

УДК 681.2.083

doi:10.21685/2072-3059-2022-2-3

Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры

И. М. Рыбаков¹, А. В. Лысенко², С. А. Бростилов³, Ю. Е. Герасимова⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹rybakov_im@mail.ru, ²lysenko_av@bk.ru,

³brostilov@yandex.ru, ⁴gerasimova.julia1981@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Быстрые темпы развития радиоэлектронной техники, в особенности основной ее части – печатной платы, ставят актуальную задачу постоянного создания и актуализации существующих средств и способов детектирования и диагностики параметров печатных плат при внешних воздействующих факторах. В свою очередь непрерывное повышение технического уровня электроники требует постоянного опережения качественных и надежностных характеристик, связанных с ростом плотности монтажа и увеличением рабочей частоты электрорадиоизделий. Обеспечение этих требований позволяет достичь высокого уровня конкурентоспособности электроники и развитие новых технологических витков производства печатных плат. *Материалы и методы.* При разработке системы детектирования теплофизических параметров электронной аппаратуры использованы методы статистической обработки данных и теории измерений, методики проектирования и объектно-ориентированное программирование. *Результаты и выводы.* Разработан комбинированный метод расчета теплофизических параметров электронных блоков. Решены задачи математического моделирования температурных полей печатных плат. Реализована методика детектирования критически нестабильных элементов электронной аппаратуры с помощью четырехканальной системы измерения теплового поля.

Ключевые слова: комбинированный метод, тепловой расчет, математическая модель, программно-аппаратный комплекс, температура, печатная плата, контроль управления, надежность, работоспособность

Для цитирования: Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Бростилов С. А., Герасимова Ю. Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 36–45. doi:10.21685/2072-3059-2022-2-3

The information-measuring and control system for thermophysical modeling of electronic equipment parameters

I.M. Rybakov¹, A.V. Lysenko², S.A. Brostilov³, Yu.E. Gerasimova⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

¹rybakov_im@mail.ru, ²lysenko_av@bk.ru,

³brostilov@yandex.ru, ⁴gerasimova.julia1981@yandex.ru

Abstract. *Background.* The rapid pace of development of electronic equipment, especially its main part of the printed circuit board, poses the urgent task of constantly creating and updating existing means and methods for detecting and diagnosing the parameters of

© Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Бростилов С. А., Герасимова Ю. Е., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

printed circuit boards under external influencing factors. In turn, the advanced rates of development of microelectronics require a continuous increase in their technical level, which is determined by an increase in the density of installation of electrical radio products, increased requirements for reliability, and an increase in operating frequency. Meeting these requirements allows achieving a high level of design and development of technology for the production of printed circuit boards. *Materials and methods.* When developing a system for detecting thermophysical parameters of electronic equipment, methods of statistical data processing and measurement theory, design techniques and object-oriented programming were used. *Results and conclusions.* A combined method for calculating the thermophysical parameters of electronic units has been developed. The issues of mathematical modeling of temperature fields of printed circuit boards are solved. A technique for detecting critically unstable elements of electronic equipment using a four-channel thermal field measurement system has been implemented.

Keywords: combined method, thermal calculation, mathematical model, software and hardware complex, temperature, printed circuit board, control control, reliability, operability

For citation: Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. The information-measuring and control system for thermophysical modeling of electronic equipment parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-2-3

Введение

Актуальность создания комбинированной методики расчета теплофизических параметров электронных блоков заключена в выработке наукоемких решений еще на стадии проектирования самой электронной аппаратуры [1, 2]. Данная задача обуславливает необходимость постоянного контроля и управления всеми техническими параметрами разрабатываемой электроники. Одним из основных критичных параметров радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является температурный режим работы. Управление и контроль температурным режимом, получение актуальной информации о температурах перегрева радиоэлектронных компонентов, выявление нестабильных элементов РЭА и создание новых конструкторских и технологических приемов отвода тепла от РЭА – это первостепенные задачи, решая которые, возможно достичь высокого уровня надежности РЭА и техники в целом [3, 4]. Научная новизна заключается в разработке комбинированного метода исследования печатных узлов электроники в части влияния на его тепловой режим топологии печатных проводников для учета металлизированных слоев печатной платы как элементов системы охлаждения. Таким образом, можно достичь совершенствования методик выявления нестабильных элементов РЭА, снижения температурной погрешности измерения и исследовать новые технологические приемы отвода тепла за счет увеличения количества металлизации топологии проводящих слоев печатной платы для повышения надежностных характеристик электронных блоков изделий [5, 6].

