

ВІДДАЛЕНЕ КОРИГУВАННЯ ПОХИБОК БАГАТОКАНАЛЬНИХ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

© Яцук В.О., Здеб В.Б., 2015

Описано методологію віддаленого коригування похибок багатоканальних вимірювачів, призначених для використання в розпорошених кібер-фізичних системах.

The created methodology for remote errors correction of multichannel measuring devices which used at cyber physical systems.

Вступ. В багатоканальних системах автоматичного управління технологічними процесами низки виробництв виникає завдання збору вимірювальної інформації із сенсорів, які мають різні потенціали точок заземлення, наприклад, металургійні, машинобудівні, нафтогазові і хімічні виробництва, теплові та атомні електростанції та інші [11]. Оскільки міжканальні завади можуть сягати значень десятків і сотень вольт, то немає альтернативи використанню релейних комутаторів каналів, високовольтних оптичних та КМДН комутаторів або перетворювачів з гальванічним розділенням. Релейні комутатори призводять до виникнення суттєвої адитивної складової похибки (АСП), зумовленої часовими та температурними змінами їх залишкових напруг та струмів витоку. Окрім того в цьому випадку комутатор вимірювальних сигналів, зазвичай, реалізується як єдине конструктивне ціле, до якого джерела вимірювальних сигналів під'єднуються окремими лініями зв'язку, довжина яких може сягати декількох сотень метрів і в місцях під'єднання можуть виникати контактні е.р.с., що спричиняє появу додаткової АСП вимірювального тракту.

Перетворювачі з гальванічним розділенням не дають змоги коригування власних АСП, мають достатньо високу вартість та необхідність використання якісних гальванічно розділених блоків живлення для кожного з вимірювальних каналів [11, 16-18]. Очевидно, що в цьому випадку суттєво зменшуються вимоги до комутатора вимірювальних каналів (КМТ), оскільки він комутуватиме сигнали відносно невисокого рівня і може бути практично будь-якого типу, наприклад, на основі КМДН-транзисторів [3, 8, 16].

Як показав аналіз літературних джерел, принциповим недоліком відомих методів і засобів побудови БЗВ є практична відсутність можливостей їх калібрування на місці експлуатації із врахуванням впливу залишкових параметрів власне ліній зв'язку (ЛЗ) між сенсорами та вторинним приладом.

Структурна схема багатоканального вимірювача. Для встановлення можливих шляхів покращання метрологічного забезпечення багатоканальних вимірювачів напруги постійного струму з іскробезпечними колами та гальванічним розділенням вимірювальних каналів проаналізуємо основні метрологічні властивості. Еквівалентне значення вхідної напруги j -того увімкненого каналу $U_{\text{вх}j}$ визначимо за співвідношенням

$$U_{exj}=U_{xj}+Z_{exj}(I_{ex}+\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n I_{\hat{a}1^i})+(Z_{exj}-r_{kj}$$

$$)I_{c1j}+I_{c2j} \cdot r_{k2j}+e_{ex}+U_{ji}+U_{jic6}=U_{xj}+e_{ei}+e_{ex}+U_{ji}+U_{jic6}, (1)$$

де I_{ex} – вхідний струм АЦП БЗВ; $e_{ex}=e_{1j}+e_{2j}+e_{\text{л}1j}+e_{\text{л}2j}+e_{31j}+e_{32j}+e_{ex}$ – еквівалентне значення залишкових напруг у вхідному колі j-того каналу; e_{1j}, e_{2j} – залишкові напруги замкнених ключів S_{1j}, S_{2j} j-того каналу; $e_{\text{л}1j}, e_{\text{л}2j}, e_{31j}, e_{32j}$ – залишкові напруги, що можуть виникати у, відповідно, ЛЗ та БІЗ j – того каналу; e_{ex} – еквівалента АСП, зведена до входу АЦП БЗВ; U_{ji} – сумарна напруга, що виникає через проникнення вимірюваних напруг U_{xj} решти n-1 розімкнених вимірювальних каналів (в даний момент увімкнений j-тий канал); U_{jic6} – сумарна напруга, що виникає через проникнення напруг спільного виду $U_{ei}+U_{oi}$ решти n-1 розімкнених каналів до входу j - того замкненого каналу; n – кількість вимірювальних каналів; $e_{ei}=Z_{exj}(I_{ex}+\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n I_{\hat{a}1^i})+(Z_{exj}-r_{kj})I_{c1j}+I_{c2j} \cdot r_{k2j}$ – еквівалентне значення залишкових напруг у вхідному

