

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАЧІВ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВІ ПЛАТИНОВИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ДВОДРОТОВОЮ ЛІНІЄЮ ЗВ'ЯЗКУ

© Олесків Т.М., Яцук В.О.

Національний університет „Львівська політехніка”, кафедра „Метрологія, стандартизація та сертифікація”, м. Львів, вул. С. Бандери, 28
taras_oleskiv@ukr.net

Проведено аналітичний огляд існуючих методів і засобів метрологічного забезпечення вимірювачів різниці температур. Запропоновано структуру вимірювача різниці температур для сенсорів з дводровою лінією зв'язку з можливістю проведення процедури автоматичного калібрування. Проаналізовано параметри ліній зв'язку.

Проведен аналитический обзор существующих методов и средств метрологического обеспечения измерителей разности температур. Предложена структура измерителя разности температур для сенсоров с двухпроводной линией связи с возможностью проведения процедуры автоматической калибровки. Проанализированы параметры линий связи.

An analytical review of existing methods and means of metrological assurance of measuring temperature difference is conducted. Temperature difference measuring structure for sensors with two-wire line connection with the possibility of automatic calibration procedure is proposed. Parameters of lines connection are analyzed.

Вступ. В наші дні прецизійне вимірювання як температури, так і різниці температур відіграє важливу роль під час контролю багатьох технологічних процесів (випробувань сонячних колекторів, метрологічної перевірки колективних теплотічильників та ін.). Аналіз нормативної документації показав, що для метрологічного забезпечення вимірювання різниці температур потрібно вибирати методи і засоби, межа допустимих значень похибки яких не перевищувала б $\Delta_{\text{доп}} \leq \pm 0,1$ К. Провівши огляд чутливих елементів було встановлено, що для виконання цієї умови для вимірювання різниці температур найдоцільніше використовувати платинові термоперетворювачі опору завдяки їх високій точності, стабільності в часі, широкому температурному діапазону вимірювання та добрим електричним властивостям, які встановлені європейським стандартом DIN EN 60 751 [2].

Під час побудови як самих вимірювачів різниці температур, так і засобів їх метрологічного забезпечення, основними джерелами похибок є вплив залишкових параметрів з'єднувальних ліній, перегрів чутливих елементів вимірювальним струмом, похибка від зміни значення вимірювального струму, адитивна і мультиплікативна складові похибки усього тракту перетворення.

Аналітичний огляд існуючих методів і засобів метрологічного забезпечення вимірювачів різниці температур. На сьогодні при вимірюванні як температури, так і різниці температур часто використовують платинові термоперетворювачі з характеристикою термоелемента Pt 100 і все більшого поширення набувають сенсори з НСХ Pt 500 і Pt 1000. Застосування сучасних технологій дозволяє виготовляти терморезистивні перетворювачі з підвищеною точністю, при достатньо низькій вартості. Температурні сенсори Pt 100, Pt 500 та Pt 1000 виготовляються на основі тонкоплівкових технологій, що забезпечує їм порівняно малі габарити і високу швидкодію [1].

Для під'єднання терморезисторів до вимірювального приладу використовують дво-, три- або чотирипровідні лінії зв'язку [4] з метою зменшення похибок вимірювання. Для зменшення похибок, що з'являються через невідповідність опору з'єднувальних провідників їх градуальному значенню, використовують термоперетворювачі трьома і чотирма виводами і відповідне їх ввімкнення в мостове або компенсаційне коло [4]. Для побудови прецизійних вимірювачів різниці температур пропонується використовувати чотиридротове під'єднання сенсорів [3]. Звичайно, використавши чотирипровідну схему підключення терморезисторів, можна уникнути впливу залишкових параметрів з'єднувальних ліній і тим самим добитися зменшення похибки

вимірювання різниці температур. Проте така структура буде складнішою в реалізації і, відповідно, собівартість приладу зростатиме.

Постановка задачі:

- Розробити структуру вимірювача різниці температур на основі дводровового під'єднання терморезистивних перетворювачів;
- Враховуючи основні джерела похибок при розробці приладу запропонувати шляхи їх усунення;
- Запропонувати процедуру автоматичного калібрування функції перетворення;
- Проаналізувати параметри ліній зв'язку і зробити висновок про можливість використання дводровового під'єднання сенсорів.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи вищесказане, під час побудови вимірювача різниці температур у випадку використання коротких ліній зв'язку пропонується використати структуру вимірювача різниці опорів терморезистора з дводровою лінією зв'язку, подібну до структури цифрового омметра з автоматичною корекцією похибок [5]. Відмінність полягає в тому, що в пропонованій структурі додано ще один канал вимірювання опорів. Для здійснення процедури автоматичного калібрування функції перетворення передбачена також можливість під'єднання калібрувального резистора.

