УДК 621.3.088

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТОКА НА ПОГРЕШНОСТЬ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

НЕЖЕВЕНКО Е.В.

Рассматривается вопрос об определении погрешности измерения температуры металлокерамическим измерительным преобразователем вследствие действия измерительного тока на нагрев резистивного элемента.

В работе [1] впервые была предложена новая конструкция резистивного термопреобразователя на основе технологии пластифицированной металлизированной керамики. Принцип действия металлокерамического измерительного преобразователя температуры (МИПТ) основан на зависимости сопротивления его резистивного элемента от температуры. Среди различного рода погрешностей, характеризующих термопреобразователи сопротивления и в частности МИПТ, основную роль играют методические погрешности, которые возникают из-за неточности выполнения принципа (метода) измерений, недостаточной изученности процессов теплообмена между исследуемым объектом и чувствительным элементом МИПТ. Одной из составляющих методической погрешности МИПТ является его нагрев измерительным током.

В практике измерений температуры с помощью резистивных элементов принято, что величина нагрева преобразователя измерительным током к диапазону измерения вторичного прибора должна быть заданной [2,3]. Уменьшение значения этого отношения удорожает схему, так как необходимо применять более высокочувствительный выходной прибор — усилитель, вследствие чего схема становится менее надежной и более восприимчивой к внешним воздействиям. Особенно это относится к низкоомным МИПТ.

Задачу вычисления погрешности МИПТ от действия измерительного тока можно свести к определению функционала отклонения собственной температуры МИПТ Т от температуры исследуемой среды $T_з$:

$$\Re\left(T, T_з\right) \le T_{доп}, \qquad (1)$$

где $T_{доп}$ — допустимое значение погрешности от нагрева МИПТ измерительным током.

В качестве функционала невязки было взято среднеквадратичное превышение температуры резистивного элемента, который в данном случае рассматривается как тепловыделяющий элемент:

$$\Re\left(T, T_з\right) = \left[\int\limits_{\Omega}\left(T - T_з\right)^2 dxdy\right]^{1/2}, \qquad (2)$$

здесь Ω — двумерная область пластины МИПТ.

В качестве $\Re\left(T, T_з\right)$ можно взять также максимальное отклонение температуры или любую другую норму разности двух функций [4].

Минимизировать функционал $\Re\left(T, T_з\right)$, обеспечив минимальную погрешность от действия измерительного тока, можно путем идентификации удельной мощности внутренних источников теплоты МИПТ $q_v(x,y)$. Температурное поле в МИПТ описывается стационарным уравнением теплопроводности с граничными условиями третьего рода [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + q_v(T) = c_v \rho \frac{\partial T}{\partial \tau}; \qquad (3)$$

$$-\lambda(x, T)\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{общ}(T)(T - T_c(\tau));$$

$$\alpha_{общ} = \alpha_к + \alpha_{луч},$$

где $T(\tau)$ — температура МИПТ; $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности МИПТ; q_v — плотность внутренних источников теплоты; c_v, ρ — удельная теплоёмкость и плотность МИПТ, соответственно; α_K, $\alpha_{луч}$ —конвективная и лучистая составляющие коэффициента теплоотдачи; x, y — пространственные координаты.

Оценка погрешности МИПТ вследствие влияния величины измерительного тока на нагрев преобразователя производится с помощью аппарата спектральных функций влияния [5] и заключается в следующем. Неизвестная функция отыскивается в виде

$$q_v(x, y) = \sum_{i=1}^{n} c_i \varphi_i(x, y), \qquad (4)$$

здесь $\varphi_i(x, y)$ представляют собой систему базисных функций и являются спектральными составляющими внутренних воздействий; c_i —параметр внутренних воздействий; n — число спектральных составляющих. В качестве таковых могут быть выбраны различные аппроксимирующие функции, например кусочно-постоянные, кусочно-линейные, полиномы, сплайны и др.

Разделим поверхность прямоугольной пластины МИПТ на подобласти, в каждой из которых резистивный элемент располагается регулярным образом (т.е. $q_v(x, y) = c_i = const$ в пределах одной подобласти H_i), а в качестве спектральной составляющей выбираем единичную функцию

$$\varphi_i = \begin{cases} 1, (x, y) \in H_i; \\ 0, (x, y) \notin H_i. \end{cases} \qquad (5)$$

При этом число спектральных составляющих равно числу зон разбиения. Поиск наилучшего приближения в рамках выбранного класса функций заключается в определении числа спектральных составляющих (т.е. количества зон) путем его последовательного увеличения, при котором экстремальное значение минимизируемого функционала будет удовлетворять критерию (1).

