

УДК 620.536

## МІКРОПРОЦЕСОРНА КОРЕКЦІЯ ЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ НАСИЧЕНИХ НОРМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Г. І. Барило<sup>1)</sup>, О. В. Бойко<sup>2)</sup>, О. П. Чабан<sup>2)</sup>, Р. О. Матвіїв<sup>1)</sup>, Н. І. Кус<sup>1)</sup>

1) – Національний університет «Львівська політехніка», вул.С.Бандери,12, м. Львів, 79013, тел.(032)258 23 94

2) – Національний медичний університет ім. Данила Галицького, вул. Пекарська, 69, м. Львів, 79010, тел.(032)276 78 08

Проведено аналіз похибок температурних поправок і визначено їх залежності від похибок вимірювання температури нормального елемента. Показано, що при вимірюванні відхилення температури нормального елемента від температури повірки досягається вища точність визначення значень поправок. Запропоновано структуру мікропроцесорної міри е.р.с. на основі насиченого нормального елемента типу Х482 з автоматичною температурною поправкою значення е.р.с. Запропоновано метод обробки результатів відхилення температури, який повністю компенсує вплив напруги зміщення нульового рівня операційних підсилювачів і аналого–цифрового перетворювача. Описано цифровий метод лінеаризації передавальної характеристики терморезистивного перетворювача. Розроблено конструкцію термовирівнювача і представлено основні результати експериментальних досліджень виготовленого зразка мікропроцесорної міри е.р.с.

Ключові слова: насичений нормальний елемент, похибка, стабілізатор зразкового струму, термовирівнювач.

Проведен анализ погрешностей температурных поправок и определены их зависимости от погрешностей измерения температуры нормального элемента. Показано, что при измерении отклонения температуры нормального элемента от температуры поверки достигается высшая точность определения значений поправок. Предложена структура микропроцессорной меры э.д.с. на основе насыщенного нормального элемента типа Х482 с автоматической температурной поправкой значения э.д.с. Предложен метод обработки результатов отклонения температуры, который полностью компенсирует влияние напряжения смещения нулевого уровня операционных усилителей и аналого–цифрового преобразователя. Описан цифровой метод линеаризации передаточной характеристики терморезистивного преобразователя. Разработана конструкция термовыравнивателя и представлены основные результаты экспериментальных исследований изготовленного образца микропроцессорной меры э.д.с.

Ключевые слова: насыщенный нормальный элемент, погрешность, стабилизатор образцового тока, термовыравниватель.

The temperature corrections of errors is analysed and their dependence on temperature measurement errors of the normal element is defined. It is shown that in the case of measurement the temperature deviation of the normal element from the calibration temperature higher accuracy of the amendments values determination is achieved. The structure of the thermo–emf microprocessor measure based on saturated standard cell type H482 with automatic temperature correction of the thermo–emf values is proposed. The method of processing the results of temperature deviation, which fully compensates the effect of offset voltage of operational amplifiers and analog–digital converter. We describe a digital linearization method of transfer characteristics of the thermoresistive converter. The thermo–adjustor structure is designed and the main results of experimental studies of the thermo–emf microprocessor measure are presented.

Key words: saturated normal element, error, standard current controlled stabilizer, thermo–adjustor.

Основною перевагою насичених нормальних елементів (НЕ) є висока часова стабільність значення електрорушійної сили (е.р.с.). Однак

їм властива велика температурна залежність значення е.р.с. [1, 2]. Температурну компенсацію зміни е.р.с. здійснюють шляхом

коригування значення е.р.с. відповідно до значення температури НЕ, використовуючи метод температурних поправок, активне термостатування і аналогову компенсацію зміни е.р.с. [3].