Основные задачи для достижения поставленной цели в работе:

- разработка математической модели температурного поля печатной платы, учитывающей влияние тепла от проводящих слоев, что позволит выявлять критичные к температуре элементы на ранних стадиях разработки;
- разработка комбинированного метода детектирования критически нестабильных элементов РЭА, отличающаяся улучшенным способом определения тепловых полей на всех участках печатных узлов;

– разработка четырехканальной системы измерения теплового поля, включающая в себя совместное применение как контактных, так и бесконтактных способов измерения тепловых полей печатного узла.

1. Математическая модель расчета температур для области с высокой концентрацией источников тепловыделений

Широкий спектр наукоемких отраслей, связанных с производством электроники, лег в основу создания методики анализа температурных полей на печатных платах. Разработки в областях технологии и автоматизации производства, а также обработки и хранения информации, стали технической базой и основой методологического обеспечения расчета температурного режима систем управления ракетно-космическими объектами, где к этой проблеме также добавляется радиационная и вибрационная загруженность электроники и постоянно увеличивающаяся плотность печатного монтажа в сочетании с высоким быстродействием и увеличенной функциональностью аппаратуры. Решение этих задач в условиях экстремальных внешних воздействий в высокой степени способствует повышению надежности электронной аппаратуры.

Следует учитывать тот факт, что основой надежности электронной аппаратуры является качественное исполнение печатного монтажа; это обуславливает широкий спектр технологических требований, предъявляемых к производству электроники, что, в свою очередь, дает вектор развития индивидуальных технических решений. Согласно технологии изготовления печатных плат их состав включает в себя поочередное спекание диэлектрических и проводящих слоев. Модель, разработанная по вышеуказанной технологии, в первом приближении представляет собой материал с анизотропными свойствами и при проведении математического моделирования полученная конструкция не имеет неоднородности и различия в теплопроводности разнородных участков печатной платы. При этом не учитывается топология проводящего рисунка, это в результате может давать большую погрешность вычислений, что, в свою очередь, оказывает большое влияние на точность определения тепловых полей и, как следствие, на надежность функционирования печатного узла.

Одной из функций печатных плат является их конструктивная основа радиоэлектронных компонентов, а также монтажная подложка для электро-радиоэлементов. В связи с тем что скорость обработки информации соизмерима со скоростью распространения информации в линиях связи, вышеперечисленные явления являются одними из определяющих факторов, сопутствующих микроминиатюризации электронной аппаратуры, ее функциональности и, как следствие, надежности всего устройства в целом. Быстро развивающееся производство печатных плат, в котором одно поколение сменяет другое каждые один-три года вслед за развитием электронной компонентной базы, позволяет с высокой степенью интеграции применять новые технологии создания печатных плат, которые постоянно дополняются новыми приемами и операциями, а их возможности расширяются за счет использования прецизионного оборудования, более качественных материалов и инструментов. Поэтому материальные и интеллектуальные инновации наиболее активно внедряются в индустрию печатных плат, что стало неременным условием

поддержания конкурентоспособности на отечественном и международном рынках электроники. После обширного рассмотрения методов и состояния технических средств измерений было принято решение о внедрении в процесс анализа состояния печатной платы нового метода обнаружения и диагностики параметров печатных плат в реальных условиях нагружения.

Первым этапом исследований будет являться разработка комбинированного метода обеспечения нормального теплового режима РЭА за счет применения точных средств измерения с программно-аппаратной поддержкой. Область применения разработанного метода включает весь комплекс изделий военно-промышленного комплекса и ракетно-космической техники, в которой применяется РЭА.

