

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У КОРПУСІ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

STUDY OF THE TEMPERATURE FIELDS IN THERMOTRANSDUCER'S CASE

Янишин Я. С., канд. екон. наук, в. о. проф.

Львівський національний аграрний університет, Україна, e-mail: yaroslav2111@ukr.net

Yaroslav Yanyshyn, PhD, As.-Prof.,

Lviv National Agrarian University; Ukraine; E-mail: yaroslav2111@ukr.net

<https://doi.org/>

Анотація. У роботі запропоновано аналітичне дослідження складової інструментальної похибки термоперетворювачів, спричиненої протіканням тепла під час вимірювання високих температур. Значення вказаної похибки залежить від конструктивного виконання термоперетворювачів, інтенсивності теплообміну із вимірюваним середовищем і особливостей його контакту із зовнішнім середовищем.

Ключові слова: термоперетворювач, температура, теплообмін, теплопередача, точність вимірювання, циліндричний стрижень.

Abstract. The choice of ways of obtaining information about the temperature of the surface layers of a moving object is the crucial in determining the type of temperature transducers. This choice depends on the row of specific factors: the speed of movement of the measured object relative the object, the state of the surface, the presence of related agents in near-surface layers, the presence of disturbing factors - noise, vibration, etc. The major factor seems to be the value of the heat carried out from the diagnosed object with the help of intermediate substance.

The main method for measuring the temperature of moving and rolling objects is the application of sensors that are fixed near-by moving surfaces in such a manner that become in direct heat contact with them. Then arises the problem of accuracy of the received readouts or/and their interpretation. The study of the instrumental error component of thermotransducers, caused by the heat withdrawal at the measuring the middle-high temperatures, is considered in this paper. The value of this error depends on the design of the thermotransducer and its sensitive element, the intensity of the heat exchange with environment and the features of its contact with the measured object.

The physical principles and model foundations of designing thermometers are accessed in the paper. Numerical schemes for computing the thermal state of thermotransducer as well as the method of resolving their constructive parameters are considered. At the same time, the problem of the possibility of an adequate mathematical description on the basis of corresponding physical and mathematical models with the subsequent use of the calculated data for creation of new and optimization of existing thermometric means remains a current topical issue.

Key words: Thermotransducer, Temperature, Heat exchange, Heat transfer, Measurement error, Cylindrical rod.

Вступ

Підвищення точності вимірювання температури різних середовищ у разі багаторазових стрімких охолоджень і підігрівань вимагає подальших аналітичних досліджень інструментальної похибки термоперетворювачів.

Недоліки

Основним способом вимірювання температури рухомих об'єктів є використання термоперетворювачів, які нерухомо закріплені відносно поверхонь, що рухаються, і контактують з ними через проміжне середовище із доброю теплопровідністю [1]. Під час застосування вказаних засобів виникає проблема оцінювання точності отриманих показів, зокрема інтерпретації методичних та інструментальних похибок.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження похибки поверхневих термоперетворювачів, спричиненої відведенням тепла.

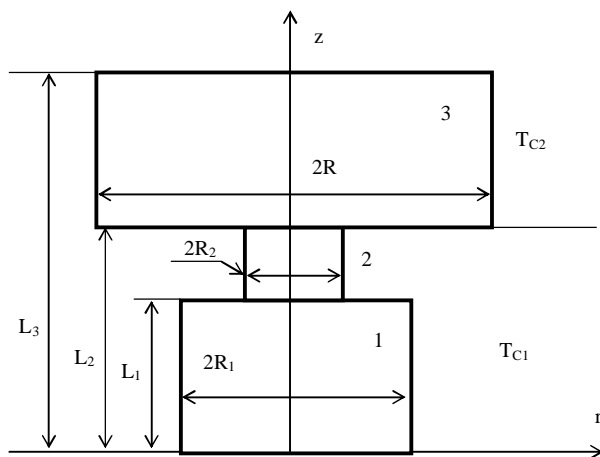
1. Розвиток методики дослідження температурного поля термоперетворювачів

Проблему підвищення точності ідентифікованих показів можна вирішити, використовуючи відповідні розрахункові дані та схемні рішення, зокрема і з вибором способів отримання інформації про температуру приповерхневих шарів рухомого об'єкта, які перебувають у детермінованій залежності від температури в глибинних шарах конструктивних елементів відповідної машини чи апарата загалом. Вибір способу отримання інформації визначається багатьма факторами: швидкістю руху, станом поверхні, наявністю супутніх агентів у приповерхневих шарах, присутністю факторів збурення – шуму [1], вібрації тощо. Залежно від пакета вказаних факторів, передавання тепла від діагностованого об'єкта можна здійснити за допомогою теплопередавальних елементів, заповнених твердофазною субстанцією. В роботі [2] наведено фізичні принципи та теоретичні засади побудови більшості відомих термоперетворювачів.