Таким чином структура пропонованого вимірювача різниці температур зrealізована на основі пари платинових термоперетворювачів опорів і має наступний вигляд (рис. 1):

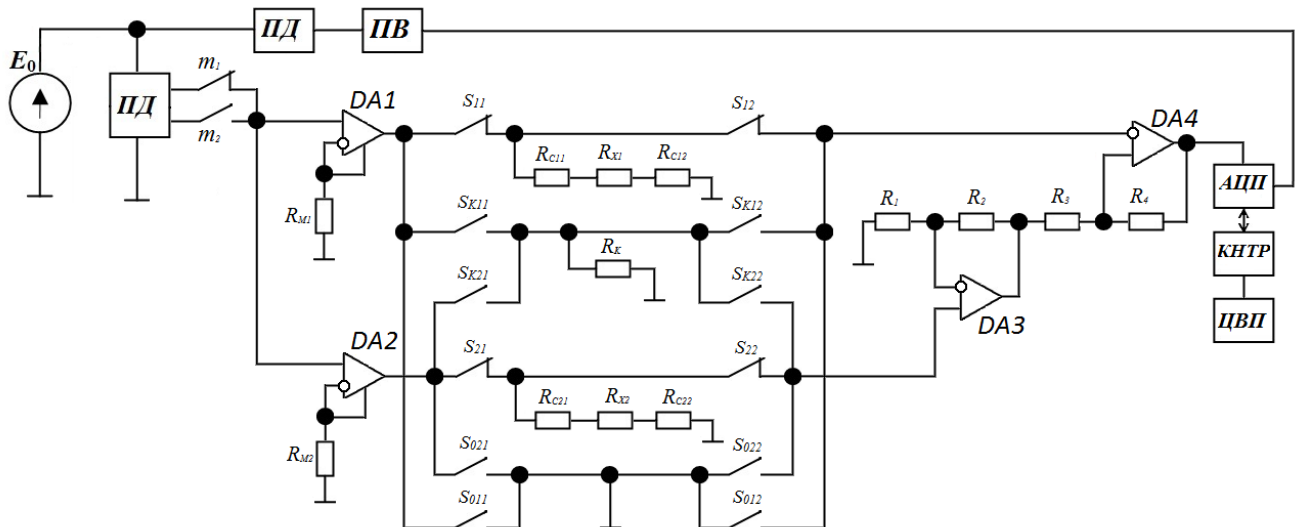


Рис. 1. Структурна схема вимірювача різниці температур для сенсорів з дводровою лінією зв'язку з можливістю проведення процедури автоматичного калібрування

Функціональна схема складається з:

- джерела опорної напруги E_0 ;
- двох генераторів струму, побудованих на підсилювачах DA1 і DA2 із струмозадавальними резисторами;
- диференційного підсилювача DA3, DA4;
- аналого-цифрового перетворювача;
- контролера;
- цифрового відлікового пристрою.

Для автоматичного коригування адитивної складової похибки вимірювача різниці температур використовується метод модуляції вимірювальних струмів, який реалізовується шляхом зміни опорної напруги для генератора струму з допомогою перемикача m_1, m_2 .

Інваріантність результату вимірювання до значень вимірювальних струмів забезпечується шляхом формування опорної для АЦП напруги від ДОН пристрою.

Для проведення процедури автоматичного калібрування вимірювача різниці температур передбачено окремий калібрувальний резистор R_k , який може бути під'єднаний до обох входів пристрою.

Коли замкнуті ключі $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$, визначається результат вимірювання різниці опорів терморезисторів ΔN_X , як різниця кодів двох результатів перетворення:

