

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 53.088.23

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТА ТЕРМОПАРЫ
С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТОНКОГО ОБРАЗЦА
С НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ
НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ****А. А. Фефелов**, к.т.н., доцент кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-3002-943X, e-mail: fefelov_andrey@bk.ru

А. Н. Чувилин, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-6612-4685, e-mail: antontchuwilin@yandex.ru

Рассматривается вопрос фактически достигаемой точности измерения контактным методом температуры образцов, выполненных из материалов, применяемых для изготовления основ печатных плат. Целью работы является оценка погрешности измерения температуры поверхности образца, вызванной искажением температурного поля при контакте термопарного зонда с поверхностью исследуемого объекта. Выполнено численное моделирование распределения температуры в образце до и после его контакта с термопарным зондом, исследовано влияние теплопроводности образца и площади контакта термопары с образцом на погрешность измерения температуры. Рассмотрена возможность повышения точности измерений температуры контактным методом путем введения в область контакта термоинтерфейса в виде теплопроводящей пасты.

Ключевые слова: измерение температуры, термопара, погрешность измерения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-120-126

Введение

Неотъемлемой частью процесса проектирования и диагностики современных устройств электронной техники является анализ тепловых режимов функционирования компонентов печатного монтажа и в целом общей картины распределения температур и тепловых потоков в печатных платах. Современные программные комплексы, такие как COMSOL Multiphysics, Solid Works, ANSYS и др. предлагают широкий спектр возможностей по численному моделированию процессов теплообмена. Принципиально такое моделирование может учитывать все виды теплопередачи (теплопроводность, излучение, конвекцию) и выполняться с учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры [1, 2]. Однако точное описание полного комплекса начальных и граничных условий в расчетных моделях, содержащих десятки и сотни компонентов печатного монтажа, наталкивается на очевидные трудности. В связи с этим применение инструментальных методов контроля температуры в таких сложных системах продолжает оставаться актуальным способом получения достоверной информации о тепловых режимах радиоэлектронных компонентов [3].

В задачах исследования тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры наряду с получившей широкое распространение в последнее время ИК диагностикой продолжает активно использоваться и контактный способ измерения температуры с помощью термочувствительных зондов. В отличие от тепловизионной съемки применение термочувствительных зондов хотя и не обеспечивает прямой визуализации тепловых полей, вместе с тем считается более точным методом определения температуры ввиду отсутствия влияния на результаты измерений коэффициента излучения исследуемой поверхности. Ведущие производители

термопарных измерителей температуры (Fluke, Testo и др.) указывают для своей продукции погрешности измерений порядка сотых долей градуса. В то же время представляется очевидным тот факт, что контакт термопары с поверхностью исследуемого образца должен вызывать искажения температурного поля и вносить дополнительную погрешность в измерение температуры объекта в зоне контакта. В связи с этим освещение вопроса фактически достигаемой точности измерений температуры контактным методом в задачах диагностики и анализа тепловых полей печатных плат и радиоэлектронных компонентов представляет определенный практический интерес.

Однако из-за не равной нулю теплопроводности проводников, соединяющих зонд и измерительное оборудование, и элементов конструкции, удерживающих измеритель, а также наличия конвективного теплообмена между поверхностью зонда и окружающей средой существует отток тепла от образца через зонд. При большой толщине образца и его высокой теплопроводности, когда отводимое через зонд тепло составляет малую часть от общего теплового потока, проходящего через образец, данным эффектом можно пренебречь. Но для тонких материалов с невысокой теплопроводностью, к которым, в частности, относятся и материалы оснований печатных плат (текстолит, стеклотекстолит и др.), данное явление может вызывать значительное искажение температурного поля. В таком случае высокая точность измерителя температуры нивелируется влиянием, оказываемым им на объект исследования.

Далее представлены некоторые результаты численного моделирования полей температур в образце, имитирующем основание печатной платы в условиях наличия и отсутствия контакта поверхности образца с термопарным зондом. Выполнена оценка погрешности измерений температуры поверхности образца, обусловленной искажением температурного поля при контакте образца с зондом, изучено влияние теплопроводности материала образца и площади контакта на погрешность измерений.

Моделирование

Моделирование проводилось с применением программного пакета COMSOL Multiphysics 5.6 с подключенным физическим интерфейсом «Heat Transfer in Solids» (передача тепла в твердых телах). Рассматривалась задача продольного распространения теплового потока в образце при наличии конвективного теплообмена образца и поверхности рабочего спая термопары с внешней средой, при этом для создания в образце теплового потока в продольном направлении на одной из боковых граней образца задавалось распределение плотности теплового потока. Вид примененной в моделировании расчетной сетки показан на рисунке 1.

