

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.317.727

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ТЕМПЕРАТУРНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГРУПОВОЇ МІРИ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

© Зенон Готра¹, Григорій Барило¹, Оксана Бойко², Марія Вістак³, Роман Матвійів⁴, 2014

¹ Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра електронних приладів,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

² Львівський національний медичний університет, кафедра медичної інформатики,

³ Львівський національний медичний університет, кафедра біофізики,
вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна

⁴ Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна.

Розглянуто питання побудови мікропроцесорної системи температурної стабілізації групової міри електрорушійної сили. Розроблено структурну схему, в якій реалізовано алгоритм температурних поправок до нормованих значень електрорушійної сили нормальних елементів. Здійснено моделювання роботи окремих функціональних вузлів та розрахунок параметрів основних елементів системи. Наведено результати експериментальних досліджень. Використання розробленої системи температурної стабілізації в груповій мірі Х489 дає змогу відтворювати одиницю електрорушійної сили з точністю ± 1 мкВ.

Рассмотрены вопросы построения микропроцессорной системы температурной стабилизации групповой меры электродвижущей силы. Разработана структурная схема, в которой реализован алгоритм температурных поправок нормированных значений электродвижущей силы нормальных элементов. Проведено моделирование работы отдельных функциональных узлов и произведен расчет параметров основных элементов системы. Представлены результаты экспериментальных исследований. Использование разработанной системы температурной стабилизации в групповой мере Х489 позволяет воспроизводить единицу электродвижущей силы с точностью ± 1 мкВ.

The problems of constructing microprocessor system of temperature stabilization of electromotive force group measures are under consideration. A structural scheme with the algorithm of temperature corrections to the regulated values of the electromotive force of Weston cells is developed. Modelling of separate functional units is made and the calculation of system main parameters is conducted. The results of experimental studies are represented. Usage of the developed system of temperature stabilization within the group measure H489 enables reproducing a unit of electromotive force with an accuracy of ± 1 mкV.

Постановка задачі. Одним із основних завдань метрологічного забезпечення в системі відтворення одиниці електрорушійної сили (ЕРС) та сталої напруги є досягнення високої точності та часової стабільності, мінімальної залежності вихідних параметрів від зовнішніх факторів. Для зберігання та передавання значення одиниці ЕРС використовуються міри напруги, побудовані на основі термостатованих

нормальних елементів. Значення температури термостатування таких елементів встановлюється більшим від значення температури робочих умов експлуатації мір ЕРС. В термостатованих мірах ЕРС типу Х488/1, Х488/2 і Х489 [1] температура термостатування вибрана 29,5 °С, 37 °С та 30 °С, відповідно. Для досягнення необхідної точності та стабільності вихідних параметрів у таких мірах використовують

багатоконтурні системи з пасивними та активними термостатами. Стабілізація температури робочого тіла нормального елемента здійснюється за допомогою чутливих термоперетворювачів, які керують роботою активних термостатів. Останні дослідження в напрямі підвищення метрологічних характеристик нормальних елементів проводились на основі використання нових чутливих сенсорів температури та вдосконалення термостатів [2–4]. Однак такі вдосконалення потребують високопрецизійних електронних компонентів та значно збільшують масогабаритні параметри самої міри.

Перспективним напрямом покращення метрологічних параметрів термостатованих мір є використання елементів мікропроцесорної техніки, що дасть змогу автоматизувати процес самоконтролю та передавання зразкових значень ЕРС іншим мірам і вимірювальним приладам. Реалізація цього підходу є актуальним завданням метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Аналіз досліджень. Відповідно до цієї задачі розроблено алгоритм та структурну схему (рис. 1) мікропроцесорної системи температурної стабілізації для термостатованої міри ЕРС типу X489 [5]. Система містить нормальні елементи (HE1, HE2, HE3, HE4) типу X482, терморезистори (R_{tB} , R_{tP} і R_{tK}), нагрівний елемент (R_H), комутатор (K), пристрій регулювання температури (ПРТ), підсилювач постійної напруги

(ПН), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), пристрій вимірювання відхилень температури термостата від нормованого значення (ПВТ), мікропроцесор (МП), пристрій індикації (ПІ), пристрій керування (ПК) і блок живлення (БЖ).

