

Можливості оперативного калібрування промислових вимірювачів напруги

© Василь Яцук, Роман Янович, Володимир Здеб

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
vyatsuk@lp.edu.ua, romanyanovych@rambler.ru, zvbl@polynet.lviv.ua.

У статті запропоновано підвищувати метрологічну надійність промислових вимірювачів напруги на місці експлуатації з використанням кодо-керованих мір напруги. Розроблено алгоритм коригування адитивних складових похибки як вольтметра, так і міри напруги. Показано граничні метрологічні можливості оперативного дистанційного контролювання вимірювачів напруги на місці експлуатації

В статье предложено повышать метрологическую надёжность промышленных измерителей напряжения на месте эксплуатации с использованием кодо-управляемых мер напряжения. Разработан алгоритм корректирования аддитивных составляющих погрешностей как вольтметра, так и мер напряжения. Показаны граничные метрологические возможности пути оперативного дистанционного контролирования измерителей напряжения на месте эксплуатации

Increasing of industrial measuring voltage metrological reliability by a code-control measure voltage under the exploitation conditions is proposed in this paper. The correction algorithm of additive errors for both a voltmeter and a voltage measure is proposed. The extreme metrological possibility of remote express voltmeter checking in the exploitation conditions has been discussed

Вступ. Вимірювання під час контролювання перебігу технологічних процесів слід розглядати як цілісний процес від сприйняття і перетворення вимірювальної інформації з об'єкту до її опрацювання, зберігання, передавання і використання для вироблення зворотної дії на контрольовані технологічні об'єкти. Тому для забезпечення в сучасних умовах одного із найважливіших параметрів засобів вимірювань (ЗВТ) необхідної метрологічної надійності на практиці постійно контролюють процеси вимірювальної техніки [1]. Достовірна вимірювальна інформація необхідної точності може бути отримана тільки шляхом технічно обгрунтованого вибору ЗВТ, який включає такі дані [2]: наявність вимірюваних або контрольованих параметрів об'єкта; значення допусків на відхилення контрольованих параметрів і допустимі значення похибок вимірювання параметрів об'єкта; допустимі ймовірності хибної і невстановленої відмов для кожного з контрольованих параметрів і значення довірчих ймовірностей для вимірюваних параметрів; закони розподілу вимірюваних (контрольованих) параметрів і похибок їх вимірювання, що можуть виникати при використанні засобів вимірювання (контролю) параметрів; умови вимірювань: механічні навантаження (вібрація, удари, прискорення тощо), кліматичні впливи (температура, вологість, тиск тощо), наявність чи відсутність активно шкідливого середовища (агресивні гази і рідини, високі температура або електрична напруга, грибки, плісень, електромагнітні поля, радіоактивні та інші випромінювання тощо), в якому будуть експлуатуватися засоби вимірювань або їх) елементи.

На базі цих даних розраховуються точнісні характеристики (границі допустимих основної та додаткової похибок потрібного ЗВТ [3-6].

Мета досліджень. Основною метою цієї статті є теоретичний аналіз можливості оперативного калібрування промислових вимірювачів напруги за допомогою кодо-керованих мір напруги з автоматичною корекцією адитивної складової похибки (АСП).

Нормативне забезпечення оперативного контролювання метрологічного стану засобу вимірювань. Однією із основних метрологічних характеристик ЗВТ під час періодичного контролювання є достовірність вимірювань (контролювання) параметрів, яка вказує на ймовірність того, що значення похибки вимірювання не буде перевищувати допустимих значень із заданою ймовірністю. Для гарантування досягнення потрібного рівня якості товарів, продукції, послуг, що виробляються із використанням ЗВТ, сучасні вітчизняні і міжнародні нормативні документи рекомендують проводити систематичний і повний контроль проведення процесів вимірювань, який розглядається як окрема і тривала процедура [1]. Цей стандарт рекомендує контролювати вимірювальні процеси із статистичним опрацюванням результатів вимірювань та їх документуванням. Частоту перевірки процесів вимірювань слід визначати для кожного

окремого процесу, зокрема як техніко-економічний компроміс між вартістю метрологічних перевірок (з вилученням ЗВТ з технологічного процесу і заміною його іншим або, при неможливості заміни, й зупиненням процесу виробництва, транспортуванням цього ЗВТ до випробувальної лабораторії і попереднього місця експлуатації, проведенням повірки) та важливістю прецизійності вимірюваного параметру для забезпечення якості і залежить від таких чотирьох основних чинників [1] - кількості перевірок, ступені потрібного забезпечення, ступені важливості джерела похибки вимірювань, стабільності процесу.