У [3-4] подано числові схеми розрахунку теплового стану термоперетворювачів і описано методику оптимального вибору їхніх конструктивних параметрів. Разом з тим, актуальною залишається проблема формування адекватного математичного опису на основі відповідних фізико-математичних моделей з подальшим використанням розрахункових даних для реалізації нових і оптимізації відомих засобів термометрії.

Нижче вивчено похибку, спричинену відведенням тепла від поверхневих термоперетворювачів, в яких спіральний навій чутливого елемента, виготовлений із платинової дротини діаметром 0,03 мм, розміщений у каналах керамічного плоского ізолятора. Канали каркаса із поміщеними в них спіралями чутливого елемента заповнюють спеціальним порошком, який захищає витки від шунтування і покращує тепловий контакт між спіралями і каркасом. Плоский ізолятор прикріплюють до корпусу за допомогою органосилікатного клею ОС-51-03. Корпус термоперетворювача для кріплення і суцільного прилягання до масивного об'єкта вимірювання має гвинт. Теплопередавання між чутливим елементом та об'єктом вимірювання відбувається через керамічний каркас, органосилікатний клей і корпус.

Для визначення і дослідження температурного поля термоперетворювача у захисному корпусі його змодельовано кусково-однорідним ступінчастим стрижнем з різними коефіцієнтами теплообміну з його поверхонь (див. рисунок). Циліндричний стрижень 1 радіусом R_1 і довжиною l_1 моделює різьбове з'єднання; циліндричний стрижень 2 радіусом R_2 і довжиною (l_2-l_1) моделює перехідний циліндричний стрижень між різьбовим з'єднанням і корпусом ТП, циліндричний стрижень 3 радіусом R_3 і довжиною (l_3-l_2) моделює корпус термоперетворювача.



Модель термоперетворювача

The model of the thermocouple

Під час вимірювання температур термоперетворювач міститься у двох середовищах: різьбове з'єднання і перехідний циліндричний стрижень у вимірювальному середовищі T_{c1} , корпус термоперетворювача в середовищі температури T_{c2} . З бокових поверхонь частин стрижня здійснюється теплообмін за законом Ньютона із середовищами температури T_{c1} і T_{c2} відповідно. На торці стрижня $z=0$ відбувається теплообмін за законом Ньютона з вимірювальним середовищем, а торець стрижня $z=l_3$ вважається теплоізолюваним.

Для визначення температури у кусково-однорідному ступінчастому стрижні записано рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \{t - [t_{c1} - (t_{c2} - t_{c1}) \cdot S_-(z - l_2)]\} \times \{k_1^2 + [k_2^2 + (k_3^2 - k_2^2) \cdot S_-(z - l_2) - k_2^2] \times S_-(z - l_1)\} \quad (1)$$

Крайові умови:

$$\frac{\partial t}{\partial z} - k \cdot (t - t_{c1}) = 0 \quad \text{якщо } z=0$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad \text{якщо } z=l_3 \quad (2)$$

$$\text{де } k_1^2 = \frac{2 \cdot \alpha_1}{\lambda_1 \cdot R_1} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 \cdot R_1}{4 \cdot \lambda_1}\right)^{-1}, \quad k_2^2 = \frac{2 \cdot \alpha_2}{\lambda_2 \cdot R_2},$$

$$k_3^2 = \frac{2 \cdot \alpha_3}{\lambda_3 \cdot R_3} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_3 \cdot R_3}{4 \cdot \lambda_3}\right)^{-1}, \quad k = \frac{\alpha_0}{\lambda_1}.$$

$S_-(z)$ – асиметрична одинична функція, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалів частин стрижня 1, 2, 3; α_0 – коефіцієнт тепловіддачі з торця стрижня $z=0$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти тепловіддачі з поверхонь стрижня 1, 2, 3.

Розв'язок рівняння (1) записано у вигляді:

$$t(z) = A \cdot \operatorname{sh}(k_1 \cdot z) + \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=1_1} \cdot \varphi_1(z - 1_1) \cdot S_-(z - 1_1) + t|_{z=1_1} \times$$

$$\times f_1(z - 1_1) \cdot S_-(z - 1_1) + \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=1_2} \times \varphi_2(z - 1_2) \times$$

$$\times S_-(z - 1_2) + t|_{z=1_2} \cdot f_2(z - 1_2) S_-(z - 1_2) +$$

$$t_{c1} \left[1 - f_1(z - 1_1) \cdot S_-(z - 1_1) \right] - \frac{k_3^2 \cdot t_{c2} - k_2^2 \cdot t_{c1}}{k_2^2} \times$$

$$\times \left[f_1(z - 1_2) - \frac{k_2^2 - k_1^2}{k_1^2} \cdot f_2(z - 1_2) \right] \times$$

$$\times S_-(z - 1_2) - t_{c1} \cdot S_-(z - 1_2) \times$$

$$\times \left[\frac{k_3^2 - k_2^2}{k_2^2} \cdot \left\{ f_1(z - 1_2) - \frac{k_2^2 - k_1^2}{k_1^2} \cdot f_2(z - 1_2) \right\} - \right.$$

$$\left. - \frac{k_2^2 - k_1^2}{k_1^2} \cdot f_2(z - 1_2) - f_1(z - 1_2) \right] -$$

