

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ТЕМПЕРАТУРНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГРУПОВОЇ МІРИ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

© Готра Зенон¹, Баріло Григорій¹, Бойко Оксана², Вістак Марія³, Матвіїв Роман⁴

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

² Львівський Національний медичний університет, кафедра медичної інформатики, вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна.

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 проведено розрахунок параметрів основних елементів системи. Представлені результати експериментальних досліджень. Використання розробленої системи температурної стабілізації в груповій мірі Х489 дозволяє відтворювати одиницю електрорушійної сили з точністю $\pm 1\text{мкВ}$.

Ключові слова: міра електрорушійної сили, мікропроцесор, нормальний елемент, термостат.

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 произведён расчёт параметров основных элементов системы. Представлены результаты экспериментальных исследований. Использование разработанной системы температурной стабилизации в групповой мере Х489 позволяет воспроизводить единицу электродвижущей силы с точностью $\pm 1\text{мкВ}$.

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 $\pm 1\text{mкV}$.

Постановка задачі. Одним із основних завдань метрологічного забезпечення в системі відтворення одиниці електрорушійної сили (е.р.с.) та сталої напруги є досягнення високої точності та часової стабільності, мінімальної залежності вихідних параметрів від зовнішніх факторів. Для зберігання та передавання значення одиниці е.р.с. використовуються міри напруги, побудовані на основі термостатованих нормальних елементів. Значення температури термостатування таких елементів встановлюється більшим від значення температури робочих умов експлуатації мір е.р.с. В термостатованих мірах е.р.с. 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 в таких мірах використовуються багатоконтурні системи з пасивними та активними термостатами. Стабілізація температури робочого тіла нормального елемента здійснюється з допомогою чутливих термоперетворювачів які керують роботою активних термостатів. Останні дослідження в напрямку підвищення метрологічних характеристик нормальних елементів проводились на основі використання нових чутливих сенсорів температури та вдосконалення термостатів [2, 3,4]. Однак такі вдосконалення потребують високоприцеційних електронних компонентів та значно збільшують масогабаритні параметри самої міри.

Перспективним напрямком покращення метрологічних параметрів термостатованих мір є використання елементів мікропроцесорної техніки, що дозволить автоматизувати процес самоконтролю та передавання

зразкових значень е.р.с. іншим мірам і вимірювальним приладам. Реалізація цього підходу є актуальною задачею метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Аналіз досліджень. У відповідності до цієї задачі розроблено алгоритм та структурну схему (рис.1) мікропроцесорної системи температурної стабілізації для термостатованої міри е.р.с. типу X489 [5]. Система містить нормальні елементи (HE1, HE2, HE3, HE4) типу X482, терморезистори ($R_{тв}$, $R_{тп}$ і $R_{тк}$), нагрівний елемент ($R_{н}$), комутатор (К), 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).