Враховуючи суперечливість практичних критеріїв – ризик невідповідності ЗВТ технічним умовам під час його експлуатації повинен бути мінімальним, а пов'язані з метрологічним підтвердженням витрати повинні бути якомога нижчі – нормативні документи рекомендують декілька методів початкового вибору періодичності метрологічного підтвердження та її коригування на підставі накопиченого досвіду [1].

Періодичність метрологічних перевірок у першу чергу визначається метрологічною надійністю ЗВТ і для підвищення достовірності вимірювань її слід збільшувати. З іншого боку, здійснення метрологічної перевірки пов'язане із значними економічними витратами і тому її періодичність слід максимально збільшувати. В результаті до сьогодні проблема встановлення оптимальних міжповірочних інтервалів є дуже складною і до кінця не вирішеною [2, 3, 6, 7].

Кінцевою метою проведення оперативного контролю протікання процесів вимірювань є підвищення метрологічної надійності. Здійснення цієї процедури пов'язане із двома її науково-технічними аспектами. Першим з них є кількісна характеристика – достовірність контролю, а другою – частота його проведення.

Для забезпечення високої достовірності контролю $D=1$ слід на практиці забезпечувати симетричні межі допустимих значень похибок ЗВТ в реальних умовах експлуатації з математичним сподіванням $M(\Delta_x)=0$. Рівності ж нулю математичного сподівання похибки ЗВ в реальних умовах експлуатації можна досягнути лише за умови коригування систематичної складової похибки.

На сучасній елементній базі кодо-керовані міри електричних величин легко можуть бути виготовленими малогабаритними і переносними [2, 3], тому і контролювання похибок ЗВ можна буде проводити як завгодно часто безпосередньо на місці експлуатації. Частота здійснення операцій контролювання залежатиме від часового дрейфу метрологічних характеристик даного ЗВТ, а результати контролювання можна фіксувати у спеціальному формулярі. На підставі аналізу даних формуляра можна буде робити висновок або про придатність даного ЗВТ до подальшого використання, або про необхідність його метрологічної перевірки. Звичайно, що при визначенні границь допустимих значень похибок Δ_{x0} ЗВ слід контролювати в робочих умовах експлуатації значення впливних величин та розраховувати відповідні значення додаткових похибок, наприклад, зумовлених відхиленням від нормальних значень температури, відносної вологості та атмосферного тиску, напруги та частоти мережі живлення, напруженості зовнішнього магнітного поля, зовнішніх електричних завод тощо.

Огляд існуючих методів контролювання ЗВТ. У загальному випадку похибка ЗВТ описується многочленною моделлю [2], причому для переважної більшості промислових ЗВТ можна обмежитися тільки трьома складовими та врахувати окремо часовий дрейф та зміну значень її складових при змінах параметрів довкілля в робочих умовах експлуатації

$$\Delta_x = \Delta_{x0} + \Delta_{xt} + \Delta_{xp} = \Delta_0 + \delta_s X + \varepsilon X^2 + \Delta_{0t} + \delta_{st} X + \varepsilon_t X^2 + \Delta_{0p} + \delta_{sp} X + \varepsilon_p X^2, \quad (1)$$