$$- \frac{k_3^2 \cdot t_{c2} - k_2^2 \cdot t_{c1}}{k_1^2} \cdot f_2(z - 1_2) \cdot S_-(z - 1_2)$$

$$\text{де } \varphi_1(x) = \frac{\operatorname{sh}(k_2 \cdot x)}{k_2} - \frac{\operatorname{sh}(k_1 \cdot x)}{k_1}$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\operatorname{sh}(k_3 \cdot x)}{k_3} - \frac{\operatorname{sh}(k_2 \cdot x)}{k_2}$$

$$f_1(x) = \operatorname{ch}(k_2 \cdot x) - \operatorname{ch}(k_1 \cdot x),$$

$$f_2(x) = \operatorname{ch}(k_3 \cdot x) - \operatorname{ch}(k_2 \cdot x),$$

$$f_3(x) = \operatorname{ch}(k_1 \cdot x - 1),$$

$$f_4(x) = \operatorname{ch}(k_3 \cdot x) - \operatorname{ch}(k_1 \cdot x)$$

Використавши крайові умови (2), знайдемо сталі інтегрування.

У результаті отримаємо, що похибка термоперетворювача, спричинена притоком тепла, становить:

$$\Delta t = t_{c1} \cdot \frac{1}{l_1} \cdot \int_0^{l_1} t(z) dz. \quad (4)$$

2. Результати й обговорення

Для досліджень прийнято такі значення величин:

$$l_1=0,004 \text{ м}; l_2=0,005 \text{ м}; l_3=0,008 \text{ м};$$

$$R_1=0,0025 \text{ м}; R_2=0,0019 \text{ м}; R_3=0,0075 \text{ м};$$

$$\alpha_0=1000 \text{ Вт/м}\cdot\text{м/К}; \alpha_1=8000 \text{ Вт/м}\cdot\text{м/К};$$

$$\alpha_2=1000 \text{ Вт/м}\cdot\text{м/К}; \alpha_3=0,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{м/К};$$

$$\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=420 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; t_{c1}=77 \text{ К}, t_{c2}=293 \text{ К}.$$

Для цих даних одержано розподіл температури по осі z у мідному корпусі для різних моментів часу за початкової температури 293 К. Якщо $\tau=10$ с на $z=0$, $t=77$ К. Якщо $z=1_1$, $t=122$ К; $z=1_2$, $t=143$ К; $z=1_3$, $t=144$ К. Із плином часу розподіл температури по товщині термоперетворювача вирівнюється і на момент часу $\tau=50$ с температура досягає значення $t=77$ К по всій довжині термоперетворювача.

Висновки

Отримані результати формують основу інженерного методу розрахунку метрологічних характеристик термоперетворювача, що експлуатується у складних умовах теплообміну. Зауважимо, що похибка термоперетворювача залежить від значень температур вимірюваного і навколишнього середовища, умов теплообміну, теплофізичних харак-

теристик матеріалу, з якого виготовлено корпус термоперетворювача, геометричних розмірів тощо.

Подяка

Автор висловлює вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірвальних технологій Національного університету “Львівська політехніка”, Україна, та її завідувачеві – доктору технічних наук, професорові Б. Стаднику за надану допомогу та всебічне сприяння у підготовці статті.

Список літератури

- [1] Yu. Bobalo, Z. Kolodiy, B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, “Development of Noise Measurements. Part 3. Passive Method of Electronic Elements Quality Characterization”, *Sensors & Transducers*, vol. 152, is. 5, p. 164–168, 2013.
- [2] S.Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, O.Basalkevych, “Research in Nanothermometry. Part 8. Summary”, *Sensors & Transducers*, vol. 144, is. 9, p. 1–15, 2012.
- [3] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Kozak, “Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry”, *Sensors & Transducers*, vol. 140, is. 5, p. 8–14, 2012.
- [4] S. Yatsyshyn, I. Mykytyn, B. Stadnyk, Z. Kolodiy, “Development of Noise Measurements. Part 5. Miniature Gas Sensors and their Performance”, *Sensors & Transducers*, vol. 154, is. 7, p. 223–226, 2013.

References

- [1] Yu. Bobalo, Z. Kolodiy, B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, “Development of Noise Measurements. Part 3. Passive Method of Electronic Elements Quality Characterization”, *Sensors & Transducers*, vol. 152, is. 5, p. 164–168, 2013.
- [2] S.Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, O.Basalkevych, “Research in Nanothermometry. Part 8. Summary”, *Sensors & Transducers*, vol. 144, is. 9, p. 1–15, 2012.
- [3] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Kozak, “Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry”, *Sensors & Transducers*, vol. 140, is. 5, p. 8–14, 2012.
- [4] S. Yatsyshyn, I. Mykytyn, B. Stadnyk, Z. Kolodiy, “Development of Noise Measurements. Part 5. Miniature Gas Sensors and their Performance”, *Sensors & Transducers*, vol. 154, is. 7, p. 223–226, 2013.