

родовищ України / Козій В.М., Лур'є А.І., Рубанова І.А. // Питання розвитку газової промисловості України: Збірник наукових праць УкрНДІгаз. – 2000. – Вип. 28. – С. 66–68. 8. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82. – [Дата введения 01.07.83]. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 4 с. (Государственный стандарт Союза ССР). 9. Природний газ. Визначення складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії. Частина 1. Настанови щодо спеціалізованого аналізування: ДСТУ ISO 6974-1:2007. – [Чинний від 01-10-2008]. – К.: Держстандарт України, 2008. – 24 с. (Національний стандарт України). 10. Мотало А.В. Методи і засоби гігрометрії природного газу/ Мотало А.В., Мотало В.П. // Вимірювальна техніка та метрологія, 2006. – Вип. 66. – С. 210–219. 11. Щетинков Е.С. Фізика горіння газів / Щетинков Е.С. – М.: Наука, 1965. – 740 с. 12. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги: ГОСТ 20060-83. – [Дата введения 01.07.84]. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 16 с. (Государственный стандарт Союза ССР).

УДК 621.32;536.2

Ю.В. Яцук¹, Р.П. Дяк²

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики’;

²Лабораторія вимірювальної техніки ЛКП “Залізничнотеплоенерго”

КОРИГУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІР ОПОР

© Яцук Ю.В., Дяк Р.П., 2010

Аналіз метрологічних властивостей способів коригування температурних залежностей опору зразкових мір на основі пасивних елементів показав їх велику працездатність. Запропонована структура з використанням операційних підсилювачів спрощує процес коригування та уможливорює підвищення його точності.

The metrological properties analyses of the correction methods of resistance standard measure temperature dependence which based on passive scheme elements were done in this paper. Disadvantages of such correction methods was showed also. The active resistance measure by med modern operational amplifier were designed too. The operational amplifier nonideality additive parameters produce negligible errors of resistance measure was analyzed too.

Похибка вимірювання або ж відтворення електричного опору визначається передусім похибками масштабувальних резисторів [1–6]. Особливо відчутним вплив масштабувальних резисторів є під час вимірювання температури цифровими терморезистивними термометрами (ЦТ), особливо якщо зміна його інформативного вхідного параметра $\Delta R_{\theta} = R_{\theta} - R_0$ є співмірною або й набагато меншою від початкового значення опору R_0 термоперетворювача опору (ТО), де R_{θ} – значення опору ТО за температури θ . Під час метрологічної перевірки теплолічильників виконують випробування теплообчислювача з імітацією опорів R_{θ} ТО двома багатозначними мірами (магазинами) опору [7]. Наприклад, під час метрологічної перевірки межа допустимих значень

похибки δ_d робочих еталонів, що імітують опір ТО, не повинна перевищувати $\pm(0,04\dots0,1)$ Ом або $\delta_d \leq \pm(0,04\dots0,1)\%$ при використанні ТО з $R_0=100$ Ом [8]. Такі високі вимоги до інструментальних похибок масштабувальних резисторів істотно збільшують вимоги і до їх температурних коефіцієнтів опору (ТКО). Справді, якщо прийняти, що масштабувальні резистори виготовлені з таких матеріалів, що і вимірювальні котушки опору [1], а значення температурної складової не перевищує третини значення допустимої $\delta_{\theta\theta} = \frac{\delta_d}{R} \leq \pm(0,013\dots0,33)\%$, то значення відхилення температури $\Delta\theta = \theta - 20$ від нормального значення 20°C не повинно перевищувати

$$\delta_{\theta\theta} = \alpha \cdot \Delta\theta - |\beta| \cdot (\Delta\theta)^2, \quad (1)$$

де $\alpha = (3\dots40) \cdot 10^{-6}$ 1/К, $\beta = -(3\dots8) \cdot 10^{-7}$ 1/К² – температурні коефіцієнти вимірювальних котушок опору.

