придатність до оперативного контролювання параметрів ВК [14]. У загальному випадку апроксимації функції перетворення ВК КФС поліномом степеня n необхідно здійснити n вимірювань, скласти систему $n+1$ рівнянь, з якої можна визначити як вимірювану величину, так і усі коефіцієнти функції перетворення. Степінь апроксимаційного полінома визначатиме складність розв'язування системи рівнянь. Оскільки параметри коефіцієнтів перетворення змінюються у часі та під впливом змін умов довкілля, то за умови, що час вимірювань набагато менший від швидкості їх зміни, суттєво підвищуватиметься точність вимірювань. На практиці можна використовувати адитивні, мультиплікативні та функціональні тести. Адитивні тести (АТ) реалізуються як сума вимірюваної та зразкової величин, мультиплікативні (МТ) – як добутки вимірюваної величини та зразкового коефіцієнта передавання. Функціональні тести формуються як певні функції вимірюваної та зразкової величин. Функціональні тести практично не використовуються, а мультиплікативні тести зазвичай складно практично реалізувати, позаяк для їх втілення необхідно застосовувати прецизійні та стабільні елементи

[15]. Окрім того, під час практичної реалізації тестових методів впливатимуть також залишкові параметри комутаційних елементів. Для зменшення впливу цих елементів доцільно розташовувати блоки формування АТ та МТ якомога далі від входу, тобто ближче до АЦП, або використовувати двоканальну структуру ВК [14–16].

Практично важливим є питання використання тестів тільки одного виду – найпростіших адитивних або мультиплікативних. Під час розроблення ВК КФС за умови порівняно невисоких вимог до їх точності та застосування сучасної елементної бази функцію перетворення можна апроксимувати лінійним двочленом.

Під час використання тестових методів назагал зменшується швидкодійність вимірювання і це призводить до появи динамічних похибок, пов'язаних із можливою зміною вимірюваної величини. Оскільки під час реалізації тестових методів вимірювана величина постійно підключена до ЗВТ, то за допомогою спеціальних структурних схем і алгоритмів можна значно зменшити загальний час перетворення і зробити швидкодію отримання результатів вимірювання такою, що відповідає швидкодії власне ЗВТ.

1.2. Тестові методи із просторовим розділенням каналів перетворення

Час одержання результату вимірювання можна принципово зменшити завдяки створенню схем із просторовим розділенням каналів перетворення вимірюваної величини, адитивного і мультиплікативного тестів. У загальному випадку структурна схема ВК для реалізації такого алгоритму складається із трьох ідентичних каналів [14, 15]. На вхід ВК1 подається вимірювана величина $X(t_i)$, на вхід ВК2 адитивний тест $[X(t_i)+B]$, а на вхід ВК3 – мультиплікативний тест $[KX(t_i)]$. У момент часу t_i з виходу всіх трьох ВК одержують сигнали $V_1(t_i)$, $V_2(t_i)$, $V_3(t_i)$, які пов'язані з вимірюваною величиною X традиційними співвідношеннями (відповідно, без тестів, тільки з адитивним і тільки з мультиплікативним тестами). На підставі цих результатів перетворення складають систему трьох рівнянь із трьома невідомими – коефіцієнтами МСП усіх трьох каналів. Однак під час практичного використання необхідно скоригувати АСП та МСП усіх ВК. Наприклад, для зменшення впливу їх інструментальних похибок доцільно виконати операцію налаштування у двох точках діапазону $X_i=0$ та $X_i=X_k$, де X_k – значення зразкової величини. Нескориговане значення похибок визначатиметься дрейфами АСП та коефіцієнтів передавання кожного із ВК. Така процедура призводить до істотного зростання трудомісткості метрологічного обслуговування ВК.

Для зменшення похибок доцільно застосувати спосіб взаємного автоматичного опрацювання сигналів для визначення вимірюваної величини за спеціальним алгоритмом. Структура такого засобу вимірювання складатиметься із трьох ВК, до яких по чергово підключатимуться адитивний та мультиплікативний тести. Окрім необхідності гальванічного розділення живлень усіх ВК та блоків формування АТ та МТ, до недоліків цього способу належить великий вплив залишкових параметрів комутаційних елементів для реалізації різночасового підключення до входів усіх ВК тестових сигналів.