Основним недоліком активного термостатування є складність конструкції, значний час встановлення температури термостатування і, відповідно, нормованого значення е.р.с. після вимкнення і повторного ввімкнення живлення термостату. Для термостатованої міри електрорушійної сили Х489 на основі НЕ типу Х482 нормується час встановлення нормованого значення е.р.с. після ввімкнення термостата не менше 72 год. [4]. Недоліком аналогового компенсаційного методу є виникнення додаткових завод на виході НЕ, які проходять через кола живлення компенсаційної схеми.

Оптимальним методом є метод температурних поправок значень е.р.с. Удосконалення методу температурних поправок значення е.р.с. насичених НЕ є актуальною задачею метрології та вимірювальної техніки.

Відхилення значення е.р.с. насичених НЕ типу Х482 від зміни температури з високою точністю описується таким виразом [3]:

$$\Delta E = A(t - t_n) + B(t - t_n)^2 - C(t - t_n)^3, \quad (1)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти залежності, значення яких для НЕ, типу Х482, які при температурі повірки  $t_n = 20^\circ\text{C}$  відповідно дорівнюють  $40,6 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ,  $0,95 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ,  $0,01 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура НЕ,  $t_n$  – нормована температура.

Для визначення істинного значення е.р.с. при відхиленні температури  $t$  НЕ від значення  $t_n$  необхідно внести поправку до нормованого значення е.р.с.

$$E_t = E_n - \Delta E, \quad (2)$$

де  $E_n$  – нормоване значення е.р.с. НЕ при температурі  $t_n$ .

Точність визначення поправок в основному залежить від точності визначення температури НЕ або від точності визначення відхилення температури від температури повірки.

Абсолютне значення похибки визначення поправок дорівнює

$$\Delta = \Delta E(t_e) - \Delta E(t), \quad (3)$$

де  $\Delta E(t_e)$ ,  $\Delta E(t)$  – значення відхилення е.р.с. при вимірюваному значенні температури  $t_e$  НЕ і при істинному значенні температури  $t$ , відповідно.

При цьому  $\Delta E(t)$  визначається за формулою

(1), а  $\Delta E(t_e)$  – з виразу:

$$\begin{aligned} \Delta E(t_e) = & A(t(1 + \delta_t) - t_n) + \\ & + B(t(1 + \delta_t) - t_n)^2 - C(t(1 + \delta_t) - t_n)^3, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\delta_t$  – відносна похибка вимірювання температури.

У випадку вимірювання відхилення температури НЕ від температури повірки відхилення е.р.с. обчислюється за такою формулою:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Delta t) = & A(\Delta t(1 + \delta)) + \\ & + B(\Delta t(1 + \delta))^2 - C(\Delta t(1 + \delta))^3, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\Delta t$  – значення відхилення температури НЕ від температури повірки;  $\delta$  – відносна похибка вимірювання відхилення температури.

Після відповідних підстановок у вираз (3) і без врахування складових похибок з нехтовно малими значеннями отримаємо такий вираз залежності абсолютної похибки визначення поправок від похибки вимірювання температури НЕ:

$$\Delta_t = A t \delta_t + 2B(t - t_n) t \delta_t - 3C(t - t_n)^2 t \delta_t. \quad (6)$$

Аналогічно отримаємо вираз абсолютної похибки визначення поправок від похибки вимірювання відхилення температури НЕ від температури повірки:

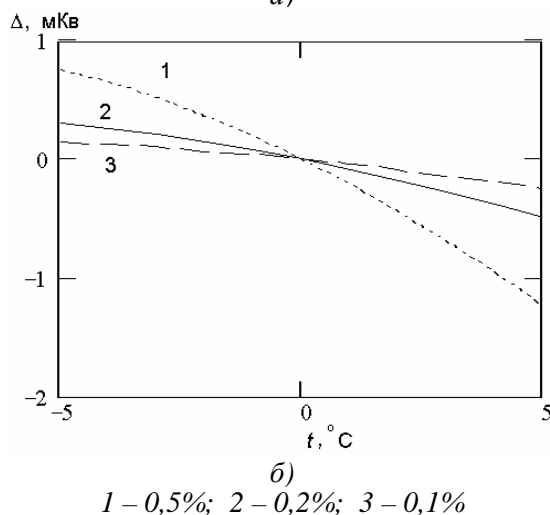
$$\Delta_{\Delta t} = A \Delta t \delta_{\Delta t} + 2B \Delta t^2 \delta_{\Delta t} - 3C \Delta t^3 \delta_{\Delta t}. \quad (7)$$