Для найгірших умов максимального значення коефіцієнта α та мінімального значення коефіцієнта β отримується значення $\Delta\theta \approx \pm 3,5$ К. Для серійних прецизійних резисторів значення ТКО може сягати $\pm(75\dots200) \cdot 10^{-6}$ 1/К [9] і, відповідно, температурний діапазон може становити $\Delta\theta \leq \pm(1\dots2,7)$ К. Такі порівняно високі вимоги до відхилень температури довікля щодо нормального значення істотно ускладнюють і здорожують метрологічну перевірку засобів вимірювальної техніки або ж призводять до зростання їх додаткових температурних похибок в умовах експлуатації.

Формулювання завдань досліджень. Основною метою цієї роботи є пошук можливостей та обґрунтування доцільності коригування температурних залежностей мір опору.

Коригування температурних залежностей мір опору на основі пасивних елементів.

Найпростішим способом коригування ТКО мір опору є використання додаткових пасивних елементів, що сполучаються послідовно з основною мірою R_{N1} (рис.1).

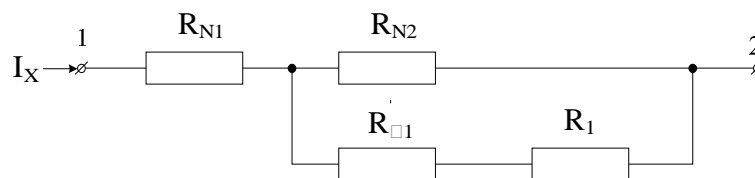


Рис. 1. Структура коригування температурних залежностей мір опору на основі пасивних елементів

Еквівалентний опір R_{12} такої міри між точками 1 та 2 подамо співвідношенням:

$$R_{12} = R_{N1} + \frac{R_{N2} \cdot (R_{\theta 1} + R_1)}{R_{N2} + R_{\theta 1} + R_1} = R_{N120} - D_{1R} \cdot (R_{\theta 120} + R_{120}) + R_{N10} \cdot \alpha \cdot \Delta\theta + D_{1R}^2 R_{\theta 1} \alpha_{\theta 1} \Delta\theta \left[1 + \frac{R_{10}}{R_{\theta 1}} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{\theta}} + \left(\frac{R_{\theta 120} + R_{120} + R_{N20} \cdot \alpha_N \cdot 20}{R_{N220}} \right)^2 \cdot \frac{R_{N220}}{R_{\theta 1}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_{\theta 1}} \right], \quad (2)$$

де $R_{N1} = R_{N120} - R_{N10} \cdot \alpha_N \cdot \Delta\theta$; $R_{N2} = R_{N220} - R_{N20} \cdot \alpha_2 \cdot \Delta\theta$; $R_1 = R_{120} - R_{10} \cdot \alpha_1 \cdot \Delta\theta$; $R_{\theta 1} = R_{\theta 120} - R_{\theta 10} \cdot \alpha_{\theta 1} \cdot \Delta\theta$; R_{N120} , R_{N220} , R_{120} , $R_{\theta 120}$ – відповідно, опори резисторів R_{N1} , R_{N2} , R_1 та $R_{\theta 1}$ при нормальній температурі $+20^\circ\text{C}$; R_{N1} , R_{N2} , R_1 та $R_{\theta 1}$ – відповідно, опори резисторів R_{N1} , R_{N2} , R_1 та $R_{\theta 1}$ при температурі 0°C ; α_N , α_2 , α_1 , $\alpha_{\theta 1}$ – відповідно, коефіцієнти температурної чутливості резисторів R_{N1} , R_{N2} , R_1 та $R_{\theta 1}$; $\Delta\theta = \theta - 20$; $\Delta\theta$ – температура довікля; $D_{1R} = \frac{R_{N220}}{R_{N220} + R_{\theta 120} + R_{120}}$.