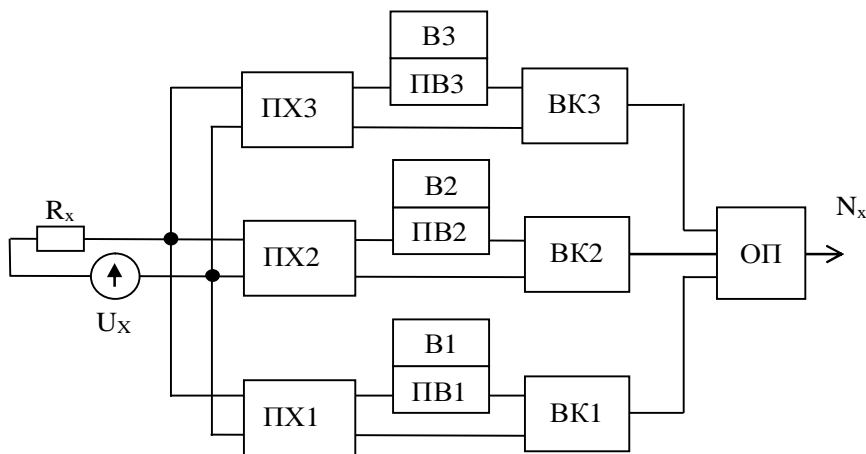
1.3. Тестовий алгоритм зменшення динамічних похибок із комутаційним інвертуванням

Для суттєвого зменшення впливу залишкових параметрів комутаційних елементів доцільно засто-

сувати спосіб коригування похибок ВК у реальному масштабі часу з комутаційним інвертуванням (див. рисунок). В основу структури покладено просторове розділення трьох ВК1-ВК3, у кожному з яких забезпечується можливість інвертування вимірювального сигналу за допомогою перемикачів полярності ПП1-ПП3 і використовуються окремі блоки формування адитивних тестів В1-В3, які можуть вмикатися у вимірювальне коло в прямій та в інверсній полярностях.

Щоб забезпечити високу точність, під час підсумовування аналогових сигналів у кожному із ВК потрібно забезпечити гальванічне розділення живлення блоків окремих елементів вимірювальних каналів – ППХ, В та ВК.

Сьогодні це не є технічною проблемою, оскільки для малопотужних навантажень серійно виготовляють пристрої гальванічного розділення [17, 18].



Структурна схема для зменшення динамічних похибок тестовим методом з комутаційним інвертуванням та триканальним просторовим розділенням

Block diagram for reducing dynamic errors based on test method with switching inverting and three-channeled spatial separations

Процес вимірювання відбувається за три цикли перетворення. У першому циклі в момент часу t_1 у ВК1 перетворюється вимірювана величина прямої полярності $X(t_1)$ та адитивний тест B_1 : $[X(t_1)+B_1]$, у ВК2 – вимірювана величина прямої полярності $X(t_1)$ та адитивний тест $-B_2$: $[X(t_1)-B_2]$, а у ВК3 – вимірювана величина зворотної полярності $-X(t_1)$ та адитивний тест B_3 : $[-X(t_1)+B_3]$. Упродовж другого циклу перетворення, який здійснюється у момент часу t_2 , у ВК1 перетворюється вимірювана величина прямої полярності $X(t_2)$ та адитивний тест $-B_1$: $[X(t_2)-B_1]$, у ВК2 – вимірювана величина прямої полярності $X(t_2)$ та адитивний тест B_2 : $[X(t_2)+B_2]$, а у ВК3 – вимірювана величина прямої полярності $-X(t_2)$ та адитивний тест B_3 : $[X(t_2)-B_3]$. Під час третього