де Δ_x - абсолютна похибка ЗВТ в момент часу t в робочих умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких змінювався як функція часу $\overline{p}_t = F(p, t)$; $\Delta_{x0} = \Delta_0 + \delta_s X + \varepsilon X^2$ - абсолютна похибка ЗВТ в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градуювання) в нормальних умовах експлуатації; $\Delta_{xt} = \Delta_{0t} + \delta_{st} X + \varepsilon_t X^2$ - зміна абсолютної похибки за час $t-t_0$, який пройшов після проведення метрологічної перевірки або градуювання за умови роботи ЗВТ в нормальних умовах експлуатації; $\Delta_{xp} = \Delta_{0p} + \delta_{sp} X + \varepsilon_p X^2$ зміна абсолютної похибки за час $t-t_0$, який пройшов після проведення метрологічної перевірки або градуювання за умови роботи ЗВТ 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 адитивна складова похибки ЗВТ в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градуювання) в нормальних умовах експлуатації і її можливі зміни в момент часу t та в робочих умовах експлуатації, вектор параметрів довкілля яких становив $\overline{p}_t = F(p, t)$; δ_s, ε - мультиплікативний та квадратичний коефіцієнти багаточленної моделі похибки ЗВТ в початковий момент часу t_0 (після проведення метрологічної перевірки або градуювання) в нормальних умовах експлуатації; $\delta_{st}, \varepsilon_t, \delta_{sp}, \varepsilon_p$ - відповідно мультиплікативні та квадратичні коефіцієнти багаточленної моделі похибки ЗВТ 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 методик [2, 3], можливо коригувати часові зміни похибки ЗВТ даного типу. Враховуючи різноманіття впливних факторів, відносно великі діапазони зміни параметрів довкілля в робочих умовах експлуатації та, особливо, відсутність прогнозної інформації про можливий характер їх зміни, можна зробити висновок про практичну неможливість розроблення загальних методик корекції часових змін похибок ЗВТ в робочих умовах експлуатації на сьогоднішньому рівні розвитку вимірювальної техніки [2, 3]. Однак сучасний рівень розвитку мікроелектронних та інформаційних технологій принципово змінює підхід до структури вимірювального кола ЗВТ, особливо електричних величин та інших фізичних величин, перетворених в електричні сигнали. У першу чергу це пов'язано з інтелектуалізацією ЗВТ та можливістю корегувань похибок вимірювального тракту з використанням відомих методів – зразкових сигналів, ітераційного, адитивної та мультиплікативної корекції, допоміжних вимірювань. Як було вище показано, реалізація будь-якого з методів підвищення точності пов'язана із використанням у вхідному колі ЗВТ електронних комутаторів, залишкові параметри яких і визначатимуть похибку скорегованих значень результатів вимірювання. Серед усіх складових похибки ЗВТ адитивна складова, як правило, має найбільші значення і найінтенсивніше змінюється як в часі, так і при зміні параметрів довкілля. Теоретично також показано, що при використанні методу комутаційного інвертування скореговане значення адитивної складової похибки, зведене до входу вольтметра, не перевищуватиме (у випадку реалізації перемикача полярності на основі серійних електронних МДН-ключів):

$$\Delta_{0ki} = 2R_x \Delta I_{bk} + (4I_{bk} + I_{bx}) \Delta R_k, \quad (2)$$

де Δ_{0ki} - скориговане значення адитивної складової похибки; $R_x \Delta R_k$ – 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 ЗВТ.

Багаторічний досвід експлуатації (з 1983 р. і 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 десятих мкВ, що й дало змогу взагалі відмовитись від операції ручного встановлення нульових показів приладів. Дійсно, враховуючи відносно високу швидкодію цифрових ЗВТ порівняно із максимальними градієнтами змін впливних факторів та максимально можливою швидкістю часового дрейфу значень похибки, можна зробити висновок про ефективність використання методу комутаційного інвертування для корекції адитивної складової похибки ЗВТ в робочих умовах експлуатації, при цьому, очевидно, $\Delta_0 = \Delta_{0ki}$, $\Delta_{0t} = \Delta_{0p} = 0$. Окрім цього, за методом комутаційного інвертування коригуються також парні степені нелінійності загальної функції перетворення ЗВТ і, тим самим, суттєво зменшується нелінійна складова похибки (1). Отже, при корекції похибок ЗВТ за методом комутаційного інвертування часова та температурна стабільність промислових приладів в основному визначатиметься тільки стабільністю масштабних елементів. Для достатньо стабільних елементів широкого вжитку гарантований час роботи без калібрувань для приладів типу ЦР7701

становить 5000 год. або майже два роки однозмінної їх роботи, у той час як періодичність метрологічних перевірок – один рік.