Для построения уравнения, описывающего распространение температурного поля, используем уравнение теплового баланса для дискретного элемента модели

$$\frac{q_x^+ - q_x^-}{dx} + \frac{q_y^+ - q_y^-}{dy} + \frac{q_z^+ - q_z^-}{dz} = 0,$$

где q_i^+ – проекция вектора теплоотдачи теплового потока на координатные оси; q_i^- – проекция вектора поглощения теплового потока на координатные оси; $\frac{q_x^+ - q_x^-}{dx}$ – тепловой поток в направлении x [Вт/м²]; $\frac{q_y^+ - q_y^-}{dy}$ – тепловой

поток в направлении y [Вт/м²]; $\frac{q_z^+ - q_z^-}{dz}$ – тепловой поток в направлении z [Вт/м²].

При наличии внутренних источников теплоты плотность теплового потока в плоской стенке линейно возрастает с увеличением x и равна

$$q_x = q_v x.$$

Из уравнения видно, что $q = 0$ при $x = 0$; $q_\delta = q_v \delta$ при $x = q$, т.е. достигает своего максимального значения. Согласно закону Фурье

$$q_x = q_v x = -\lambda \frac{dt}{dx}.$$

Произведя разделение переменных, получим

$$dt = -\frac{1}{\lambda} q_v x dx.$$

Проинтегрируем данное уравнение:

$$t_x = -\frac{1}{2\lambda} q_v x^2 + C.$$

Заметим, что постоянная интегрирования C определяется из граничных условий. При $x = 0$, $t = t_0 = C$ уравнение изменения температуры принимает вид

$$t_x = t_0 - q_v \frac{x^2}{2\lambda}.$$

Уравнение теплового баланса $t = t_c$ при $x = \delta$ в данном случае принимает вид:

$$t_0 - t_c = q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} = q\delta \frac{\delta}{2\lambda}.$$

Подставляя выражение для плотности теплового потока q , получим уравнение теплопроводности Фурье для трехмерной задачи:

$$q_x = -\Lambda_x \frac{dT}{dx}; \quad q_y = -\Lambda_y \frac{dT}{dy}; \quad q_z = -\Lambda_z \frac{dT}{dz}.$$

Заменяя выражение разностными аналогами и подставляя в уравнение Фурье в разностной форме, получим модель расчета температурного поля пластины:

$$\Lambda_x \frac{T_{i+1,k,l} - 2T_{i,k,l} + T_{i-1,k,l}}{h_x^2} + \Lambda_y \frac{T_{i+1,k,l} - 2T_{i,k,l} + T_{i-1,k,l}}{h_y^2} + \Lambda_z \frac{T_{i+1,k,l} - 2T_{i,k,l} + T_{i-1,k,l}}{h_z^2} = 0,$$

где $\Lambda_x, \Lambda_y, \Lambda_z$ – коэффициенты теплопроводности среды в направлениях координатных осей.

Тем самым получаем математическую модель температурного поля пластины, которая учитывает влияние теплопроводности проводящих слоев печатной платы во всех ее областях.

2. Блок-схема комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков

Предложенная комбинированная методика расчета теплофизических параметров электронных блоков базируется на алгоритмах контактного и бесконтактного измерения тепловых характеристик электронных блоков. При этом использование комбинированного алгоритма работы позволяет достичь более точного детектирования и прогнозирования работы электронных изделий и принять верное конструкторское и технологическое решение уже на стадии проектирования электронной аппаратуры. Рассмотрим основные элементы алгоритма работы предложенной методики, представленной на рис. 1.

После определения основы, составляющей конструкцию печатной платы, следующим этапом будет определение теплофизических параметров элементов конструкции и электронной части печатной платы. Для этого используется блок базы данных. Задав граничные условия для проведения расчета, определяем критически нестабильные элементы с помощью разработанного комбинированного метода расчета. При этом система позволяет использовать как контактный, так и бесконтактный способы детектирования температурных полей печатной платы, что в совокупности организует комбинированный

метод определения тепловых полей печатной платы. После работы основного блока идет архивирование данных и формирование отчета, в результате которого принимаются решения по способу организации и нормализации теплового режима печатной платы.

