УДК 681.515.001

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

А. Б. Бекбаев, А. М. Карбозова, В. П. Шерышев
Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева
ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050013, Казахстан. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с определением температуры площадки касания электрического контакта методами математического моделирования путём решения прямой задачи теплопроводности. Исходная смешанная краевая задача теплопроводности методом термически тонкого слоя сведена к задаче Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, имеющей достаточно простое аналитическое решение. Методами случайного поиска и наименьших квадратов найдены значения двух поправочных коэффициентов. Это позволило свести абсолютную погрешность определения температуры площадки касания к четырём градусам. Полученное выражение положено в основу построения интеллектуального датчика температуры недоступной поверхности.

Ключевые слова: контроль, тепловое состояние, электрический контакт.

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТАКТУ

А. Б. Бекбаєв, А. М. Карбозова, В. П. Шеришев
Казахський національний технічний університет імені К.І. Сатпаєва
вул. Сатпаєва, 22, м. Алмати, 050013, Казахстан. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

Розглянуто питання, пов'язані з визначенням температури площадки торкання електричного контакту методами математичного моделювання шляхом вирішення прямої задачі теплопровідності. Вихідну змішану крайову задачу теплопровідності методом термічно тонкого шару зведено до задачі Коші для звичайного диференціального рівняння першого порядку, що має досить просте аналітичне рішення. Методами випадкового пошуку й найменших квадратів знайдено значення двох поправочних коефіцієнтів. Це дозволило звести абсолютну похибку визначення температури площадки торкання до чотирьох градусів. Отриману формулу покладено в основу побудови інтелектуального датчика температури недоступної поверхні.

Ключові слова: контроль, тепловий стан, електричний контакт.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последнее время подходы к методам диагностики технического состояния электрических контактов претерпели существенное изменение. Наряду с традиционными методами диагностики, всё более широкое применение находят современные высокоэффективные способы контроля, обеспечивающие выявление дефектов контактных систем электрооборудования в начальной стадии их возникновения. К числу таких методов относится температурный контроль.

Однако прямое измерение температуры площадки касания электрического контакта часто оказывается недоступным. В этих случаях для интеллектуальных датчиков (ИД), имеющих в своём составе микроконтроллеры с программами пересчёта температур доступных поверхностей в температуры недоступных поверхностей (ТНП), отсутствует приемлемая альтернатива.

При длительном прохождении номинальных токов через электрический контакт максимальные температуры нагрева контактных соединений не должны превышать установленных значений. Под температурой контакта понимают температуру наиболее нагретого места в контактном узле (температуру площадки касания).

Площадка касания и непосредственно прилегающие к ней области обладают наибольшей температурой нагрева. В реальных конструкциях контактных систем площадка касания, как правило, недоступна для прямого измерения температуры. В дальнейшем температуру площадки касания будем именовать температурой недоступной поверхности (ТНП). Её значения могут быть определены только с помощью математического моделирования.

Для температурного контроля с использованием методов математического моделирования ТНП обычно поступают следующим образом: 1) измеряют температуру на некотором расстоянии от контролируемой поверхности; 2) вычисляют плотность теплового потока, проходящего через эту поверхность; 3) восстанавливают температуру контролируемой поверхности с помощью решения граничной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ), т.е. решается задача идентификации.

Поскольку ОЗТ относятся к классу некорректно поставленных задач математической физики [1], такой подход к решению задачи контроля температуры требует разработки сложных специализированных алгоритмов [2]. С другой стороны, если рассматриваемый процесс допускает достаточно точную оценку плотности теплового потока, проходящего через контролируемую поверхность, то температура контролируемой поверхности может быть определена путем решения прямой задачи теплопроводности (ПЗТ).

В этом случае необходимо отступить на некоторое расстояние вглубь материала от недоступной поверхности и измерить температуру. Таким образом, получаем смешанную краевую задачу теплопроводности: на недоступной поверхности задаётся тепловой поток, а на доступной – измеренная температура. ПЗТ, в отличие от ОЗТ, являются корректно поставленными задачами. Их решение устойчиво по отношению к случайным ошибкам измерения температуры, выбранной исследователем в качестве доступной для прямого измерения поверхности. Такой метод использовался в [3] для определения температуры поверхности полупроводниковой пластины, взаимодействующей с потоком низкотемпературной плазмы. Однако полученное в [3] решение является сложным для практической реализации в реальном масштабе времени.