За умов, що значення ТКО $\alpha_{\Theta 1} > 0$ (термочутливий резистор виготовлений, наприклад, з міді), та $\alpha_{\Theta 1} > |\alpha_1|$, $\alpha_{\Theta 1} > |\alpha_2|$, за допомогою схеми рис.1 можна скоригувати тільки від'ємний ТКО зразкового резистора R_{N1} . Умова коригування записується як

$$|\alpha_N| = \alpha_{\Theta 1} D_{2R}^2 \left(\frac{R_{\Theta 1}}{R_{N10}} \right) \left[1 + \frac{R_{10}}{R_{\Theta 1}} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{\Theta 1}} + \left(\frac{R_{\Theta 120} + R_{120} + R_{N20} \alpha_N \cdot 20}{R_{N220}} \right) \cdot \frac{R_{N120}}{R_{\Theta 1}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_{\Theta 1}} \right]. \quad (3)$$

Оскільки, зазвичай, $|\alpha_N| \ll \alpha_{\Theta 1}$, то під час розрахунку параметрів схеми рис. 1 з метою зменшення впливу ТКО резисторів R_{N2} та R_1 , значення яких може бути і від'ємним, доцільно вибирати $D_{1R} \ll 1$, $R_{10}/R_{01} \ll 1$, $(R_{\Theta 120} + R_{120} + R_{N20} + \alpha_N \cdot 20)^2 / R_{N220}^2 \ll 1$. Тоді в першому наближенні можна знехтувати впливом ТКО коригувальних резисторів на виконання умови коригування ТКО зразкового резистора R_{N1} .

У випадку додатного ТКО зразкового резистора R_{N1} $\alpha_N > 0$ в схемі рис. 1 слід використовувати терморезистори з від'ємним ТКО або термістори. Опір термісторів R_{1T} знижується зі зростанням температури за залежністю [9]

$$R_{1T} = R_{1T20} \cdot e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_{20}} \right)} = R_{1T20} \cdot e^{\frac{B}{T_{20}} \left(\frac{1}{1 + \Delta\theta/T_{20}} - 1 \right)} \approx R_{1T20} \cdot e^{-\frac{B}{T_{20}^2} \Delta\theta}, \quad (4)$$

де R_{1T} , R_{1T20} – опір терморезистора при поточному значенні T абсолютної температури та $T_{20} = 273,15 + 20 = 293,15\text{K}$; B – коефіцієнт пропорційності, що має розмірність температури; $\Delta\theta = T - T_{20}$.

У порівняно вузькому діапазоні відхилення температури експоненційну функцію (4) можна розкласти в ряд до лінійного члена. Наприклад, якщо $\Delta\theta \leq \pm 10\text{K}$, то алгебрична сума квадратичного та кубічного членів розкладу не перевищить 2 % від значення R_{1T} , а вже при $\Delta\theta \leq \pm 20\text{K}$ вона становитиме майже 10 %. Отже, після розкладу експоненти за співвідношенням (4) у ряд отримується вираз

$$R_{1T} = R_{1T20} \left(1 - \frac{B}{T_{20}^2} \cdot \Delta\theta \right) = R_{1T20} - R_{1T20} \cdot b \cdot \Delta\theta, \quad (5)$$

де $b = B/T_{20}^2$ – ТКО термістора в діапазоні температур $T_{20} \pm \Delta\theta$.

Методика розрахунку пасивних ланок з уніфікацією характеристик термісторів розроблена давно, але доцільно розглянути їх метрологічні властивості із урахуванням ТКО усіх резистивних елементів [10].

З урахуванням співвідношення (5) еквівалентний опір R_{12} переписується як

$$R_{12} = R_{N120} - D_{2R} \cdot (R_{1T120} + R_{120}) + R_{N10} \cdot \alpha \cdot \Delta\theta - D_{2R}^2 R_{1T20} b \Delta\theta \left[1 - \frac{R_{10}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_1}{b} - \left(\frac{R_{1T20} + R_{120} + R_{N20} \alpha_N \cdot 20}{R_{N220}} \right) \cdot \frac{R_{N120}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_2}{b} \right], \quad (6)$$

де $D_{2R} = \frac{R_{N220}}{R_{N220} + R_{1T20} + R_{120}}$.