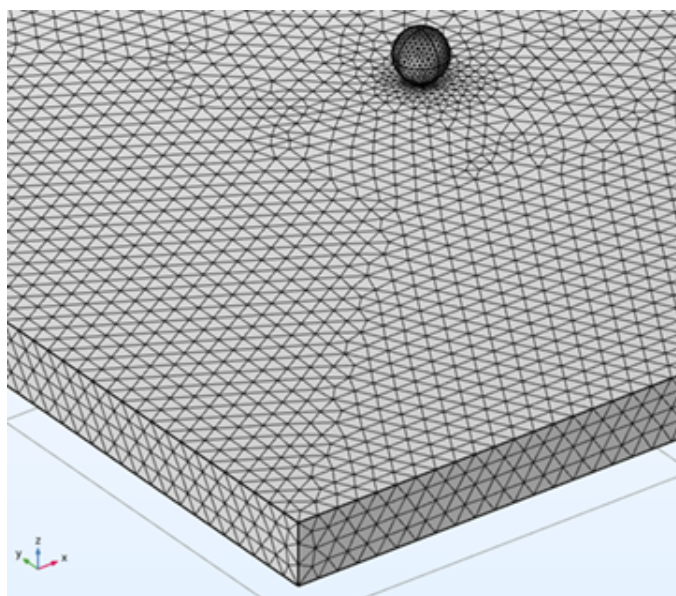


Рисунок 1 – Сетка конечных элементов, используемая при численном моделировании

Figure 1 – Finite element grid used in numerical modeling

Рисунок 2 наглядно демонстрирует соотношение размеров элементов сетки и области контакта. В ходе моделирования минимальный размер элемента сетки составлял $2,1 \cdot 10^{-5}$ м при диаметре пятна контакта $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ м и толщине образца 1,5 мм. Термопара моделировалась шариком размером 1,2 мм с плоским основанием (см. рисунок 3). Изменение площади контакта термопары с поверхностью образца решалось путем изменения диаметра основания. Результаты моделирования температурных полей в образце в отсутствие и при наличии контакта термопары с образцом показаны на рисунках 4 и 5. Коэффициент теплопроводности образца здесь принимался равным $\lambda_{обр} = 0,3 \frac{Вт}{м \cdot К}$, основание термопары имело площадь $S = 3,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, температура окружающей среды 20 °С.

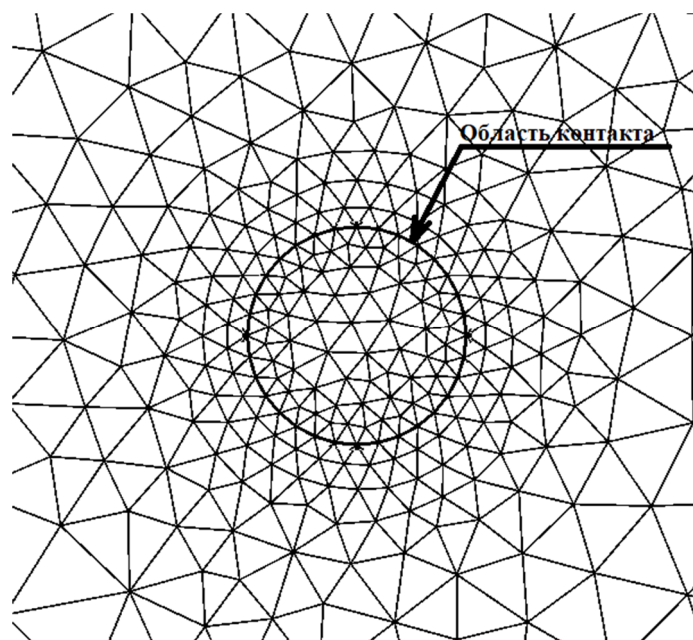


Рисунок 2 – Сетка конечных элементов, используемая при численном моделировании (область контакта)

Figure 2 – Finite element grid used in numerical modeling (contact area)