На рис. 1 наведено графічні залежності абсолютної похибки значення поправок від зміни температури для різних значень похибок вимірювання температури і відхилення температури.

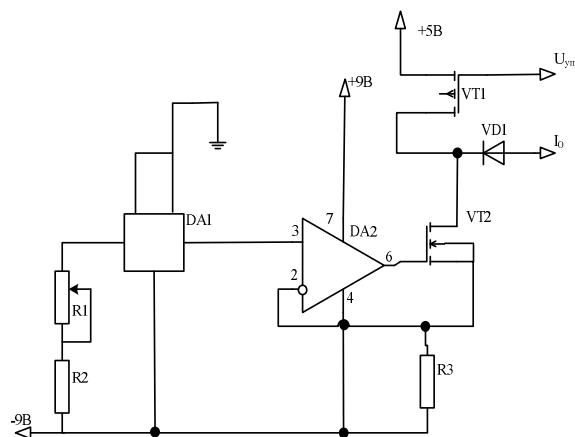
З аналізу графічних залежностей видно, що при вимірюванні відхилення температури НЕ від температури повірки досягається вища точність визначення значень поправок.

Використання елементів мікропроцесорної техніки значно підвищує точність вимірювання температури НЕ і забезпечує виконання необхідних математичних операцій для компенсації основних складових похибки вимірювання температури і обчислення істинного значення е.р.с. НЕ.

На рис. 2 наведено структурну схему мікропроцесорної міри е.р.с. на базі насиченого нормального елемента типу Х482, яка містить нормальний елемент (НЕ), термозалежний резистор  $R_t$ , керований стабілізатор струму (КСС), перетворювач зміни опору в напругу


$$I = \frac{U_{cm} + \Delta U}{R_3},$$

При застосуванні транзистора  $VT1$  типу МОН, струмом його керування можна повністю нехтувати. Відповідно, струм витоку транзистора  $VT2$  визначається значенням резистора  $R3$ .



Під'єднання вихідного струму до терморезистора  $R_t$  здійснюється з допомогою ключа побудованого на діоді  $VD1$  та транзисторі

VT2.

Середнє значення струму, який проходить через терморезистор, визначається виразом:

$$I_{\text{сер}} = \frac{I_0 \cdot \tau_{\text{ае}}}{\tau_{\text{ае}} + \tau_{\text{ае}}}$$

де  $\tau_{\text{ае}}$  – час під'єднання до терморезистора  $R_t$ ;  $\tau_{\text{вик}}$  – час відсутності струму через терморезистор  $R_t$ .

Напруга з терморезистора  $R_t$  поступає на входи ПЗО, принципову схему якого наведено на рис. 4.

Основними елементами ПЗО є зразковий резистор  $R_0$  і операційні підсилювачі  $DA1$  і  $DA2$ . Операційний підсилювач  $DA2$  працює в режимі повторювача напруги, а операційний підсилювач  $DA1$  з резисторами  $R_1$  і  $R_2$  працює в інвертуючому режимі.