Умова коригування додатного ТКО α_N зразкового резистора R_N

$$\alpha_N = D_{2R}^2 \frac{R_{1T20}}{R_{N10}} b \left[1 - \frac{R_{10}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_1}{b} - \left(\frac{R_{1T20} + R_{120} + R_{N20} \alpha_N \cdot 20}{R_{N220}} \right)^2 \cdot \frac{R_{N120}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_2}{b} \right]. \quad (7)$$

Технологічний розкид δ_{1T20} опору R_{1T20} та δ_B коефіцієнта B призводить до порушення умови (7)

$$\alpha_N = b D_{2R}^2 \frac{R_{1T20}}{R_{N10}} \left[1 - \frac{R_{10}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_1}{b} - \left(\frac{R_{1T20} + R_{120} + R_{N20} \alpha_N \cdot 20}{R_{N220}} \right)^2 \cdot \frac{R_{N120}}{R_{1T20}} \cdot \frac{\alpha_2}{b} \right] * \left(1 + \delta_B - \frac{2R_{1T20}}{R_{120} + R_{N220} + R_{1T20}} \delta_{1T20} \right). \quad (8)$$

Як показує аналіз співвідношення (8), значення розкиду чутливості δ_θ термістора R_{1T} практично не зменшується у схемі рис. 1, а значення розкиду δ_{1T20} опору R_{1T20} істотно зменшується в $2R_{1T20}/(R_{120} + R_{N220} + R_{1T20})$ разів. Наприклад, якщо $\delta_B \approx 17\%$, $\delta_{1T20} \approx 20\%$ [9,10], то еквівалентний ТКО скоригованого зразкового резистора можна зменшити приблизно лише в 5 разів. Для подальшого зменшення цього ТКО слід врахувати значення δ_B та δ_{1T20} конкретного екземпляра термістора під

час розрахунку параметрів елементів схеми (рис. 1). Посередні метрологічні властивості, порівняно вузький температурний діапазон та неможливість коригування як додатних, так і від'ємних ТКО однією ланкою з однотипними елементами істотно утруднює та здорожує виготовлення таких термоне залежних резисторів, наприклад, для метрологічної перевірки теплообчислювачів використовуються шість зразкових резисторів вартістю близько 60 євро кожен.

Коригування температурних залежностей мір опору з використанням активних елементів.

Великою мірою вказані недоліки усунені у схемі зразкової міри опору R_{N1} з коригуванням її додатних і від'ємних ТКО (рис. 2).

Принцип її дії полягає у формуванні на додатковому зразковому резисторі R_{N2} такого спаду напруги, який коригуватиме спад напруги на зразковому резисторі R_{N1} , спричинений його температурними змінами.

Для цього струм I_X міри за допомогою перетворювача струм-напруга DA1, $R_{1\theta}$, R_1 перетворюється на напругу U_1 та, за допомогою резисторної ланки, перетворюється на коригувальний спад напруги U_{KP}

$$U_{KP} = I_X R_{N2} \frac{R_{1\theta} + R_1}{R_{N2} + R_4} \cdot \frac{R_3}{R_2}, \quad (9)$$

$R_{\theta 1} = R_{1\theta 0} (1 + \alpha\theta) = R_{1\theta 20} + R_{1\theta 0} \alpha_{\theta 1} \cdot \Delta\theta$ – опір термочутливого резистора;
 $R_1 = R_{120} + R_{10} \alpha_1 \Delta\theta$; $R_2 = R_{220} + R_{20} \alpha_2 \Delta\theta$; $R_3 = R_{320} + R_{30} \alpha_3 \Delta\theta$; $R_4 = R_{420} + R_{40} \alpha_4 \Delta\theta$;
 $R_{N2} = R_{N220} + R_{N20} \alpha_{2N} \Delta\theta$; $R_{N1} = R_{N120} + R_{N10} \alpha_{1N} \Delta\theta$ – опори масштабувальних резисторів, відповідно, за поточного значення температури θ доквілля $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{N2}, R_{N1}, R_{120}, R_{220}, R_{320}, R_{420}, R_{N120}, R_{1\theta 20}$ – відповідно, опори резисторів $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{N2}, R_{N1}, R_{\theta 1}$ при 20°C ; $R_{10}, R_{20}, R_{30}, R_{40}, R_{N10}, R_{N20}, R_{1\theta 0}$ – відповідно, опори резисторів $R_1, R_2, R_3, R_4, R_{N2}, R_{N1}, R_{\theta 1}$ – за температури доквілля 0°C ; $\alpha_{\theta 1}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_{1N}, \alpha_{2N}$, – коефіцієнти температурної чутливості резисторів, відповідно, $R_{\theta 1}, R_1, R_2, R_3, R_4, R_{N1}, R_{N2}$; $\Delta\theta = \theta - 20$ – відхилення температури доквілля від нормального значення 20°C .