Підвищити метрологічну надійність цифрових ЗВТ можна такими традиційними шляхами, як: використання найстабільнішої елементної бази; використання методу допоміжних вимірювань або конструктивно-технологічних методів усунення впливних факторів довкілля (екранування, термостатування, герметизація, тощо). Всі подані шляхи підвищення метрологічної надійності ЗВТ є еволюційними і їх реалізація обмежується сучасними технічними, технологічними та економічними чинниками. Принципово нові можливості відкриваються у випадку використання тільки одного прецизійного і стабільного блоку масштабування в ЗВТ, особливо виконаного в інтегральній технології. Як відомо, метрологічні властивості ЗВТ, побудованих на основі компенсаційного або диференційного методів вимірювання, в основному визначаються точністю і стабільністю кодокерованих мір напруги, які віддавна масово виготовляються. З урахуванням сказаного, для побудови високо стабільних цифрових вольтметрів перевагу слід віддати диференційному методу побудови з корекцією похибок комутаційним інвертуванням вимірюваної та зразкової напруг. Суть високочутливих диференційних методів вимірювання полягає в знаходженні коду результату вимірювання як алгебричної суми кодів прецизійної та стабільної кодокерованої міри та коду зваженої різниці вимірюваної та зразкової напруг, що мають приблизно однакові значення [6].

Коригування похибок ЗВТ з допомогою кодо-керованих мір. Значення похибки $\Delta(X, \vec{Q}, \vec{\zeta}, t)$ в загальному випадку залежить від значення X вхідного інформативного сигналу і для її аналізу зручно використовувати багаточленну модель [2, 3]:

$$\Delta_x(X, \vec{Q}, \vec{\zeta}, t) = \Delta_{0x}(\vec{Q}, \vec{\zeta}, t) + \delta_{sx}(\vec{Q}, \vec{\zeta}, t) \cdot X + \varepsilon_x(\vec{Q}, \vec{\zeta}, t) \cdot X^2 + \dots \quad (3)$$

де $\Delta_{0x}(\cdot)$, $\delta_{sx}(\cdot) \cdot X$, $\varepsilon_x(\cdot) \cdot X^2$ – відповідно адитивна, мультиплікативна та нелінійна складові похибки.

Коефіцієнти Δ_{0x} , δ_{sx} , ε_x , ... є випадковими величинами або процесами, які залежать від векторів \vec{Q} параметрів вимірювального кола та $\vec{\zeta}$ факторів похибок, але не залежать від інформативного параметра X . Існуючі методики визначення метрологічної надійності базуються на статистичному опрацюванні результатів тривалих експериментальних досліджень достатньо великої вибірки однотипних ЗВ [4, 5]. Проведення таких досліджень доцільне лише для масових ЗВ, відрізняється великою трудоемністю та не дає гарантій встановлення факту метрологічної відмови окремого екземпляру ЗВ. Для здійснення оперативного контролювання за протіканням вимірювальних процесів ЗВ, що вже експлуатуються, доцільно використовувати переносні кодо-керовані міри (калібратори) електричних величин [2, 3, 6].

В робочих умовах експлуатації калібратори електричних величин потребують періодичного ручного коригування адитивної складової похибки (АСП), що збільшує трудомісткість метрологічних робіт, а також час їх проведення. Зважаючи на це, калібратори електричних величин доцільно забезпечувати системою автоматичного коригування АСП за методом комутаційного інвертування, як це зображено на рис. 1 (умовні позначення: ДОН – джерело опорної напруги; ПП1, ПП2 – перемикачі полярності; КМН – кодо-керована міра напруги; μ – значення коду керування КМН; U_k – вихідна напруга калібратора).