циклу у ВК1 перетворюється вимірювана величина зворотної полярності $-X(t_3)$ та адитивний тест B_1 : $[-X(t_3)+B_1]$, у ВК2 – вимірювана величина зворотної полярності $X(t_3)$ та адитивний тест B_2 : $[-X(t_3)+B_2]$, а у ВК3 – вимірювана величина прямої полярності $X(t_3)$ та адитивний тест B_3 : $[X(t_3)+B_3]$. Отримуємо систему дев'яти рівнянь з дев'ятьма невідомими $a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_1, a_2, a_3, X(t_1), X(t_2), X(t_3)$. Насправді під час зміни конфігурації схеми (перемикання полярностей вимірюваної та зразкової величин) значення АСП в кожному із ВК1-ВК3 змінюватиметься. Тоді уточнену систему рівнянь подамо як:

$$N_1(t_1)=a_1[X(t_1)+B_1+a_{011}], \quad (1)$$

$$N_2(t_1)=a_2[X(t_1)-B_2+a_{021}], \quad (2)$$

$$N_3(t_1) = a_3[-X(t_1) + B_3 + a_{031}], \quad (3)$$

$$N_1(t_2) = a_1[X(t_2) - B_1 + a_{012}], \quad (4)$$

$$N_2(t_2) = a_2[X(t_2) + B_2 + a_{022}], \quad (5)$$

$$N_3(t_2) = a_3[X(t_2) - B_3 + a_{032}], \quad (6)$$

$$N_1(t_3) = a_1[-X(t_1) + B_1 + a_{013}], \quad (7)$$

$$N_2(t_3) = a_2[-X(t_3) + B_2 + a_{023}], \quad (8)$$

$$N_3(t_3) = a_3[X(t_3) + B_3 + a_{033}], \quad (9)$$

де a_{011} , a_{021} , a_{031} , a_{012} , a_{022} , a_{032} , a_{013} , a_{023} , a_{033} – зведені до входу, відповідно, ВК1–ВК3 АСП, відповідно в першому, другому та третьому циклах перетворення; a_1 , a_2 , a_3 – коефіцієнти передавання, відповідно, ВК1–ВК3; $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3)$ – значення вимірюваної величини, відповідно, в моменти часу t_1 , t_2 , t_3 .

Для розв'язання цієї системи рівнянь та для коригування АСП ВК1–ВК3 знайдемо різниці виразів (1) і (4), (7) і (1), (2) і (5), (5) і (8), (3) і (6), (9) і (3):

$$N_1(t_1, t_2) = N_1(t_1) - N_1(t_2) = a_1[X(t_1) - X(t_2) + 2B_1 + b_{012}], \quad (10)$$

$$N_1(t_3, t_1) = N_1(t_3) - N_1(t_1) = a_1[X(t_1) + X(t_3) + b_{013}], \quad (11)$$

$$N_2(t_1, t_2) = N_2(t_1) - N_2(t_2) = a_2[X(t_1) - X(t_2) - 2B_2 + c_{012}], \quad (12)$$

$$N_2(t_2, t_3) = N_2(t_2) - N_2(t_3) = a_2[X(t_2) + X(t_3) + c_{023}], \quad (13)$$

$$N_3(t_1, t_2) = N_3(t_1) - N_3(t_2) = -a_3[X(t_1) + X(t_2) + 2B_3 + d_{012}], \quad (14)$$

$$N_3(t_3, t_1) = N_3(t_3) - N_3(t_1) = a_3[X(t_1) + X(t_3) + d_{031}]. \quad (15)$$

де $b_{012} = a_{011} - a_{012}$; $b_{013} = a_{011} - a_{013}$ – нескориговані значення АСП у ВК1, відповідно, в першому та другому і першому та третьому циклах перетворення; $c_{012} = a_{021} - a_{022}$; $c_{023} = a_{022} - a_{023}$ – нескориговані значення АСП у ВК2, відповідно, в першому та другому і другому та третьому циклах перетворення; $d_{012} = a_{031} - a_{032}$; $d_{031} = a_{033} - a_{031}$ – нескориговані значення АСП у ВК3, відповідно, в першому та другому і третьому та першому циклах перетворення.

