

УДК 620.536

МІКРОПРОЦЕСОРНА КОРЕКЦІЯ ЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ НАСИЧЕНИХ НОРМАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Г. І. Барило¹⁾, О. В. Бойко²⁾, О. П. Чабан²⁾, Р. О. Матвійів¹⁾, Н. І. Кус¹⁾

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 δ_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 Δt – значення відхилення температури НЕ від температури повірки; δ – 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

(ПЗО), аналого–цифровий перетворювач (АЦП), мікропроцесор (МП), пристрій керування (ПК) і пристрій індикації (ПІ).

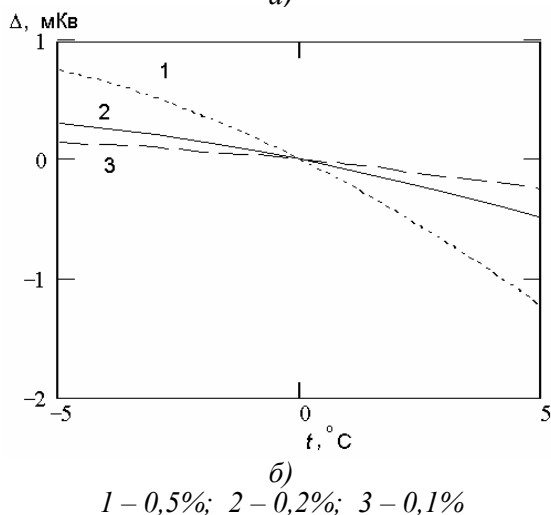
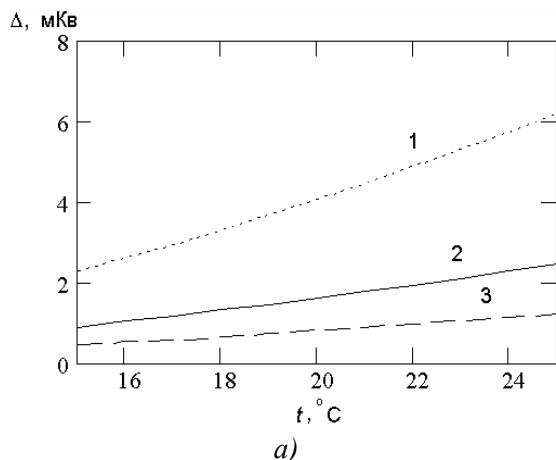


Рисунок 1 – Графічні залежності абсолютної похибки визначення поправок від температури HE (а) і від відхилення температури (б) при таких значеннях похибок вимірювання

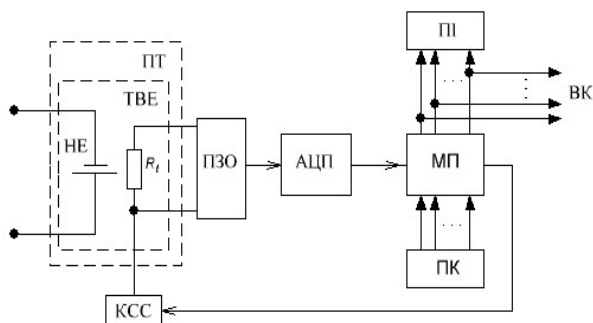


Рисунок 2 – Структурна схема мікропроцесорної міри е.р.с.

Для забезпечення рівності температури HE і терморезистора R_t використано термовірніювальний елемент (ТВЕ), який для збільшення теплової інерційності розміщений в пасивному термостаті (ПТ).

Для зменшення самонагріву терморезистора R_t керований стабілізатор зразкового струму працює в імпульсному режимі, управління яким здійснюється через відповідний цифровий порт мікроконтролера.

Керований стабілізатор струму (рис. 3) побудований на основі операційного підсилювача DA2, стабілізатора зразкової напруги DA1 та транзисторів VT1 та VT2. Стабілізатор напруги DA2 формує опорну напругу, яка встановлюється резисторами R1 і R2. Транзистор VT1 працює в режимі ключа і здійснює функцію комутації вихідного струму. Діод VD1 запобігає появі зворотнього струму в момент виключення.

Вихідний зразковий струм КСС визначається виразом:

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

де U_{cm} – зразкова напруга стабілізатора DA1; ΔU – напруга зміщення нульового рівня операційного підсилювача DA2.