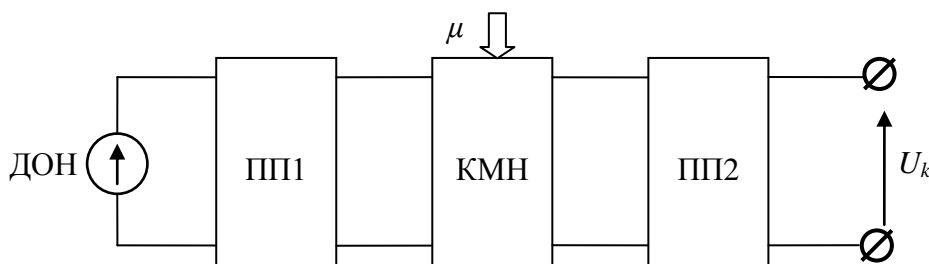


Рис. 1. Структура калібратора напруги з коригуванням адитивної складової похибки методом комутаційного інвертування

Завдяки використанню сучасної елементної бази кодо-керовані міри електричних величин легко можуть бути виготовлені малогабаритними і переносними. Тому, кодо-керовану міру напруги пропонується реалізувати за схемою рис. 2. Провівши аналіз схеми кодо-керованої міри напруги з врахуванням параметрів неідеальності, знайдемо напругу U_k :

$$U_k = \left\{ \left[(E_0 + e_1) \left(1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{M_1} \right) \mu \left(1 + \frac{1}{k_2} \right) \right] + e_2(1 + \mu) \right\} \mu_m \left(1 + \frac{1}{k_3} \right) + e_3(1 + \mu_m) \quad (4)$$

де e_1, e_2, e_3 – напруги зміщення операційних підсилювачів (ОП) ОП1, ОП2, ОП3; k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти передавання розімкнених операційних підсилювачів; M_1 – коефіцієнт послаблення синфазної складової ОП1; μ, μ_m – коди управління ЦАП1 та ЦАП2 відповідно.

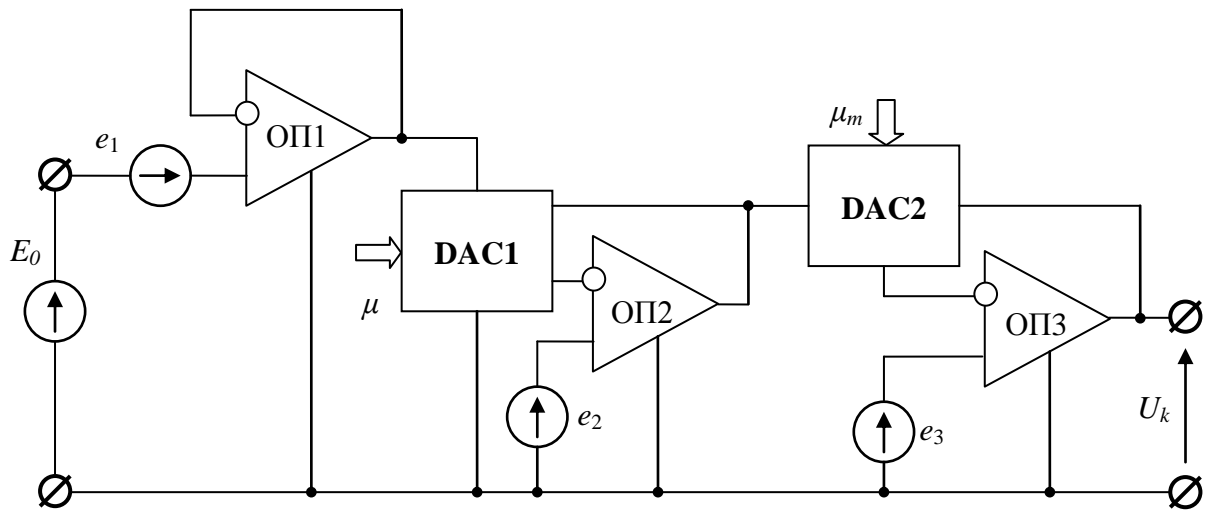


Рис.2 Кодо-керована міра напруги

З метою коригування АСП кодо-керованих мір слід здійснити з допомогою ЗВТ два вимірювання вихідної напруги калібратора та знайти середньо арифметичне двох його показів при однойменних (та протилежних) положеннях перемикачів полярності ПП1 та ПП2 калібратора напруги (очевидно, що при цьому кодо-керована міра напруги повинна бути доповнена перемикачами полярності ПП1 та ПП2 як подано на рис. 1):

