

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

## HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

---

---

УДК 621.3, 536.2  
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724

### ВЛИЯНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ НА ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

С. Ю. Сотникова\*, Н. А. Кононова, Л. Б. Ландер,  
В. Э. Цветков, С. В. Яловнаров

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия*  
\**natakon14@yandex.ru*

**Аннотация.** Исследовано влияние трассировки печатных проводников на тепловые режимы печатных узлов в составе радиоэлектронных приборов (РЭП). Показано, что отсутствие учета теплового процесса в медных печатных проводниках при оценке теплового режима плат на этапе разработки может привести к большим ошибкам в оценке надежности РЭП. Для компьютерного моделирования тепловых режимов использовалась широко распространенная система автоматизированного проектирования SolidWorks. Сравнение результатов моделирования печатного узла дальномера с данными эксперимента позволило доказать необходимость учета тепловых процессов в печатных проводниках при проведении моделирования РЭП. Показано, что обычно используемые тепловые модели печатных узлов, выполненные без учета металлизации, могут привести к погрешности в определении температуры электрорадиоэлементов до 22 %. Это не дает возможности правильно принять решение по обеспечению надежности РЭП.

**Ключевые слова:** радиоэлектронные приборы, печатные узлы, трассировка, металлизация, тепловые процессы, отвод тепла, обеспечение надежности

**Ссылка для цитирования:** Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В. Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 712—724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724.

### INFLUENCE OF PRINTED CONDUCTORS ON THE THERMAL REGIME OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES

S. Yu. Sotnikova\*, N. A. Kononova, L. B. Lander,  
V. E. Tsvetkov, S. V. Yalovnarov

*HSE University, Moscow, Russia*  
\**natakon14@yandex.ru*

**Abstract.** The effect of printed conductors tracing on the thermal modes of printed components of radio-electronic devices is investigated. It is shown that the failure to take into account the thermal process in copper printed conductors when assessing the thermal regime of boards at the development stage can lead to large errors in assessing the radio-electronic device reliability. For computer simulation of thermal regimes, the widely used computer-aided design system SolidWorks is used. Comparison of the results of modeling the printed circuit assembly of the rangefinder with the experimental data makes it possible to prove the need to take into account thermal processes in printed conductors when simulating the radio-electronic devices. It is demonstrated that the commonly used thermal models of printed circuit assemblies, which do not take into account metallization, may lead to an error in determining the temperature of electronic elements up to 22 %. This does not make it possible to make a correct decision on ensuring the reliability of the radio-electronic devices.

**Keywords:** electronic devices, printed circuit assembly, tracing, metallization, thermal processes, heat removal, reliability assurance

---

© Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В., 2022

**For citation:** Sotnikova S. Yu., Kononova N. A., Lander L. B., Tsvetkov V. E., Yalovnarov S. V. Influence of printed conductors on the thermal regime of radio-electronic devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 712—724 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724.

**Введение.** Одним из важных факторов, который должен учитываться при обеспечении надежности радиоэлектронных приборов (РЭП), считается тепловое воздействие на свойства конструктивных материалов и электрорадиоэлементов (ЭРЭ) [1]. Нагрев ЭРЭ обусловлен как температурой окружающего воздуха и соседних частей РЭП, так и выделением тепловой энергии в ЭРЭ и в печатных проводниках [2, 3]. Поэтому при обеспечении надежности РЭП в формулы расчета, наряду с табличными значениями интенсивности отказов ЭРЭ, обычно вводят поправочные коэффициенты, зависящие от температурных режимов работы элементов [4]. Во время эксплуатации РЭП могут прийти в нерабочее состояние из-за отклонения рабочих температур ЭРЭ от расчетных проектных значений.

В настоящей статье решена задача учета в тепловых моделях РЭП топологии печатных проводников, которые могут влиять на точность вычисления истинных значений температуры ЭРЭ. Проведенные исследования показали, что компьютерное моделирование тепловых режимов позволяет определить запасы по температуре ЭРЭ уже на ранних этапах проектирования РЭП до их изготовления и проведения испытаний [5, 6].

К настоящему времени разработано множество программных продуктов для моделирования тепловых процессов [7]. Однако до сих пор не все разработчики РЭП владеют информацией о роли теплового процесса в проводниках, реализующих принципиальную электрическую схему РЭП на печатных платах. Поэтому они пренебрегают учетом этой части теплового процесса при построении полных расчетных тепловых моделей печатных узлов, которые составляют основу конструкций РЭП [8, 9]. Это часто приводит к получению расчетного теплового режима, значительно отличающегося от действительного. Тогда на этапе сдаточных испытаний или при эксплуатации наступает отказ РЭП.

Следует также учесть, что использование металлизации печатных плат в качестве способа охлаждения — перспективный метод, позволяющий на 5 % и более увеличить отвод тепла от нагретых областей [10, 11], что также необходимо учитывать при построении тепловых моделей РЭП.

В настоящей работе исследование влияния печатных проводников на тепловой режим РЭП сопровождается рассмотрением примера лазерного дальномера, который часто встраивается в сложную систему навигации и управления (к ее надежности и точности работы предъявляются повышенные требования). Даже небольшое повышение температуры прибора может привести к отказу (постепенному или внезапному) или к существенному снижению точности работы прибора.

Целью настоящих исследований является сравнение экспериментальных и получаемых моделированием значений температуры ЭРЭ печатных узлов РЭП.

На примере дальномера показывается, как учесть погрешности моделирования (с учетом в тепловой модели наличия печатных медных проводников и без учета) для принятия решений об установлении максимально допустимых значений коэффициентов тепловых нагрузок ЭРЭ, чтобы обеспечить требуемую надежность РЭП на ранних этапах их проектирования.

