

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ САМОВОСТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

А. А. Рыжов¹, А. В. Лысенко², И. М. Рыбаков³, В. С. Мамонтов⁴, Н. К. Юрков⁵

¹ Пензенский научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

^{2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ pgufr@mail.ru, ² lysenko_av@bk.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ golden.aquarius@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена специфика изготовления самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерной сшивки. *Материалы и методы.* Оценивается радиационное сшивание полимеров на фоне воздействия ионизирующего излучения с образованием поперечных химических связей между макромолекулами, приводящее к образованию пространственной сетки. *Результаты.* На основании исследования, анализа и проведенных работ была определена структурная схема специального технологического процесса изготовления самовосстанавливающихся предохранителей и его основные операции. *Выводы.* В процессе изготовления пробных образцов и опытных партий были отработаны специальные технологические процессы, такие как: пайка выводов к резистивным платам; изготовление резистивных плат; лазерная маркировка; контроль электрических параметров.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся предохранитель, радиационное сшивание, полимерное сшивание, резистивные платы

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Рыжов А. А., Лысенко А. В., Рыбаков И. М., Мамонтов В. С., Юрков Н. К. К проблеме повышения надежности самовосстанавливающихся предохранителей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 111–118. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-10

TO THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY OF SELF-REPAIRING FUSES

A.A. Ryzhov¹, A.V. Lysenko², I.M. Rybakov³, V.S. Mamontov⁴, N.K. Yurkov⁵

¹ Penza Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

^{2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

¹ pgufr@mail.ru, ² lysenko_av@bk.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ golden.aquarius@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The specifics of manufacturing self-healing fuses based on polymer crosslinking are considered. *Materials and methods.* Radiation crosslinking of polymers is evaluated against the background of exposure to ionizing radiation with the formation of transverse chemical bonds between macromolecules, leading to the formation of a spatial grid. *Results.* Based on the research, analysis and work carried out, a block diagram of a special technological process for manufacturing self-healing fuses and its main operations was determined. *Conclusions.* During the production of test samples and experimental batches, special technological processes were worked out, such as: soldering of terminals to resistive boards; manufacturing of resistive boards; laser marking; control of electrical parameters.

Keywords: self-healing fuse, radiation crosslinking, polymer crosslinking, resistive boards

Financing: the research has been realized at the expense of the grant of the Russian Science Foundation the project № 22-29-20318, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20318>

For citation: Ryzhov A.A., Lysenko A.V., Rybakov I.M., Mamontov V.S., Yurkov N.K. To the problem of increasing the reliability of self-repairing fuses. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4): 111–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-10

Введение

При выполнении операции «Пайка выводов к резистивным платам», самовосстанавливающихся предохранителей (СВП) подвергается воздействию температуры, превышающей температуру фазовой трансформации в полимерно-углеродном композите. При этом происходит значительное увеличение сопротивления предохранителя, которое носит обратимый характер. С целью ускорения возврата сопротивления к первоначальному значению и дальнейшей стабильности величины сопротивления необходима термообработка изделий [1–3].

При изготовлении опытных образцов был применен следующий режим термообработки: выдержка при максимально допустимой рабочей температуре несколько часов, а также проведение операции «термоциклирование» – несколько циклов с чередованием температур.

При анализе всех зарубежных аналогов производители СВП в качестве токопроводящих электродов для равномерного распределения электрического потенциала по всей площади используют медные пластины [4–6].

Радиационная обработка

Сшитыми (сетчатыми) полимерами называются высокомолекулярные соединения, имеющие сложную макромолекулярную структуру, которая образует единую пространственную сетку [7]. Сшитый полиэтилен получается перекисом, силаном и радиацией. Первые два метода изготовления, в частности первый, приводят к образованию гидроперекисной группы в композитах, способствующей сильному окислению полиэтилена, и к значительным увеличению контактного сопротивления, недопустимого для СВП.

Далее одной из основных технических операций при изготовлении резисторов для использования в качестве СВП является радиационная сшивка полимер-углеродных композитов, которая позволяет стабилизировать основные технические параметры СВП, его механические и химические свойства.