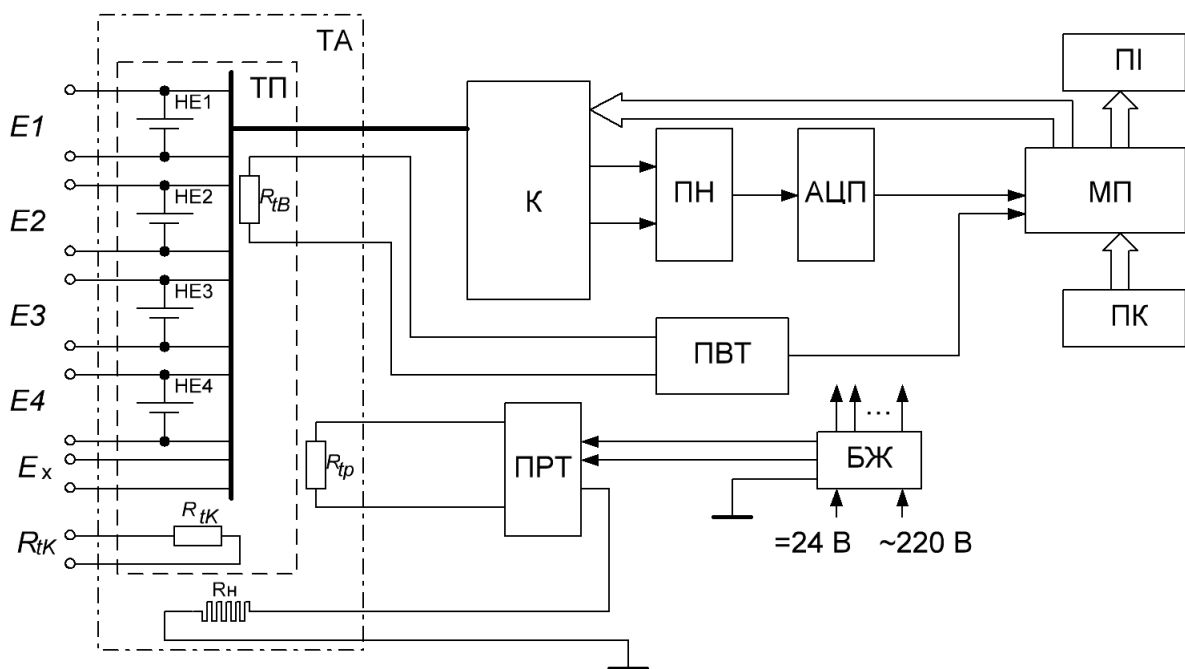


Рис.1. Структурна схема термостатованої групової міри е.р.с.

Нормальні елементи та терморезистори $R_{тв}$ і $R_{тк}$ розміщені в пасивному термостаті ТП, який додатково встановлений в активний термостат ТА. Для вимірювання відхилення температури від нормованого значення використовується терморезистор $R_{тв}$, а для зовнішнього контролю температури НЕ використовується $R_{тк}$. Регулювання температури в активному термостаті здійснюється за допомогою терморезистора $R_{тп}$, який під'єднаний до мостової резистивної схеми пристрою регулювання температури ПРТ. Принципова схема ПРТ наведена на рис.2. Для контролю температури використано дві мостові схеми зі спільними плечами на резисторах R_1 і $R_п$. Мостові резистивні схеми працюють у зрівноваженому режимі. Для зменшення перехідних температурних процесів в активному термостаті ПРТ використано два режими нагріву за потужністю. Зменшення потужності нагріву відбувається при рівності значень опорів резисторів $R_п$ і R_5 . При цьому нагрівний елемент $R_н$ під'єднується до напруги $U_{т2}$ меншого значення. При $R_п \geq R_3$ пристрій порівняння на операційному підсилювачі DA1 за допомогою контакту K2-1 від'єднує нагрівний елемент $R_н$ від напруги нагріву.