Для достижения этой цели авторами настоящей работе принято решение:

- рассмотреть компьютерное тепловое моделирование одного из печатных узлов конкретного лазерного дальномера;
- провести экспериментальные исследования тепловых процессов реального дальномера с учетом задания внешних тепловых воздействий, близких к условиям эксплуатации;

— оценить точность результатов моделирования печатного узла лазерного дальномера с учетом и без учета влияния печатных проводников, включая участки свободной металлизации;

— оценить погрешность определения коэффициента тепловой нагрузки ЭРЭ при максимальной рабочей температуре эксплуатации дальномера.

**Первый этап: моделирование тепловых процессов в общей конструкции РЭП.** При анализе тепловых процессов в печатных узлах, входящих в РЭП, необходимо сначала рассмотреть тепловую модель всего РЭП в корпусе, а затем, определив граничные условия для каждого печатного узла, приступить к моделированию. Таким образом реализуется иерархический подход [12, 13], который позволяет уточнить значения температуры внутри корпуса прибора для того, чтобы затем точнее определить температуру ЭРЭ на печатных платах.

На первом этапе моделирования используется подсистема АСОНИКА-Т, позволяющая оперативно строить и рассчитывать тепловые модели произвольных конструкций РЭП в виде ненаправленных графов, которые имеют вид электрических цепей, построенных на основе метода электротепловых аналогий [14].

Для построения модели тепловых процессов в виде топологического графа вся конструкция РЭП разбивается на условно изотермические части, каждая из которых представляется в модели отдельным узлом графа (рис. 1). Значения температуры этих частей РЭП в узлах модели рассчитываются в результате моделирования с помощью подсистемы АСОНИКА-Т. Тепловые взаимодействия между выделенными частями конструкции, а также с воздушной средой внутри и снаружи блока, показаны ветвями, представляющими собой тепловые сопротивления теплопроводности, конвекции и излучения (на рис. 1 они изображены сплошными, пунктирными и волнистыми ветвями соответственно).

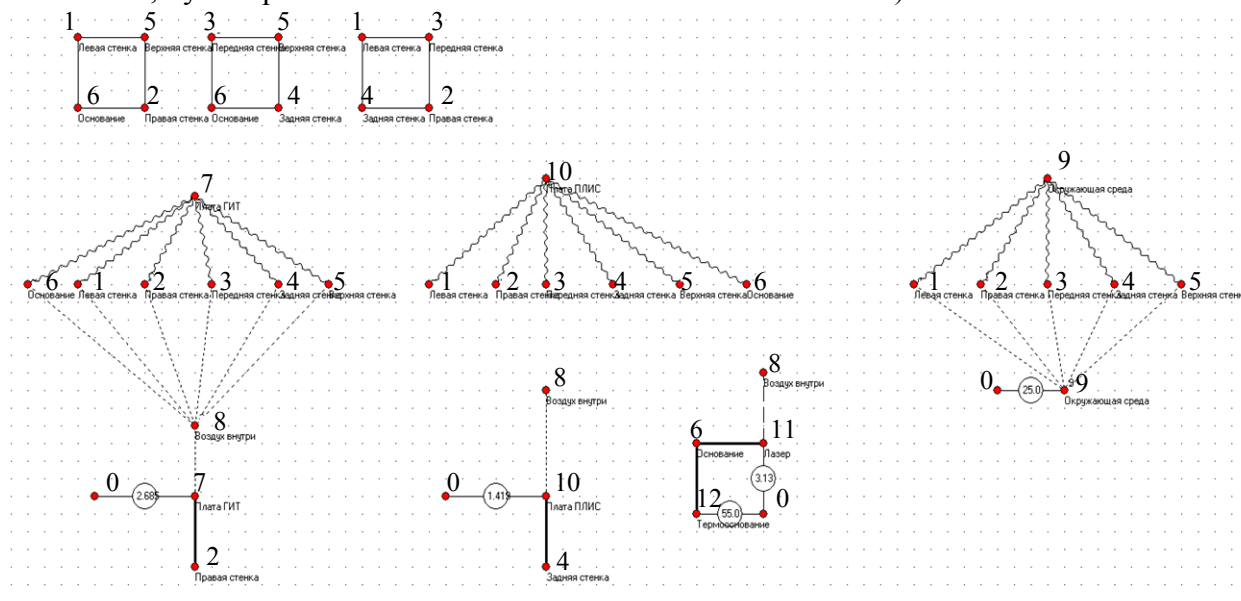


Рис. 1

В случае, если РЭП — дальномер, предлагается следующая идеализация конструкции блока для построения модели тепловых процессов в нем. Корпус дальномера имеет форму параллелепипеда, и каждая грань корпуса принимается изотермичной во всем своем объеме. Поэтому в тепловой модели, показанной на рис. 1, каждой грани соответствует один узел (они пронумерованы от 1 до 6). Повторение номера узла в изображении модели программа подсистемы АСОНИКА-Т воспринимает как один узел, условно расщепленный на несколько узлов для удобства контроля наличия всех ветвей модели. Воздух внутри корпуса считается также изотермичным (узел 8), он омывает три источника тепловыделений: два печатных узла с номерами 7 и 10 и излучающий твердотельный лазер (узел 11). Теплообмен конвекцией и излучением с торцов печатных плат не учитывается из-за малости площади их общей поверхности.

Лазер, закрепленный на основании блока, участвует с ним в контактном теплообмене (сплошная полужирная ветвь 6—11). Основание, в свою очередь, имеет контактный теплообмен с термооснованием (ветвь 6—12), имеющим постоянно поддерживаемую температуру 55 °С. Выделяемые мощности лазера и двух печатных узлов внутри корпуса представлены в виде источников тепловыделений (ветви 11—0, 7—0 и 10—0). Заданы теплообмен конвекцией и излучением от стенок корпуса блока в окружающий воздух (узел 9). От печатных узлов конвекцией тепло идет в воздух внутри блока (узел 8) и контактным теплообменом к стенкам, к которым они крепятся (узлы 2 и 4). Заданные значения температуры термооснования и окружающей среды присутствуют в модели в виде источников тепла (ветви 12—0 и 9—0).