Большое значение для осуществления радиационной сшивки имеет также способность свободной валентности макрорадикала или заряда макроиона к внутри- и межмолекулярной миграции. В кристаллических областях образуются связи между участками одной и той же молекулы (внутримолекулярные связи), а в аморфных – между соседними макромолекулами (межмолекулярные связи). Внутримолекулярные связи называют неэффективными, так как они не участвуют в образовании пространственной сетки. Вследствие этого радиационная сшивка высококристаллического полиэтилена (полиэтилена высокой плотности) протекает менее эффективно, чем полиэтилена низкой плотности [4].

Скорость радиационной сшивки зависит от температуры облучения, особенно в области перехода полимера из одного физического состояния во второе (температуру стеклования, плавления и др.). С повышением температур скорость распада макромолекул возрастает вследствие увеличения подвижности макроцепей [8–10].

Эффективность сшивки радиации оценивается количеством продольных связей, образованных в полимерах при поглощениях 100 эВ излучения [1].

В случае радиосшивки, если на полиэтиленовые связи воздействует поток электронов или лучей, они рвутся. Углерод обретает свободную связь и объединяет свободную связь в соседнюю молекулярную цепочку, создавая таким образом поперечные межмолекулярные связи на аморфном участке. Относительное число образуемых поперечных соединений в единицу объема полипропилена определяется «степенью сцепления» – это отношения массы полипропилена, охваченного трехмерными соединениями, к общей массе полипропилена.

По сравнению с другими способами сшивки полимеров радиационная сшивка не требует «вещественного» агента сшивки, это позволяет получить полимеры, которые обладают улучшенной комплексностью электрических, физических и механических свойств. На практике чаще всего используется радиационная сшивка полиэтилена – например, чтобы получить нагревостойкую электроизоляцию, химически стойкий упаковочный материал.

Когда деформируется сшитый полиэтилен, поливинилденфторид и другие частично кристаллические полимеры, пространственные сетки испытывают напряжение, под воздействием которого система стремится вернуться в равновесие [11]. Такое явление, называемое эффектом памяти, используется при изготовлении полиэтиленовых термоусадочных пленок, пластин, листов.

При проведении сшивки, было выявлено, что величина поглощенной дозы влияет в первую очередь на величину скачка сопротивления самовосстанавливающегося предохранителя при фазовой трансформации, происходящей в теле СВП.

На рис. 1 приведена зависимость «позисторного эффекта» на образцах СВП, выполненная для исследований и анализа.

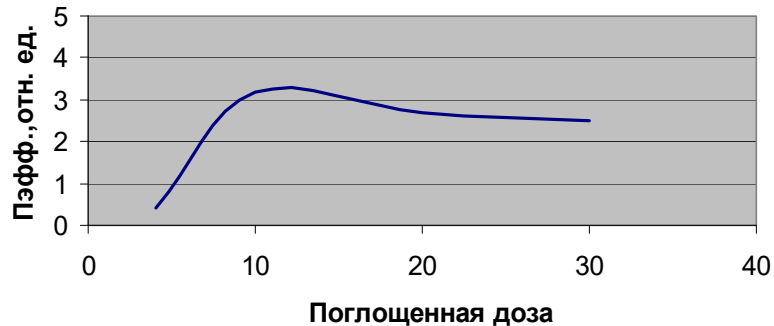


Рис. 1. Зависимость «позисторного эффекта» от величины поглощенной дозы γ – излучения

На основании представленных данных многочисленной патентной информации, оптимальной дозой облучения следует считать величину порядка 5–50 Мрад, достаточной для обеспечения оптимальных физико-механических характеристик и сохранения «позисторного эффекта».

Изготовление резистивных плат

Лучшим способом формирования электродов для токопровода является горячая прессовка медного волокна на полимерных углеродных композитах. Процессом является укладывание заготовки из медной фольги в разогретой пресс-форме. Диск из КПУ (композит полимерно-углеродный) помещается на него и сверху кладется вторая фольга. Пресс-форма устанавливается в нагретый гидравлический пресс, который сжимает пресс-форму, создавая давление на диск, и затем пресс-форма охлаждается без снятия нагрузки. Далее заготовка с опрессованными электродами изымается из пресс-формы и разрезается на резистивные платы.

Общий внешний вид заготовок с опрессованными электродами и нарезанные резистивные платы изображены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Общий внешний вид заготовок



Рис. 3. Внешний вид заготовок с опрессованными электродами

Для хорошего сцепления токопроводящих электродов с полимерно-углеродным композитом и получения горячим прессованием качественных заготовок без вздутий и отслоений необходимо использовать медную фольгу с односторонним адгезионным слоем – высокоразвитой шероховатостью.