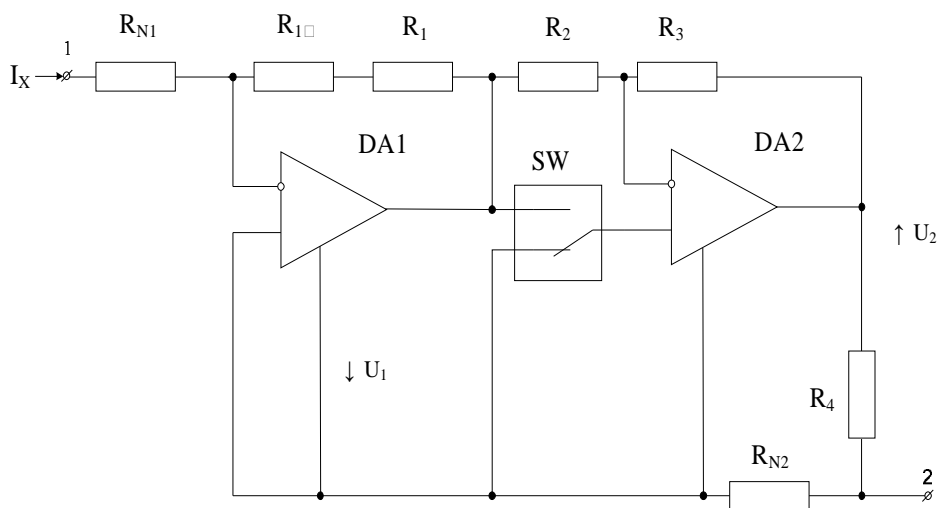


Рис. 2. Схема активної міри з коригуванням температурної залежності зразкового резистора

В схему активної міри опору уведений перемикач SW, за допомогою якого змінюється полярність вихідної напруги U_2 підсилювача DA2. Справді, якщо перемикач SW перебуває у нижньому за рис. 2 положенні, то вихідна напруга інвертується та дорівнює $U_2 = -U_1 \frac{R_3}{R_2}$, де U_1 – напруга підсилювача DA1. Якщо ж перемикач SW перебуває у верхньому за рис. 2 положенні, то вихідна напруга U_2 не інвертується $U_2=U_1$.

Між клемми 1 та 2 відтворюється опір R_{12}

$$R_{12} = R_{N1} + R_{N2} - R_{N2} \frac{R_{1\theta} + R_1}{R_{N2} + R_4} \cdot \frac{R_3}{R_2}. \quad (10)$$

Підставивши вирази температурних залежностей резисторів у формулу (10), після перетворень отримаємо