Моделирование тепловых режимов дальномера было проведено для температуры окружающей среды 25 (рис. 2, а) и 55 °С (б). Полученные распределения температур в дальномере как результаты его моделирования представлены в виде таблиц. Температура воздуха внутри блока, которая требуется для задания в качестве граничного условия при моделировании печатного узла генератора импульсов тока (ГИТ), рассматриваемого далее, составляет 53,2 и 57 °С для двух вариантов эксплуатации.

| № узла | Имя узла         | Температура, °С |
|--------|------------------|-----------------|
| 1      | Левая стенка     | 51.1            |
| 2      | Правая стенка    | 52.9            |
| 3      | Передняя стенка  | 51.2            |
| 4      | Задняя стенка    | 52.1            |
| 5      | Верхняя стенка   | 50.2            |
| 6      | Основание        | 55              |
| 7      | Плата ГИТ        | 54.9            |
| 8      | Воздух внутри    | 53.2            |
| 9      | Окружающая среда | 25              |
| 10     | Плата ПЛИС       | 54.9            |
| 11     | Лазер            | 55.5            |
| 12     | Термооснование   | 55              |

| № узла | Имя узла         | Температура, °С |
|--------|------------------|-----------------|
| 1      | Левая стенка     | 56.5            |
| 2      | Правая стенка    | 58.1            |
| 3      | Передняя стенка  | 56.6            |
| 4      | Задняя стенка    | 57.4            |
| 5      | Верхняя стенка   | 57.1            |
| 6      | Основание        | 55.1            |
| 7      | Плата ГИТ        | 60              |
| 8      | Воздух внутри    | 57              |
| 9      | Окружающая среда | 55              |
| 10     | Плата ПЛИС       | 60.1            |
| 11     | Лазер            | 55.6            |
| 12     | Термооснование   | 55              |

Рис. 2

**Второй этап: исследование тепловых процессов печатного узла РЭП.** В настоящей работе исследование тепловых процессов одного из печатных узлов дальномера проводилось с помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Плата этого узла содержит шесть слоев металлизации, выполненных из меди. Было построено три модели печатной платы:

- с учетом топологии печатных проводников верхнего и нижнего слоев металлизации платы и с учетом средневзвешенного значения коэффициентов теплопроводности стеклотекстолита и меди оставшихся внутренних слоев многослойной печатной платы;
- без учета топологии верхнего и нижнего слоев, но с учетом средневзвешенного значения коэффициентов теплопроводности всех слоев многослойной печатной платы;
- без учета топологии верхнего и нижнего слоев и без учета наличия медных слоев в плате, т.е. с учетом только теплопроводности стеклотекстолита.

За основу построения тепловой модели платы генератора импульсов тока с учетом печатных проводников печатного узла была взята его топология из САПР Altium Designer. По реальным размерам (100×44×2 мм) создан компьютерный прототип конструкции платы, добавлены печатные проводники в соответствии с топологией с верхней и нижней сторон в виде отдельных участков толщиной 50 мкм, разработаны прототипы моделей, установленных на плате ЭРЭ. Далее плата, печатные проводники и ЭРЭ объединены в общую сборку платы.

На рис. 3 представлен полученный полный компьютерный прототип конструкции печатного узла. Для каждого ЭРЭ описываются теплофизические свойства материала. Они выбираются из базы данных или, при необходимости, создаются с нуля.

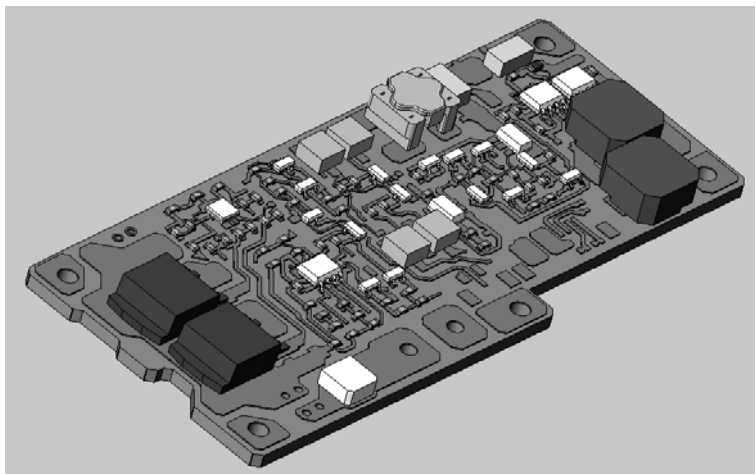


Рис. 3

С целью сокращения времени построения расчетной сетки было принято решение не создавать внутренние проводящие слои топологии в качестве отдельных тел в SolidWorks, а задать эффективную теплопроводность материала платы с учетом наличия внутренней металлизации, т.е. средневзвешенное значение коэффициентов теплопроводности стеклотекстолита и меди [15, 16].

При условии, что печатные проводники достаточно однородно распределены внутри платы, расчет эффективного коэффициента теплопроводности для  $n$ -слойной печатной платы может быть проведен по формуле [17]:

$$\lambda_3 = \lambda_{\text{пт}} + K_3 (n\delta_{\text{пр}} / (n-1)\delta_{\text{пт}}) \lambda_{\text{пр}},$$

где  $\lambda_{\text{пт}}$  — коэффициент теплопроводности печатной платы;  $K_3$  — среднее значение коэффициента заполнения печатной платы проводниками по всем слоям;  $\delta_{\text{пр}}$  — толщина проводящего слоя;  $\delta_{\text{пт}}$  — толщина слоя стеклотекстолита печатной платы;  $\lambda_{\text{пр}}$  — коэффициент теплопроводности проводящих слоев.

Для расчета коэффициента заполнения печатной платы в SolidWorks выполнены эскизы геометрического рисунка внутренних слоев платы. Пример процесса измерения площади полигона внутреннего слоя приведен на рис. 4. При подсчете площади, занимаемой металлизацией, использовался инструмент „анализировать“.