Пайка выводов к резистивной плате

Для установки СВП электронной аппаратуры на токопроводящие электроды резисторной платы прилагаются выводы разных конфигураций по конструкции.

Благодаря специальным свойствам полимерного и углеродного композита его длительное перегревание не допускается [12, 13]. Таким образом, традиционные приемы пайки при пайке паяльника и окунания в припойный расплав в этом случае недопустимы, поскольку температура паяльника и припойного расплава в ванне для пайки должна составлять не более 250 °С. В процессе исследования видов внешней пайки подходящий был выбран способ внешней пайки с помощью припойной пасты.

Паста для пропитки наносится на поверхности смазанных поверхностей толщиной не более 1 мм, а затем соединяется и кратковременно нагревается на приспособление для пропитки выводов на несколько минут. Инструмент для пайки приведен на рис. 4.



Рис. 4. Приспособление для пайки выводов

Клей расплавляется при нагревании, обеспечивая надежное соединение деталей. С учетом того, что процесс синтеза является относительно коротким и протекает при температурах, не превышающих 250 °С, этот метод крепления клеем к плате сопротивления используется для создания СВП.

В результате изучения и исследования методов пайки для КПУ был разработан технологический процесс на пайку выводов к резистивным платам.

Контроль электрических параметров

При производстве СВП особое значение имеет метрологическое обеспечение измерения их электрических параметров.

В табл. 1 приведены основные электрические параметры СВП, подлежащие контролю в процессе их изготовления.

Таблица 1

Основные электрические параметры СВП

Наименование параметра	Буквенное обозначение	Допускаемые границы	
		не менее	не более
Номинальное сопротивление, Ом	$R_{ном}$	0,05	5,00
Ток удержания, А	$I_{уд.}$	0,10	3,40
Ток размыкания, А	$I_{разм.}$	0,20	6,80
Максимальное время размыкания, с	$t_{ср}$	0,02	25,00

Для измерения некоторых параметров, например, номинального сопротивления, могут быть выбраны соответствующие средства измерения, которые удовлетворяют заданным требованиям.

Однако к СВП предъявляются некоторые особые требования, такие как ток удержания, ток размыкания и время размыкания [7]. Эти параметры могут быть измерены с помощью многофункционального измерителя времени срабатывания, который позволяет измерять параметры воздействия СВП на ток удержания, время отключения при воздействии тока размыкания и пятикратное превышение тока удержания.

Схема установки измерения времени работы приведена на рис. 6.

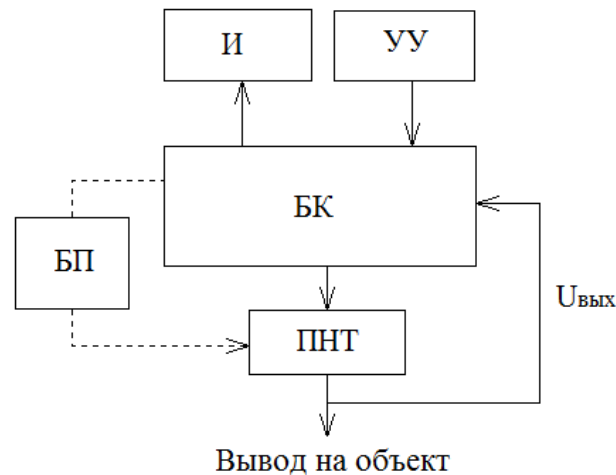


Рис. 6. Структурная схема установки для измерения времени срабатывания:
 БК – блок комбинированный; ПНТ – преобразователь напряжения в ток;
 БП – блок питания; И – индикатор; УУ – устройство управления

Принцип действия схемы следующий. Благодаря устройству управления (УУ) оператор выбирает режимы для задания максимальной мощности и тестовой мощности. Напряжение и ток могут быть скорректированы клавишами при помощи индикатора (И). В соответствии с заданным значением тока комбинированный блок (БК) создает напряжение, преобразуемое преобразователем напряжения в напряжение ПНТ, подавленное на контролируемом резисторе.

В то же время значение напряжения на СВП постоянно контролируется до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень.

Время действия размыкания характеризуется интервалом между моментом передачи тестового тока на СВП, а также моментом того, как на резистор достигается падение напряжения, соответствующего заданному максимуму.