$$\begin{cases} N_{X1} = k_{ADC} \left(\frac{p_{m1} E_0 + \Delta \Gamma_1}{k_{ПД} E_0 + \Delta_{ПВ}} k_{m1} \frac{R_{X1} + R_{C1}}{R_{M1}} - \frac{p_{m1} E_0 + \Delta \Gamma_2}{k_{ПД} E_0 + \Delta_{ПВ}} k_{m2} \frac{R_{X2} + R_{C2}}{R_{M2}} \right); \\ N_{X2} = k_{ADC} \left(\frac{p_{m2} E_0 + \Delta \Gamma_1}{k_{ПД} E_0 + \Delta_{ПВ}} k_{m1} \frac{R_{X1} + R_{C1}}{R_{M1}} - \frac{p_{m2} E_0 + \Delta \Gamma_2}{k_{ПД} E_0 + \Delta_{ПВ}} k_{m2} \frac{R_{X2} + R_{C2}}{R_{M2}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta N_X = N_{X1} - N_{X2} = \frac{k_{ADC}(p_{m1} - p_{m2})}{k_{ПД}(1 + \Delta_{ПВ}/E_0 k_{ПД})} \cdot \left[\frac{k_{m1}(R_{X1} + R_{C1})}{R_{M1}} - \frac{k_{m2}(R_{X2} + R_{C2})}{R_{M2}} \right]. \quad (2)$$

Оскільки зміна масштабувальних коефіцієнтів тракту перетворення із зміною умов довкілля та часу може призводити до суттєвих похибок, то пропонується процедура авто калібрування, яка відбувається за таким алгоритмом. До першого входу під'єднується калібрувальний резистор з точно відомим опором R_K , другий канал закорочується (замкнуті $S_{K11}, S_{K12}, S_{021}, S_{022}$) і отримується показ ΔN_{K1} . Потім, навпаки, до другого входу під'єднується той самий калібрувальний резистор R_K , а перший закорочується (замкнуті $S_{K21}, S_{K22}, S_{011}, S_{012}$) і отримується показ ΔN_{K2} :

$$\begin{cases} \Delta N_{K1} = N_{K11} - N_{K12} = \frac{k_{ADC}(p_{m1} - p_{m2})}{k_{ПД}(1 + \Delta_{ПВ}/E_0 k_{ПД})} \cdot \frac{k_{m1}}{R_{M1}} \cdot R_K; \\ \Delta N_{K2} = N_{K21} - N_{K22} = \frac{k_{ADC}(p_{m1} - p_{m2})}{k_{ПД}(1 + \Delta_{ПВ}/E_0 k_{ПД})} \cdot \frac{k_{m2}}{R_{M2}} \cdot R_K. \end{cases} \quad (3)$$

Визначаються невідомі значення коефіцієнтів перетворення обох половин диференційного підсилювача АЦП різниці температур:

$$\begin{cases} \frac{k_{ADC}(p_{m1} - p_{m2})}{k_{ПД}(1 + \Delta_{ПВ}/E_0 k_{ПД})} \cdot \frac{k_{m1}}{R_{M1}} = \frac{\Delta N_{K1}}{R_K}; \\ \frac{k_{ADC}(p_{m1} - p_{m2})}{k_{ПД}(1 + \Delta_{ПВ}/E_0 k_{ПД})} \cdot \frac{k_{m2}}{R_{M2}} = \frac{\Delta N_{K2}}{R_K}. \end{cases} \quad (4)$$

Після такої процедури калібрування результат вимірювання можна записати так:

$$\Delta N_{XK} = \left(\frac{\Delta N_{K1}}{R_K} R_{X1} - \frac{\Delta N_{K2}}{R_K} R_{X2} \right) + \left(\frac{\Delta N_{K1}}{R_K} R_{C1} - \frac{\Delta N_{K2}}{R_K} R_{C2} \right) \quad (5)$$

Як бачимо, на результат вимірювання різниці температур впливають опори з'єднувальних дротів. Треба вибирати довжину цих дротів так, щоб похибка вимірювання різниці їх опорів ΔR_C була нехтівно малою, порівняно з похибкою вимірювання різниці опорів терморезисторів ΔR_X , тобто $\Delta R_C \leq \frac{\Delta R_X}{3 \div 5}$. Із врахуванням залежності

Календара, $R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2)$, чутливість за опором платиного термоперетворювача Pt 100 ($R_0 = 100$ Ом), знайдемо як:

$$\varepsilon_R = \frac{\partial R_\theta}{\partial \theta} = R_0 \cdot (A + 2B\theta) \approx R_0 \cdot A = 100 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 0,39 \text{ Ом/К}. \quad (6)$$