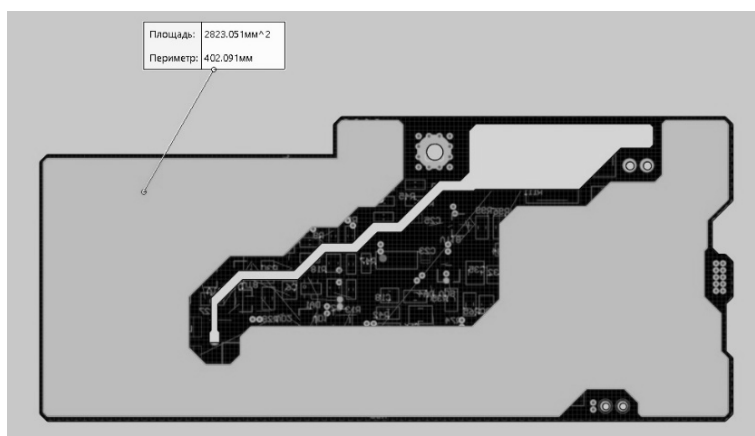


Рис. 4

Коэффициент заполнения печатной платы проводниками:  $K_3 = 0,68$ . При следующих исходных данных материалов печатной платы: стеклотекстолит FR-4  $\delta_{\text{пт}} = 0,34$  мм,

$\lambda_{\text{пш}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и медь  $\delta_{\text{пр}} = 0,05 \text{ мм}$ ,  $\lambda_{\text{пр}} = 390 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , число слоев 9, эффективный коэффициент теплопроводности составил

$$\lambda_3 = 0,2 + 0,68 \cdot ((4 \cdot 0,05) / 5 \cdot 0,34) \cdot 390 = 31,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Таким образом, при подготовке к моделированию в программе SolidWorks задан материал печатной платы с рассчитанным (и внесенным вручную) эффективным коэффициентом теплопроводности.

Для проведения теплового моделирования печатного узла с помощью инструментов SolidWorks Simulation требуется задать граничные условия. При задании в программе процессов излучения и естественной конвекции от всех поверхностей вводилась температура окружающего воздуха  $53,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , исходя из проведенных в подсистеме АСОНИКА-Т расчетов для блока дальномера. Справочный коэффициент конвективной теплоотдачи был взят  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Коэффициент черноты поверхностей ЭРЭ и платы —  $0,8$ . Для областей крепежных отверстий задана температура термооснования  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . В зависимости от способа крепления тепловые сопротивления крепления ЭРЭ заданы от  $0,8$  до  $2,5 \text{ К}/\text{Вт}$ . Для каждого ЭРЭ и области металлизации был задан источник теплового потока (в Вт), взятый из результатов схмотехнического моделирования. Из-за высокой удельной электропроводности меди тепловой режим одиночного проводника определяется не только общим температурным фоном печатной платы, но и действием выделяемого в проводнике джоулева тепла, которое целесообразно учитывать [18].

В основу решения задач теплопроводности в программе SolidWorks заложен метод конечных элементов [19]: непрерывная в объеме тела физическая величина, в данном случае температура, может быть аппроксимирована дискретной моделью, построенной на множестве кусочно-непрерывных функций. Для этого изучаемая модель разбивается на множество малых областей, называемых конечными элементами, соединенными между собой в узлах. В нашем случае печатный узел — объемное тело, поэтому модель состоит из тетраэдров, по площадям граней которых распределение температуры аппроксимируется параболическими или линейными функциями.

В связи с высокой сложностью и неоднородностью построенной геометрической модели печатного узла для исследования была выбрана сетка на основе смешанной кривизны (рис. 5).