колі j-того каналу, зумовлене струмами витоку КМДН ключів.

Очевидно, що у випадку використання локальних вимірювальних систем з довжинами ЛЗ десятки метрів завади спільного виду можуть мати невеликі значення, бути співмірними або меншими від допустимих значень КМДН ключів. В таких ключах принципово не виникають залишкові напруги (можна прийняти $e_{1j}=e_{2j}=0$), струми витоку ($I_{c1i,j}, I_{c2i,j}, I_{\text{в}i,j}, I_{\text{в}i,j}$ є відносно невеликими (декілька наноампер), але еквіпотенційно зростають із зростанням температури (типові максимальні значення сотні наноампер), що практично обмежує максимальні значення еквівалентних вихідних опорів $Z_{exi,j}$ [8].

Дійсно, якщо $I_{c1i,j} \approx I_{c2i,j} \approx I_{\text{в}i,j} \approx I_{\text{в}i,j} \leq 100$ нА; $Z_{exj} \leq 1$ кОм; n=16, то значення залишкової напруги e_{ei} становитиме $e_{ei} \approx 2$ мВ. Такі значення залишкових напруг практично унеможливають вимірювання напруг малого рівня, наприклад, вихідних сигналів термоелектричних перетворювачів, без коригування похибок.

Під час використання релейних комутаторів струми витоку практично відсутні, але суттєво впливатимуть залишкові напруги реле, значення яких становить декілька мілівольт. Основною проблемою при цьому є часовий та температурний дрейф залишкових напруг, який дуже важко безпосередньо коригувати класичними методами. Відомо, що релейні комутатори з функцією «вимикання перед вмиканням» використовуються в БЗВ з гальванічним розділенням вимірювальних каналів (БЗВГР), особливо коли значення напруг спільного виду є значним (сотні і навіть тисячі вольт).

Вираз для визначення сумарної напруги U_{ji} , що виникає через проникнення вимірюваних напруг U_{xi} усіх решти n-1 розімкнених вимірювальних каналів в j-тий увімкнений подамо як

$$U_{ji} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n U_{xi} \frac{Z_{exj} \cdot Z_{\text{в}i,j} / (Z_{exj} + Z_{\text{в}i,j})}{R_{kxi} + Z_{exj} \cdot Z_{\text{в}i,j} / (Z_{exj} + Z_{\text{в}i,j})}, (3)$$

де U_{xi} – вимірювана напруга i – того каналу; $R_{kxi}=R_{k1i}+R_{k2i}+Z_{\text{л}1i}+Z_{\text{л}2i}+Z_{31i}+Z_{32i}$ – еквівалентний вихідний опір сенсора розімкненого i-того каналу; (R_{k1i}, R_{k2i} – опори розімкнених ключів (S_{1i}, S_{2i} i-того каналу; $Z_{\text{л}2i}, Z_{31i}$ – опори ЛЗ i-того каналу; Z_{31i}, Z_{32i} – прохідні

опори блоку іскро- та вибухозахисту і-того каналу.