$$\begin{aligned} U_{k1} &= E_0 \cdot \mu \cdot \mu_m \cdot (1 + \delta_{SM}) + \Delta_{0M} \\ U_{k2} &= E_0 \cdot \mu \cdot \mu_m \cdot (1 + \delta_{SM}) - \Delta_{0M} \end{aligned} \quad (5)$$

де δ_K – мультиплікативна складова похибки (МСП) кодо-керованої міри напруги; μ – код управління DAC1; μ_m – код управління DAC2; Δ_K – АСП кодо-керованої міри напруги.

Тоді середнє значення вихідного сигналу калібратора за два цикли перетворення буде рівне

$$U_k = \frac{U_{k1} + U_{k2}}{2} = E_0 \cdot \mu \cdot \mu_m \cdot (1 + \delta_K). \quad (6)$$

Враховуючи практичну незалежність коефіцієнта перетворення помножувальних ЦАП від зміни температури довкілля, пропонуємо використовувати DAC2 для задання одиничного коефіцієнта передавання інвертора напруги на базі ОП3 (при цьому код управління DAC2 повинен мати незмінне значення $\mu_m=1/2$ [3, 10, 11]). Цього легко можна досягнути шляхом апаратного задання фіксованого коду управління другим ЦАП.

В більшості випадків межі допустимих значень похибки ЗВТ та кодо-керованих мір нормуються двочленними моделями, відповідно, $Y_X = \Delta_{0X} + k_H(1 + \delta_{SX})$, $U_k = \Delta_{0M} + \mu_m \mu_H E_0(1 + \delta_{SM})$. Тоді, за умов, що за час проведення вимірювань і робочі умови експлуатації, і похибки ЗВТ та калібратора напруги залишаються незмінними, для визначення похибки ЗВТ необхідно провести всього чотири вимірювання при

двох значеннях вихідного сигналу калібратора та опрацювати їх результати:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \Delta_{0K} + k_H (1 + \delta_{SX}) [\Delta_{0M} + \mu_m \mu_{1H} E_0 (1 + \delta_{SM})] \\ Y_{12} &= \Delta_{0K} + k_H (1 + \delta_{SX}) [-\Delta_{0M} + \mu_m \mu_{1H} E_0 (1 + \delta_{SM})] \\ Y_{21} &= \Delta_{0K} + k_H (1 + \delta_{SX}) [\Delta_{0M} + \mu_m \mu_{2H} E_0 (1 + \delta_{SM})] \\ Y_{22} &= \Delta_{0K} + k_H (1 + \delta_{SX}) [-\Delta_{0M} + \mu_m \mu_{2H} E_0 (1 + \delta_{SM})] \end{aligned} \quad (7)$$

де Y_{11}, Y_{12} – покази ЗВТ при вихідних напругах U_{K11} та U_{K12} калібратора та встановленні номінального значення коду керування μ_{1H} ; Y_{21}, Y_{22} – покази ЗВТ при вихідних напругах U_{K21} та U_{K22} калібратора та встановленні номінального значення коду керування μ_{2H} ; Δ_{0X}, Δ_{0K} – АСП ЗВТ, відповідно, в робочих умовах експлуатації та під час калібрування; Δ_{0M} – АСП кодо-керованої міри; k_H – номінальний коефіцієнт перетворення ЗВТ; δ_{SX}, δ_{SK} – коефіцієнти мультиплікативної складової похибки (МСП) ЗВТ, відповідно, в робочих умовах експлуатації та під час калібрування; δ_{SM} – коефіцієнт мультиплікативної складової похибки кодо-керованої міри (калібратора напруги); E_0 – значення напруги ДОН; μ_{1H}, μ_{2H} – номінальні значення кодів керування кодо-керованої міри при встановленні значень вихідної напруги U_{K1} та U_{K2} .