1.4. Коригування адитивних складових похибок під час використання тестових методів із просторовим розділенням каналів

Відомо, що під час комутаційного інвертування нескориговане значення АСП визначатиметься лише різницями залишкових параметрів комутаційних елементів [14]. Наприклад, АСП у ВК1 в першому та другому циклах визначатиметься як:

$$\begin{aligned} a_{011} = & e_1 + I_{INI}(r_{11} + R_X + r_{12} + r_{21} + R_{B1} + r_{22}) + \\ & + I_{IC13}(R_X + r_{12} + r_{21} + R_{B1} + r_{22}) + I_{IC24}(r_{12} + r_{21} + R_{B1} + r_{22}) + \\ & + I_{IB14}(r_{11} + R_X + r_{12} + r_{21} + R_{B1} + r_{22}) + \\ & + I_{IB23}(r_{21} + R_{B1} + r_{22}) - I_{IC14}r_{21} + I_{IC23}r_{22}, \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{012} = & e_1 + I_{INI}(r_{11} + R_X + r_{12} + r_{23} + R_{B1} + r_{24}) + \\ & + I_{IC13}(R_X + r_{12} + r_{23} + R_{B1} + r_{24}) + I_{IC24}(r_{12} + r_{23} + R_{B1} + r_{24}) + \\ & + I_{IB14}(r_{11} + R_X + r_{12} + r_{23} + R_{B1} + r_{24}) + \\ & + I_{IB23}(r_{23} + R_{B1} + r_{24}) - I_{IC14}r_{21} + I_{IC23}r_{22}, \quad (17) \end{aligned}$$

тоді нескориговане значення АСП b_{012} визначатиметься так:

$$\begin{aligned} b_{012} = & (I_{INI} + I_{IC13} + I_{IC24} + I_{IB14} + I_{IB23})[(r_{21} + r_{22}) - (r_{23} + r_{24})] - \\ & - I_{IC14}(r_{21} - r_{24}) + I_{IC23}(r_{22} - r_{23}), \quad (18) \end{aligned}$$

де e_1 , I_{INI} – напруга зміщення та вхідний струм масштабувального підсилювача у ВК1; r_{11} , r_{12} , r_{13} , r_{14} , r_{21} , r_{22} , r_{23} , r_{24} – опори замкнених ключів перемикачів полярності ПХ1 вимірюваного сигналу та ПВ1 адитивного тесту В1; $I_{IC13} = I_{IC1} + I_{IC3}$; $I_{IC24} = I_{IC2} + I_{IC4}$; $I_{IB14} = I_{IB1} + I_{IB4}$; $I_{IB23} = I_{IB2} + I_{IB3}$ – суми зворотних струмів стоків та витоків усіх чотирьох ключів ПХ1; $I_{IC14} = I_{IC1} + I_{IC4}$; $I_{IC23} = I_{IC2} + I_{IC3}$ – суми зворотних струмів стоків усіх чотирьох ключів ПВ1.

Як показує аналіз співвідношення (18), нескориговане значення АСП b_{012} справді визначатиметься в основному різницями опорів замкнених ключів перемикачів полярності за умови, що усі чотири ключі розміщені в одному корпусі (розкид опорів приблизно становитиме декілька відсотків від значень опорів замкнених ключів [14]) та вибрано сучасну мікросхему аналогового комутатора типу ADG1636, для якої оцінка максимального нескоригованого значення АСП не перевищуватиме $b_{012} \leq \pm 0,07$ мкВ [19]. Нескориговане значення АСП в усіх інших ВК також не перевищуватиме вказаного значення. Тому можна стверджувати про доцільність застосування запропонованої структури вимірювачів електричних величин з коригуванням похибок з просторовим розділенням ВК.

1.5. Коригування мультиплікативних складових похибок під час використання тестових методів із просторовим розділенням каналів

Для забезпечення інваріантності до коефіцієнтів передавання ВК1–ВК3 (коригування МСП) знаходять відношення виразів (11) і (10), (13) і (12), (15) і (14) та отримують нову систему рівнянь з трьома шуканими невідомими $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3)$:

$$N_{it} = \frac{N_1(t_1, t_2)}{N_1(t_3, t_1)} = \frac{X(t_1) + X(t_3) + b_{012}}{X(t_1) - X(t_2) + 2B_1 + b_{013}}, \quad (19)$$

$$N_{2r} = \frac{N_2(t_2, t_3)}{N_2(t_1, t_2)} = \frac{X(t_2) + X(t_3) + c_{023}}{X(t_1) - X(t_2) - 2B_2 + c_{012}}, \quad (20)$$

$$N_{3r} = \frac{N_3(t_3, t_1)}{N_3(t_1, t_2)} = \frac{X(t_1) + X(t_3) + d_{031}}{-X(t_1) - X(t_2) + 2B_3 + d_{012}}. \quad (21)$$