$$R_{12} = R_{N\theta 20} \left\{ 1 + \frac{R_{N10}}{R_{N\theta 20}} \alpha_{1N} \cdot \Delta\theta + \frac{R_{N20}}{R_{N\theta 20}} \alpha_{2N} \cdot \Delta\theta - \frac{R_{N220}}{R_{N\theta 20}} * \right. \\ * D_{3R} \alpha_{\theta 1} \cdot \Delta\theta \left[\frac{R_{1\theta 0}}{R_{1\theta 20} + R_{120}} + \frac{R_{10} \frac{\alpha_1}{\alpha_{\theta 1}}}{R_{1\theta 20} + R_{120}} + \frac{R_{20}}{R_{220}} \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_{\theta 1}} - \frac{R_{20}}{R_{220}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_{\theta 1}} + \right. \\ \left. \left. + \frac{R_{420}}{R_{420} + R_{N220}} \cdot \frac{R_{N20}}{R_{N220}} \cdot \frac{\alpha_{2N}}{\alpha_{\theta 1}} - \frac{R_{40}}{R_{420} + R_{N220}} \cdot \frac{\alpha_4}{\alpha_{\theta 1}} \right] \right\}. \quad (11)$$

Умовою коригування ТКО зразкового резистора R_{N1} є

$$\alpha_{1N} \frac{R_{N10}}{R_{N\theta 20}} = \alpha_{\theta 1} \left\{ \frac{R_{N220}}{R_{N\theta 20}} - D_{3R} \left[\frac{R_{1\theta 0}}{R_{1\theta 20} + R_{120}} + \frac{R_{10} \frac{\alpha_1}{\alpha_{\theta 1}}}{R_{1\theta 20} + R_{120}} + \frac{R_{20}}{R_{220}} \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_{\theta 1}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{R_{20}}{R_{220}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_{\theta 1}} + \frac{R_{420} \frac{\alpha_{2N}}{\alpha_{\theta 1}}}{R_{420} + R_{N220}} - \frac{R_{40} \frac{\alpha_4}{\alpha_{\theta 1}}}{R_{420} + R_{N220}} \right] - \frac{R_{N20}}{R_{N220}} \cdot \frac{\alpha_{2N}}{\alpha_{\theta 1}} \right\} \quad (12)$$

де $D_{3R} = \frac{R_{220}}{R_{220}} \cdot \frac{R_{1\theta 20} + R_{120}}{R_{N220} + R_{420}}$; $R_{N\theta 20} = R_{N120} + R_{N220} (1 - D_{3R})$.

Зазвичай на практиці неважко забезпечити, щоб значення ТКО $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_{2N}$ були в декілька десятків разів меншими від $\alpha_{\theta 1}$ (опір $R_{1\theta}$ виготовлений, наприклад, з міді). Оскільки значення усіх відношень резисторів у квадратних дужках та R_{N20}/R_{N220} співвідношення (12) не перевищують одиниці, то в першому наближенні усіма членами, що містить відношення ТКО, можна знехтувати. Тоді точність виконання співвідношення (12) залежить від точності виготовлення резисторів схеми коригування ТКО зразкового резистора (рис. 2).

Очевидно, що на точність коригування впливатимуть і параметри неідеальності операційних підсилювачів (ОП) DA1, DA2. Аналіз структури рис. 2 показує, що для типових схем увімкнення підсилювачів DA1, DA2 можна знехтувати мультиплікативними параметрами неідеальності сучасних операційних підсилювачів [11]. На похибку коригування впливатимуть адитивні параметри неідеальності напруги зміщення та вхідні струми підсилювачів. З урахуванням цього спад напруги U_{12} між клемми 1 і 2 структури міри визначається як

$$U_{12} = I_X (R_{N1} + R_{N2}) - \left\{ \left[I_X (R_{1\theta} + R_1) + e_1 + I_{1BX}^- (R_{1\theta} + R_1) \right] * \right. \\ \left. * \frac{R_3}{R_2} + \left(e_2 + I_{2BX}^- \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) \frac{R_{N2}}{R_{N2} + R_4} \right\} \quad (13)$$

або значення опору R_{12}

$$R_{12} = R_{N1} + R_{N2} - \frac{R_{N2}}{R_{N2} + R_4} \left\{ \left[(R_{1\theta} + R_1) + \frac{e_1 + I_{1BX}^- (R_{1\theta} + R_1)}{I_{XX}} \right] \cdot \frac{R_3}{R_2} + \frac{e_2 + I_{2BX}^- \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{I_{XX}} \right\}, \quad (14)$$

де e_1, e_2 – напруги зміщення ОП DA1, DA2; I – вхідні струми інвертувальних входів ОП DA1, DA2.