Нормальні елементи та терморезистори R_{tB} і R_{tK} розміщені в пасивному термостаті ТП, який додатково встановлений в активний термостат ТА. Для вимірювання відхилення температури від нормованого значення використовується терморезистор R_{tB} , а для зовнішнього контролю температури НЕ використовується R_{tK} . Регулювання температури в активному термостаті здійснюється за допомогою терморезистора R_{tP} , під'єданого до мостової резистивної схеми пристрою регулювання температури ПРТ. Принципову схему ПРТ наведено на рис. 2. Для контролю температури використано дві мостові схеми зі спільними плечами на резисторах R_1 і R_P . Мостові резистивні схеми працюють у зрівноваженому режимі. Для зменшення перехідних температурних процесів у активному термостаті ПРТ використано два режими нагрівання за потужністю. Потужність нагрівання зменшується, коли рівні значення опорів резисторів R_P і R_5 . При цьому нагрівний елемент R_H під'єднується до напруги U_{T2} меншого значення. Якщо $R_P \geq R_3$, пристрій порівняння на операційному підсилювачі DA1 за допомогою контакту K2-1 від'єднує нагрівний елемент R_H від напруги нагрівання.

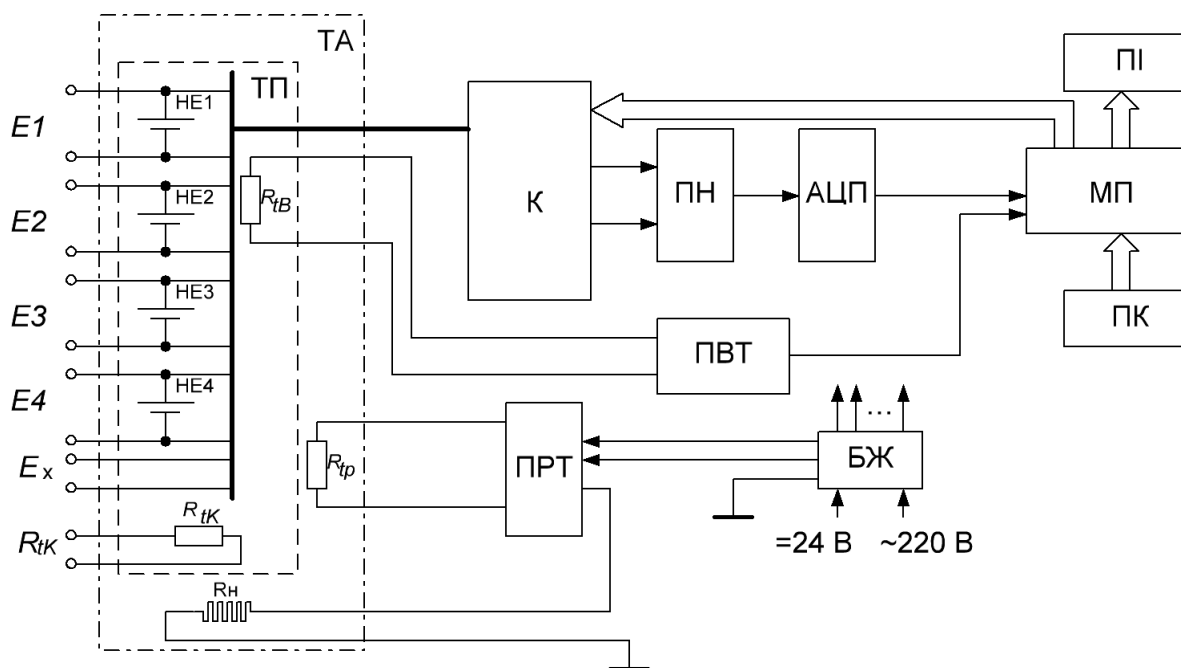


Рис. 1. Структурна схема термостатованої групової міри ЕРС

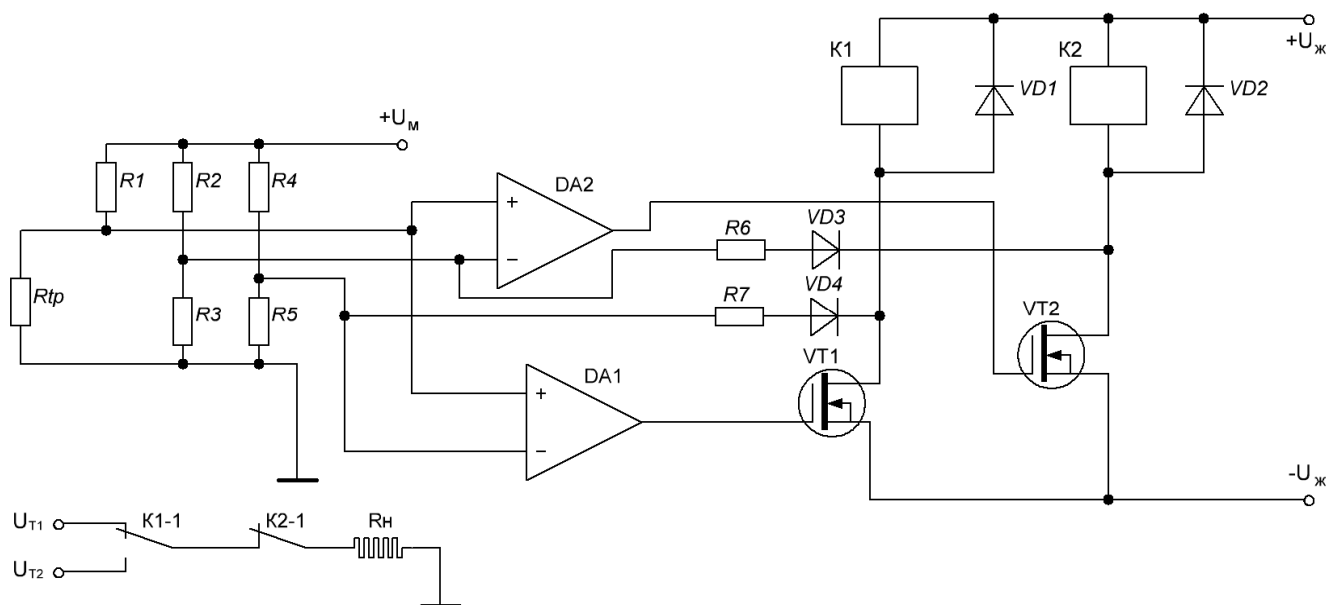


Рис. 2. Принципова схема пристрою регулювання температури активного термостата

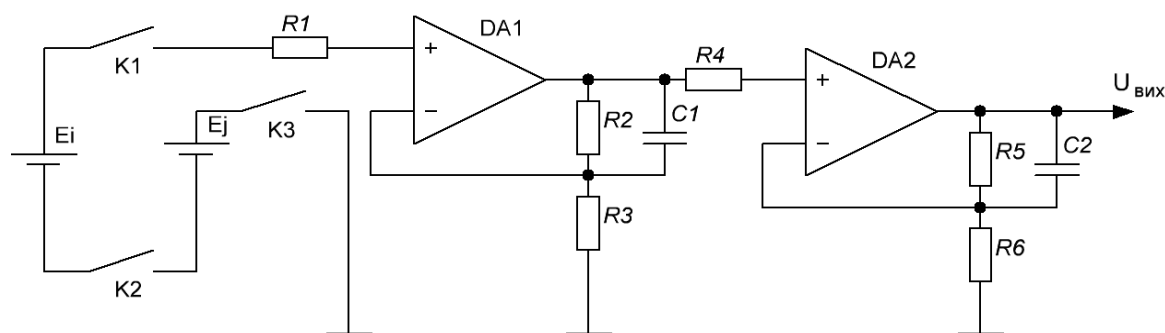


Рис. 3. Схема порівняння ЕРС НЕ

Режими роботи мікропроцесорної системи температурної стабілізації та їх аналіз. Використання мікропроцесора дає змогу забезпечити груповій мірі ЕРС режим контролю значення ЕРС окремих нормальних елементів і режим передавання розміру одиниці ЕРС НЕ груповій мірі, що перевіряється.