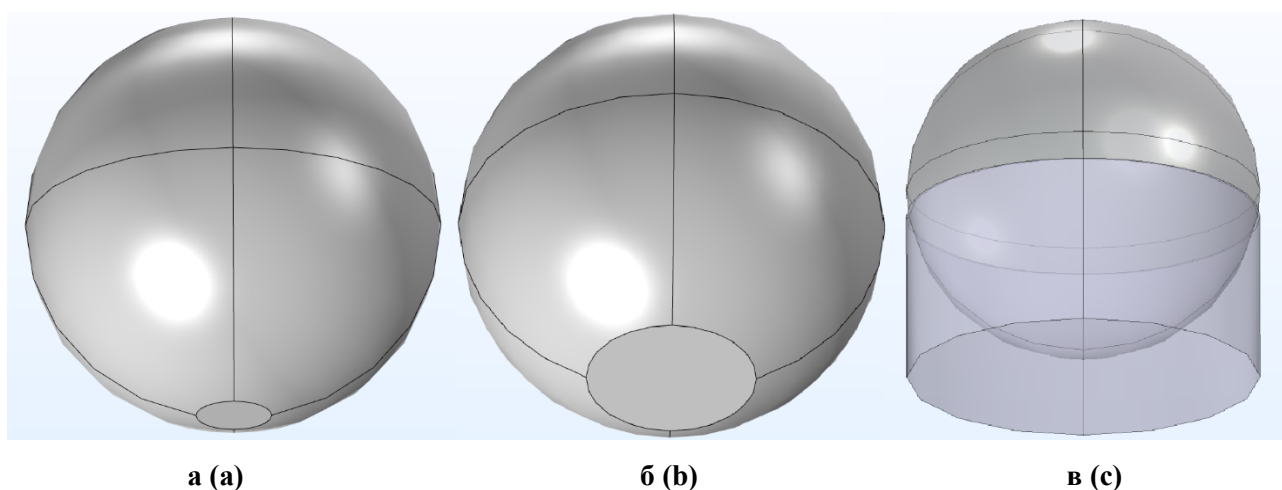


Рисунок 3 – Модель термопары в виде шара с плоским основанием различного диаметра (а, б) и термопары с термоинтерфейсом в виде теплопроводящей пасты (в)

Figure 3 – A model of thermocouple in the form of a ball with flat base of various diameters (a, b) and a thermocouple with thermal interface in the form of heat-conducting paste (c)

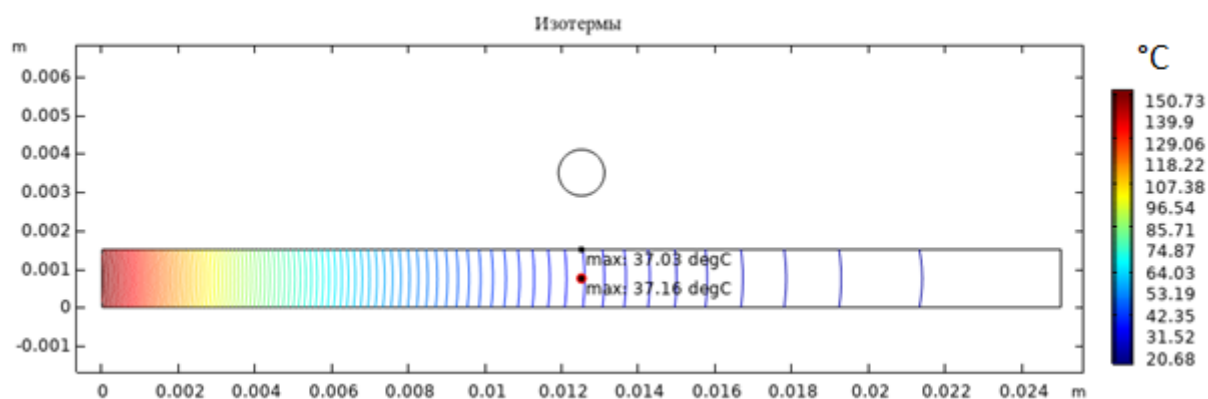


Рисунок 4 – Распределение температур в образце до контакта термопары и поверхности
Figure 4 – Temperature distribution in the sample before contact of thermocouple and surface