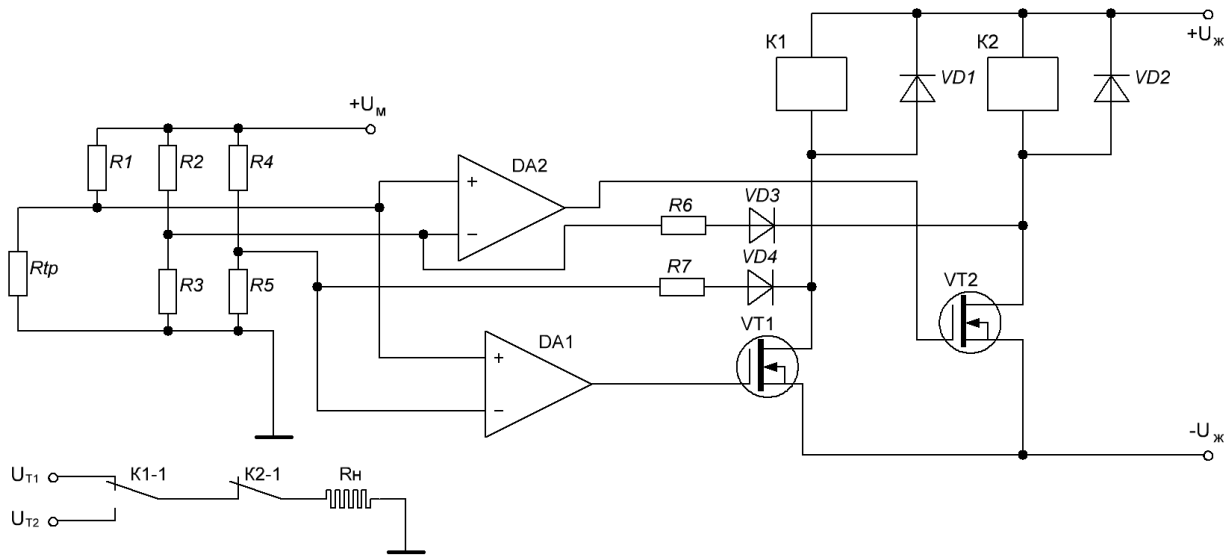


Рис.2. Принципова схема пристрою регулювання температури активного термостату

Режими роботи мікропроцесорної системи температурної стабілізації та їх аналіз

Використання мікропроцесора дозволяє забезпечити груповій мірі е.р.с. режим контролю значення е.р.с. окремих нормальних елементів і режим передавання розміру одиниці е.р.с. НЕ груповій мірі перевіряємій мірі.

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

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

де E_i, E_j – відповідно значення е.р.с. перевіряемого НЕ і контрольного НЕ;
 k_1, k_2 – коефіцієнти підсилення першого і другого каскаду підсилювача.

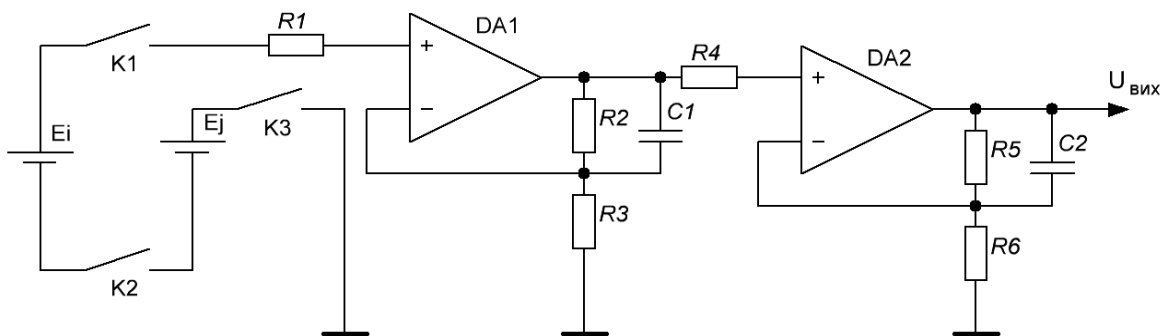


Рис.3. Схема порівняння е.р.с. НЕ

Вихідна напруга підсилювача поступає 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 поступає на вхід мікропроцесора МП. При цьому МП відповідно до алгоритму програми обчислює значення е.р.с. кожного нормального елементу:

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

де N_j – значення е.р.с. j -контрольного НЕ при нормованій температурі термостата;

ΔN_{ij} – температурна поправка значення е.р.с. НЕ;

ΔN_0 – еквівалентне значення зміщення нульового рівня вимірювального каналу.

Температурна поправка значення е.р.с. НЕ дорівнює температурній зміні значення е.р.с. НЕ з протилежним знаком. При цьому значення температурної зміни е.р.с. 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 е.р.с. НЕ в діапазоні $t_{TH} \pm \Delta t$

Для насичених нормальних елементів коефіцієнти A, B і C нормуються при температурі перевірки $t_H = 20^\circ\text{C}$. При зміні температури перевірки коефіцієнти залежності температурної зміни е.р.с. НЕ визначаються з виразів

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

Відповідно, для температурного діапазону $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ коефіцієнти дорівнюють:

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

При цьому температурна поправка е.р.с. НЕ визначається в залежності від відхилення температури НЕ від нормованого значення 30°C 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, принципова схема якого наведена на рис.4.

