

мами. Так, ведуться розробки, пов'язані з вимірюванням акустичних шумів, спричинених внутрішніми напруженостями у матеріалі об'єкта.

1. Бабий Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Морск. гидрофизич. исслед. 1974. №2 (56). С 189-192. 2. Bowen T.S. US pat 1983 № 4385634. 3. Миргородский В.И., Пасечник В.И., Пешин С.В. и др. Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению // ДАН, 1987. Т.297. №6. С. 1370-1372. 4. Аносов А.А., Бограчев К.М. Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Акустический журнал. 1998. Т. 44. №6. С.725-730.

5. Аносов А.А. Восстановление двумерного распределения внутренней температуры модельного объекта методом пассивной термоакустической томографии // Акустический журнал. 1999. Т 45. № 1. С 20-24. 6. Аносов А.А., Исрефилов М.Г. Точность решения двумерной обратной задачи акустотермографии при некорреляционном приеме // Радиотехника. 1995. № 9. С 65-68. 7. Anosov A.A., Isrefilov M.G. Physical basis and perspectives of acoustothermography // Ultrasonics. 1996. Vol.34. P 511-512. 8. Буров В.А., Касаткина Е.Е. Статистические обратные задачи термоакустической томографии. // Акустический журнал. 1997. Т 43. № 2. С 162-169. 9. Дорожовець М.М. Математичні проблеми реконструкції образів у технічній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія. 1998. №53. С 3-17.

УДК 536.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У КОРПУСІ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Богдан Стадник, Ольга Лиса, Михайло Семерак, Валентин Виходець, 2000

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна  
Львівський державний аграрний університет, 79060, Львів-Дубляни, Україна

*Досліджується похибка поверхневих термометрів, зумовлена теплопритоканням.*

*Исследуется погрешность поверхностных термометров, вызванная теплопритоком.*

*The work is devoted to research of an error of superficial thermometers caused by inflow of heat.*

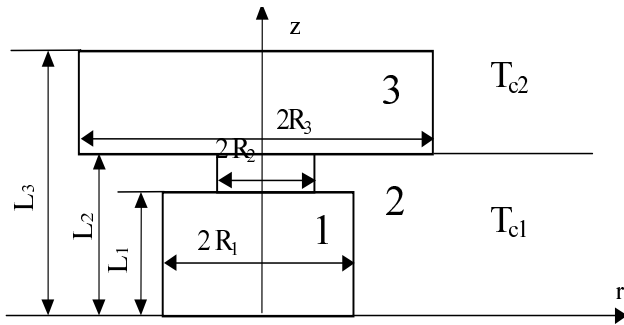
Підвищення точності вимірювання температури різних середовищ при багаторазових різких охолодженнях і відігрівках вимагає подальших аналітичних досліджень інструментальної похибки термометрів (ТП). У даній роботі запропоновано аналітичне дослідження складової інструментальної похибки термометрів, зумовленої притоканням тепла при вимірюванні низьких температур і відтіканням тепла при вимірюванні високих температур. Величина вказаної похибки залежить від конструктивного виконання ТП, інтенсивності теплообміну з вимірюваним середовищем і особливостей його контакту з зовнішнім середовищем.

Досліджено похибку, зумовлену теплопритоканням поверхневих термометрів, в яких спіральний навій чутливого елемента, виготовлений із платинової дротини діаметром 0.03 мм, розміщений в каналах керамічного плоского ізолятора. Канали каркаса з поміщеними в них спіралями чутливого елемента заповнюються спеціальним порошком, який захищає витки від закорочення і покращує тепловий

контакт між спіралями і каркасом. Плоский ізолятор прикріплюється до корпусу за допомогою органосилікатного клею ОС-51-03. Корпус термометрів для кріплення і суцільного прилягання до масивного об'єкта вимірювання має гвинт. Теплопередача між чутливим елементом та об'єктом вимірювання проходить через керамічний каркас, органосилікатний клей і корпус.

Для визначення і дослідження температурного поля термометрів у захисному корпусі змодельованого 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 ТП.