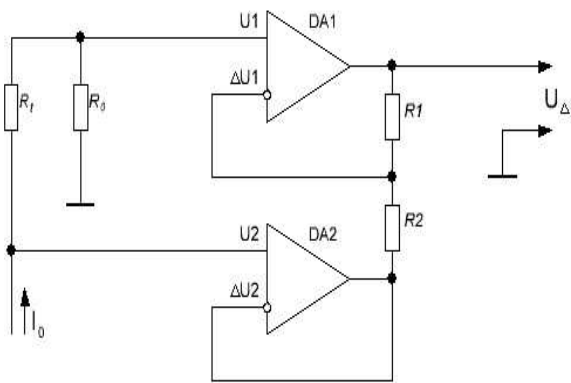


Рисунок 4 – Принципова схема перетворювача зміни опору в напругу

Зразковий струм  $I_0$  з КСС, протікаючи через терморезистор  $R_t$  і зразковий резистор  $R_0$ , формує на неінвертуючих входах операційних підсилювачів  $DA1$  і  $DA2$  напруги  $U_1$  і  $U_2$ , відповідно. При цьому вихідна напруга операційного підсилювача  $DA1$  визначається з наступної формули:

$$U_{\Delta t} = (I_0 R_t (1 + \alpha \cdot \Delta t) + \Delta U_1 - \Delta U_2) \frac{R_1}{R_2} - I_0 R_0 + \Delta U_1 \quad (8)$$

де  $R_t$  – істинне значення опору терморезистора  $R_t$  при температурі повірки НЕ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт терморезистора  $R_t$ ;  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  – напруга зміщення нульового рівня операційних підсилювачів  $DA1$  і  $DA2$ , відповідно.

При рівності  $R_0 = R_m \frac{R_1}{R_2}$  отримаємо, що

$$U_{\Delta t} = I_0 R_m \alpha \cdot \Delta t \frac{R_1}{R_2} + (\Delta U_1 - \Delta U_2) \frac{R_1}{R_2} + \Delta U_1. \quad (9)$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача зміни опору в напругу задається значеннями опорів резисторів  $R_1$  і  $R_2$ .

При відсутності зразкового струму ( $I_0=0$ ) вихідна напруга операційного підсилювача  $DA1$  дорівнює

$$U_0 = (\Delta U_1 - \Delta U_2) \frac{R_1}{R_2} + \Delta U_1. \quad (10)$$

Напруги  $U_{\Delta t}$  і  $U_0$  поступають на вхід АЦП. При цьому максимальне значення вхідного сигналу АЦП визначається з виразу:

$$U_{\Delta t_{\text{max}}} = I_0 R_m \alpha \cdot \Delta t_{\text{max}} \frac{R_1}{R_2}, \quad (11)$$

де  $\Delta t_{\text{max}}$  – максимально допустиме значення відхилення температури НЕ від температури повірки.

При проходженні зразкового струму через резистори  $R_t$  і  $R_0$  на виході АЦП формуються коди відповідно до виразу

$$N_{\Delta t} = I_0 R_m \alpha \Delta t \frac{R_1}{R_2} k_{\Delta \text{ОІ}} + \left( (\Delta U_1 - \Delta U_2) \frac{R_1}{R_2} + \Delta U_1 \right) k_{\Delta \text{ОІ}} + \Delta_{\Delta \text{ОІ}}, \quad (12)$$

де  $k_{\Delta \text{ОІ}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП;  $\Delta_{\Delta \text{ОІ}}$  – еквівалентне значення зміщення нульового рівня АЦП.

При відсутності зразкового струму через резистори  $R_t$  і  $R_0$  вихідний код визначається з виразу

$$N_0 = \left( (\Delta U_1 - \Delta U_2) \frac{R_1}{R_2} + \Delta U_1 \right) k_{\Delta \text{ОІ}} + \Delta_{\Delta \text{ОІ}}. \quad (13)$$

Вихідний код АЦП поступає на входи МП, який обчислює код пропорційний зміні опору терморезистора  $R_t$  від номінального значення  $R_m$ :

$$N = N_{\Delta t} - N_0. \quad (14)$$

З урахуванням виразів (12) і (13) отримаємо, що

$$N = I_0 R_m \alpha \Delta t \frac{R_1}{R_2} k_{\Delta \bar{\theta} \bar{t}}. \quad (15)$$

Як видно з виразу (15), вплив зміщення нульового рівня підсилювачів DA1, DA2 і АЦП на похибку вимірювання відхилення температури повністю компенсується. При цьому похибка вимірювання відхилення температури НЕ в основному визначається похибками резисторів  $R_t$  і  $R_0$ , похибкою відношення резисторів  $R_1$  і  $R_2$ , а також мультиплікативною похибкою АЦП.