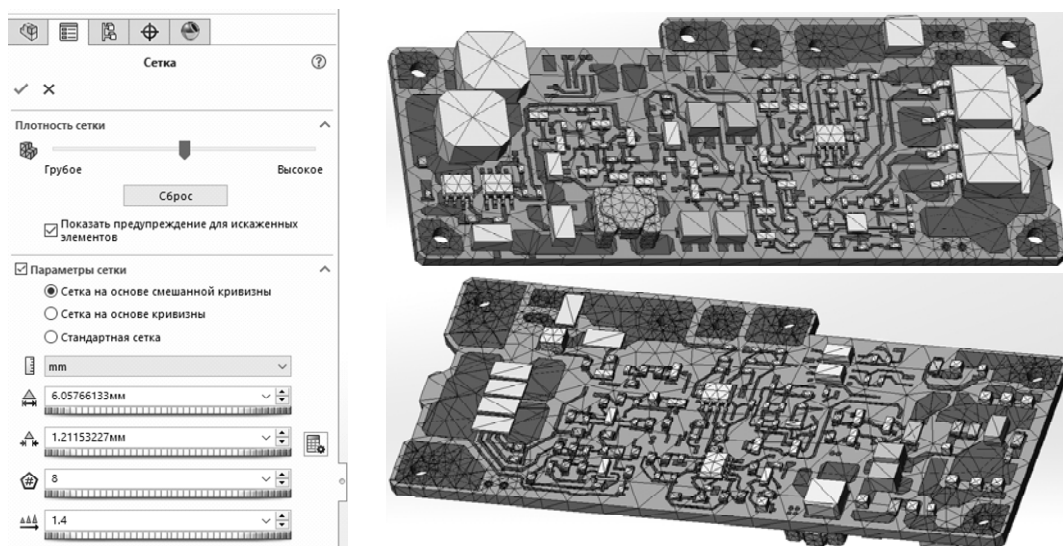


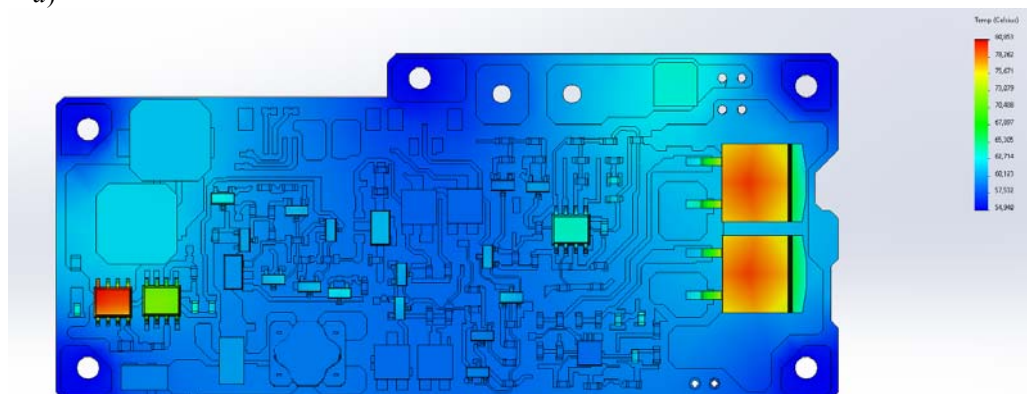
Рис. 5

Проведено компьютерное моделирование печатного узла для температуры реального эксперимента ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Напомним, что используется наиболее приближенная к реальности

модель с учетом топологии проводников на верхней и нижней сторонах и эффективным коэффициентом теплопроводности (пример расчета которого приведен выше).

Результаты моделирования печатного узла в САПР SolidWorks приведены на рис. 6 (а — тепловое поле верхней стороны, с учетом проводников; б — нижней). Наиболее сильно нагреты элементы VT19, VT20, VT11. С использованием функции „зондирование“ в САПР были получены следующие значения:  $T_{VT19} = 79,7$ ,  $T_{VT20} = 79,5$ ,  $T_{VT11} = 78,4$  °С. Важно заметить, что ножки элементов VT19 и VT20 нагреваются не в равной степени вследствие того, что опираются на полигоны металлизации, различающиеся по площади. Температура различных участков платы составляет в среднем 55 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С.

а)



б)

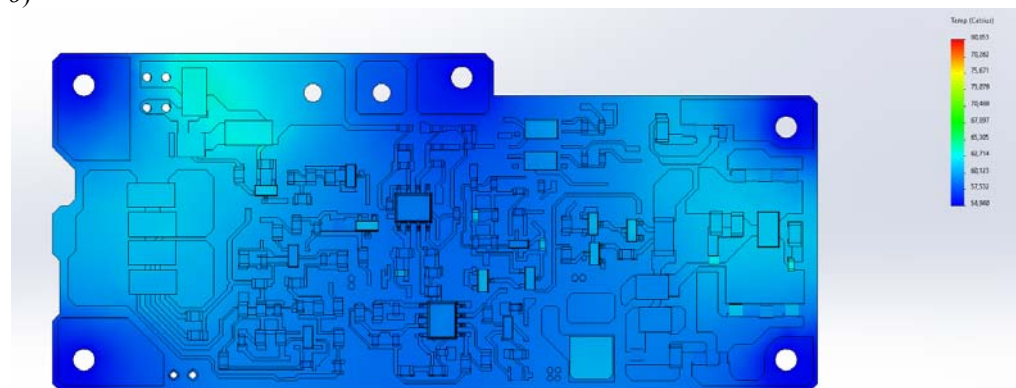


Рис. 6

В боковых областях проводящих слоев расположены крупные полигоны, которые разогреваются из-за проходящего по ним тока. В то же время эти фрагменты металлизации выполняют роль теплоотвода для размещенных на них ЭРЭ и отводят тепловой поток эффективнее, чем дорожки в средней части платы.

Далее было проведено моделирование печатного узла с использованием второй модели (рис. 7, верхняя сторона) без учета топологии печатных проводников сверху и снизу, но с заданием эффективного коэффициента теплопроводности, рассчитанного для всех слоев по формуле

$$\lambda_3 = 0,2 + 0,6 \left( (6 \cdot 0,05) / (5 \cdot 0,34) \right) \cdot 390 = 41,5 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Температура на корпусе  $T_{VT19} = 83,8$ ,  $T_{VT20} = 84,2$ ,  $T_{VT11} = 85,0$  °С.

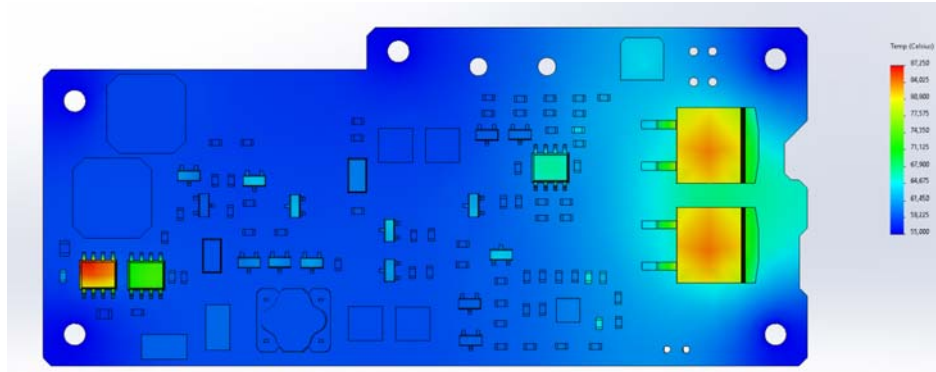


Рис. 7

В третьем варианте моделирования исследована та же модель, но задан коэффициент теплопроводности только для стеклотекстолита FR-4  $\lambda_{\text{штп}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура на корпусе  $T_{\text{VT19}} = 92,0$ ,  $T_{\text{VT20}} = 92,3$ ,  $T_{\text{VT11}} = 89,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Во второй части исследований для расчета коэффициентов тепловой нагрузки [12] было проведено моделирование при максимально допустимой рабочей температуре окружающей среды  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  (такая температура эксплуатации лазерного дальномера определяется его техническими условиями). В этом случае для модели с полным учетом металлизации значения температуры были наименьшими:  $T_{\text{VT19}} = 81,6$ ,  $T_{\text{VT20}} = 81,6$ ,  $T_{\text{VT11}} = 80,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При использовании модели с учетом только эффективной теплопроводности платы и без металлизации сверху и снизу температура составила:  $T_{\text{VT19}} = 86,2$ ,  $T_{\text{VT20}} = 86,5$ ,  $T_{\text{VT11}} = 87 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура на рассматриваемых элементах в модели без учета металлизации:  $T_{\text{VT19}} = 95,7$ ,  $T_{\text{VT20}} = 96,0$ ,  $T_{\text{VT11}} = 92,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Экспериментальная часть.** Для сравнения результатов моделирования и реальных значений был проведен эксперимент с лабораторным образцом дальномера. До крепления датчиков с помощью тепловизора было получено тепловое поле платы генератора импульсов тока при подаче питания (рис. 8).