Під час вимірювання температур ТП знаходиться у двох середовищах: різьбове з'єднання і перехідний циліндричний стрижень знаходиться у вимірювальному-



Модель термоперетворювача

середовищі температури  $T_{c1}$ , корпус ТП в середовищі температури  $T_{c2}$ . З бокових поверхонь частин стрижня здійснюється теплообмін за законом Ньютона з 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 ступінчатому стрижні записано рівняння теплопровідності\*

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \left\{ t - [t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \cdot S_-(z - l_2)] \right\} \times \left\{ \kappa_1^2 + \left[ \kappa_2^2 + (\kappa_3^2 - \kappa_2^2) \cdot S_-(z - l_2) - \kappa_1^2 \right] \times \right. \\ \left. \times S_-(z - l_1) \right\} \quad (1)$$

Крайові умови:

$$\frac{\partial t}{\partial z} - \kappa \cdot (t - t_{c1}) = 0 \quad \text{при } z=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z=l_3$$

$$\text{де } \kappa_1^2 = \frac{2 \cdot \alpha_1}{\lambda_1 \cdot R_1} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 \cdot R_1}{4 \cdot \lambda_1}\right)^{-1} \quad \kappa_2^2 = \frac{2 \cdot \alpha_2}{\lambda_2 \cdot R_2}$$

$$\kappa_3^2 = \frac{2 \cdot \alpha_1}{\lambda_3 \cdot R_3} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_3 \cdot R_3}{4 \cdot \lambda_3}\right)^{-1} \quad \kappa = \frac{\alpha_0}{\lambda_1}$$

$S_-(\zeta)$  – асиметрична одинична функція,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів частин стрижня 1, 2, 3;  $\alpha_0$  – 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:

$$t(z) = A \cdot \text{sh}(\kappa_j \cdot z) + B \cdot \text{ch}(\kappa_j \cdot z) + \\ + \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l_j} \cdot \varphi_j(z - l_j) \cdot S_-(z - l_j) + t \Big|_{z=l_j} \times$$

$$\times f_l(z - l_j) \cdot S_-(z - l_j) + \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l_2} \times \varphi_2(z - l_2) \times \\ \times S_-(z - l_2) + t \Big|_{z=l_2} \cdot f_2(z - l_2) \times \\ \times S_-(z - l_2) + t_{c1} \times \\ \times [1 - f_l(z - l_j) \cdot S_-(z - l_j)] - \frac{\kappa_3^2 \cdot t_{c2} - \kappa_2^2 \cdot t_{c1}}{\kappa_2^2} \times \\ \times \left[ f_l(z - l_2) - \frac{\kappa_2^2 - \kappa_l^2}{\kappa_l^2} \cdot f_3(z - l_2) \right] \times \\ \times S_-(z - l_2) - t_{c2} \cdot S_-(z - l_2) \times \\ \times \left[ \frac{\kappa_3^2 - \kappa_2^2}{\kappa_2^2} \cdot \left\{ f_l(z - l_2) - \frac{\kappa_2^2 - \kappa_l^2}{\kappa_l^2} \cdot f_3(z - l_2) \right\} - \right. \\ \left. - \frac{\kappa_2^2 - \kappa_l^2}{\kappa_3^2 - \kappa_l^2} \cdot f_4(z - l_2) - f_l(z - l_1) \right] - \\ - \frac{\kappa_3^2 \cdot t_{c2} - \kappa_2^2 \cdot t_{c1}}{\kappa_l^2} \cdot f_3(z - l_2) \cdot S_-(z - l_2) \quad (3)$$

$$\text{де } \varphi_1(x) = \frac{\text{sh}(\kappa_2 \cdot x)}{\kappa_2} - \frac{\text{sh}(\kappa_1 \cdot x)}{\kappa_1},$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\text{sh}(\kappa_3 \cdot x)}{\kappa_3} - \frac{\text{sh}(\kappa_2 \cdot x)}{\kappa_2}$$

$$f_1(x) = \text{ch}(\kappa_2 \cdot x) - \text{ch}(\kappa_1 \cdot x)$$

$$f_2(x) = \text{ch}(\kappa_3 \cdot x) - \text{ch}(\kappa_2 \cdot x)$$

$$f_3(x) = \text{ch}(\kappa_1 \cdot x - 1) \quad f_4(x) = \text{ch}(\kappa_3 \cdot x) - \text{ch}(\kappa_1 \cdot x)$$

Використавши крайові умови (2), знайдемо сталі інтегрування.