У контрольному режимі значення ЕРС кожного нормального елемента порівнюється зі значеннями ЕРС інших нормальних елементів (рис. 3). Необхідна комутація здійснюється ключами $K1_i$, $K2_j$ і $K3$ комутатора K . При цьому на вхід підсилювача постійної напруги ПН на операційних підсилювачах $DA1$ і $DA2$ надходить різниця значень ЕРС двох нормальних елементів. Застосування послідовно з'єднаних двох підсилювальних каскадів зменшує значення шумів і відповідно підвищує точність порівняння значень ЕРС НЕ. Вихідна напруга операційного підсилювача $DA2$ визначається з виразу:

$$U_{\text{вих}} = (E_i - E_j) \cdot k_1 \cdot k_2, \quad (1)$$

де E_i , E_j – відповідно значення ЕРС перевіреного НЕ і контрольного НЕ; k_1 , k_2 – коефіцієнти підсилення першого і другого каскаду підсилювача.

Вихідна напруга підсилювача надходить на вхід АЦП, вихідний код якого визначається виразом:

$$\Delta N_{ij} = (E_i - E_j) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (2)$$

де k_3 – коефіцієнт перетворення АЦП.

Вихідний код АЦП надходить на вхід мікропроцесора МП. При цьому МП відповідно до алгоритму програми обчислює значення ЕРС кожного нормального елемента:

$$N_{iB} = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (N_j + \Delta N_{ij} + \Delta N_{ij} - \Delta N_0), \quad (3)$$

де N_j – значення ЕРС j -контрольного НЕ за нормованої температури термостата; ΔN_{ij} – температурна поправка

значення ЕРС НЕ; ΔN_0 – еквівалентне значення зміщення нульового рівня вимірювального каналу.

Температурна поправка значення ЕРС НЕ дорівнює температурній зміні значення ЕРС НЕ з протилежним знаком. Тоді значення температурної зміни ЕРС НЕ в температурному діапазоні термостата $t_{TH} \pm \Delta t$ визначається з виразу

$$\Delta E = A_T \cdot \Delta t - B_T \cdot \Delta t^2 + C_T \cdot \Delta t^3, \quad (4)$$

де Δt – значення відхилення температури від нормованого значення t_{TH} , A_T , B_T , C_T – коефіцієнти залежності температурної зміни ЕРС НЕ в діапазоні $t_{TH} \pm \Delta t$.

Для насичених нормальних елементів коефіцієнти A , B і C нормуються за температури перевірки $t_H = 20$ °С. У разі зміни температури перевірки коефіцієнти залежності температурної зміни ЕРС НЕ визначаються з виразів

$$\begin{aligned} A_T &= A + 2B(t_T - t_n) - 3C(t_T - t_n)^2; \\ B_T &= B - 3C(t_T - t_n); \\ C_T &= C. \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно, для температурного діапазону (30 ± 2) °С коефіцієнти дорівнюють:

$$A_T = 56,6 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}, B_T = 0,65 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}^2, C_T = 0,01 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}^3.$$

При цьому температурна поправка ЕРС НЕ визначається залежно від відхилення температури НЕ від нормованого значення 30 °С відповідно до виразу:

$$\Delta N_t = 56,6 \cdot \Delta t + 0,65 \cdot \Delta t^2 - 0,01 \cdot \Delta t^3. \quad (6)$$

Відхилення температури від нормованого значення визначається пристроєм ПВТ, принципову схему якого наведено на рис. 4.

Для вимірювання відхилення температури НЕ від нормованого значення терморезистор R_{TB} під'єднується до мостової схеми на резисторах R_1 , R_2 , R_3 . Тоді значення опору резистора R_3 дорівнює значенню опору терморезистора R_{TB} за нормованої температури нормальних елементів. Для підвищення точності вимірювання відхилення температури НЕ терморезистор R_{TB} побудовано з чотирьох послідовно з'єднаних терморезисторів, які розміщуються біля кожного НЕ.