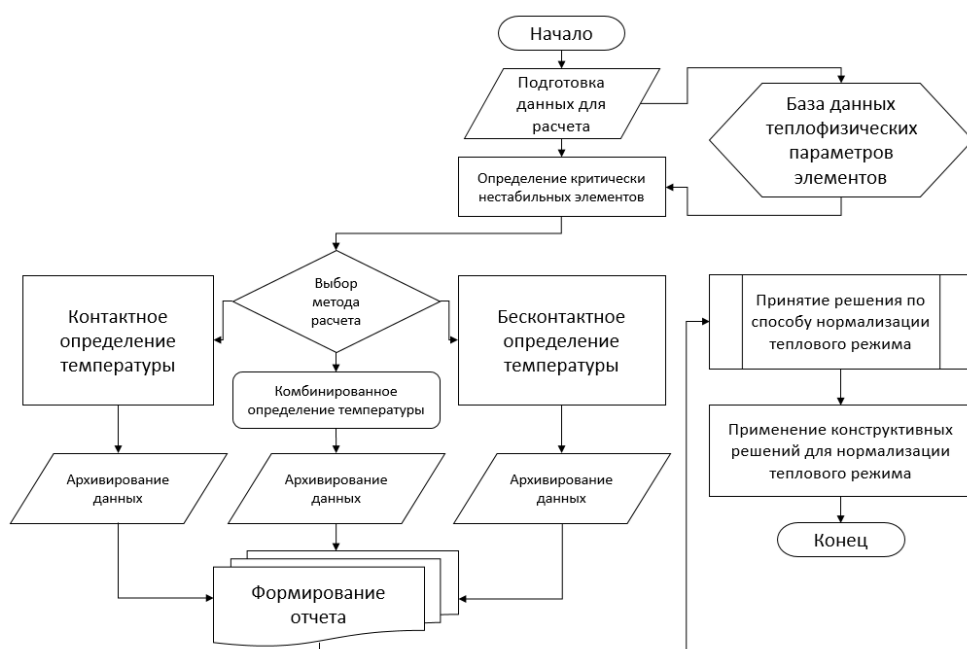


Рис. 1. Блок-схема алгоритма комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков

3. Структурная схема комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков с программно-аппаратной поддержкой

Следующим этапом является формирование структурной схемы комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков с программно-аппаратной поддержкой. Структурная схема представлена на рис. 2.

Основными блоками структурной схемы с программно-аппаратной поддержкой комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков являются блок синтеза данных, программно-аппаратный блок и функционально-измерительный блок. Вышеперечисленные блоки являются основой реализации комбинированного метода выявления критически нестабильных элементов РЭА. Данный метод отличается улучшенным способом определения тепловых полей на всех участках печатных узлов. В блоке синтеза данных после обработки технического задания осуществляется анализ разрабатываемой конструкции. В разрабатываемом электронном блоке определяются все геометрические размеры, включая не только корпус, но и толщину печатной платы, количество слоев, толщины слоев диэлектрического основания и металлизированного слоя. После определения геометрических параметров данные передаются в модуль подготовки электронной части. На

данном этапе происходит анализ всей электронной части разрабатываемого прибора для определения структурной целостности схемы. Данный этап является основным при теплофизическом конструировании, так как остальные модули в блоке синтеза данных имеют вспомогательный характер для управления критериями оценки теплового режима и базой данных тепловых конструкций электроники. Основными блоками для проведения анализа в комбинированном методе расчета теплофизических параметров являются программно-аппаратный и функционально-измерительный блоки. Программно-аппаратный блок осуществляет теплофизическое моделирование конструкции с определением критически нестабильных элементов конструкции. Функционально-измерительный блок осуществляет процесс сбора и передачи данных с помощью встроенной подсистемы индикации и локального управления, далее происходит детектирование температурных полей с помощью инфракрасных датчиков измерения температуры. В момент измерения печатный узел должен находиться под нагрузкой и, как минимум, на него должно быть подано напряжение питания. Для достижения максимально допустимой точности измерений печатный узел должен находиться в сигнальном режиме работы. Таким образом, реализован комбинированный метод расчета теплофизических параметров электронных блоков с программно-аппаратной поддержкой.