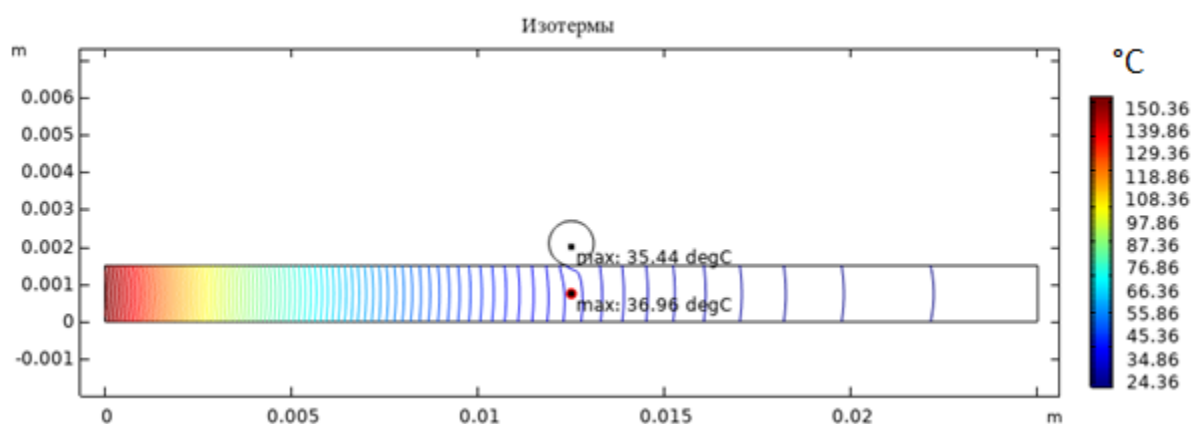


Рисунок 5 – Распределение температур в образце при контакте термопары с поверхностью
Figure 5 – Temperature distribution in the sample at the contact of thermocouple with surface

Как видно из представленных на рисунках 4 и 5 результатов моделирования, температура в центре образца до его контакта с термопарой составила 37,16 °С, а на поверхности из-за отвода тепла конвекцией – 37,03 °С. Контакт термопары с поверхностью образца вызывает заметные возмущения в его температурном поле. Температура в центре образца уменьшилась на 0,2 °С и составила 36,96 °С. При этом температура самой термопары, принимаемая в качестве результата контактного измерения температуры, составила 35,44 °С, что на 1,52 °С меньше температуры поверхности образца до его контакта с термопарой. Полученное значение абсолютной погрешности измерения температуры $\Delta_{\text{абс}}$ хотя и укладывается в допуски, устанавливаемые [4], тем не менее заметно отличается от указанных выше паспортных значений. Относительное отклонение результата $\Delta_{\%}$, определенное как отношение разности температуры поверхности образца до касания $T_{\text{пов}}$ и значения температуры термопары $T_{\text{термопары}}$ к значению температуры поверхности до касания, составило:

$$\Delta_{\%} = \frac{|T_{\text{пов}} - T_{\text{термопары}}|}{T_{\text{пов}}} \cdot 100\% = 4,1\%.$$

Для изучения влияния величины теплопроводности материала образца на точность измерений температуры была выполнена серия численных экспериментов, в которых теплопроводность материала образца варьировалась в диапазоне от 0,2 до 1,0 Вт/(м·К) при неизменной площади поверхности контакта термопары с образцом. Полученные результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 6.

Таблица 1 – Зависимость значений температур и отклонений результатов измерения от теплопроводности

Table 1 – Dependence of temperature values and deviations of measurement results on thermal conductivity

$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$T_{пов}, ^\circ C$	$T_{термопары}, ^\circ C$	$\Delta_{абс}, ^\circ C$	$\Delta\%$
0,2	33,114	31,424	1,690	5,103
0,3	36,957	35,432	1,525	4,128
0,4	39,460	38,114	1,345	3,410
0,5	41,215	40,024	1,191	2,891
0,6	42,501	41,437	1,064	2,504
0,7	43,455	42,492	0,962	2,215
0,8	44,230	43,354	0,875	1,979
0,9	44,835	44,032	0,803	1,791
1	45,352	44,611	0,741	1,634

Как видно из представленных данных, абсолютная погрешность измерения температуры в пределах рассматриваемого диапазона значений теплопроводности материала образца превышает пределы инструментальной абсолютной погрешности в сотые доли градуса, обычно указываемые в паспортных характеристиках термопар. При этом имеется четко прослеживаемая тенденция к снижению погрешности измерений с ростом теплопроводности материала образца.

