

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТИПИЧНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Бычкова А.А., Абрамова А.В.

Научный руководитель: Атрошенко Ю.К., ассистент

Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: b_alena_93@mail.ru

NUMERICAL RESEARCH OF INTEGRATED CHARACTERISTICS OF PROCESS OF HEATING OF THE SENSITIVE ELEMENT OF TYPICAL RESISTANCE THERMOCONVERTERS

Bychkova A.A., Abramova A.V.

Scientific Supervisor: Assistant prof. ATP ENIN Atroshenko Yu.K.

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: b_alena_93@mail.ru

Numerical research of integrated characteristics of process of heating of the sensitive elements of resistance thermoconverters like types Pt, Cu and Ni was executed. The theoretical dependences of sufficient duration of heating of RTD on the taken temperature were received. It is shown that platinum RTD require less time of heating for obtaining satisfactory accuracy of measurements.

Температура является одним из наиболее часто измеряемых параметров технологических процессов в промышленности. В большинстве систем управления и контроля для измерения температуры используются преобразователи температуры – термоэлектрические преобразователи (ТЭП) и термометры сопротивления (ТПС). Часто температура является не только показателем качества протекания технологического процесса, но и критерием безопасности. Поэтому достоверность измерения температуры является важнейшей характеристикой датчиков температуры [1–4].

На погрешность измерения температуры контактными средствами измерения оказывает влияние ряд факторов, в том числе, длительность выполнения измерений. Оценить требуемую длительность выполнения измерения для различных типов преобразователей температуры возможно с помощью прогностической модели [2,3].

Целью настоящей работы является разработка прогностической модели термопреобразователя сопротивления для определения интегральных характеристик (длительность нагревания, температурное поле) процесса теплопереноса в чувствительном элементе ТПС.

Область решения задачи представляет неоднородную систему, состоящую из металлического чувствительного элемента (медь, платина или никель), порошка окиси алюминия и защитного чехла (рис. 1).

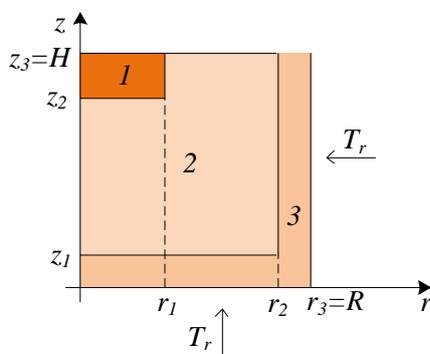


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – чувствительный элемент; 2 – порошок Al_2O_3 ; 3 – защитный чехол.

Нестационарный процесс переноса тепла описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности для каждого слоя (1) – (3) и соответствующими граничными условиями:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right); \quad 0 < r < r_1, \quad z_2 < z < H; \quad (1)$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right); \quad 0 < r < r_2, \quad z_1 < z < z_2, \quad r_1 < r < r_2, \quad z_2 < z < H; \quad (2)$$

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right); \quad 0 < r < r_3, \quad 0 < z < z_1, \quad r_2 < r < r_3, \quad z_1 < z < H. \quad (3)$$

где ρ – плотность, м³/ч; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); индексы: 1 – чувствительный элемент ТПС, 2 – порошок окиси алюминия, 3 – защитный чехол.

Граничные условия для границы «Чувствительный элемент – порошок Al₂O₃» ($r=r_1, z=z_2$):

$$\begin{aligned} T_1(r_1, z) = T_2(r_1, z) & \qquad T_1(r, z_2) = T_2(r, z_2) \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} & \qquad (z_2 < z < H); \qquad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_2} \qquad (0 < r < r_1); \end{aligned}$$

«Порошок Al₂O₃ – защитный чехол» ($r=r_2, z=z_1$):

$$\begin{aligned} T_2(r_2, z) = T_3(r_2, z) & \qquad T_2(r, z_1) = T_3(r, z_1) \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2} & \qquad (z_1 < z < H); \qquad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z_1} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=z_1} \qquad (0 < r < r_2). \end{aligned}$$

Начальные и краевые условия: $t = 0; T = T_0$;

$$r = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad r = R; \quad T = T_r;$$

$$z = 0; \quad T = T_r; \quad z = H; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

Математическое моделирование выполнено с учетом теплофизических характеристик [5,6]: чувствительный элемент ТПС (тип Pt): $\lambda_1=70$ Вт/(м·К); $C_1=134$ Дж/(кг·К); $\rho_1=21500$ кг/м³; чувствительный элемент ТПС (тип Cu): $\lambda_1=390$ Вт/(м·К); $C_1=385$ Дж/(кг·К); $\rho_1=8890$ кг/м³; чувствительный элемент ТПС (тип Ni): $\lambda_1=92$ Вт/(м·К); $C_1=500$ Дж/(кг·К); $\rho_1=8900$ кг/м³; порошок Al₂O₃: $\lambda_2=6,57$ Вт/(м·К); $C_2=850$ Дж/(кг·К); $\rho_2=1520$ кг/м³; металлический чехол: $\lambda_3=47$ Вт/(м·К); $C_3=460$ Дж/(кг·К); $\rho_3=7800$ кг/м³.