Функция влияния $W_i(x,y)$ от действия источника теплоты $\varphi_i(x,y)$, имеющего объемную плотность, равную единице, определяется из решения задачи теплопроводности:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} = -\varphi_i(x,y)\,; \qquad (6)$$

$$\lambda_n \frac{\partial W_i}{\partial n} + \alpha W_i = 0\,. \qquad (7)$$

Если для подобластей H_i, $i=1,\ldots,n$ вычислить n функций влияния $W_i(x,y)$, то тогда, согласно принципу суперпозиции, температуру в любой точке пластины можно представить в виде

$$T(x,y) = \sum_{i=1}^{n} c_i W_i(x,y) + T_в(x,y)\,, \qquad (8)$$

где $T_в(x,y)$ – реакция на граничные воздействия, определяемая из решения задачи теплопроводности:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T_в}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T_в}{\partial y^2} = 0\,, \qquad (9)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_в}{\partial n} + \alpha\left(T_в - T_{cp}\right) = 0\,. \qquad (10)$$

Решение задачи теплопроводности осуществляем методом конечных разностей и находим его в M узлах конечно-разностной сетки. При решении обратной задачи известна температура в каждом узле сетки $T_з(x_j, y_j)$, $(j=1,\ldots,M)$. Для того чтобы определить коэффициенты c_i, $(i=1,\ldots,n)$, необходимо температуру $T(x_j,y_j)$ в уравнении (8) принять равной $Tз(x_j,y_j)$ для каждого узла сетки, что дает следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} c_1W_1(x_1,y_1)+c_2W_2(x_1,y_1)+\ldots+c_nW_n(x_1,y_1) = \\ = T_з(x_1,y_1) - T_в(x_1,y_1)\,, \\ c_1W_1(x_2,y_2)+c_2W_2(x_2,y_2)+\ldots+c_nW_n(x_2,y_2) = \\ = T_з(x_2,y_2) - T_в(x_2,y_2)\,, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ c_1W_1(x_M,y_M)+c_2W_2(x_M,y_M)+\ldots+c_nW_n(x_M,y_M) = \\ = T_з(x_M,y_M) - T_в(x_M,y_M) \end{cases} \qquad (11)$$

или в векторном виде

$$\mathbf{W}\vec{\mathbf{c}} = \Delta\vec{\mathbf{T}}\,, \qquad (12)$$

где W – матрица функций влияния; $\vec{\mathbf{c}}$ – вектор параметров внутренних воздействий; $\Delta\vec{T}$ – вектор разности температур.

Для достаточно подробной разностной сетки количество уравнений M больше числа неизвестных параметров n. Поэтому система (11) является переопределенной и ее необходимо решать с помощью метода наименьших квадратов, преобразовав к системе линейных уравнений с симметричной матрицей

$$\mathbf{W}^T\mathbf{W}\vec{\mathbf{c}} = \mathbf{W}^T\Delta\vec{\mathbf{T}}\,, \qquad (13)$$

где T – символ транспонирования.

Подстановка решения системы (13) в (4) дает искомое распределение объемной плотности мощности источников теплоты $q_v(x,y)$. Заметим также, что формула (8) при известных c_i позволяет проверить критерий (1), не прибегая к решению прямой задачи теплопроводности с полученным распределением удельной мощности внутренних источников теплоты $q_v(x,y)$.

Таким образом, результаты решения можно считать удовлетворительными, если выполняется условие (1), т.е. отклонение расчетной температуры не превышает $DT_{доп}$, определяющее погрешность от нагрева МИПТ измерительным током. При невыполнении условия (1) необходимо увеличить число подобластей разбиения и повторить вычисления.

Литература: 1. *Мацевитый ЮМ., Нежевенко Е.В., Овчаренко В.Е., Цаканян О.С.*Металлокерамические измерительные преобразователи температуры. Физические и математические модели // Технология приборостроения.1998. №2.С.33-36. 2.*Самсонов Г.В., Киц А.И.* Датчики для измерения температур в промышленности. Киев: Наук. думка, 1972. 224 с. 3. *Лах В.И., Стадник Б.И., Кюздени О.А.* Приборы для измерения температур контактным методом: обзорная информация. М., 1969. 232 с. 4. *Эльстольц Л.Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969. 268 с. 5. *Мацевитый Ю.М., Слесаренко А.П., Цаканян О.С.* Идентификация граничных тепловых воздействий с помощью спектральных функций // Инж. - физ. журнал. 1987. Т.53, №3. С.480-486.

Поступила в редколлегию 15.12.99

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Овчаренко В.Е.

Нежевенко Елена Витальевна, инженер кафедры ТАПР ХТУРЭ. Научные интересы: тепловые процессы в электронной технике. Адрес: Украина, 61118, Харьков, ул. Познанская, 7, кв.161.