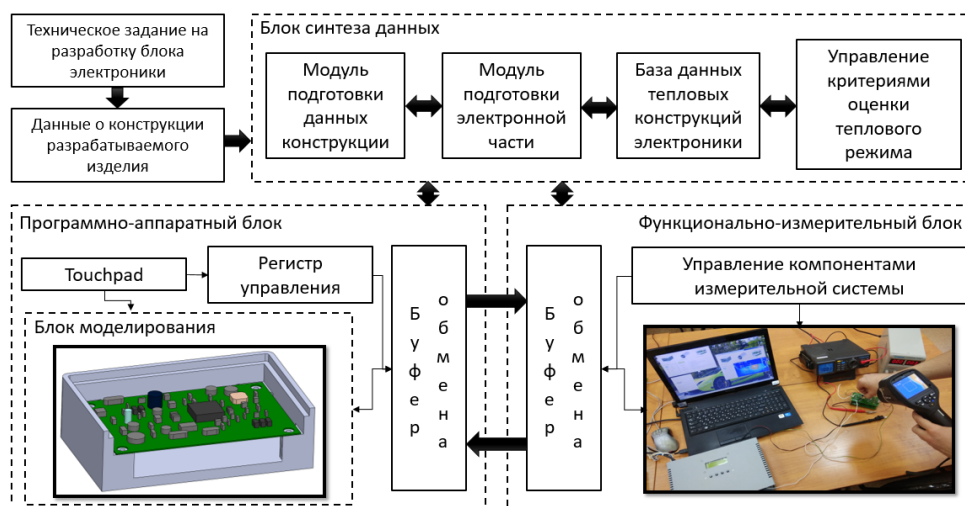


Рис. 2. Структурная схема комбинированного метода расчета теплофизических параметров электронных блоков с программно-аппаратной поддержкой

4. Результаты расчета теплового режима печатного узла

Примером использования разработанной методологии является экспериментальный расчет теплового режима блока электроники типовой конструкции РЭА. На рис. 3 представлена диаграмма значений температур для разных типов элементов в зависимости от используемого метода измерений.

Анализ диаграммы показал, что для активных и пассивных элементов электронной части блока показания значений температур значительно точнее определены при использовании комбинированного метода. Практическая значимость полученных результатов особо актуальна для полупроводнико-

вых интегральных микросхем, где в зависимости от выбранного метода измерений возможно получить более стабильные значения температур, характеризующие реальный температурный режим для критических элементов схемы. Таким образом, разработанный комбинированный метод расчета теплофизических параметров электронных блоков на основе модели температурного поля пластины за счет применения точных средств измерения с программно-аппаратной поддержкой позволяет увеличить точность определения теплового поля печатного узла до 5 %.

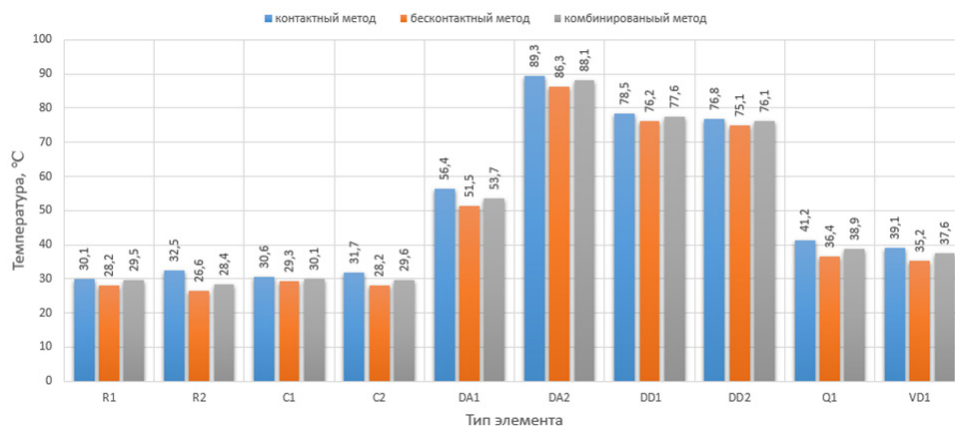


Рис. 3. Сравнительная диаграмма определения температуры для разных типов элементов в зависимости от используемого метода

Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан комбинированный метод расчета теплофизических параметров электронных блоков на основе модели температурного поля пластины. Были решены задачи по разработке математической модели температурного поля пластины, учитывающей влияние теплопроводности проводящих слоев печатной платы, по разработке комбинированного метода выявления критически нестабильных элементов РЭА и разработке четырехканальной системы измерения теплового поля, включающей в себя совместное применение как контактных, так и бесконтактных способов измерения тепловых полей печатного узла. Полученных результатов удалось достичь за счет применения комбинированного метода измерения температур с последующей передачей данных в программно-аппаратную часть в виде распределения температурных полей с последующим их анализом при помощи разработанной математической модели температурного поля пластины и расчета температур для области печатного узла с высокой концентрацией критичных к температуре элементов с увеличением точности определения теплового поля печатного узла до 5 %.

Список литературы

1. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Rybakov I. M., Dolotin A. I., Brostilov S. A, Principles of Mathematical Logic for Multi-Agent Control of Intellectual Mobile Objects and Systems in the Dynamic Environment // International Seminar on Electron Devices Design and Production. Prague; Czech Republic. doi:10.1109/SED.2019.8798466

- Godnev A. G., Lysenko A. V., Yurkov N. K., Rybakov I. M., Deryabin D. V. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. Moscow; Russian Federation, 2020. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067435
- Сидняев Н. И., Уракова К. А. Метод определения периодичности диагностирования космических систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 47–67.
- Зеленцов Б. П. Модель надежности объекта при недостоверном контроле // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 46–54.
- Зинкевич А. Е. Расчет тепловых зазоров между печатной площадкой и экраном при проектировании печатных плат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 28–32.
- Рыбаков И. М. Модель надежности характеристик элементов в зависимости от большого количества внешних и внутренних воздействий // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 134–135.

References

- Grishko A.K., Kochegarov I.I., Rybakov I.M., Dolotin A.I., Brostilov S.A. Principles of Mathematical Logic for Multi-Agent Control of Intellectual Mobile Objects and Systems in the Dynamic Environment. *International Seminar on Electron Devices Design and Production*. Prague; Czech Republic. doi:10.1109/SED.2019.8798466
- Godnev A.G., Lysenko A.V., Yurkov N.K., Rybakov I.M., Deryabin D.V. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. Moscow; Russian Federation, 2020. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067435
- Sidnyaev N.I., Urakova K.A. Method for determining the frequency of diagnosing space systems according to the permissible level of probability of no-failure operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):47–67. (In Russ.)
- Zelentsov B.P. Reliability model of an object with unreliable control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):46–54. (In Russ.)
- Zinkevich A.E. Calculation of thermal gaps between the printed pad and the screen when designing printed circuit boards. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2019;2:28–32. (In Russ.)
- Rybakov I.M. Model of reliability characteristics of elements depending on a large number of external and internal influences. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International symposium Reliability and Quality*. 2019;1:134–135. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Михайлович Рыбаков

кандидат технических наук, доцент
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rybakov_im@mail.ru

И'уа М. Рыбаков

Candidate of engineering sciences, associate
professor of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная,40)

E-mail: lysenko_av@bk.ru

Aleksey V. Lysenko

Candidate of engineering sciences, associate
professor of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Бростилов

кандидат технических наук, доцент
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная,40)

E-mail: brostilov@yandex.ru

Sergey A. Brostilov

Candidate of engineering sciences, associate
professor of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Юлия Евгеньевна Герасимова

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная,40)

E-mail: gerasimova.julia1981@yandex.ru

Yuliya E. Gerasimova

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 08.04.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.04.2022

Принята к публикации / Accepted 06.05.2022