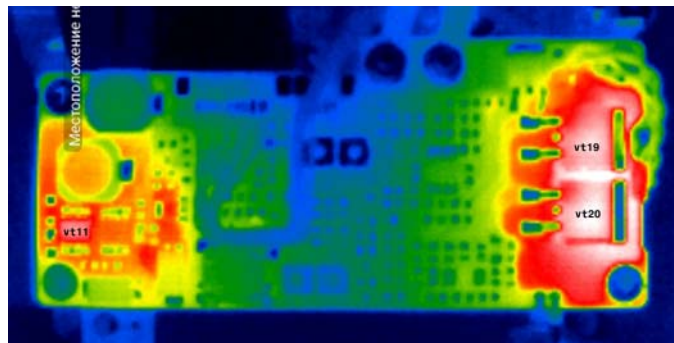


Рис. 8

Распределение температуры подтвердило, что ЭРЭ VT19, VT20, VT11 являются наиболее тепловыделяющими. На рис. 9 приведена плата с уже установленными тремя термодатчиками DS18B20.

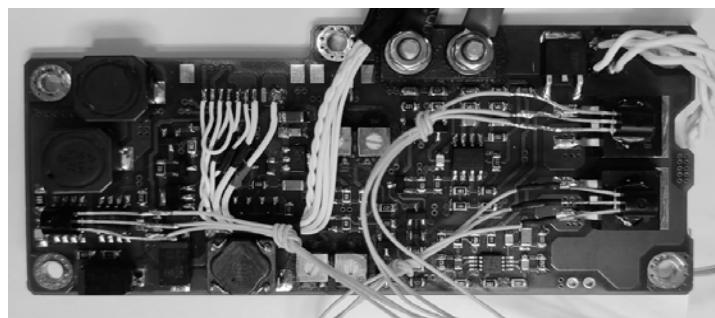


Рис. 9



Затем плата была установлена в корпусе, который, в свою очередь, крепился на термооснование с поддерживаемой температурой 55 °С. Дальномер был выдержан на термоосновании в течение 2 ч для стабилизации начальной температуры. Температура окружающей среды на момент проведения эксперимента равнялась 25 °С. Начальная температура запуска на датчиках 52 °С. Заданная длительность работы дальномера 10 мин. Результаты эксперимента представлены на рис. 10. На датчиках установились:  $T_{VT19} = 76,1$  (датчик 1),  $T_{VT20} = 75,5$  (датчик 2),  $T_{VT11} = 77,7$  °С (датчик 3).

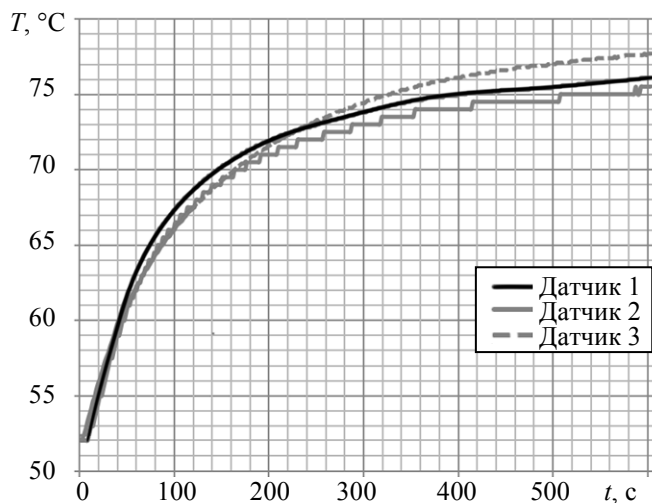


Рис. 10

**Результаты проведенных исследований.** Проанализировав результаты моделирования с учетом и без учета металлизации, можно увидеть, что температура на ЭРЭ существенно различается. Примем значения температуры, полученные в эксперименте, за истинные. Результаты расчетов относительных погрешностей для результатов моделирования при температуре окружающей среды 25 °С представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных для моделей с различными вариантами учета металлизации

| ЭРЭ  | $T_{\text{экс}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | С полным учетом металлизации |                | С учетом только эффективной теплопроводности платы |                | Без учета металлизации      |                |
|------|--|------------------------------|----------------|--|----------------|-----------------------------|----------------|
|      |  | $T, \text{ }^\circ\text{C}$  | $\Delta T, \%$ | $T, \text{ }^\circ\text{C}$                        | $\Delta T, \%$ | $T, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\Delta T, \%$ |
| VT19 | 76,1                                     | 79,7                         | 5              | 83,8   | 10             | 92,0                        | 21             |
| VT20 | 75,5                                     | 79,5                         | 5              | 84,2   | 12             | 92,3                        | 22             |
| VT11 | 77,7                                     | 78,4                         | 1              | 85,0   | 9              | 89,2                        | 15             |

Таким образом, полученные при использовании модели платы с учетом печатных проводников результаты близки к экспериментальным, погрешность моделирования ниже погрешности эксперимента, по сравнению с моделью без учета — не выше 5 %. Исходя из этого можно прийти к заключению, что разработанная модель с учетом печатных проводников адекватна. Это означает, что для лабораторных испытаний в реальных условиях проектирования РЭП изготавливать их макеты не нужно, заменив испытания компьютерным моделированием. Это сокращает затраты на проектирование.