Целью настоящей работы является рассмотрение подхода к определению температуры недоступной поверхности, основанного на применении метода термически тонкого слоя [4]. Задача определения ТНП сводится к задаче Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка [5], выводится и уточняется приближённая формула для определения ТНП.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Поскольку оба контактных элемента, как правило, выполняются из одного и того же или близких по теплофизическим характеристикам материалов, то, в силу симметрии температурного поля относительно плоскости касания, ограничимся рассмотрением тепловых процессов только в одном из элементов контактной пары (рис. 1).

Электрический ток, протекающий по цепи, нагревает контактные элементы. Плотность потока теплоты, выделяющейся на контактной поверхности $\bar q_1(t)$, может быть вычислена по выражению вида:

$$\bar q_1(t) = \frac{U(t)I(t)}{2S}, \tag{1}$$

где $U(t)$ – падение напряжения на контакте; $I(t)$ – сила тока; S – площадь контактной площадки.

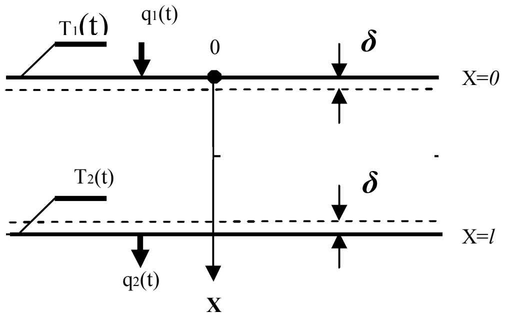

Рисунок 1 – Схема теплового процесса в одном элементе контактной системы

Поверхность $x = l$, расположенная на достаточно малом расстоянии l от контактной поверхности $x = 0$, доступна для прямого измерения температуры. В этом случае тепловой поток можно считать одномерным и направленным вдоль оси OX. При известной плотности теплового потока $\bar q_1(t)$ на поверхности $x = 0$ и заданной измеренной температуре $\hat{\bar T}_2(t)$ поверхности $x = l$ ПЗТ применительно к определению ТНП $\bar T_1(t)$ формулируется следующим образом:

$$c\frac{\partial \bar T}{\partial \bar t} = \frac{\partial}{\partial \bar x}\left(\lambda\frac{\partial \bar T}{\partial \bar x}\right),\ 0<\bar x<l,\ \bar t>0\ ; \tag{2}$$

$$-\lambda\frac{\partial \bar T}{\partial \bar x} = \bar q_1(\bar t),\ \bar x = 0,\ \bar t>0; \tag{3}$$

$$\bar T = \hat{\bar T}_2(t),\ \bar x = l,\ \bar t>0\ ; \tag{4}$$

$$\bar T(\bar x, 0) = \bar T_0,\ 0\le \bar x\le l,\ \bar t = 0, \tag{5}$$

где $\hat{\bar T}_0$ – начальная температура контактной системы. Второму граничному условию (4) (граничное условие первого рода) может быть поставлено в соответствие эквивалентное граничное условие второго рода:

$$-\lambda\frac{\partial \bar T}{\partial \bar x} = \bar q_2(t),\ \bar x = l,\ \bar t>0\ , \tag{6}$$

где $\bar q_2(t)$ – плотность теплового потока, проходящего через поверхность $x = l$.

В соответствии с методом термически тонкого слоя [6], в области определения решения введём приграничные термически тонкие слои δ (рис. 2) и поставленную задачу будем решать в безразмерных переменных:

$$x=\frac{\bar x}{l};\ t=\frac{\lambda\bar t}{cl^2};\ T(x,t)=\left[\bar T(\bar x,\bar t)-\bar T_0\right]/\left[\bar q_1 l/\lambda\right], \tag{7}$$

где l – расстояние от контактной поверхности до поверхности термометрирования (*м*); λ – теплопроводность материала элемента контакта (*Вт/(м·К)*); c – удельная теплоемкость материала (*Дж/(кг·К)*); $\bar q_1(t)$ – заданная на контролируемой контактной поверхности плотность теплового потока (*Вт/м²*); x – безразмерная координата; t – безразмерное время; T – безразмерная температура (тильдой обозначены соответствующие размерные величины: координата (*м*); время (*с*); температура ($^\circ C$); $\bar T_0$ – начальная температура контактной системы ($^\circ C$)).