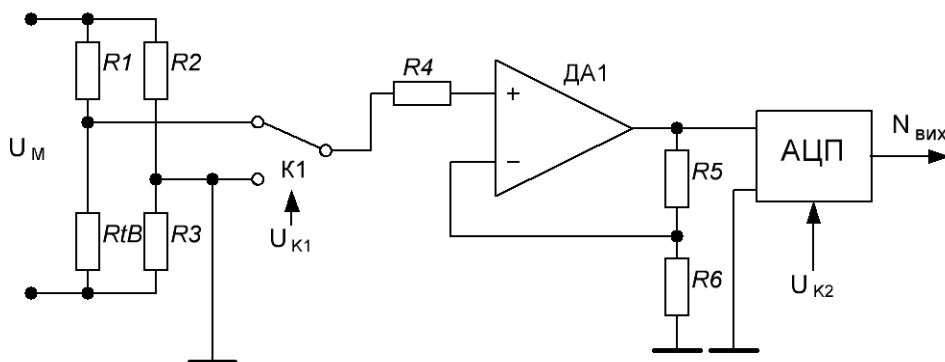


Рис.4. Схема вимірювання відхилення температури НЕ від нормованого значення

Для вимірювання відхилення температури НЕ від нормованого значення терморезистор R_{TB} під'єднується до мостової схеми на резисторах R_1, R_2, R_3 . При цьому значення опору резистора R_3 дорівнює значенню опору терморезистора R_{TB} при нормованій температурі нормальних елементів. Для підвищення точності вимірювання

відхилення температури НЕ терморезистор R_{tB} складається з чотирьох послідовно з'єднаних терморезисторів, які розміщуються біля кожного НЕ.

Вихідна напруга мостової резистивної схеми описується виразом:

$$\Delta U = U_M \left(\frac{R_{tB}}{R1 + R_{tB}} - \frac{R3}{R3 + R2} \right). \quad (7)$$

Нелінійність вихідної напруги мостової резистивної схеми залежить від нелінійності функції перетворення терморезистора R_{tB} і від нелінійності функції перетворення мостової резистивної схеми.

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

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

де $R_{t \max}$, $R_{t \min}$ – значення опору терморезистора R_{tB} при максимальному t_{\max} і мінімальному t_{\min} значеннях температури термостата, відповідно

R_{tB_n} - значення опору терморезистора R_{tB} при номінальній температурі термостата t_{Tn} .

Еквівалентне значення похибки нелінійності терморезистора в $^{\circ}\text{C}$ 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.

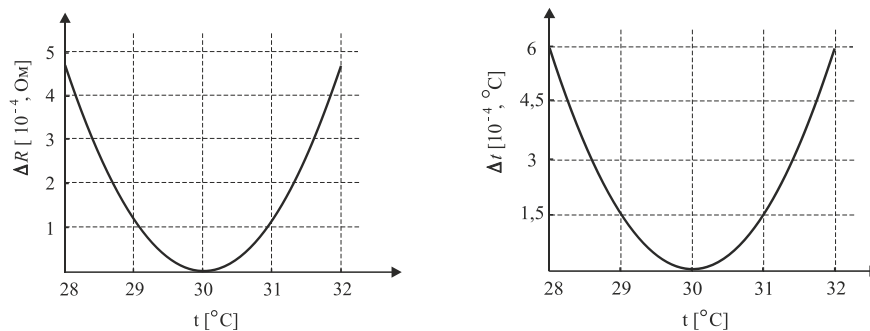


Рис.5. Графічні залежності абсолютної похибки нелінійності для ТОП з $W_{100}=1,391$
а) нелінійність зміни опору, б) еквівалентне значення нелінійності в $^{\circ}\text{C}$

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

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 при максимальному значенні 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 при різних значеннях опору резисторів $R1$, $R2$

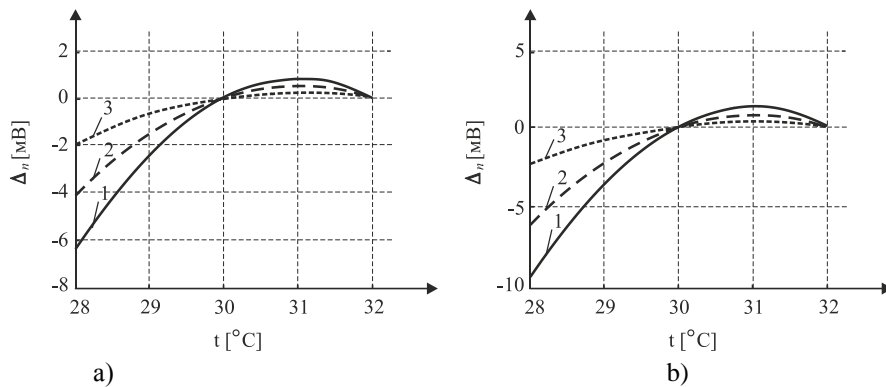


Рис.6. Графічні залежності абсолютної похибки нелінійності вихідної напруги мостової резистивної схеми при різних значеннях опорів резисторів $R1, R2$:
 1- $R1=R2=1\text{кОм}$, 2- $R1=R2=2\text{кОм}$, 3- $R1=R2=10\text{кОм}$
 для $R_{iB}=200\text{ Ом}$ (а) і $R_{iB}=400\text{ Ом}$ (б)