За умов, що $Z_{ex} \gg Z_{exj}$ та $(R_{k1i} + R_{k2i}) \gg Z_{exj} + (Z_{xi} + Z_{l1i} + Z_{l2i} + Z_{l3i} + Z_{l2i})$, то співвідношення (3) переписється у вигляді

$$U_{ji} = \sum_{i \neq j}^n U_{xi} \frac{Z_{exj}}{R_{ki}} = \sum_{i \neq j}^n U_{xi} \cdot K_{ji}, \quad (4)$$

де $R_{ki} = R_{k1i} + R_{k2i}$; $K_{ji} = Z_{exj} / R_{ki}$ - коефіцієнт впливу розімкнених (n-1) каналів на j- тий увімкнений.

З аналізу виразу (4) можна зробити висновок, що мінімальне значення сумарної напруги U_{xj} визначатиметься за умов, що еквівалентний вихідний опір сенсорів j-того та i-того каналів прагнуть до нуля $Z_{xi}, Z_{l1i}, Z_{l2i}, Z_{l3i}, Z_{l2i} \rightarrow 0$, $Z_{xj}, Z_{l1j}, Z_{l2j}, Z_{l3j}, Z_{l2j} \rightarrow 0$ та вибрано високоякісні ключові елементи. Наприклад, якщо $Z_{exj} \approx 1$ кОм, $R_{ki} \approx 10^8$ Ом то $K_{ji} \approx 10^3 / 10^8 = 10^{-5} = 0,001$ %. При таких значеннях коефіцієнтів впливу K_{ji} можна знехтувати впливом розімкнених каналів на увімкнений в промислових БЗВ. Вираз для сумарного значення напруги $U_{jicв}$, що виникає через проникнення напруг $U_{ei} + U_{oi}$ спільного виду n-1 розімкнених каналів в j-тий увімкнений подамо як

$$U_{jicв} = \sum_{i \neq j}^n \left\{ (U_{ei} + U_{oi}) \left[\frac{Z_{xi}}{Z_{xi} + Z_{123j}} + \frac{Z_{123j} \cdot Z_{12j}}{(Z_{xj} + Z_{123j})(Z_{12j} + Z_{23j})} \right] \right\}, \quad (5)$$

де $Z_{123j} = \frac{Z_j}{Z_{12j} + Z_{13j} + Z_{23j}}$; $Z_{12j} = Z_{ej} + Z_{BE} + Z_{ej} \cdot Z_{BE} / Z_{EK}$; $Z_{13j} = Z_{ej} + Z_{EK} + Z_{ej} \cdot Z_{EK} / Z_{BE}$; $Z_{23j} = Z_{BE} + Z_{EK} + Z_{EK} \cdot Z_{BE} / Z_{ej}$; Z_{ej} - опір ЛЗ екрану в j- тому каналі; Z_{BE} , Z_{EK} - опори ізоляції, відповідно, вимірювальної схеми БЗВ відносно аналогового екрану та аналогового екрану відносно корпусу; U_{ei} - напруга спільного виду відносно точки заземлення електричних апаратів об'єкту, де встановлено i-тий сенсор; U_{oi} - напруга спільного виду, що виникає через наявність струмів розтікання між точками заземлення вимірюваного об'єкту в i-тому каналі та безпосередньо БЗВ.

За умов, що опір ізоляції $Z_{EK} \gg Z_{ej} + Z_{xj}$, співвідношення (5) перетворимо так

$$U_{jicв} = \sum_{i \neq j}^n \left[(U_{ei} + U_{oi}) \frac{Z_{uej} + Z_{xj} + Z_{ej} + Z_{oj}}{Z_{EK}} \right], \quad (6)$$

Аналіз цього співвідношення показує, що, як і у випадку одноканальних засобів вимірювань, значення напруги спільного виду, яка перетвориться в заваду нормального виду, у першу чергу залежить від значення опору ізоляції екрану відносно корпусу БЗВ, а також пропорційно зростає із збільшенням кількості n вимірювальних каналів. Принагідно зауважимо, що для випадку не- комутованих екранів в БЗВ може суттєво зростати завада нормального виду. Дійсно, для некомутованих екранів за принципом суперпозиції знайдемо значення напруги завади нормального виду $U_{jikм}$, в яку перетворюються завади спільного виду $U_{ei} + U_{oi}$ в i-тому вимірювальному каналі

$$U_{jikм} = \sum_{i \neq j}^n \left[(U_{ei} + U_{oi}) \frac{Z_{cej}}{Z_{cei} + Z_{cej}} \right], \quad (7)$$