Обозначения (7) позволяют перейти от размерной постановки ПЗТ к безразмерному аналогу. Безразмерная температура трехслойной пластины $T(x, t)$ (рис. 1) является решением следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},\ 0<\mathrm{x}<\mathrm{l},\ \mathrm{t}>0\ ; \tag{8}$$

$$-\frac{\partial T}{\partial x} = 1;\ \mathrm{x}=0,\ \mathrm{t}>0\ ; \tag{9}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta+0} = \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta-0};\ \left.T\right|_{x=\delta+0} = \left.T\right|_{x=\delta-0},\ t>0; \tag{10}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=l-\delta-0} = \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=l-\delta+0};\ \left.T\right|_{x=l-\delta-0} = \left.T\right|_{x=l-\delta+0};\ t>0; \tag{11}$$

$$-\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\overline{q}_2\left(t\right)}{\overline{q}_1\left(t\right)}=q_2\left(t\right);\mathrm{x}=1,\mathrm{t}>0\,; \qquad (12)$$

$$T(x,0)=0\,,0\le x\le 1,\;\;t=0\,. \qquad (13)$$

Интегрируя уравнение (8) в пределах соответствующих толщин слоев с учётом граничных условий (9), (12) и условий сопряжения (10), (11), получаем:

$$\delta\frac{\partial T_1}{\partial t}-1=\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta}\;; \qquad (14)$$

$$\delta\frac{\partial T_2}{\partial t}+q_2(t)=\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=l-\delta}\;; \qquad (15)$$

$$\frac{1}{2}(1-2\delta)\left(\frac{\partial T_1}{\partial t}+\frac{\partial T_2}{\partial t}\right)=\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=l-\delta}-\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=\delta}. \qquad (16)$$

С помощью уравнений (14)–(16) осуществляем переход от краевой задачи теплопроводности (8)–(13) к задаче Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка относительно средней температуры $\theta=\dfrac{T_1+T_2}{2}$:

$$0,25\frac{d\theta}{dt}+\theta=0,5+T_2\left(t\right);\;\theta\left(0\right)=0\,, \qquad (17)$$

где $T_2\left(t\right)$ – безразмерная измеренная температура доступной для измерения температуры поверхности.

На выходе аналого-цифрового преобразователя измеренная температура $T_2\left(t\right)$, а вместе с ней и правая часть уравнения (17) представляют собой ступенчатую функцию времени. Поэтому на каждом шаге постоянства правой части решение задачи (17) имеет следующий вид:

$$T_1\left(t^{(k)}\right)=\left[0,5+T_2\left(t^{(k)}\right)\right]\times\left[1-e^{-\frac{t^{(k)}}{0,25}}\right], \qquad (18)$$

где $t^{(k)}$ – отсчёты времени, $k=1,2,3,...,n$.

Для уточнения приближённой формулы (18) рассмотрим модельную задачу, рассмотренную в [7], имеющую аналитическое решение $T_{\breve{o}\times}\left(t^{(k)}\right)$, и введём поправочные коэффициенты k_1 и k_2:

$$T_1\left(t^{(k)}\right)=k_1\left\{2\left[0,5+T_2\left(t^{(k)}\right)\right]\left[1-e^{-k_2\frac{t^{(k)}}{0,25}}\right]-T_2\left(t^{(k)}\right)\right\}, \qquad (19)$$

Коэффициент k_1 определяем методом наименьших квадратов по выражению:

$$k_1=\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}T_{\breve{o}\times}\left(t^{(k)}\right)\left\{2\left[0,5+T_2\left(t^{(k)}\right)\right]\left[1-e^{-k_2\frac{t^{(k)}}{0,25}}\right]-T_2\left(t^{(k)}\right)\right\}}{\sum\limits_{k=1}^{n}\left\{2\left[0,5+T_2\left(t^{(k)}\right)\right]\left[1-e^{-k_2\frac{t^{(k)}}{0,25}}\right]-T_2\left(t^{(k)}\right)\right\}^2}, \qquad (20)$$

коэффициент k_2 определяем методом случайного поиска (подбора).

На рис. 2 приведены результаты восстановления ТНП стального контактного элемента, полученные при $k_1=0,415$ и $k_2=5$ при следующих значениях параметров:

– расстояние от контролируемой поверхности до точки термометрирования $l=0,0124$ м;

– теплопроводность материала $\lambda=45,4$ Вт/(м·° С);

– удельная теплоемкость материала $c=3,54\cdot10^8$ Дж/(м^3·° С);

– плотность теплового потока $q_1=0,8\cdot10^6$ Вт/м^2.