Вихідна напруга мостової резистивної схеми описується виразом:

$$\Delta U = U_M \left(\frac{R_{TB}}{R_1 + R_{TB}} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right). \quad (7)$$

Нелінійність вихідної напруги мостової резистивної схеми залежить від нелінійності функції пере-

творення терморезистора R_{TB} і від нелінійності функції перетворення мостової резистивної схеми.

Нелінійність функції перетворення терморезистора R_{TB} в температурному діапазоні термостата $t_{TH} \pm \Delta t$ описується виразом

$$\Delta R = \frac{R_{t_{max}} - R_{t_{min}}}{t_{max} - t_{min}} \Delta t - (R_{TB} - R_{t_{B_n}}), \quad (8)$$

де $R_{t_{max}}$, $R_{t_{min}}$ – значення опору терморезистора R_{TB} за максимального t_{max} і мінімального t_{min} значень температури термостата, відповідно; $R_{t_{B_n}}$ – значення опору терморезистора R_{TB} за номінальної температури термостата t_{TH} .

Еквівалентне значення похибки нелінійності терморезистора в °С визначається з виразу

$$\Delta t_n = \frac{\Delta R}{R_{t_{max}} - R_{t_{min}}} (t_{max} - t_{min}). \quad (9)$$

Графічні залежності абсолютної похибки нелінійності для ТОП100 з $W_{100} = 1,391$ наведено на рис. 5.

З аналізу графічних залежностей видно, що для платинового терморезистора в діапазоні температур 28...32 °С абсолютна похибка нелінійності не перевищує $5 \cdot 10^{-4}$ Ом, а еквівалентне температурне значення – $6 \cdot 10^{-4}$ °С.

Загальна абсолютна похибка нелінійності вихідної напруги мостової резистивної схеми описується виразом:

$$\Delta_n = \Delta U - \frac{\Delta U_{max}}{\Delta t_{max}} \Delta t, \quad (10)$$

де ΔU_{max} – максимальне значення вихідної напруги мостової схеми за максимального значення температури НЕ; Δt_{max} – максимальне значення відхилення температури НЕ від нормованого значення.

На рис. 6 наведено графічні залежності абсолютної похибки нелінійності вихідної напруги мостової резистивної схеми за різних значень опору резисторів R_1 , R_2

З аналізу графічних залежностей видно, що нелінійність вихідної напруги мостової резистивної схеми зменшується, якщо збільшується значення опорів R_1 , R_2 , однак при цьому зменшується чутливість мостової схеми (зміна вихідної напруги мостової схеми у разі зміни температури на 10^{-2} °С). На рис. 7 наведено графічні залежності чутливості мостової схеми від значень опорів R_1 , R_2 за напруги живлення мостової схеми $U_M = 2,4$ В і $R_{TB} = 400$ Ом.

