

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ СИЛЫ ПРИЖАТИЯ ТЕРМОДАТЧИКА К ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТУ<sup>1</sup>

**MATHEMATICAL MODEL  
OF DEPENDENCE OF MEASUREMENT  
ACCURACY TEMPERATURE VALUES  
FROM THE PRESSING FORCE  
OF THE TEMPERATURE SENSOR  
TO THE ELECTRONIC COMPONENT**

**I. Ivanov  
D. Panasik  
S. Safonov  
A. Semenenko  
S. Uvaysov**

*Summary.* Brief description of the method of contact temperature measurement housing of electronic components are considered. The mathematical model of the thermal contact resistance «housing electronic component — thermocouple» considered. We defined a function influence of forces pressing on additional thermocouple temperature measurement error. Practical advice on the choice of measurement parameters are reported.

*Keywords:* temperature measurement, thermocouple, thermal contact resistance, an additional error, АSONИКА-Т.

**Иванов Илья Александрович**

К.т.н., ст. преподаватель,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
ivanov\_i\_a@mail.ru

**Панасик Дарья Сергеевна**

Магистрант, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»  
darya.panasik@mail.ru

**Сафонов Сергей Николаевич**

Ст. преподаватель, Национальный  
исследовательский университет «Высшая школа  
экономики»  
sns06@mail.ru

**Семененко Александр Николаевич**

Аспирант, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»  
matanmaniak@mail.ru

**Увайсов Сайгид Увайсович**

Д.т.н., профессор, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»  
uvaysov@yandex.ru

*Аннотация.* Приведено краткое описание методики контактных измерений температур корпусов электрорадиоэлементов. Рассмотрена математическая модель теплового сопротивления контакта «корпус электрорадиоэлемента-термопара». Определена функция влияния силы прижатия термопары на дополнительную погрешность измерения температуры. Даны практические рекомендации по выбору параметров измерений.

*Ключевые слова:* измерение температуры, датчик температуры, контактное тепловое сопротивление, дополнительная погрешность, АSONИКА-Т.

## Введение

**Т**емпература — один из главных дестабилизирующих факторов, влияющих на техническое состояние электронной аппаратуры (ЭА). Основные методы и средства, применяемые для оценки реальных температурных режимов ЭА, подразделяются на контактные и бесконтактные. У каждого из методов существуют свои ограничения. Например, активно развивающиеся бесконтактные методы измерения температуры подразумевают использование таких устройств, как термографы и ИК-пирометры, но их применение неприемлемо при анализе тепловых по-

лей внутри закрытого корпуса блока. В таких случаях используются устройства, измеряющие значения температуры контактным методом. Наиболее распространенным датчиком для контактных измерений является термопара.

Выявленные при испытаниях нарушения тепловых режимов могут привести к необходимости существенных изменений конструкции ЭА с соответствующими затратами ресурсов и времени. Поэтому, начиная с ранних этапов проектирования при заданных геометрических и теплофизических параметрах конструкции рассчитываются температуры элементов ЭА, предполагаемые

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422)

в реальных условиях эксплуатации. Расчет проводится с применением современных программ компьютерного моделирования тепловых процессов. Необходимые для оценки тепловых режимов мощности тепловыделений получают методами схемотехнического моделирования. При этом тепловое моделирование конструкции производится с учетом особенностей процесса измерения, а именно с учетом влияния теплопередачи через термопару на достоверность оценки реальной температуры электрорадиоэлемента (ЭРЭ). Термопара и ЭРЭ имеют геометрические размеры и теплофизические параметры одного порядка, и таким влиянием пренебречь нельзя.

Оценка степени вносимой погрешности осуществляется с помощью специальной математической модели теплового процесса взаимодействия «ЭРЭ — термопара», предложенной в [2]. Одним из основных параметров, определяющих адекватность модели, является величина теплового сопротивления в точке контакта ЭРЭ и датчика температуры. Это сопротивление в значительной степени зависит от силы прижатия контактирующей пары.

Таким образом, возникает необходимость изучения влияния силы прижатия датчика к электронному компоненту на точность измерения температуры.

#### Описание методики контактных измерений температур корпусов электрорадиоэлементов

Измерение температур ЭРЭ, смонтированных на печатном узле, выполняется в процессе разработки аппаратуры для оценки правильности выбора электрических и тепловых режимов. Температуры ЭРЭ измеряются, также, при выходном контроле и техническом обслуживании печатных узлов с целью выявления скрытых дефектов ЭРЭ и дефектов монтажа.

Методика контроля включает три этапа: моделирование тепловых режимов ЭРЭ (например, в подсистеме АСОНИКА-Т [1]) на стадии проектирования, измерение температур корпусов ЭРЭ, сравнение измеренных температур с расчетными значениями для выдачи заключения о наличии неисправностей.

Моделирование выполняется для получения расчетных температур ( $T_{1i}$ ) корпусов ЭРЭ при расположении печатных узлов в свободном пространстве. Далее рассчитываются температуры корпусов ЭРЭ ( $T_{2i}$ ) при контакте с термодатчиком [2]. В итоге определяются поправки для номинального теплового режима ЭРЭ

( $\Delta T_i = T_{1i} - T_{2i}$ ), учитывающие отвод теплоты через термодатчик.