Решение задачи выполнено методом конечных разностей на основе четырехточечной неявной разностной схемы. Область решения задачи представляет сетку 200×200 узлов с шагами $2,5 \cdot 10^{-2}$ мм по осевой и радиальной координатам, шаг по времени $t = 0,001$ с [7].

В качестве показателя окончания процесса нагревания выбран момент достижения чувствительным элементом температуры, отличной от температуры на границе области решения на величину, не превышающую допускаемую погрешность измерения. Для платиновых ТПС предел допусаемого отклонения от НСХ составляет ($\pm (0,6+0,008 \cdot |T_r - 273|)$) К (класс допуска С); для медных ТПС – ($\pm (0,5+0,0065 \cdot |T_r - 273|)$) К (класс допуска В); для никелевых – ($\pm (0,3+0,008 \cdot |T_r - 273|)$) К (класс допуска С) [8].

Полученные зависимости для длительности нагревания ТПС до температуры в диапазоне от 325 К до 475 К показаны на рис. 2, а.

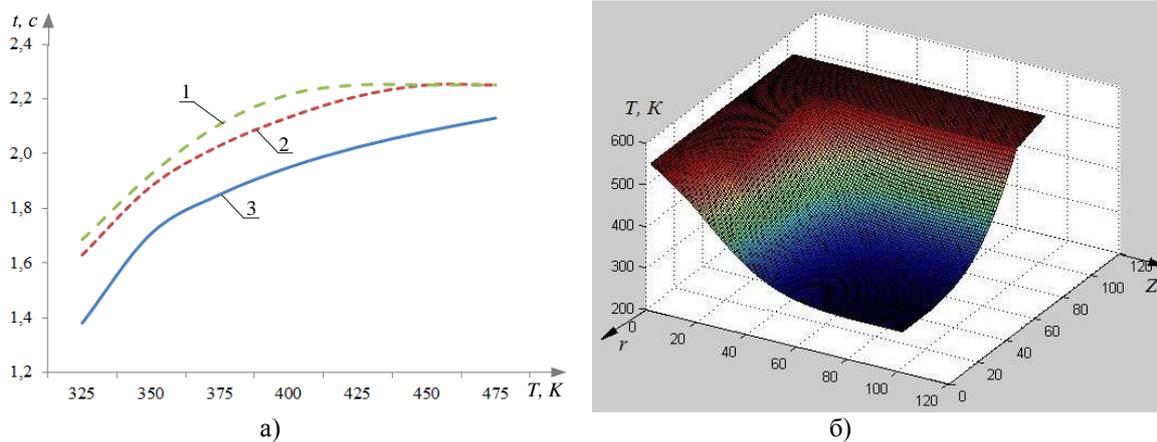


Рис. 2. Результаты численного исследования: а – зависимость достаточного времени нагрева чувствительного элемента ТПС от измеряемой температуры; б – Распределение температуры в чувствительном элементе ТПС (НСХ 100Pt); 1 – ТПС типа Ni; 2 – ТПС типа Cu; 3 – ТПС типа Pt

Из рис. 2, а видно, что зависимость между временем нагрева для исследуемых термометров сопротивления носит нелинейный характер и стремится к постоянному значению в области температур, которым соответствует непостоянное значение допускового отклонения от номинальной статической характеристики. Для платиновых ТПС требуется меньшее время нагрева, чем для медных и никелевых термометров.

На рис. 2,б показано распределение температуры в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя типа 100Pt при нагреве до температуры 600 К после окончания процесса нагрева. Видно, что в первоначальный момент времени происходит интенсивное нагревание защитного чехла за счет поддержания постоянной температуры на границах $z = 0$ и $r = R$ (рис. 1).

В работе дано описание модели термопреобразователей сопротивления, позволяющей выполнять прогностическую оценку длительности нагрева ТПС для получения требуемых погрешностей. Получены теоретические зависимости длительности нагрева ТПС от измеряемой температуры.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» №13.1339.2014/К (шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. By Cao, Tao-Feng Modeling the temperature distribution and performance of a PEM fuel cell with thermal contact resistance. International Journal of Heat and Mass Transfer, **87**, 2015. – pp. 544–556.
2. Атрошенко Ю.К., Озерова И.П., Стрижак П.А. Влияние теплового контакта на результаты измерений поверхностных термоэлектрических преобразователей. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 1 (214), 2015. – С. 97–105;
3. Атрошенко Ю.К. Численное исследование интегральных характеристик теплопереноса в типичных термоэлектрических преобразователях. – СТТ-2014: сборник трудов конференции в 3 т. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 3 – С. 127–128;
4. Hayes A. RTDs vs. Thermocouples. – Flow Control, vol. 20, Is. 8, 2014. – pp.34–36;
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочное руководство. – М.: Государственно издательство физико-математической литературы, 1959. – 357 с.
6. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 532 с.
8. ГОСТ 6651–2009 Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний, М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОР», 2009. – 31 с.