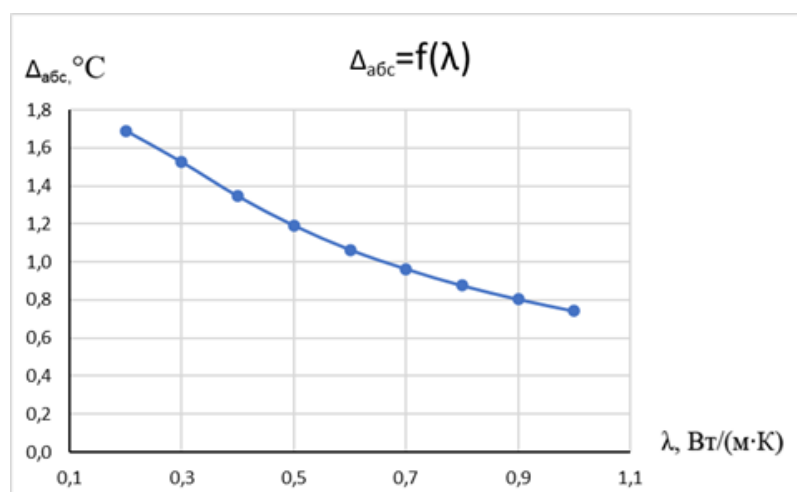


Рисунок 6 – Зависимость абсолютной погрешности измерений температуры от теплопроводности материала основы печатной платы

Figure 6 – The dependence of absolute error of temperature measurements on thermal conductivity of base material of printed circuit board

Сопротивление теплопередаче в области контакта термопарного зонда с образцом также оказывает влияние на результаты измерений. Для изучения влияния данного фактора на точность измерений была выполнена серия численных экспериментов для трех значений площади поверхности контакта термопары со образцом. Был также рассмотрен вариант использования термопасты Arctic MX-4 с заявленной теплопроводностью $8,5 \frac{Вт}{м \cdot К}$ [5] для сниже-

ния сопротивления теплопередачи в зоне контакта и повышения таким образом точности измерений. Расположение термопасты в зоне контакта термопары с поверхностью образца показано на рисунке 3, в. Толщина слоя термопасты в зазоре между основанием термопары и поверхностью образца принималась равной 0,1 мм. Результаты моделирования представлены на рисунке 7.

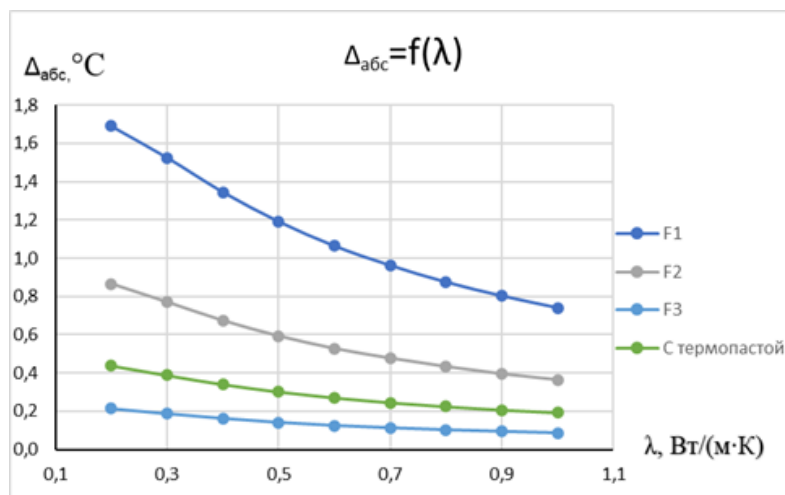


Рисунок 7 – Зависимость абсолютной погрешности измерений температуры от теплопроводности материала основы печатной платы для разных площадей контакта термопары с исследуемой поверхностью ($F_1 = 0,037 \text{ мм}^2$; $F_2 = 0,34 \text{ мм}^2$; $F_3 = 1,1 \text{ мм}^2$)

Figure 7 – The dependence of the absolute error of temperature measurements on the thermal conductivity of the base material of the printed circuit board for different areas of contact of the thermocouple with the surface under study ($F_1 = 0,037 \text{ mm}^2$; $F_2 = 0,34 \text{ mm}^2$; $F_3 = 1,1 \text{ mm}^2$)

Как видно из представленных на рисунке 7 данных, с ростом площади контакта термопары с образцом абсолютная погрешность измерения температуры поверхности образца уменьшается. Введение термопасты в зону контакта измерительного зонда с образцом ожидаемо заметно повышает точность измерений. Тем не менее и в этом случае абсолютная погрешность определения температуры остается на уровне единиц градусов, существенно превышая таковые значения, указываемые в паспортных данных современных термопарных зондов.