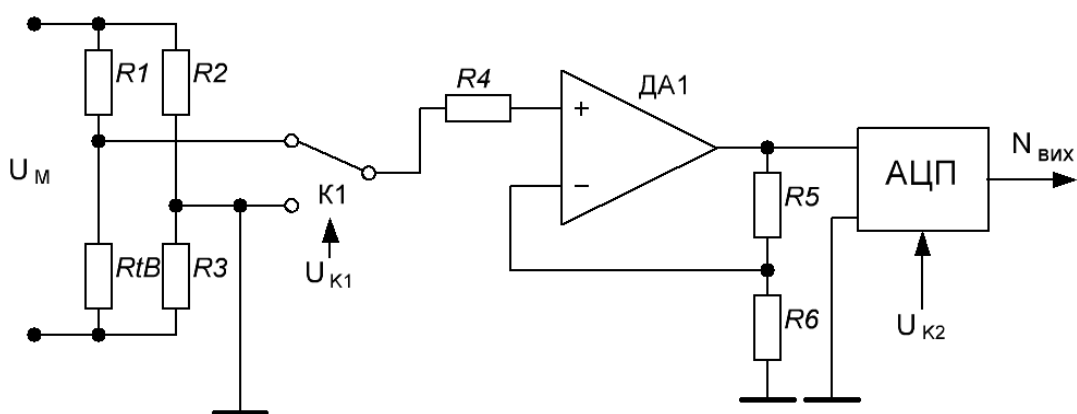
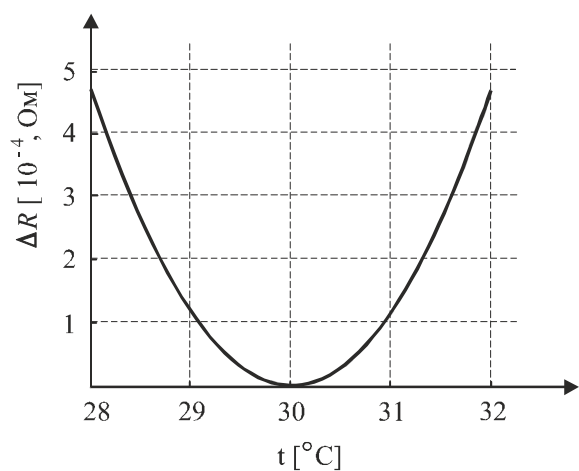
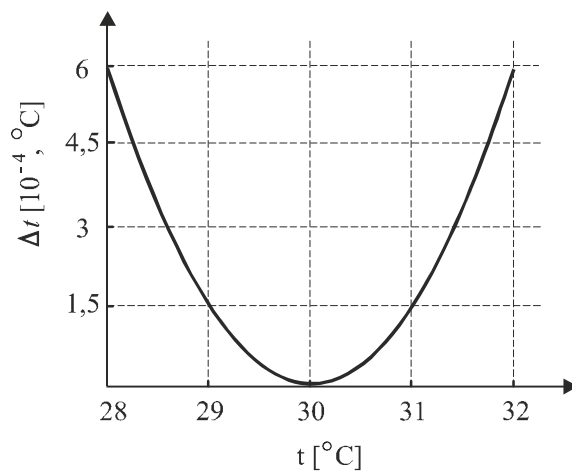


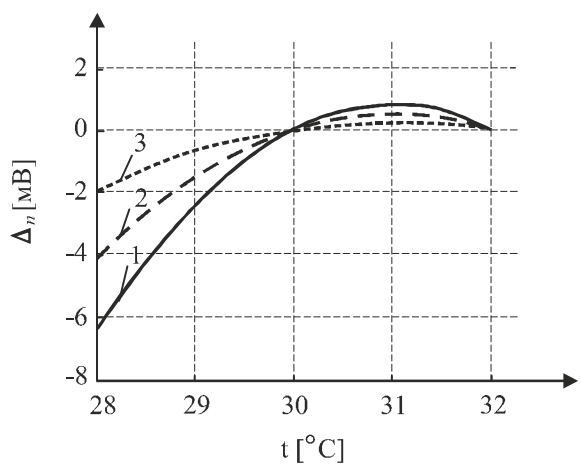
Рис. 4. Схема вимірювання відхилення температури НЕ від нормованого значення



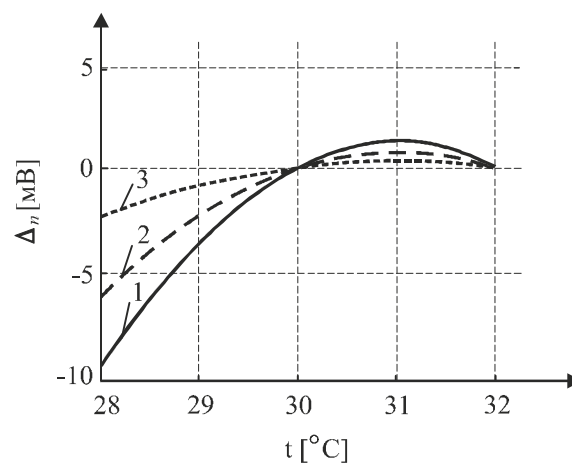
а



б

Рис. 5. Графічні залежності абсолютної похибки нелінійності для ТОП з $W_{100}=1,391$:
а – нелінійність зміни опору; б – еквівалентне значення нелінійності, $^{\circ}\text{C}$