Після перетворень одержуємо систему рівнянь для визначення вимірюваної величини в різні моменти часу:

$$(N_{1r} - 1)X(t_1) - N_{1r}X(t_2) - X(t_3) = -2N_{1r}B_1 + n_{01}, \quad (22)$$

$$N_{2r}X(t_1) - (N_{2r} + 1)X(t_2) + X(t_3) = 2N_{2r}B_2 + n_{02}, \quad (23)$$

$$-(N_{3r} + 1)X(t_1) - N_{3r}X(t_2) - X(t_3) = -2N_{3r}B_3 + n_{03}, \quad (24)$$

де $n_{01} = b_{013} - N_{1r}b_{012}$; $n_{02} = c_{023} - N_{2r}c_{012}$; $n_{03} = d_{032} - N_{3r}d_{012}$.

Із системи рівнянь (22)–(24) за правилом Крамера можна знайти значення вимірюваної величини $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3)$ у моменти часу t_1 , t_2 , t_3 . Якщо значення вимірюваної величини в сусідні моменти часу не відрізняються більше від межі допустимої похибки вимірювання, то можна припустити, що вимірювана величина практично незмінна. У цьому випадку для визначення кожного поточного значення вимірюваної величини можна використовувати результати двох попередніх перетворень. За результатами аналізу різниць між декількома сусідніми результатами перетворення можна прогнозувати характер зміни вимірюваної величини.

Обговорення отриманих результатів та напрями подальших досліджень

Зважаючи на практичну необхідність забезпечення метрологічно надійної роботи КФС для промислових вимірювань їх необхідно забезпечувати системами оперативного контролювання, які можна розробляти як окремі вбудовувані у ВК КФС блоки калібрування або ж підсистеми автоматизованого оперативного контролювання метрологічного стану. Використання для цього переносних кодокерованих багатозначних мір електричних величин певною мірою обгрунтоване за умови їх періодичної метрологічної перевірки. Однак на практиці реалізація прецизійних кодокерованих мір пов'язана із низкою технічних складнощів, спричинених необхідністю отримання малого значення одиниці молодшого розряду й інтегральної та диференціальної лінійності багаторозрядних мір. Окрім того, оскільки АСП власне прецизійних кодокерованих мір під час багаторозрядного відтворення електричних величин перетворюється на МСП, то виникає необхідність коригування їх похибок за будь-яких змін коду керування мірою [13]. За необхідності відтворення декількох значень електричних величин та ручного

коригування похибок така процедура стає дуже трудомісткою і не завжди практично придатною. Автоматичне коригування похибок кодокерованих мір можливе тільки для деяких електричних величин [13].

Тому сьогодні вважають привабливими програмно-апаратні способи реалізації коригування похибок ВК КФС. Під час класичної реалізації тестових методів із часовим розділенням вимірювальних каналів та лінійною апроксимацією функції перетворення результат вимірювання можна отримати за три цикли перетворення, що критично під час управління технологічними процесами в реальному масштабі часу і/або достатньо швидких змін вимірюваної величини. Принципово зменшити час вимірювання до одного циклу перетворення можна під час просторового розділення вимірювальних каналів, але тоді виникає потреба в періодичному налагодженні параметрів ВК КФС, оскільки немає процедури автоматичного коригування похибок [14, 15]. Якщо увести процедуру автоматичного коригування похибок ВК, час вимірювання невідворотно збільшується. Сучасна елементна база уможливило вибір вбудованих АЦП та контролера вимірювального каналу достатньої швидкодії та із задовільними обчислювальними можливостями, а отже, апаратно-програмної реалізації тестових методів із просторовим розділенням вимірювальних каналів та автоматичним коригуванням адитивних та мультиплікативних складових похибки.