Похибка термоперетворювача зумовлена теплопритоком

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

Із аналізу виразу (3) видно, що значення похибки термоперетворювача залежить від значення температур вимірювального середовища і довкілля, умов теплообміну, теплофізичних характеристик матеріалу, з якого виготовлено корпус ТП, геометричних розмірів ТП.

Для досліджень були прийняті такі значення величин:

$$l_1=0.004\text{м}; \quad l_2=0.005\text{м}; \quad l_3=0.008\text{м};$$

$$R_1=0.0025\text{м}; \quad R_2=0.0019\text{м}; \quad R_3=0.0075\text{м};$$

$$\alpha_0=1000 \text{Вт/м}^2\text{м/К};$$

$$\alpha_1=8000 \text{Вт/м}^2\text{м/К}; \quad \alpha_2=1000 \text{Вт/м}^2\text{м/К};$$

$$\alpha_3=0.1 \text{Вт/м}^2\text{м/К};$$

\* Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.

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

Для цих даних одержано розподіл температури по осі  $z$  у мідному корпусі для різних моментів часу при початковій температурі 293К. При  $\tau=10$  с на поверхні  $z=0$   $t=77$  К. При  $z=l_1$   $t=122$  К;  $z=l_2$   $t=143$  К;  $z=l_3$   $t=144$  К. З бігом часу відбувається подальше вирівнювання

температури по товщині ТП і на момент часу  $\tau=50$  с  $t=77$  К по всій довжині термоперетворювача.

Одержані результати являють собою основу інженерних методів розрахунку метрологічних характеристик ТП, які експлуатуються у складних умовах теплообміну.

УДК 536.53

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШУМОВОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

© Ігор Микитин, Богдан Стадник, Михайло Дорожовець, 2000

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Виведено функцію перетворення шумового термометра з використанням математичного апарату статистичного аналізу.*

*Выведена функция преобразования шумового термометра с использованием математического аппарата статистического анализа.*

*The noise thermometer transient function is found by the stochastic processes theory mathematic equations using.*

В основі шумової термометрії лежить виведена Х.Найквістом залежність середнього квадрата шумової напруги на електрично ненавантаженому опорі від температури [1], частотного діапазону та значення опору, отримана методом статистичної термодинаміки і поза залежністю від конкретних фізико-хімічних властивостей резистора

$$\begin{aligned} \overline{e_{\text{tef}}^2(t)} &= 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R, \\ S_{\text{tef}}(f) &= 4 \cdot k \cdot T \cdot R, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\overline{e_{\text{tef}}^2(t)}$  – середній квадрат шумового сигналу (усереднення за часом);  $S_{\text{tef}}(f)$  – спектральна густина потужності шумового сигналу;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – термодинамічна температура;  $R$  – активний опір.

Оскільки тепловий шум є ергодичний випадковий процес, то усереднення за часом (на достатньо великому проміжку спостереження) дорівнює усередненню за множиною спостережень. Тоді (1) можна записати

$$\begin{aligned} \overline{e_{\text{tef}}^2(t)} &= \frac{1}{T} \int_0^T e_{\text{tef}}^2(t) dt = M[e_{\text{tef}}^2(t)] = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{tef}}(f) df = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $M[e_{\text{tef}}^2(t)]$  – усереднення за множиною спостережень.

Корисний сигнал можна описувати лише інтегральними характеристиками, оскільки миттєві значення випадкового процесу невідомі. Однією з таких характеристик є спектральна густина потужності, якою також описують шумові параметри активних елементів. Тому доцільно визначити вихідний сигнал шумового термометра як функцію спектральних густин потужності корисного та неінформативних шумових сигналів. На структурній схемі шумового термометра (рис.1.) сигнали  $e_0(t)$ ,  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  статистично незалежні між собою.  $e_0(t)$  – корисний шумовий сигнал, який одночасно подається на два входи кореляційного підсилювача [2],  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  – неінформативні шумові сигнали, які прикладені окремо до кожного каналу.

Позначимо  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  імпульсні передавальні характеристики двох каналів кореляційного підсилювача 1, 2;  $h_4(t)$  – імпульсна передавальна характеристика пристрою усереднення 4,  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  – сигнали на вході перемножувача;  $y(t)$  – сигнал на виході перемножувача,  $z(t)$  – сигнал на виході пристрою усереднення.

Миттєве значення напруги на виході пристрою усереднення запишеться