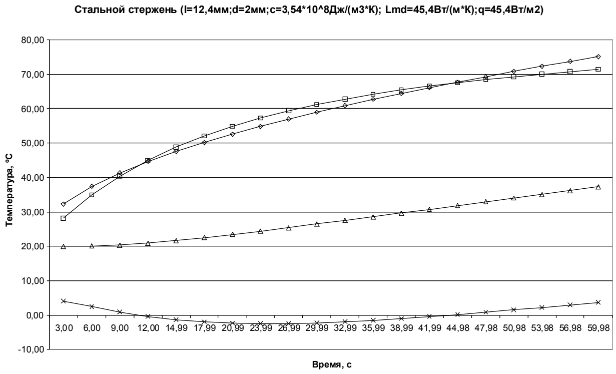

Рисунок 2 – Определение температуры недоступной поверхности по формуле (19): ◊ – точное решение задачи нагрева пластины постоянным тепловым потоком с одной поверхности; другая поверхность теплоизолирована [5]; □ – температура, рассчитанная по формуле (19); Δ – измеренная температура доступной поверхности; x – разность точной и рассчитанной температуры недоступной поверхности

Из графиков (рис. 2) следует, что абсолютная погрешность восстановления температуры недоступной поверхности $x=0$ (19), по данным термометрирования доступной поверхности $x=l$, не превышает 4 °С.

ВЫВОДЫ. 1. Приближённая формула для определения ТНП электрического контакта может быть получена путём решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка относительно средней по толщине приповерхностного слоя элемента контактной системы температуры.

2. Уменьшение погрешности определения ТНП (температуры площадки касания контактной системы) может быть достигнуто введением в приближённую формулу двух поправочных коэффициентов и последующим сложением полученных результатов вычислений с соответствующими значениями интерполяционного полинома, компенсирующими методические погрешности вычислений. Значения коэффициентов полинома определяются с помощью проведения многовариантных расчётов на ЭВМ.

3. Полученное в результате рекомендуемых действий выражение (19) может быть положено в основу разрабатываемого интеллектуального датчика температуры недоступной для прямого измерения

поверхности электрического контакта при осуществлении электротехнологических процессов и диагностике технического состояния электрооборудования технологических комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974. – 284 с.
2. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
3. Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А., Паранин В.Д. Метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы // Журн. техн. физики. – 2007. – Т. 77. – Вып. 12. – С. 21–25.
4. Бажанов А.А., Чижов В.Н., Шерышев В.П. Метод термически тонкого слоя в задачах моделирования и идентификации тепловых процессов. – Алматы: Эверо, 2005. – 186 с.
5. Бекбаев А.Б., Бажанов А.А., Шерышев В.П., Бавлаков В.Н. Контроль температуры поверхности материала, недоступной для прямого термометрирования // Вестник автоматизации. – 2011. – № 1 (31). – С. 45–47.

CONTROL OF THERMAL STATE OF ELECTRIC CONTACT

A. Bekbayev, A. Karbozova, V. Sheryshev
Kazakh National Technical University named after K.I. Satpaev
ul. Satpayeva, 22, Almaty, 050013, Kazakhstan. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

Problems connected with definition of temperature of the contact surface of electric contact using the methods of mathematical modelling by solution of direct problem of heat conductivity are considered. Initial mixed value problem of heat conductivity by the method of thermally thin layer was transformed to Koshi problem for ordinary differential equation of the first order, having enough simple analytical solution. Values of two correction coefficients were found by selection and using least squares method. It made possible to reduce an absolute error of temperature detecting of the surface contact till four degrees. The obtained formula was the basis of the construction of intellectual sensor of temperature of inaccessible surface.

Key words: control, thermal state, electric contact.

REFERENCES

1. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. *Methods of solution of incorrect problems.* – M.: Nauka, 1974. – 284 p. [in Russian]
2. Alifanov O.M., Artyuhin E.A., Rumyantsev S.V. *Extreme methods of solution of incorrect problems.* – M.: Nauka, 1988. – 288 p. [in Russian]
3. Kazanskiy N.L., Kolpakov A.I., Kolpakov V.A., Paranin V.D. Method of test of surface temperature in the area of its interaction with the stream of low temperature plasm // *Journ. of Techn. Physics*. – 2007. – Vol. 77. – Iss. 12. – PP. 21–25. [in Russian]
4. Bazhanov A.A., Chizhov V.N., Sheryshev V.P. *Method of thermally thin layer in the problems of modelling and identification of thermal processes*. – Almaty: Evero, 2005. – 186 p. [in Russian]
5.Bekbaev A.B., Bazhanov A.A., Sheryshev V.P., Bavlakov V.N. Control of temperature of the surface of material inaccessible for direct thermometrics // *Bulletin of Automation*. – 2011. – № 1 (31). – PP. 45–47. [in Russian]

Стаття надійшла 18.06.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Бештою О.С.