Результаты измерения времени работы отображаются в индикаторе разрешающей способности до 0,001 с. Предел допускает абсолютную ошибку измерения времени работы:

- в диапазоне 0,001–1 с равен $\pm 0,005$ с;
- в диапазоне 1–20 с равен $\pm 0,5$ с;
- в диапазоне 20–100 с равен ± 1 с.

СВП, выдержавшие отбраковочные испытания, передаются на контроль величины сопротивления. Если сопротивление после испытаний не превышает ± 3 % от номинального диапазона сопротивлений, СВП считаются годными [4].

Поведенческая модель СВП

В ходе выполнения работы была разработана поведенческая модель изделия и описана логика его функционирования для использования в системах автоматизированного проектирования.

При разработке поведенческих моделей учтены предпочтительные типы и версии электронных моделей для изделий ЭКБ, применяемые в системах проектирования аппаратуры, для аналоговых и пассивных изделий – модели *SPICE*. Библиотечный вариант состоит из следующих составных частей:

- 1) условное графическое обозначение (УГО);
- 2) посадочное место (Footprint);
- 3) 3D-модель изделия.

В программе создано УГО для всех вариантов исполнения СВП. Было разработано условное графическое обозначение элемента.

Предпочтительные САПР: *MicroCap, Aldec Active VHDL, CST Studio, Modelsim, Altium Designer, ADS, AWR Design Environment*.

Были разработаны посадочные места и 3D-модели элементов для различных вариантов исполнения СВП.

Была проведена верификация разработанных моделей, заключающаяся в разработке и проверке корректности получаемых посадочных мест и 3D-моделей.

Также были обозначены пределы применимости поведенческой модели. Модель предназначена для использования в программном пакете Altium Designer для разработки схем электрических принципиальных печатных плат, включая подготовку к производству, моделированию низкочастотных параметров (*SPICE*-модель). Кроме того, моделирование может выполняться в пакете *MicroCAP*.

Далее определяем зависимости времени срабатывания предохранителей от тока перегрузки и тока удержания от температуры окружающей среды.

Измерение зависимости тока удерживающего резистора от температуры в окружающей среде осуществляется с помощью включения схемы, представленной на рис. 7.

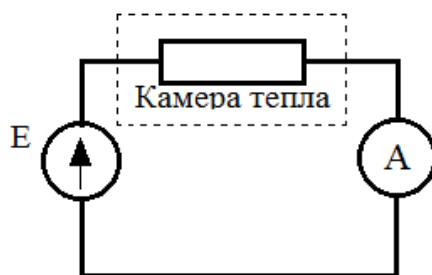


Рис. 7. Схема для снятия температурной зависимости

Заключение

Был произведен анализ и исследование видов сшивки полимеров, выбран наиболее подходящий – радиационная сшивка. Подобраны режимы, необходимая доза облучения и время.

При изготовлении опытных образцов был применен следующий режим термообработки: выдержка при максимально допустимой рабочей температуре несколько часов, а также проведение операции «термоциклирование» – несколько циклов с чередованием температур. Выполнив операции с экспериментальными образцами, можно сделать вывод, что операции термообработки и термоциклирования необходимы для наших образцов для стабилизации технических параметров.

Для хорошего сцепления токопроводящих электродов с полимерно-углеродным композитом и получения горячим прессованием качественных заготовок без вздутий и отслоений, необходимо использовать медную фольгу с односторонним адгезионным слоем – высокоразвитой шероховатостью.

Благодаря особым свойствам полимерно-углеродных композиционных материалов ему не разрешается перегреваться в течение длительного времени. Следовательно, традиционный метод пайки клеммы паяльником или погружения в расплав припоя в данном случае неприемлем, поскольку температура наконечника паяльника или расплава припоя в паяльной ванне должна составлять не менее 250 °С.

В процессе изучения видов пайки внешних выводов подходящим был выбран метод пайки припойными пастами. В результате изучения и исследования методов пайки для КПУ был разработан технологический процесс на пайку выводов к резистивным платам.

Список литературы

1. Каминская Т. П., Подшибякин С. В. Сшивка полимерно-углеродных композитов для самовосстанавливающихся предохранителей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 143–144.
2. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V. [et al.]. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. 2018. P. 105–112.
3. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 2016. P. 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798
4. Домкин К. И. Влияние сшивки на электрофизические свойства самовосстанавливающихся предохранителей // Ломоносов-2011 : материалы Междунар. молодежного научного форума / отв. ред. А. И. Андреев, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, М. В. Чистякова. М. : МАКС Пресс, 2011.