Заключение

Приведенные в работе данные наглядно демонстрируют проблему обеспечения точности измерений поверхностных температур объектов контактным методом, обусловленную искажениями температурного поля образца при его контакте с рабочим спаем термопары. Результаты численного моделирования, проведенного на образцах, эмитирующих основания печатных плат, показали существенные отклонения абсолютной погрешности измерений температуры поверхности образца от значений, указываемых в паспортных данных для современных термопар, при этом с ростом теплопроводности материала образца точность измерений повышается ввиду снижения доли теплового потока, отводимого через поверхность рабочего спаива в окружающую среду. Увеличение площади поверхности контакта зонда с образцом и введение в область контакта теплопроводящей пасты также повышают точность измерения температуры, однако ни в одном из рассмотренных вариантов не удастся приблизиться к паспортной точности термопарных зондов, заявляемой фирмами-производителями.

В описанной выше численной модели не рассматривалось влияние дополнительных тепловых потерь, обусловленных рассеянием тепла с поверхности изоляции токопроводящих выводов термопары. Вместе с тем представляется очевидным, что учет данного фактора приведет к увеличению погрешности измерений ввиду роста рассеиваемого термопарой теплового потока. С учетом сказанного, приведенные в работе данные по погрешности измерений температуры поверхности образца представляют собой минимальные значения указанной величины, обусловленные теплообменом с окружающей средой лишь поверхности рабочего спаива.

Библиографический список

1. Фефелов А. А., Улитенко А. И., Маннанов А. Ф. Решение методом граничных элементов задачи о распределении температуры в призматическом стержне при заданных граничных условиях

первого и третьего рода // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 81-85.

2. **Фефелов А. А.** Применение математического аппарата метода граничных элементов для решения задач теплопроводности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2005. № 16. С. 117-120.

3. **Сускин В. В., Фам В. Т.** Математическая модель температурного режима фотоэлектрической панели с охлаждением тепловым каналным радиатором // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 143-148.

4. **ГОСТ Р 8.585-2001.** Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. М., 2001. Государственная система обеспечения единства измерений.

5. Arctic MX-4. Характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://arctic-m.com/goods/arctic-mx-4/> (дата обращения: 12.01.2023).

UDC 53.088.23

STUDYING THE INFLUENCE OF THERMOCOUPLE CONTACT HAVING THE SURFACE OF THIN SAMPLE WITH LOW THERMAL CONDUCTIVITY ON TEMPERATURE MEASUREMENT ACCURACY

A. A. Fefelov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Industrial Electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-3002-943X, e-mail: fefelov_andrey@bk.ru

A. N. Chuvilin, Master's student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-6612-4685, e-mail: antontchuwilin@yandex.ru

*The problem of achievable accuracy for contact method temperature measurements of the samples made of materials used for printed board bases is considered. **The aim of the work** is to estimate the errors when measuring sample surface temperature caused by the distortion of temperature field, thermocouple probe being in contact with the surface of the object studied. Numerical modeling of temperature distribution in the sample before and after its contact with a thermocouple probe was performed; the influence of sample thermal conductivity together with the area of thermocouple contact with the sample on temperature measurement error has been studied. The possibility of increasing the accuracy of temperature measurements by contact method introducing a thermal interface in the form of heat-conducting paste into contact area is considered.*

Key words: temperature measurement, thermocouple, measurement error.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-120-126

References

1. **Fefelov A. A., Ulitenko A. I., Mannanov A. F.** Reshenie metodom granichnyh jelementov zadachi o raspredelenii temperatury v prizmaticheskom sterzhne pri zadannyh granichnyh uslovijah pervogo i tret'ego roda. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 21, pp. 81-85. (in Russian).

2. **Fefelov A. A.** Primenenie matematicheskogo apparata metoda granichnyh jelementov dlja reshenija zadach teploprovodnosti. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2005, no. 16, pp. 117-120. (in Russian).

3. **Suskin V. V., Fam V. T.** Matematicheskaja model' temperaturnogo rezhima fotoelektricheskoi paneli s ohlazhdeniem teplovym kanal'nym radiatorom. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 62, pp. 143-148. (in Russian).

4. **GOST R 8.585-2001.** Thermocouples. Nominal static characteristics of the transformation. Moscow, 2001. State system for ensuring the uniformity of measurements. (in Russian).

5. Arctic MX-4. Characteristics [Electronic resource]. URL: <http://arctic-m.com/goods/arctic-mx-4/> (accessed: 12.01.2023)