Измерения температур реальных ЭРЭ выполняются контактным способом, в полученные значения ( $T_{87<.i}$ ) вносятся поправки для определения действительных температур корпусов ЭРЭ

$$(T_i = T_{87<.i} + \Delta T_i).$$

На основе сравнения действительных температур корпусов ( $T_i$ ) с расчетными температурами ( $T_{1i}$ ), которые хранятся в базе данных на исследуемый печатный узел, дается заключение о наличии скрытых дефектов ЭРЭ или дефектов монтажа на печатном узле.

#### Математическая модель теплового сопротивления контакта

При составлении модели в системе АСОНОКА-Т для расчета ( $T_{2i}$ ) назначаются параметры тепловых контактов термопары с поверхностями ЭРЭ, на основе которых рассчитываются контактные тепловые сопротивления (КТС). В результате отклонения параметров измерений от параметров, использованных в модели, возникают дополнительные погрешности.

Экспериментально было установлено, что наиболее значимым параметром, влияющим на результаты измерений контактным способом, является контактное тепловое сопротивление.

Тепловое сопротивление фактического контакта  $R_{\Phi К}$  в отраслевом стандарте [3] приведено к единице площади контакта и называется удельным тепловым сопротивлением

$$R_{\Phi К} = R_{\Phi К.0} \cdot \prod_{i=1}^4 K_i = R_{\Phi К.0} \cdot K_P \cdot K_{\lambda_{ПП}} \cdot K_H \cdot K_{\sigma}, \quad (1)$$

где

$R_{\Phi К.0} = 0,815 \cdot 10^{-4}$  — базовое значение теплового сопротивления фактического контакта,

$$\left[ \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm} \right];$$

$K_P$  — коэффициент, зависящий от контактного давления и определяемый выражением

$$K_P = 15,37 \cdot 10^6 \cdot P^{-1}; \quad (2)$$

$K_{\lambda_{ПП}}$  — коэффициент, зависящий от приведенного коэффициента теплопроводности материалов контактирующей пары и определяемый выражением

$$K_{\lambda_{ПП}} = 40,049732 \cdot \lambda_{ПП}^{-1,054012}; \quad (3)$$

$K_H$  — коэффициент, зависящий от суммарной величины микровыступов контактирующих поверхностей и определяемый выражением

$$K_H = \begin{cases} 1,906431 \cdot H^{0,058693}, & 0 < H \leq 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ 1, & H \geq 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} \end{cases}; \quad (4)$$

$K_\sigma$  — коэффициент, зависящий от приведённого предела прочности материалов контактирующей пары и определяемый выражением

$$K_\sigma = 0,2 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot \sigma_{ПП}. \quad (5)$$

Приведённый коэффициент теплопроводности и приведённый предел прочности двух материалов определяются из следующих выражений:

$$\lambda_{ПП} = 2 \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ПП} = 2 \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}. \quad (7)$$

Для проведения аналитических расчетов графические представления коэффициентов в [3] были аппроксимированы аналитическими соотношениями (2) — (5).

Функция влияния силы прижатия термопары на дополнительную погрешность измерения температуры

В исходном соотношении (1) только коэффициент  $K_p$  зависит от контактного давления. Другие коэффициенты зависят от свойств материалов корпусов ЭРЭ и термодатчика, а также свойств их поверхностей. Для последующего анализа была выполнена аппроксимация коэффициента  $K_p$  соотношением (2):

$$K_p = c \cdot P^{-1}, \text{ где } c = 15,37 \cdot 10^6 \text{ — коэффициент, } \left[ \frac{H}{M^2} \right];$$

$$P \text{ — контактное давление, } \left[ \frac{H}{M^2} \right].$$

Отклонения контактного давления  $\Delta P$  в ходе измерений приводят к дополнительной погрешности. Функция влияния контактного давления на КТС имеет вид

$$\Delta K_p = \left( \frac{\partial K_p}{\partial P} \right) \cdot \Delta P = -c \cdot P^{-2} \cdot \Delta P. \quad (8)$$

Значения  $K_p$  в [3] определены в диапазоне контактных давлений от

$$P_1 = 1 \cdot 10^6 \frac{H}{M^2} \text{ до } P_2 = 7 \cdot 10^6 \frac{H}{M^2}.$$

Оценим значения функции влияния на указанных границах диапазона контактных давлений. Для этого зададим отклонения давлений на + 10% от номинальных значений.

$$\Delta K_{p1} = -c \cdot P_1^{-2} \cdot \Delta P_1 = -15,37 \cdot 10^6 \cdot (1 \cdot 10^6)^{-2} \cdot 0,1 \cdot 10^6 = -1,54. \quad (9)$$

$$\Delta K_{p2} = -c \cdot P_2^{-2} \cdot \Delta P_2 = -15,37 \cdot 10^6 \cdot (7 \cdot 10^6)^{-2} \cdot 0,7 \cdot 10^6 = -0,219. \quad (10)$$

Таким образом, отклонения контактного давления на +10% от номинальных значений могут приводить к отклонениям коэффициента  $K_p$  -154% до -21,9%.