З аналізу графічних залежностей видно, що нелінійність вихідної напруги мостової резистивної схеми зменшується при збільшенні значень опорів $R1, R2$, однак при цьому зменшується чутливість мостової схеми (зміна вихідної напруги мостової схеми при зміні температури на 10^{-2} °C). На рис.7 наведено графічні залежності чутливості мостової схеми від значень опорів $R1, R2$ при напрузі живлення мостової схеми $U_M = 2,4\text{ В}$ і $R_{iB}=400\text{ Ом}$.

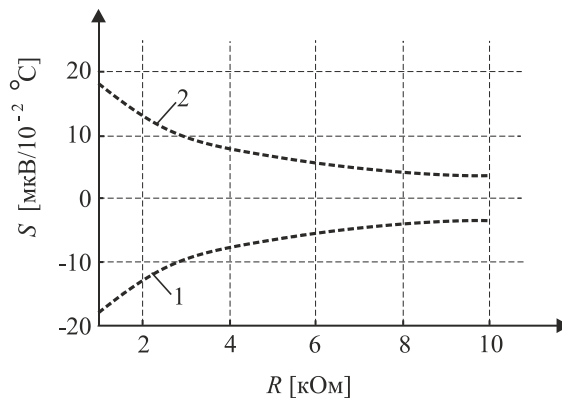


Рис.7. Графічні залежності чутливості мостової схеми від значень опорів $R1, R2$ ($R1=R2$) при температурі 28°C (1) і 32°C (2)

В режимі передавання розміру одиниці е.р.с. визначається значення різниці е.р.с. перевіряємої міри та i -го НЕ групової міри за виразом:

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

де E_x – значення е.р.с. перевіряємої міри е.р.с.

Максимальне значення різниці е.р.с. 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 е.р.с. НЕ при нормованому значенню температури;

$\Delta E_{t\max}$ – максимальне значення зміни е.р.с. зразкових НЕ від зміни температури.

При цьому максимальне значення відхилення е.р.с. 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_r – нормоване значення температури термостата;

t_n – нормоване значення температури перевіряємої міри.

При значенні $t_r=30^\circ\text{C}$ і $t_n=20^\circ\text{C}$ максимальне значення різниці е.р.с. перевіряємих насичених НЕ і НЕ групової міри рівне 681 мкВ. Відповідно при коефіцієнтах підсилення $K1=K2=10$ на вхід АЦП поступає 68,1 мВ. При перевірці насичених НЕ максимальний вхідний сигнал рівний 155 мВ. Для вимірювання різниці е.р.с. НЕ з точністю 1 мкВ чутливість АЦП повинна бути не більше 50 мкВ.

Вихідний код АЦП визначається виразом:

$$\Delta N_{xi} = (E_x - E_i) \cdot k1 \cdot k2 \cdot k3 \quad (14)$$

Значення е.р.с. перевіряємої міри мікропроцесор 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 е.р.с. i -го НЕ групової міри в режимі контролю;

$n=4$ – кількість НЕ групової міри.

В процесі визначення середнього значення е.р.с. перевіряємої міри за результатами порівняння n -нормальних елементів частково компенсуються похибки окремих нормальних елементів і в результаті підвищується точність передачі зразкових значень е.р.с..

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

Висновки

Точність передавання значення зразкових одиниць е.р.с. визначається точністю вимірювання різниці е.р.с. перевіряємої і зразкової міри, а також точністю визначення відхилення температури НЕ від нормованого значення. При вимірюванні різниці е.р.с. з точністю $\pm 0,3$ мкВ і температури НЕ з точністю $0,005^\circ\text{C}$ забезпечується передача зразкових одиниць е.р.с. з точністю ± 1 мкВ.

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

Використання запропонованої мікропроцесорної системи температурної компенсації значень е.р.с. окремих НЕ групової міри дозволяє будувати зразкові міри е.р.с. та сталої напруги на рівні першого розряду та вище.

Література

1. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки / За ред. проф. Б. Стадника. – Львів: Видавництво НУ“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. — Вип. 59. — 2002. — 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., Дорожовець М.М.,Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка / 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. – 1с. (Державний стандарт України).