Также были рассчитаны коэффициенты тепловой нагрузки [12] для ЭРЭ, подверженных наиболее существенному нагреву и рассматриваемых ранее (табл. 2). Коэффициент тепловой нагрузки равен отношению температуры ЭРЭ, полученной при моделировании (задается вариант эксплуатации в среде с максимальной рабочей температурой 55 °С), к максимально допустимой по техническим условиям ( $T_{VT19 \text{ тУ}} = T_{VT20 \text{ тУ}} = 175$ ,  $T_{VT11 \text{ тУ}} = 150$  °С).

Таблица 2

## Коэффициенты тепловой нагрузки для моделей различной детализации

| Модель   | $K_{VT19} = \frac{T_{VT19}}{T_{VT19\text{ ТУ}}}$ | $K_{VT20} = \frac{T_{VT20}}{T_{VT20\text{ ТУ}}}$ | $K_{VT11} = \frac{T_{VT11}}{T_{VT11\text{ ТУ}}}$ |
|--|--|--|--|
| С полным учетом металлизации                       | 0,47   | 0,47   | 0,53   |
| С учетом только эффективной теплопроводности платы | 0,49   | 0,49   | 0,58   |
| Без учета металлизации                             | 0,55   | 0,55   | 0,62   |

Из табл. 2 видно, что нормальный тепловой режим соблюдается с необходимым запасом по температуре (обычно 20—40 % от предельно допустимой) для трех рассматриваемых вариантов тепловых моделей. Однако применение в процессе моделирования тепловой модели с полным учетом металлизации позволяет получить реальный тепловой режим платы генерации импульсов тока точнее, поскольку присутствует учет дополнительного отвода тепла от печатного узла с ЭРЭ через участки с металлизацией.

**Заключение.** В настоящей работе показано, что для исследования тепловых режимов РЭП целесообразно на первых стадиях проектирования проводить не одноэтапное компьютерное тепловое моделирование печатных узлов с помощью известного САПР SolidWorks, а двухэтапное — с помощью двух программных продуктов. Такой подход позволяет более точно учитывать температуру воздуха, окружающего печатные узлы, и тепловые условия эксплуатации, задавая граничные условия для моделирования печатного узла, приближенные к реальности.

Для сопоставления точности моделирования значений температуры в печатном узле были исследованы три тепловые модели. В самой полной из них учитывается топология верхней и нижней сторон, а также наличие в плате проводящих медных слоев. Во второй отсутствуют печатные проводники, но принимается во внимание их вклад в процессы теплообмена путем учета эффективного коэффициента теплопроводности платы. В третьей отсутствует какой-либо учет наличия печатных проводников. Моделирование тепловых режимов для печатного узла показало, что погрешность реального эксперимента для подробной модели не превышала 5 %, а для модели без учета металлизации — 22 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что тепловые модели, не учитывающие металлизации, впоследствии оказываются заметно менее точными, особенно в случаях, когда слои проводников состоят из печатных полигонов большой площади. Опыт этого исследования показывает, что только в редких случаях, при разработке аппаратуры повышенной надежности, оправданно проведение сверхточного моделирования с использованием подробных геометрических моделей. Использование моделей средней сложности, не усложняющих расчетную сетку, но обеспечивающих нахождение реального эффективного коэффициента теплопроводности платы, целесообразно при выполнении большинства проектов. Такие модели дают погрешность в среднем 10—12 %, что является допустимым при моделировании тепловых режимов электроники.

Несмотря на то что в трех вариантах тепловых моделей одного печатного узла коэффициенты тепловой нагрузки не превышают рекомендуемого для бортовой аппаратуры значения 0,7, и разница в определении коэффициентов для полной модели и модели без учета печатных проводников составила до 8—9 %, это достаточно много, когда расчетные коэффициенты могут получиться близкими к рекомендованной верхней границе или немного выше ее. В этом случае также применение модели с учетом эффективного коэффициента теплопроводности позволяет получить коэффициент тепловой нагрузки с меньшей погрешностью (2—5 %), по сравнению с использованием полной модели.

Убедительно показано, что необходимо оценивать и учитывать влияние металлизации, которая выступает в роли системы охлаждения, на тепловые процессы печатных узлов.