Из соотношения (8) и оценок значений погрешностей (9) и (10) следует, что с целью уменьшения дополнительной погрешности измерения температуры желательно увеличивать контактное давление. При этом необходимо учитывать возможность повреждения поверхностей ЭРЭ или контактных площадок печатной платы, так как на них через корпус передается усилие прижатия термодатчика. Контактные давления ограничены механическими свойствами корпусов ЭРЭ, которые могут быть изготовлены из металлов, керамики, стекла, полимеров. Некоторые типы ЭРЭ имеют эмалевые покрытия.

Рекомендации по выбору параметров измерений

Результаты измерений температур ЭРЭ ИК-пирометром и термографом сопровождаются погрешностью, зависящей от степени черноты поверхностей ЭРЭ. Степени черноты поверхностей ЭРЭ находятся в диапазоне от 0,1 до 0,9, их уточнение при подготовке к контролю температур представляют трудоемкую задачу. Поэтому для оценки погрешностей контактного метода была использована выборочная проверка результатов изменений. Для минимизации отвода теплоты использовались диоды КД-520 в стеклянном корпусе, приклеенные на поверхности ЭРЭ. Подвод тока к ним выполнялся по проводам диаметром 0,3 мм. Регистрировался обратный ток диодов. Измерялись температуры поверхностей ЭРЭ в отсутствие термопары и при контакте с термопарой при изменении усилия прижатия. В результате было установлено, что при корректном задании параметров моделирования погрешности измерения температур поверхностей ЭРЭ с использованием термопары не превышают 10 0С на верхней границе диапазона.

В качестве термодатчика в прототипе установки использована термопара типа ТХК в связи с тем, что термопары имеют регламентированные номинальные

статические характеристики [4], износоустойчивую поверхность термоспая и выпускаются в миниатюрном исполнении.

Рабочий спай термопары, имеющий сферическую форму, сошлифовывался до диаметра плоской поверхности порядка 1 мм, что обеспечивает площадь контакта порядка 0,8 мм<sup>2</sup>. Плоская поверхность необходима для уменьшения теплового сопротивления контакта и придания определенности его параметрам. Площадь контакта термопары измерялась по отпечатку, оставленному на мастике, и вводилась в программу моделирования.

В экспериментальной установке термодара перемещается кареткой двухкоординатного стола на позиции, определенные по сборочному чертежу печатного узла, и прижимается к корпусам ЭРЭ на время, превышающее длительность переходных процессов установления температуры. Усилие прижима назначается исходя из контактного давления  $P$  и площади контакта  $S$ . Контактное давление, в общем случае, может быть выбрано в середине рекомендованного диапазона  $P = 0,5 \cdot (P_1 + P_2)$ , однако, его желательно корректировать с учетом механических свойств материалов корпусов ЭРЭ.

После подвода термопары к позиции контроля выполняется ее прижатие к корпусу ЭРЭ шаговым двигателем через винтовую передачу и спиральную калиброванную пружину. Каждый шаг двигателя обеспечивает

приращение усилия прижатия на известное значение. Перед перемещением термопары на следующую позицию контроля выполняется ее подъем для беспрепятственного движения над ЭРЭ. Структура аппаратно-программного комплекса, осуществляющего управление процессом измерения, описана в [5].

## ВЫВОДЫ

1. Контроль температур поверхностей ЭРЭ, установленных на печатных узлах, целесообразно выполнять в три этапа: моделирование тепловых режимов ЭРЭ, измерение температур корпусов ЭРЭ, сравнение измеренных температур с расчетными значениями для выдачи заключения о наличии неисправностей.

2. Учитывая большое количество параметров теплового контакта и сложность их расчетов перед моделированием, критерием наличия неисправности на печатном узле может служить превышение температуры ЭРЭ более чем на 10 °С над расчетным значением.

2. Для уменьшения дополнительной погрешности, вызванной непостоянством усилия прижатия термопары, необходимо стабилизировать усилие в процессе измерений на уровне, введенном в модель.

3. Форму рабочего спаия термопары целесообразно дорабатывать для получения плоской поверхности с известной площадью контакта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов А. Н., Линецкий Б. Л., Иванов И. А., Увайсов С. У. Методика применения системы АСОНИКА при моделировании тепловых процессов блоков и печатных узлов // Динамика сложных систем — XXI век. 2014. Т. 8. № 5. С. 3–9.
2. Аминев Д. А., Манохин А. И., Семенов А. Н., Увайсов С. У. Метод расчета погрешностей измерений температур электрорадиоэлементов печатного узла // Измерительная техника — 2015. № 5. С. 45–47.
3. ОСТ4 ГО.012.014. Расчёт контактного теплового сопротивления элементов и узлов. М.: Издательство стандартов. 23 с.
4. ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. М.: Издательство стандартов. 78 с.
5. Иванов И. А., Красивская М. И., Лышов С. М., Сафонов С. Н. Структура программно-аппаратного комплекса мониторинга температурных полей печатных узлов электронных средств // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 12. С. 59–67.