Розв'язавши систему рівнянь (7) можна визначити адитивну і коефіцієнт мультиплікативної складових похибки промислового вимірювача напруги:

$$\Delta_{0K} = Y_{11} - \frac{Y_{11} - Y_{12}}{2} - \frac{(Y_{11} + Y_{12}) - (Y_{21} + Y_{22})}{2} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1}, \quad (8)$$

$$1 + \delta_{SK} \approx \frac{(Y_{11} + Y_{12}) - (Y_{21} + Y_{22})}{2k_H E_0 (\mu_2 - \mu_1)}. \quad (9)$$

Значення кодів керування для першого ЦАП DAC1 може бути достатньо просто реалізовано шляхом апаратного задання потрібних значень кодів керування μ_{1H}, μ_{2H} . Як показує аналіз формул (8) і (9) на підставі використання методу комутаційного інвертування досить просто визначаються АСП і МСП вимірювачів напруги в робочих умовах експлуатації. Ці значення в подальшому можуть використовуватись як поправки для знаходження результату вимірювання з допомогою каліброваного ЗВТ

$$Y_X = (\Delta_{0X} - \Delta_{0K}) + k_H \frac{1 + \delta_{SX}}{1 + \delta_{SK}} X. \quad (10)$$

Як показує аналіз співвідношення (10) після здійснення оперативного калібрування ЗВТ на місці експлуатації значення як АСП, так і МСП визначатимуться тільки їх змінами при зміні умов довкілля, тобто, фактично, тільки додатковими складовими похибки. Зазвичай, межі допустимих значень додаткових складових похибки ЗВТ є в декілька разів меншими від межі допустимих значень основної похибки, тому й в найгіршому випадку після оперативного калібрування можна у декілька разів зменшити як АСП, так і МСП ЗВТ на місці експлуатації.

Аналіз сучасної елементної бази показує можливість практичної реалізації запропонованого способу оперативного калібрування вимірювачів напруги на місці експлуатації [12, 13].

Висновки

1. В статті запропоновано здійснювати контролювання промислових вимірювачів напруги на місці експлуатації за допомогою переносних прецизійних кодо-керованих мір напруги (калібраторів напруги).

2. Розроблено структуру засобу калібрування вимірювачів напруги з коригуванням його адитивної складової похибки за методом комутаційного інвертування шляхом опрацювання результатів перетворень, отримуваних з допомогою власне каліброваного засобу вимірювальної техніки.

3. Після проведеного опрацювання результатів проміжних перетворень за методом комутаційного інвертування та лише для двох значень калібрувальної напруги достатньо легко увести поправки до отримуваних результатів вимірювань напруги в робочих умовах експлуатації.

4. Показано, що у найгіршому випадку скориговане значення похибки може бути зменшене у декілька разів.

1. ISO 10012:2003 Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment. 2. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін.; За ред. проф. Поліщука Є.С. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2012. – 544 с. 3. Методи підвищення точності вимірювань: Підручник / Яцук В.О., Малахівський П.С. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2008. – 368 с. 4. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений, 2-е изд., переработанное и дополненное – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. 5. Яцук В.О. Принципи побудови кодо-керованих мір опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999. – №55. – С.35-43. 6. Лилак В.І., Столярчук П.Г., Яцук В.О. Переносні багатозначні калібратори для перевірки температурних каналів технічних систем на місці експлуатації // Вісник Харківського політехнічного університету «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – 1999. – №71. – С.94-96. 7. Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника, 1991, №11. – С. 3-10. 8. Екимов А.В., Ревяков М.И. Надежность средств измерительной техники. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с. 9. Яцук В. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювань у робочих умовах експлуатації // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. - №60. – С. 98–102. 10. Федорков Б.Г., Телец В.А., Дегтяренко В.П. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. – М.: Радио и связь, 1984. – 320 с. 11. Пейтон А. Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях: Пер. с англ. – М.: БИНОМ, 1994.- 352 с. 12. Каталог ELFA. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.elfaelektronika.com>. 13. Каталог виробів фірми Analog Device. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.analog.com>