Для зменшення випадкових похибок і впливу завад мікропроцесор додатково проводить усереднення низки результатів вимірювань:

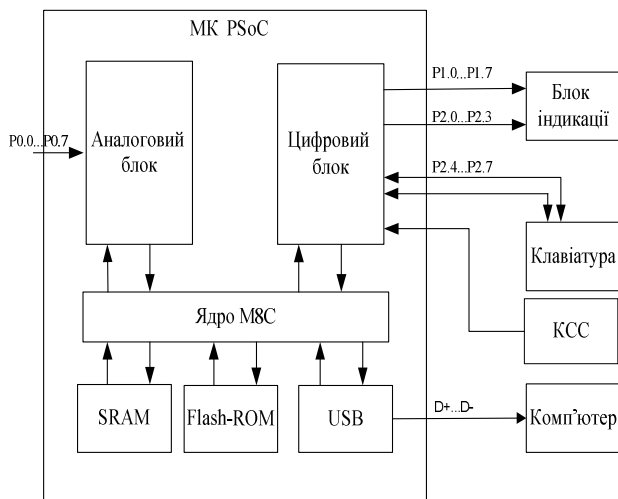
$$N_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{\Delta i} - N_{0i}), \quad (16)$$

де  $n$  – кількість вимірювань.

Після відповідних підстановок отримаємо, що

$$N_{\bar{n}\bar{\Delta}\bar{\theta}} = I_0 \alpha R_m \Delta t \frac{R_1}{R_2} k_{\Delta \bar{\theta} \bar{t}}. \quad (17)$$

При забезпеченні умови  $I_0 \alpha R_m \frac{R_1}{R_2} k_{\Delta \bar{\theta} \bar{t}} = 1$  усереднене значення коду чисельно дорівнює значенню відхилення температури НЕ від значення  $t_n$ .



**Рисунок 5 – Функціональна схема мікропроцесорного блоку міри е.р.с**

Мікропроцесорний блок міри е.р.с. побудований на основі мікроконтролера PSoC, який складається з аналогового і цифрового блоків, SRAM, Flash-ROM, ядра M8C. Сигнал з

ПЗО через аналогові порти P0.0...P0.7 надходить на аналоговий блок. Обробку вхідних даних у відповідності з закладеними у Flash – пам'ять програм здійснює процесорне ядро, яке через порти зв'язку виводить інформацію на зовнішні пристрої.

З цифрового блоку через порти P1.0...P1.7 та P2.0...P2.3 інформація надходить на блок індикації.

При використанні терморезисторів з нелінійною залежністю від температури мікропроцесор проводить лінеаризацію передавальної характеристики терморезистора відповідно до виразу

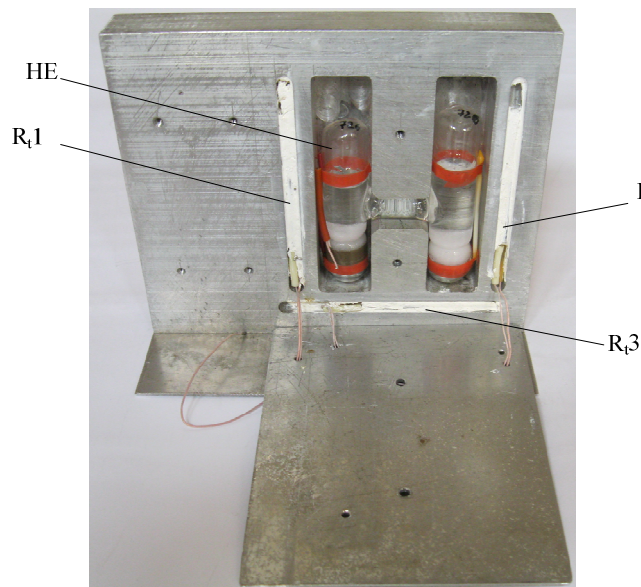
$$N_{\bar{e}} = N_{\bar{n}\bar{\Delta}\bar{\theta}} k_i + \Delta_i, \quad (18)$$