де $Z_{cej} = Z_{xj} + Z_{uej} + Z_{oj} + Z_{ej}$; $Z_{cei} = Z_{xi} + Z_{uei} + Z_{oi} + Z_{ei}$, може приймати достатньо великі значення, оскільки на її шляху не включається великий послідовний опір Z_{EK} , як це робиться у випадку комутації екранів.

Коригування похибок багатоканальних приладів. За наявності системи автокалібрування доцільно перетворювати в код значення повного вихідного опору сенсора

та з подальшими, при необхідності, виділенням інформативних сигналів програмним способом. Під час автокалібрування необхідно спершу коригувати АСП, а потім здійснювати й коригування МСП, причому значення коригувальних коефіцієнтів доцільно знаходити, зберігати та використовувати у цифровій формі. Такий підхід до автокалібрування дозволяє зменшити кількість значень калібрувальних величин. Окрім того, з'являється можливість коригування похибки від різниці опорів струмових дротів під час використання тридротової ЛЗ, наприклад, для роботи з термоперетворювачами опору (ТО). Таке коригування може здійснюватись шляхом від'єднання сенсора від БЗВ і закорочування у цьому вимірювальному каналі усіх ЛЗ з подальшим вимірюванням різниці опорів струмових дротів тридротової ЛЗ. В приладах для роботи з перетворювачами в уніфіковані сигнали постійного струму можна використовувати практично лише один шунт, що спрощує реалізацію ВМП. Встановлення різноманітних вихідних шкал при цьому може здійснюватись оператором під час програмування БЗВ та введення ним функції виду $(Ax+B) \cdot 10^n$ [20], де x - вимірювана фізична величина, A, B – постійні коефіцієнти, $n=0,1,2,\dots$

До недоліків сучасних розпорошених вимірювальних систем необхідно віднести малу метрологічну надійність через некоректність здійснення процедури автокалібрування та неможливість здійснення оперативного метрологічного контролю вимірювальних каналів. Дійсно, зазвичай автокалібрування проводиться шляхом використання вбудованої однозначної міри напруги достатньо великого значення (порядку декількох вольт), що вимагає поділу її значень до значень, співмірних із сигналами активних фізичних сенсорів. При цьому змінюється і конфігурація вимірювального кола, і проявляється небажаний вплив залишкових параметрів комутаційних елементів. Автокалібруванням практично не охоплюється частина вимірювального кола від формування вимірювальних струмів для резистивних сенсорів до отримання на них сигналів вимірювальної інформації, зазвичай напруги постійного струму. Зміна конфігурації вимірювального кола не дає можливості врахувати усі особливості використаних ліній зв'язку сенсорів із БЗВ, наприклад, наявність паразитних параметрів з'єднувальних ліній, різницю їх опорів, необхідність врахування вихідних сигналів схеми компенсації впливу зміни температури вільних кінців ТП, можливість виникнення контактних е.р.с. в місцях з'єднань дротів ЛЗ, розподілені параметри ЛЗ тощо. Можливий часовий та температурний дрейфи значення вихідної напруги однозначного джерела опорної напруги і функції перетворення цифрового пристрою опрацювання сигналів також слугуватимуть джерелами додаткових похибок вимірювання.