Із аналізу співвідношень (22)–(24) можна зробити висновок, що похибка вимірювання визначатиметься насамперед інструментальними похибками трьох однозначних мір електричних величин, похибками дискретності подання вимірювальної інформації та обчислень результату вимірювання і нескоригованим значенням АСП. Як показано вище, під час вимірювання напруги та за умови вимірювання напруги постійного струму нескориговане значення АСП, зведене до входу ВК КФС, не перевищуватиме сотих часток мікрвольта, тому може бути нехтовно малим для технічних вимірювань навіть сигналів малого рівня, наприклад, вихідних сигналів термоелектричних перетворювачів. У цьому випадку під час промислових вимірювань доцільно використовувати багаторозрядні сучасні АЦП. Наприклад, під час застосування АЦП типу AD4110-1 фірми Analog Devices похибка від дискретності подання вимірювальної інформації становитиме близько $\pm 3 \cdot 10^{-8} = \pm 3 \cdot 10^{-6} \%$. Під час виконання обчислень ця похибка дискретності як випадкова величина збільшується в корінь квадратний разів від кількості n обчислень i , наприклад, навіть для тисячі математичних операцій не перевищуватиме $\pm 0,0001 \%$,

що є цілком задовільним для промислових вимірювань. Отже, максимальне значення похибки визначатиметься інструментальними складовими похибок трьох блоків формування адитивних тестів і може не перевищувати $\pm(0,02 \dots 0,1) \%$ у всьому температурному діапазоні використання ВК КФС. Блоки формування адитивних тестів під час вимірювання напруги постійного струму складатимуться з однозначних прецизійних джерел постійної напруги та стабільних подільників напруги, а їх сумарний температурний дрейф може становити лише $\pm(0,2 \dots 3) 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ [20, 21]. У діапазоні робочих температур від 0 до $+50^\circ\text{C}$ та за умови налагодження блоків формування адитивних тестів за $+20^\circ\text{C}$ спричинятиме похибку, не більшу від $\pm(6 \dots 90) 10^{-6} = \pm(0,0006 \dots 0,009) \%$. За умови конструктивного виконання блоків формування адитивних тестів у вигляді знімних та переносних блоків та їх метрологічної перевірки в спеціальних вимірвальних лабораторіях забезпечуватиметься можливість калібрування ВК КФС безпосередньо на місці експлуатації. Час метрологічного обслуговування визначатиметься лише часом встановлення комплексу перевірених мір та уведення у контролер ВК КФС їх дійсних значень.

Отже, широке використання різноманітних кіберфізичних систем потребує методів, алгоритмів та засобів для оперативного контролювання їхнього поточного метрологічного стану, оскільки це визначатиме якість виготовлюваних товарів, продукції та надаваних послуг. Для забезпечення належної достовірності отримуваної вимірвальної інформації необхідно опрацьовувати великі масиви даних з виробленням певних коригувальних дій, що впливатимуть на технологічні процеси в реальному масштабі часу.

Висновки

Метрологічно надійна робота каналів вимірювання електричних величин у кіберфізичних системах визначається технічно придатною організацією оперативного контролювання вимірвальних каналів у реальному масштабі часу. Для практичного втілення цього, на відміну від застосування кодокерованих мір, запропоновано використовувати тестові методи із просторовим розділенням каналів та коригуванням похибок методом комутаційного інвертування. Під час оперативного контролювання використовуються лише адитивні тести та встановлюються дійсні значення коефіцієнтів перетворення усіх вимірвальних каналів у певних умовах експлуатації та в заданий момент часу. За умови використання багаторозрядних АЦП похибка вимірювання практично визначається лише похибками однозначних прецизійних мір. Якщо такі міри забезпечити засобами стабілізації їхніх значень у

робочих умовах експлуатації та виготовити в знімному виконанні, то їх періодично можна калібрувати у вимірвальній лабораторії та повторно встановлювати у ВК КФС. Це дає змогу істотно підвищити метрологічну надійність та термін експлуатації вимірвальних каналів КФС.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафебри інформаційно-вимірвальних технологій Національного університету “Львівська політехніка”, Україна, за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Під час виконання роботи не існувало будь-яких фінансових, організаційних або інших можливих конфліктів, що стосуються цієї роботи.