а



б

Рис. 6. Графічні залежності абсолютної похибки нелінійності вихідної напруги мостової резистивної схеми за різних значень опорів резисторів R_1, R_2 :

1 – $R_1=R_2=1\text{кОм}$, 2 – $R_1=R_2=2\text{кОм}$, 3 – $R_1=R_2=10\text{кОм}$

для $R_{tB}=200\text{ Ом}$ (а) і $R_{tB}=400\text{ Ом}$ (б)

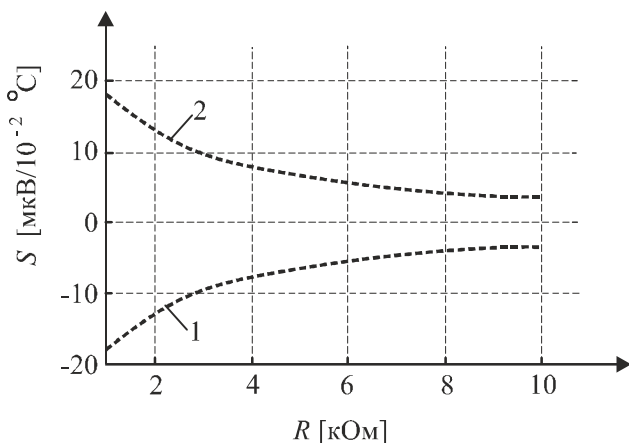


Рис. 7. Графічні залежності чутливості мостової схеми від значень опорів R_1, R_2 ($R_1=R_2$) при температурі 28 °C(1) і 32 °C(2)

У режимі передавання розміру одиниці ЕРС визначається значення різниці ЕРС перевірюваної міри та i -го НЕ групової міри за виразом:

$$\Delta E_{xi} = E_x - E_i, \quad (11)$$

де E_x – значення ЕРС перевірюваної міри ЕРС.

Максимальне значення різниці ЕРС нормальних елементів описується виразом

$$\Delta E_{x \max} = E_{x \max} - E_{i \min} - \Delta E_{t \max}, \quad (12)$$

де $E_{x \max}, E_{i \min}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення ЕРС НЕ за нормованого значення температури; $\Delta E_{t \max}$ – максимальне значення зміни ЕРС зразкових НЕ від зміни температури.

Максимальне значення відхилення ЕРС від зміни температури для насичених НЕ визначається виразом:

$$\Delta E_{t \max} = 40,6 \cdot (t_T - t_n) + 0,95 \cdot (t_T - t_n)^2 - 0,01 \cdot (t_T - t_n)^3, \quad (13)$$

де t_m – нормоване значення температури термостата; t_n – нормоване значення температури перевіреної міри.

За значення $t_T=30$ °C і $t_n=20$ °C максимальне значення різниці ЕРС перевірюваних насичених НЕ і НЕ групової міри дорівнює 681 мкВ. Відповідно за коефіцієнтів підсилення $K_1=K_2=10$ на вхід АЦП надходить 68,1 мВ. Під час перевірки насичених НЕ максимальний вхідний сигнал дорівнює 155 мВ. Для вимірювання різниці ЕРС НЕ з точністю 1 мкВ чутливість АЦП повинна бути не більшою за 50 мкВ.

Вихідний код АЦП визначається виразом:

$$\Delta N_{xi} = (E_x - E_i) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3. \quad (14)$$

Значення ЕРС перевірюваної міри мікропроцесора визначається за виразом:

$$N_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{iB} + \Delta N_{xi} - \Delta N_0, \quad (15)$$

де N_{iB} – визначене значення ЕРС i -го НЕ групової міри в режимі контролю; $n=4$ – кількість НЕ групової міри.

В процесі визначення середнього значення ЕРС перевірюваної міри за результатами порівняння n нормальних елементів частково компенсуються похибки окремих нормальних елементів і в результаті підвищується точність передачі зразкових значень ЕРС.

При цьому не тільки зменшується значення випадкових похибок вимірювання різниці ЕРС НЕ і відхилення температури, також зменшується систематична складова похибок окремих НЕ групової міри.