Типово значення напруг зміщення та вхідних струмів сучасних мікросхем ОП становить, наприклад, типів MAX 420- $e_{3M}=1$ мкВ, $I_{BX} \approx 10$ нА; LT 1050-0,5мкВ, 1нА; LM U₂₀₁₁-0,8мкВ, 5нА [11]. Зазвичай на зразкових резисторах спади напруг становлять від 0,1В до 10В. Тоді значення відносної похибки активної міри опору не перевищуватиме для ОП типу LT 1050 $\pm(2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3})\%$, тобто нехтовно мале значення порівняно з типовими значеннями похибок метрологічних пристроїв – декілька сотих відсотка.

Методика коригування ТКО зразкових мір полягатиме у визначенні його значення $\pm\alpha_{1N}$ та розрахунку значень параметрів структури (рис. 2) для його зменшення.

Висновки. У базисі пасивних елементів достатньо трудомістко та дорого здійснювати коригування ТКО зразкових резистивних мір. На основі структур з активними елементами можна здійснювати коригування ТКО різних знаків у межах однієї структури. Для сучасної мікроелектронної елементної бази адитивні параметри неідеальності операційних підсилювачів вноситимуть нехтовно малі значення похибок.

1. *Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Поліщук Є.С., Дорожовець М.М, Яцук В.О. та ін.; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескид-біт, 2003. – 544 с.* 2. *Яцук В.О., Малачівський П.С., Методи підвищення точності вимірювань: Підручник. – Львів: Бескид-біт, 2008. – 368 с.* 3. *Яцук В.О. Диференціальний метод вимірювання електричного опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2001. – № 58. – С.32–37.* 4. *Яцук В.О. Компенсаційний метод побудови цифрових омметрів // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2001. – Вип. – С.99–102.* 5. *Стадник Б., Сопільник Л., Яцук Ю. Особливості побудови цифрових резистивних термометрів підвищеної якості // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 68. – С.111–115.* 6. *Яцук В.О. Принципи побудови кодированих мір опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999. – № 55. – С.111–115.* 7. *Дяк Р.П., Яцук В.О., Столярчук П.Г. Можливості автоматизації випробувань термоперетворювачів // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2009. – С.99–102.* 8. *Дяк Р.П., Яцук В.О., Столярчук П.Г. Шляхи автоматизації робочих місць з випробувань теплообчислювачів загальнобудинкових теплотічників // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999. – № 70. – С.106–109.* 9. *Электрические измерения неэлектрических величин // Туричин А.М., Новицкий П.В., Левишина Е.С. и др.; Под ред. проф. П.Ф. Новицкого. Изд. 5-е, перер. и доп. – Ленинград: Энергия, 1975. – 576 с.* 10. *Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 239 с.* 11. www.elfa.com.

УДК 537.311.322

Р. Крайовський¹, В. Ромака²

¹Національний університет “Львівська політехніка”;

²Львівський національний університет ім. І. Франка

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК $Zr_{1-x}Ho_xNiSn$ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОННОЇ ГУСТИНИ

© Крайовський Р., Ромака В., 2010

Досліджено вплив акцепторної домішки Ho на зміну кристалічної та електронної структур інтерметалічного напівпровідника $n-ZrNiSn$ у концентраційному діапазоні $x(Ho) = 0 \div 0,50$. Зроблені висновки про характер поведінки рівня Фермі (ϵ_F) $Zr_{1-x}Ho_xNiSn$, механізми керування положенням ϵ_F та особливості функцій перетворення резистивних та термоелектричних термоелементів.

Постановка проблеми та мета роботи. Інтерметалічні напівпровідники $MNiSn$ ($M - Ti, Zr, Hf$) входять у коло термоелектричних та термометричних матеріалів, що інтенсивно вивчаються у світових дослідницьких центрах на предмет використання у процесі перетворення теплової енергії