Результаты настоящего исследования могут быть учтены для установления более точной и убедительной корреляции между конкретными схемами трассировки и тепловыделениями на ЭРЭ в различных классах РЭП, для которых очень важны и точность, и надежность работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В. Ф., Пискун Г. А., Лихачевский Д. В.* Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-3. С. 282—286.
2. *Ellison G. N.* Thermal computations for electronics conductive, radiative, and convective air cooling. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2011.
3. *Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1976. 232 с.
4. *Боровиков С. М., Цырельчук И. Н., Троян Ф. Д.* Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.
5. *Raja V., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P.* Thermal simulations of an electronic system using Ansys Icepak // Intern. Journal of Engineering Research and Applications. 2015. Vol. 5, is. 11. P. 57—68.
6. *Evstatieva N., Evstatiev B.* Modelling the Temperature Conditions of a Printed Circuit Board // 12th Intern. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2021. P. 1—4. DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425281.
7. *Москаленко К. И.* Моделирование тепловых режимов элементов на печатной плате средствами САПР // Молодежн. науч.-техн. вестн. 2016. № 5. С. 31—38.
8. *Карабан В. М., Суслов И. О.* Возможности проведения расчета теплового режима печатных плат в системе имитационного моделирования Ansys Icepak // Решетневские чтения. 2012. № 16. С. 179—180.
9. *Рыбаков И. М.* Алгоритм исследования теплового режима печатной платы // Тр. междунар. симп. „Надежность и качество“. 2017. Т. 1. С. 362—364.
10. *Рыбаков И. М.* Методика применения печатных проводников в качестве системы охлаждения // Тр. междунар. симп. „Надежность и качество“. 2018. С. 48—51.
11. *Карабан В. М., Сухоруков М. П., Морозов Е. А.* Математические модели многослойных печатных плат для теплового моделирования электронных устройств и систем // Доклады ТУСУР. 2013. № 3(29). С. 170—174.
12. *Kofanov Y., Kuznetsov N., Sotnikova S.* Evidence-Based Modeling of Thermal Processes in Printed Circuit Assemblies of Optoelectronic Devices // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). IEEE, 2021. P. 1—4. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642785.
13. *Дульнев Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
14. *Kuznetsov E., Golyaev Y., Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Vinokurov Y., Soloveva T.* Thermal computer modeling of laser gyros at the design stage: a promising way to improve their quality and increase the economic efficiency of their development and production // Optical and Quantum Electronics Switzerland: Springer, 2021. Vol. 53, is. 10. Art. number 596. P. 1—15. DOI: 10.1007/s11082-021-03253-8.
15. *Гольдин В. В., Журавский В. Г., Коваленок В. И.* и др. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования. М.: Радио и связь, 2003. 456 с.
16. *Семенов А. Н., Кофанов Ю. Н., Роткевич А. С., Увайсов С. У.* Тепловая модель радиаторов модулей электропитания электронных средств // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 12(127). С. 44—52.
17. *Захарьин К. Н., Сарафанов А. В., Егоров Н. М., Трегубов С. И.* Компьютерные технологии в приборостроении. Основы математического и методического обеспечения. Версия 1.0. Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
18. *Rybakov I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I., Grishko A. K., Brostilov S. A., Yurkov N. K.* Application of the model of the printed circuit board concerning the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803, N 1. P. 1—6. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012130.
19. *Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1990. 207 с.

- Сведения об авторах**
- Светлана Юрьевна Сотникова** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: sshotnikova@hse.ru
- Наталья Алексеевна Кононова** — студентка; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: nakononova\_1@miem.hse.ru
- Леонид Борисович Ландер** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: lblander@miem.hse.ru
- Вячеслав Эдуардович Цветков** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: vetsvetkov@miem.hse.ru
- Степан Владимирович Яловнаров** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: svyalovnarov@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 24.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

#### REFERENCES

1. Alekseev V.F., Piskun G.A., Likhachevsky D.V. *Big Data and Advanced Analytics*, 2020, no. 6-3, pp. 282–286. (in Russ.)
2. Ellison G.N. *Thermal computations for electronics conductive, radiative, and convective air cooling*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2011.
3. Rotkop L.L., Spokoyny Yu.E. *Obespecheniye teplovykh rezhimov pri konstruirovaniy radioelektronnoy apparatury* (Providing Thermal Conditions in the Design of Radio-Electronic Equipment), Moscow, 1976, 232 p. (in Russ.)
4. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Troyan F.D. *Raschet pokazateley nadezhnosti radioelektronnykh sredstv* (Calculation of Indicators of Reliability of Radio Electronic Means), Minsk, 2010, 68 p. (in Russ.)
5. Raja B., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P. *Intern. Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, no. 11(5), pp. 57–68.
6. Evstatieva N., Evstatiev B. *12th Intern. Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425281.
7. Moskalenko K.I. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik* (Youth Scientific and Technical Bulletin), 2016, no. 5, pp. 31–38. (in Russ.)
8. Karaban V.M., Suslov I.O. *Reshetnevskiy chteniya*, 2012, no. 16, pp. 179–180. (in Russ.)
9. Rybakov I.M. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, Penza, 2017, vol. 1, pp. 362–364. (in Russ.)
10. Rybakov I.M. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, Penza, 2018, pp. 48–51. (in Russ.)
11. Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2013, no. 3(29), pp. 170–174. (in Russ.)
12. Kofanov Y., Kuznetsov N., Sotnikova S. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, IEEE, 2021, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642785.
13. Dulnev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature* (Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment), Moscow, 1984, 247 p. (in Russ.)
14. Kuznetsov E., Golyaev Y., Kolbas Y., Kofanov Y., Vinokurov Y., Soloveva T. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, Switzerland, 2021, no. 10(53), art. number 596, pp. 1–15, DOI: 10.1007/s11082-021-03253-8.
15. Goldin V.V., Zhuravsky V.G., Kovalenok V.I. et al. *Issledovaniye teplovykh kharakteristik RES metodami matematicheskogo modelirovaniya* (Research of Thermal Characteristics of RES by Methods of Mathematical Modeling), Moscow, 2003, 456 p. (in Russ.)
16. Semenenko A.N., Kofanov Yu.N., Rotkevich A.S., Uvaisov S.U. *Quality. Innovation. Education*, 2015, no. 12(127), pp. 44–52. (in Russ.)
17. Zakharyin K.N., Sarafanov A.V., Egorov N.M., Tregubov S.I. *Komp'yuternyye tekhnologii v priborostroyenii. Osnovy matematicheskogo i metodicheskogo obespecheniya. Versiya 1.0* (Computer Technologies in Instrument Making. Fundamentals of Mathematical and Methodological Support. Version 1.0), Krasnoyarsk, 2008. (in Russ.)
18. Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Grishko A.K., Brostilov S.A., Yurkov N.K. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 1(803), pp. 1–6, DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012130.

19. Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Primeneniye EVM dlya resheniya zadach teploobmena* (The Use of Computers for Solving Heat Transfer Problems), Moscow, 1990, 207 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Svetlana Yu. Sotnikova** — PhD; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: ssootnikova@hse.ru
- Natalia A. Kononova** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: nakononova\_1@miem.hse.ru
- Leonid B. Lander** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: lblander@miem.hse.ru
- Vyacheslav E. Tsvetkov** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: vetsvetkov@miem.hse.ru
- Stepan V. Yalovnarov** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: svyalovnarov@edu.hse.ru

Received 01.07.2022; approved after reviewing 24.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.