Тепер, для відомої чутливості ε_R і виходячи з допустимих меж похибки вимірювача різниці температур $\pm 0,1$ К можна знайти межі допустимих значень похибки вимірювання різниці опорів терморезисторів:

$$\Delta R_X = \pm 0,39 \cdot 0,1 = 0,039 \text{ Ом}. \quad (7)$$

Відповідно довжина з'єднувальних ліній повинна бути такою, щоб похибка різниці їх опорів не перевищувала:

$$\Delta R_C \leq \frac{\Delta R_X}{3 \div 5} = \frac{0,039}{3 \div 5} = (0,008 \div 0,013) \text{ Ом}. \quad (8)$$

Межа допустимих значень похибки від різниці опорів ліній зв'язку визначається так:

$$\Delta R_C = 4 \cdot \frac{\rho_n \cdot l_n}{S_n} \cdot (\delta_\rho + \delta_S), \quad (9)$$

де ρ_n , l_n , S_n – питомий опір, довжина і площа поперечного перерізу провідників відповідно;

δ_ρ , δ_S – відповідно розкид по питомому опору і площі поперечного перерізу провідників.

За стандартними даними для мідного провідника діаметром 1 мм $\delta_\rho \approx 4,5\%$ і $\delta_S \approx 4\%$, можна визначити, якої довжини повинні бути з'єднувальні дроти, щоб похибка запропонованого вимірювача різниці температур не перевищувала 0,1 К:

$$l_n = \Delta R_C \cdot \frac{S_n}{4 \cdot \rho_n \cdot (\delta_\rho + \delta_S)} = (1,2 \div 1,9) \text{ м}. \quad (10)$$

Можна зробити висновок, що у випадку коротких дротів (до 1,9 м) для побудови вимірювача різниці температур можна використовувати дводровову лінію зв'язку.

Проте інколи потрібно використовувати довші з'єднувальні дроти чи дроти меншого діаметру. Звичайно, це призведе до того, що значення похибки вийде за встановлені межі. В такому випадку можна скоригувати результат вимірювання за рахунок визначення різниці опорів ліній зв'язку. Це можна зrealізувати, закоротивши обидва терморезистори R_{X1} та R_{X2} , в результаті чого отримаємо код, еквівалентний різниці опорів з'єднувальних ліній:

$$\Delta N_{XC} = \frac{\Delta N_{K1}}{R_K} R_{C1} - \frac{\Delta N_{K2}}{R_K} R_{C2}. \quad (11)$$

Після такої процедури скоригований результат вимірювання можна записати так:

$$\Delta N_{XKC} = \Delta N_{XK} - \Delta N_{XC} = \frac{\Delta N_{K1}}{R_K} R_{X1} - \frac{\Delta N_{K2}}{R_K} R_{X2}. \quad (12)$$

Як бачимо, після визначення різниці опорів з'єднувальних дротів на скоригований результат вимірювання буде впливати тільки похибка калібрувального резистора. Але таку процедуру можна проводити тільки у випадку, коли у вимірювачі різниці температур є доступ до термоперетворювачів.

Висновки:

- Розроблено структуру вимірювача різниці температур на основі платинових термоперетворювачів опору з дводровою лінією зв'язку.

- Для усунення похибок від зміни масштабувальних коефіцієнтів тракту перетворення із зміною умов довкілля і часу запропоновано процедуру проведення автокалібрування.

- Проведено аналіз параметрів ліній зв'язку, в результаті якого було встановлено, що у випадку використання коротких ліній при побудові вимірювача різниці температур похибка не буде виходити за встановлені межі.

- Якщо є можливість доступу до термоперетворювачів, то у випадку використання з'єднувальних ліній, параметри яких призведуть до перевищення межі граничної допустимої похибки, запропоновано процедуру коригування результату вимірювання, при якій визначається і враховується різниця опорів цих ліній.

Загальною рекомендацією до зменшення такої похибки є використання високоомних термоперетворювачів опору. Наприклад, для тих самих параметрів ліній зв'язку та плівкового термоперетворювача з НСХ Pt 1000, довжина ліній зв'язку може бути збільшена до 19 м, або ж похибка може бути зменшена до 0,01 К.

1. http://www.zamer.ru/info/datchik_pt100 2. Matthias Nau. *Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern* / Matthias Nau – Fulda, Germany: JUMO GmbH & Co. KG, 2004. – 160 S. 3. Олесків Т.М. *Електротехнічні та комп'ютерні системи* / Т.М. Олесків, В.О. Яцук // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 06(82). – С. 106–109. 4. Поліщук Є.С. *Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник* / Є.С. Поліщук. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 360 с. 5. Яцук В.О. *Методи підвищення точності вимірювань: Підручник* / В.О. Яцук, П.С. Малахівський. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2008. – 368 с.