Висновки. Точність передавання значення зразкових одиниць ЕРС визначається точністю вимірювання різниці ЕРС перевірюваної і зразкової міри, а також точністю визначення відхилення температури НЕ від нормованого значення. У разі вимірювання різниці ЕРС з точністю $\pm 0,3$ мкВ і перевірюваної температури НЕ з точністю 0,005 забезпечується передача зразкових одиниць ЕРС з точністю ± 1 мкВ.

Проведені експериментальні дослідження окремих вузлів і вдосконаленої групової міри на основі мікроконтролера ADuC841 повністю підтвердили теоретичні дослідження, виконані на базі робочого еталону ЕРС ВЕТУ 08-03-01-98 у ВАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні» (м.Львів).

Використання запропонованої мікропроцесорної системи температурної компенсації значень ЕРС окремих НЕ групової міри дає змогу будувати зразкові міри ЕРС та сталої напруги на рівні першого розряду та вище.

1. Дорожовець М. Основи метрології та вимірювальної техніки / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін.; за ред. проф. Б. Стадника. – Львів:

Видавництво Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. – Т.2. Вимірювальна техніка. – 656 с. 2. Яцук В., Яцук Ю. Метод покращання характеристик температурних сенсорів на основі р-п-переходу // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – Вип. 59. – С. 90–96. 3. Барило Г.І., Яцук Ю.В. Вдосконалення системи температурного контролю робочих еталонів вольта / Барило Г.І., Яцук Ю.В. // Вісник Вінницького ДТУ “Автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка”. – Вінниця, 2006. – С.72–75. 4. Поліщук Є.С. Мет-

рологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожжовець, В.О. Яцук та ін; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескид-Біт, 2003. – 544 с. 5. Елемент нормальний термостатований Х489. Технічний опис і інструкція по експлуатації (Ж13.519.011ТО). – Львів: ВАТ «Мікроприлад», 2006. – 56 с. 6. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие технические требования: ГОСТ 1954-82. [Чинний від 1999-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1999. – 1 с. – (Державний стандарт України).

УДК 621.317.089.6

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОЦЕДУР ТА МЕТОДІВ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

© Ольга Олеськів, Ігор Кунець, Ігор Микитин, 2014

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проведено аналітичний огляд відомих методів та процедур метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювань. Проаналізовано переваги та недоліки цих методів і доцільність їх використання.

Проведен аналитический обзор известных методов и процедур метрологической проверки программного обеспечения средств измерений. Проанализированы преимущества и недостатки этих методов и целесообразность их использования.

An analytical review of the known methods and procedures of metrological verification of measuring instruments software is carried out. The advantages and disadvantages of these methods and the appropriateness of their use are analysed.

Вступ. Під час проектування та розроблення сучасних засобів вимірювання спостерігається тенденція до зменшення аналогової частини та розширення цифрової частини приладів. Також переважно як цифрова частина використовуються мікроконтролери, програмовані логічні матриці тощо. Тому «вага» програмного забезпечення (ПЗ) у сучасних засобах вимірювання (ЗВ) постійно зростає. Невідповідність ПЗ вимірювальній задачі приладу, випадкова або навмисна зміна функцій ПЗ можуть призвести до виникнення некоректних результатів вимірювання. Тому доцільно проводити перевірку програмного забезпечення засобів вимірювання для визначення його впливу на метрологічні характеристики ЗВ та можливості подальшого використання цього програмного забезпечення у складі ЗВ. Програмне забез-

печення ЗВ не має метрологічних характеристик, але воно визначає метрологічні характеристики ЗВ, а зміна в ПЗ ЗВ може впливати на ці характеристики [1].

Отже, виникає необхідність приділяти більшу увагу саме програмному забезпеченню та вирішувати проблему перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання для визначення рівня впливу програмного забезпечення на результати вимірювань.

Під програмним забезпеченням засобів вимірювальної техніки розуміють набір програм та процедур, призначених для реєстрації, опрацювання, відображення та збереження результатів вимірювань, що є функціональною частиною ЗВ та постачається з комплектом програмних документів [2]. Проблематикою метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювальної техніки займаються міжнародні