де  $k_i$  – мультиплікативний коефіцієнт  $i$ -го діапазону температури;  $\Delta_i$  – адитивне зміщення на  $i$ -му діапазоні.

Кількість діапазонів лінеаризації визначається характеристикою нелінійності терморезистивного перетворювача  $R_t$  і допустимою похибкою вимірювання температури. Відповідно до значення відхилення температури  $\Delta t$  мікропроцесор згідно виразу (1) обчислює відхилення е.р.с. НЕ від нормованого значення і дійсне значення е.р.с. НЕ при даній температурі. Цифровий код дійсного значення е.р.с. НЕ з мікропроцесора поступає на пристрій індикації і на вихід мікропроцесорної міри е.р.с. При необхідності, мікропроцесор відповідно до сигналу з пристрою керування на пристрій індикації виводить значення температури НЕ або відхилення температури НЕ від температури повірки.

Експериментальні дослідження дослідного зразка запропонованої зразкової міри е.р.с., які проводилися на базі робочого еталону ВЕТУ 08–03–01–98 ВАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні», повністю підтвердили теоретичні висновки. Основними елементами зразкової міри є безкорпусний НЕ типу X482 і терморезистори, які розміщені в термовирівнювачі. На рис. 6 наведено фотографію конструкції дослідного зразка термовирівнювача з НЕ. Для підвищення точності вимірювання температури НЕ від температури повірки з трьох сторін розміщено терморезистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  типу ТОП50, значення загального опору яких при температурі 20 °C повірки НЕ дорівнює 161,88 Ом. При цьому значення опору резистора  $R_0$  при коефіцієнті підсилення ПЗО рівному 10 дорівнює 1,6188 кОм. Значення зразкового

струму рівне 1 мА і відповідно максимальний діапазон вихідного сигналу ПЗО дорівнює  $\pm 30$  мВ при відхиленні температури НЕ від температури повірки  $\pm 5^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 6 – Конструкція дослідного термовирівнювача з НЕ**

Похибка вимірювання відхилення температури НЕ від нормованого значення не перевищувала  $0,005^\circ\text{C}$  в діапазоні  $\pm 5^\circ\text{C}$ , а похибка обчислення дійсного значення не перевищувала  $0,5$  мкВ в діапазоні  $\pm 2^\circ\text{C}$  і  $0,75$  мкВ в діапазоні  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

## ВИСНОВКИ

Використання запропонованого методу температурних поправок значення е.р.с. НЕ, який реалізовано при виготовленні дослідного зразка, дає можливість підвищити точність зразкових мір е.р.с. на основі насичених нормальних елементів типу Х482, покращити експлуатаційні характеристики і значно спростити конструкцію порівняно з термостатованими мірами е.р.с. типу Х488 і Х489.

1. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие технические условия ГОСТ 1954–82.–[ Чинний від 1999–07–01]. – К.:Держспоживстандарт України.–1с.– (Державний стандарт України). 2. 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. 3. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка / За ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. – 544 с. 4. Элемент нормальный насыщенный Х482/ паспорт 3.519.001ПС. 5. Барило Г., Бойко О. Підвищення якості нормальних елементів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – №68. – С. 242–244.

**Поступила в редакцію 04.04.2012 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Столярчук П. Г.**