Тому, на сьогодні однією із найактуальніших завдань вимірювальної техніки є розроблення коректних систем автоматичного калібрування вимірювального тракту. Це дасть можливість забезпечити задану метрологічну надійність засобів вимірювання, проводити оперативне контролювання протікання вимірювальних процесів, уможливити процедуру метрологічної перевірки вимірювальних засобів безпосередньо на місці експлуатації. Особливої актуальності це набуває для розпорошених систем вимірювання фізичних величин, в яких класична метрологічна перевірка з демонтажем та транспортуванням обладнання до спеціальних метрологічних лабораторій не може бути здійснена принципово через практичну неможливість демонтажу ліній зв'язку (безпроводних, а у багатьох випадках (глобальні мережі, наприклад, Internet) і дровових), а також значні трудові і фінансові затрати, співмірні із встановленням обладнання під час вводу його в експлуатацію. Окрім чисто технічних і організаційних незручностей та фінансових затрат, метрологічна перевірка БЗВ, до певної міри, в “теплих” умовах не відображатиме

більшості їх метрологічних особливостей в реальних умовах експлуатації [21]. Крім того, при цьому метрологічно не перевіряються інші ланки вимірювального кола.

Висновки. Перетворювачі з гальванічним розділенням не дають змоги коригування власних АСП, мають достатньо високу вартість та необхідність використання якісних гальванічно розділених блоків живлення для кожного з вимірювальних каналів

Найменших апаратних затрат під час забезпечення іскро- або вибухозахисту в БЗВ можна досягти шляхом розміщення бар'єру іскро- або вибухозахисту (БІ) на входах комутаторів каналів КМТ.

Для коригування АСП БЗВ в каналах для роботи з сенсорами з вихідними сигналами напруги постійного струму перевагу слід віддати методу комутаційного інвертування, а в каналах для роботи з сенсорами з вихідними сигналами у вигляді зміни опору - методу комутації вимірювальних струмів.

Принциповим недоліком відомих методів і засобів побудови БЗВ є практична відсутність можливостей їх калібрування на місці експлуатації із врахуванням впливу залишкових параметрів власне ліній зв'язку (ЛЗ) між сенсорами та вторинним приладом.

Адитивна складова похибки багатоканальних засобів вимірювання параметрів резистивних сенсорів визначатиметься як залишковими напругами та е.р.с. вхідного вимірювального кола, так і струмами витоку ключів комутаторів каналів і зростатиме із збільшенням кількості вимірювальних каналів. Для її зменшення доцільно використовувати методи автоматичного коригування.

Однією із найактуальніших завдань вимірювальної техніки є розроблення коректних систем автоматичного калібрування вимірювального тракту. Це дасть можливість забезпечити задану метрологічну надійність засобів вимірювання, проводити оперативне контролювання протікання вимірювальних процесів, уможливити процедуру метрологічної перевірки вимірювальних засобів безпосередньо на місці експлуатації.

1. Бойко О.В., Столярчук П.Г., Яцук В.О., Крохмальний Б.І. Підвищення метрологічної надійності вимірювальних каналів енергетичних об'єктів // Вісник Національного ун-ту "Львівська політехніка"; "Електроенергетичні та електромеханічні системи". - 2003. - №487. - С. 33-36. 2. Пейтон А. Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях: Пер. с англ. - М.: БИНОМ, 1994.- 352 с. 3. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення механотронних систем: Навч. Посібник / М.М. Дорожовець, О.В. Івахів, В.О. Мокрицький. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2009. - 304 с. 4. V. Yatsuk, P. Stolyarchuk, M. Mikhaleva, G. Barylo Intelligent Data Acquisition System Error Correction in Working External Conditions / Proceedings of the Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications IDAACS'2005 - Sofia, Bulgaria, Sept. 5-7, 2005. - P. 51-54. 5. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін.; За ред. проф. Є.С.Поліщука. - Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2012. - 544 с. 6. Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань: Підручник. - Львів: Вид-во «Бескид-біт», 2008. - 368 с. 7. Приборы цифровые ЦР7701. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 462.739.006 ТО. 8. Яцук В.О. Розвиток теорії та методів підвищення якості засобів вимірювальної техніки з використанням кодокерованих мір// Автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.11.04 / Держ. ун-т "Львівська політехніка". - Львів, 2004.

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.