5. Белов А. Г., Баннов В. Я., Трусов В. А. [и др.]. Влагозащитное покрытие печатных узлов в датчике утечки воды // *Современные информационные технологии*. 2014. № 19. С. 265–272.
6. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Методы повышения точности прогнозирования показателей надежности наукоемких сложных электронных систем // *Современные информационные технологии*. 2014. № 19. С. 183–187.
7. Каминская Т. П., Недорезов В. Г., Домкин К. И., Шлыкова Л. А. Полимерные самовосстанавливающиеся предохранители в чип исполнении // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2009. Т. 2. С. 197–198.
8. Надырбеков Г. Ж., Григорьев А. В., Кочегаров И. И. [и др.]. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2017. Т. 2. С. 11–13.
9. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2014. Т. 1. С. 184–187.
10. Лысенко А. В. Анализ современных систем управления проектами // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2012. Т. 1. С. 371–372.
11. Домкин К. И., Каминская Т. П., Миронова Н. Д. Электрические характеристики самовосстанавливающихся предохранителей // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2008. Т. 2. С. 156–158. EDN: NDPRGZ
12. Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Кочетков А. А. Моделирование и расчет зубчатого соединения для универсального устройства замера тяги винта беспилотного летательного аппарата // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. № 4. С. 76–81.
13. Горячев Н. В., Лысенко А. В., Граб И. Д., Юрков Н. К. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2012. Т. 2. С. 242–243.

References

1. Kaminskaya T.P., Podshibyakin S.V. Crosslinking of polymer-carbon composites for self-healing fuses. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:143–144. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Grishko A.K., Lysenko A.V. et al. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018*. 2018:105–112.
3. Yurkov N.K., Tankov G.V., Lysenko A.V., Trusov V.A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*. 2016:416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798
4. Domkin K.I. The effect of crosslinking on the electrophysical properties of self-healing fuses. *Lomonosov-2011: materialy Mezhdunar. molodezhnogo nauchnogo foruma = Lomonosov-2011 : materials of the International Journal. youth Scientific Forum*. Moscow: MAKS Press, 2011. (In Russ.)
5. Belov A.G., Bannov V.Ya., Trusov V.A. et al. Moisture-proof coating of printed components in a water leakage sensor. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):265–272. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Zatylykin A.V., Poleskiy S.N. et al. Methods for improving the accuracy of forecasting reliability indicators of high-tech complex electronic systems. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):183–187. (In Russ.)
7. Kaminskaya T.P., Nedorezov V.G., Domkin K.I., Shlykova L.A. Polymer self-healing fuses in chip execution. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2009;2:197–198. (In Russ.)
8. Nadyrbekov G.Zh., Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I. et al. Structural description of the blurring of the image of a circular mark during reciprocating vibrational displacement of the material point under study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:11–13. (In Russ.)
9. Yurkov N.K., Zatylykin A.V., Poleskiy S.N. et al. A functional model of information technology for ensuring reliability of complex electronic systems taking into account external influences. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:184–187. (In Russ.)
10. Lysenko A.V. Analysis of modern project management systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:371–372. (In Russ.)
11. Domkin K.I., Kaminskaya T.P., Mironova N.D. Electrical characteristics of self-repairing fuses. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:156–158. (In Russ.). EDN: NDPRGZ

12. Ergaliev D.S., Zuev D.V., Kochetkov A.A. Modeling and calculation of a toothed joint for a universal device for measuring the thrust of an unmanned aerial vehicle propeller. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):76–81. (In Russ.)
13. Goryachev N.V., Lysenko A.V., Grab I.D., Yurkov N.K. The program of engineering calculation of the overheating temperature of the crystal of an electric radiocomponent and its heat sink. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;2:242–243. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Рыжов

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: pgufr@mail.ru

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
конструирования и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

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

Виталий Сергеевич Мамонтов

доцент кафедры конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golden.aquarius@mail.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Aleksander A. Ryzhov

Candidate of technical sciences, deputy director general
for scientific and technical development,
Penza Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozov street, Penza, Russia)

Aleksey V. Lysenko

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

Ilya M. Rybakov

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

Vitaliy S. Mamontov

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

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
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 20.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 05.09.2023

Принята к публикации/Accepted 21.09.2023