Література

- [1] Precision A/D Converters < 20 MSPS. 2006-, Analog Device, Inc., 2019 [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/standard-adc/precision-adc-20mmps.html> Accessed on: May 28, 2019.
- [2] AD4110-1. Universal Input Analog Front End with 24-Bit ADC for Industrial Process Control Systems. Analog Devices, Inc. 2019. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4110-1.pdf> Accessed on: May 28, 2019.
- [3] Dan O'Donnell and Brendan Somers. Overvoltage Robustness Testing in the AD4110-1. Analog Devices, Inc. 2019, [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1417.pdf> Accessed on: May 28, 2019.
- [4] *Proceedings, 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT. (MetroInd4.0&IoT)*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8412769> Accessed on: May 28, 2019.
- [5] *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. Naples, Italy, June 4–6, 2019. [Online]. Available: http://www.metroind40iot.org/files/MetroInd2019_CfP_v4.pdf Accessed on: May 28, 2019.
- [6] D. Placko, Ed. *Metrology in Industry: The Key for Quality*, French College of Metrology, January 2010, Paris, French DOI: 10.1002/9780470612125 [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/297502985_Metrology_in_Industry_The_Key_for_Quality Accessed on: May 28, 2019.
- [7] П. П. Орнатский, *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. Київ, Україна: Вища школа, 1983.
- [8] В. О. Яцук, Т. З. Бубела, М. М. Микийчук, Є. В. Походило, “Забезпечення метрологічної надійності в розпорошених вимірвальних системах”, *Вимірвальна техніка та метрологія*, т. 79, № 3, с. 71–82, 2018.
- [9] *Data-Acquisition-Handbook, A Reference For DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning*, 2012. MA, USA: Measurement Computing Corporation, [Online]. Available:

<http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf>

[10] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Eds, *Cyber-Physical Systems: Metrological Issues*. Internat. Barcelona, Spain: Frequency sensor association publishing, 2016.

[11] В. О. Яцук, М. М. Микийчук, Ю. В. Яцук, “Методи та засоби дистанційного калібрування вимірювальних каналів кіберфізичних систем”, у *Кіберфізичні системи: технології збору даних*, Ред. А. О. Мельник, Львів, Україна, Магнолія-2006, с. 77–176, 2019.

[12] ISO 10012:2003 *Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment*. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/26033.html> Accessed on: May 28, 2019.

[13] R. Matviiv, Yu. Yatsuk, V. Yatsuk, “Development of Portable DC Voltage Calibrators with Additive Offsets Adjusting”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/9 (95), с. 35–42, 2018.

[14] В. О. Яцук, П. С. Малачівський, *Методи підвищення точності вимірювань*. Львів, Україна: Бескид-біт, 2008.

[15] Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский, *Тестовые методы повышения точности измерений*. Москва, Россия: Энергия, 1978.

[16] Ю. Яцук, “Тестові методи для оперативного контролювання характеристик засобів електричних вимірювань”, *8-ма наук.-техн. конф. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазо-промислового обладнання*. Івано-Франківськ, Україна, с. 99–100, 2017.

[17] B. Schweber, “How to Select the Right Galvanic Isolation Technology for IoT Sensors”, Digi-Key's North American Editors. [Online]. Available: <https://www.digkey.com/en/articles/techzone/2017/dec/how-select-galvanic-isolation-technology-for-iot-sensors> Accessed on: May 28, 2019.

[18] Low Emission 500 mW Isolated DC-to-DC Converter. ADuM5020/ADuM5028. Data Sheet. 2018 Analog Devices, Inc. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM5020-5028.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[19] ADG1636, 1 Ω Typical On Resistance, ± 5 V, +12 V, +5 V, and +3.3 V Dual SPDT Switches. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG1636.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[20] Brendan Whelan. “How to Choose a Voltage Reference”, *Linear Technology Magazine*, March 2009. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/lt-journal-article/LTMag-V19N1-03-References-BrendanWhelan.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[21] LT5400 Quad Matched Resistor Network. [Online]. Available: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/5400fc-1270745.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

References

[1] Precision A/D Converters < 20 MSPS. 2006-, Analog Device, Inc., 2019 [Online]. Available: [https://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-](https://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/standard-adc/precision-adc-20msps.html)

[converters/standard-adc/precision-adc-20msps.html](https://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/standard-adc/precision-adc-20msps.html) Accessed on: May 28, 2019.