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

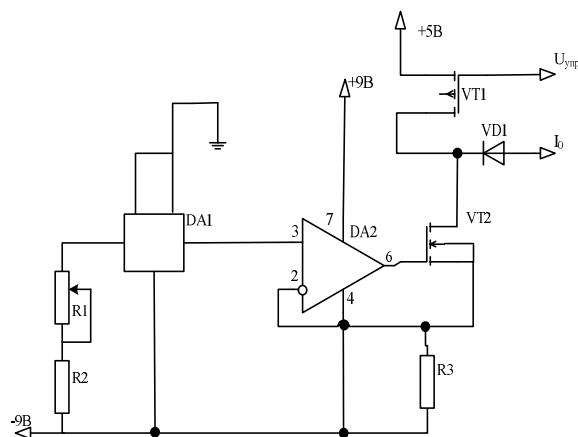


Рисунок 3 – Принципова схема керованого стабілізатора зразкового струму

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:

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

де $\tau_{\text{вк}}$ – 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.

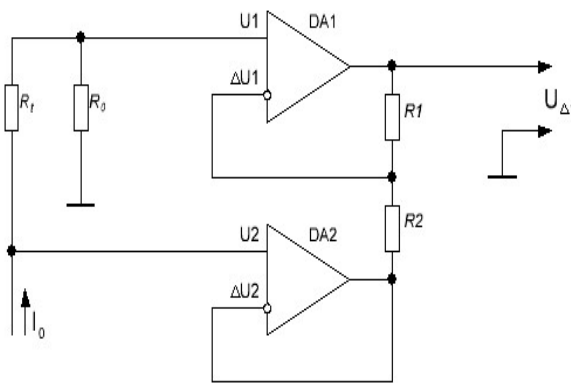


Рисунок 4 – Принципова схема перетворювача зміни опору в напругу

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:

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

де R_m – істинне значення опору терморезистора R_t при температурі повірки НЕ; α – температурний коефіцієнт терморезистора R_t ; ΔU_1 , ΔU_2 – напруга зміщення нульового рівня операційних підсилювачів DA1 і DA2, відповідно.

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

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

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_{Δ} і U_0 поступають на вхід АЦП. При цьому максимальне значення вхідного сигналу АЦП визначається з виразу:

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

де Δt_{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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

де n – кількість вимірювань.

Після відповідних підстановок отримаємо, що

$$N_{\text{сеп}} = I_0 \alpha R_m \Delta t \frac{R_1}{R_2} k_{\text{АЦП}}. \quad (17)$$

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

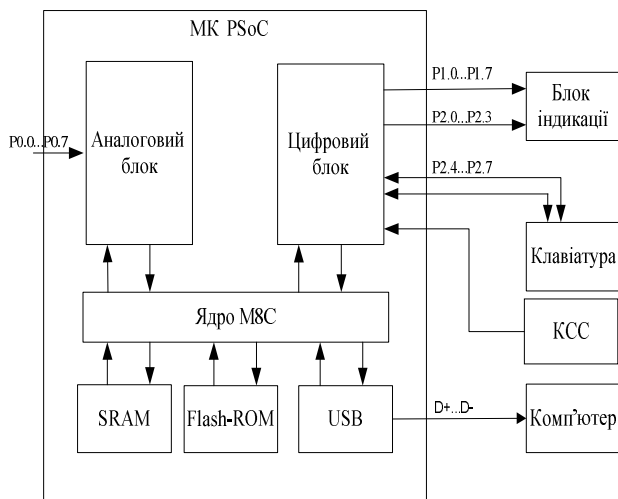


Рисунок 5 – Функціональна схема мікропроцесорного блоку міри е.р.с

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

$$N_i = N_{\text{сеп}} k_i + \Delta_i, \quad (18)$$

де k_i – мультиплікативний коефіцієнт i -го діапазону температури; Δ_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 Δt 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 °С 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 ± 30 мВ при відхиленні температури НЕ від температури повірки $\pm 5^\circ\text{C}$.

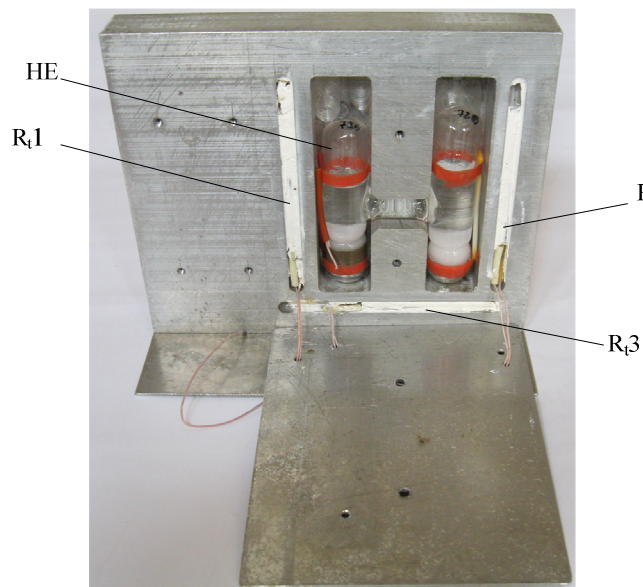


Рисунок 6 – Конструкція дослідного термовирівнювача з НЕ

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.–Іс.– (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.