[2] AD4110-1. Universal Input Analog Front End with 24-Bit ADC for Industrial Process Control Systems. Analog Devices, Inc. 2019. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4110-1.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[3] Dan O'Donnell and Brendan Somers. Overvoltage Robustness Testing in the AD4110-1. Analog Devices, Inc. 2019, [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1417.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[4]. *Proceedings, 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8412769> Accessed on: May 28, 2019.

[5] *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. Naples, Italy, June 4-6, 2019. [Online]. Available: http://www.metroind40iot.org/files/MetroInd2019_CFP_v4.pdf Accessed on: May 28, 2019.

[6] D. Placko, Ed., *Metrology in Industry: The Key for Quality*, French College of Metrology, January 2010, Paris, French DOI: 10.1002/9780470612125 [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/297502985_Metrology_in_Industry_The_Key_for_Quality Accessed on: May 28, 2019.

[7] P. Ornatskij, *Theoretical basis of information and measuring equipment*. Kyiv, Ukraine: Vyscha shkola, 1983. (In Russian).

[8] V. Yatsuk, T. Bubela, M. Mykyjchuk, Je. Pokhodylo, “Ensuring metrological reliability in dispersed measuring systems”. *Measuring equipment and metrology*, vol. 79, no. 3, p. 71–82, 2018.

[9] *Data-Acquisition-Handbook, A Reference For DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning*, 2012, MA, USA: Measurement Computing Corporation. [Online]. Available: <http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf>

[10] S Yatsyshyn, B. Stadnyk, Eds, *Cyber-Physical Systems: Metrological Issues*, Internat. Barcelona, Spain: Frequency sensor association publishing, 2016.

[11] V. Yatsuk, M. Mykyjchuk, Yu. Yatsuk, “Methods and tools of remote calibration of measurement channels of cyberphysical systems”, in *Cyber-Physical Systems: technology for data acquisition*, Red. A. Melnyk, Lviv, Ukraine: Magnoliya-2006, 2019. (In Ukrainian).

[12] ISO 10012:2003 *Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment*. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/26033.html> Accessed on: May 28, 2019.

[13] R. Matviiv, Yu. Yatsuk, V. Yatsuk, “Development of Portable DC Voltage Calibrators with Additive Offsets Adjusting”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5/9 (95), с. 35-42, 2018.

[14] V. Yatsuk, P. Malachivskij, *Methods to improve measurement accuracy*, Lviv, Ukraine: Beskyd-bit, 2008. (In Ukrainian).

[15] E. Bromberg, K. Kulikovskij, *Test methods for improving measurement accuracy*. Moscow, Russia: Enenergiya, 1978. (In Russian).

[16] Ju. Yatsuk, “Test methods for the operational control of the characteristics of electrical measuring

instruments”, in *Proc. VIII Conf. “Modern devices, materials and technologies for non-destructive testing and technical diagnostics of machine-building and oil and gas equipment”*, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2017. (In Ukrainian)..

[17] B. Schweber, “How to Select the Right Galvanic Isolation Technology for IoT Sensors”, Digi-Key's North American Editors. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2017/dec/how-select-galvanic-isolation-technology-for-iot-sensors> Accessed on: May 28, 2019.

[18] Low Emission 500 mW Isolated DC-to-DC Converter. ADuM5020/ADuM5028. Data Sheet. 2018 Analog Devices, Inc. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM5020-5028.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[19] ADG1636, 1 Ω Typical On Resistance, ± 5 V, +12 V, +5 V, and +3.3 V Dual SPDT Switches. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG1636.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[20] Brendan Whelan. “How to Choose a Voltage Reference”, Linear Technology Magazine, March 2009. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/lt-journal-article/LTMag-V19N1-03-References-BrendanWhelan.pdf> Accessed on: May 28, 2019.

[21] LT5400 Quad Matched Resistor Network. [Online]. Available: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/5400fc-1270745.pdf> Accessed on: May 28, 2019.