

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14

УДК 658.512

ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

С.Г. Семенов, В.Н. Гриднев, Н.А. Сергеева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: info@iu4.bmstu.ru

Рассмотрены методы оценки температурных режимов и их влияние на надежность электронной аппаратуры. Проведен анализ отказов элементов, возникающих вследствие нарушения теплового режима, показаны возможные причины их возникновения. Продемонстрирована применимость методов бесконтактной тепловизионной диагностики для выявления скрытых дефектов, приводящих к нарушениям теплового режима и к параметрическим или внезапным отказам в элементах электронной аппаратуры.

Ключевые слова: тепловизор, инфракрасная термография, скрытые дефекты, параметрические отказы.

INFRARED THERMOGRAPHY METHODS OF ASSESSING TEMPERATURE EFFECT ON RELIABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT

S.G. Sementsov, V.N. Gridnev, N.A. Sergeeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: info@iu4.bmstu.ru

The paper discusses the methods of estimating temperature regimes and their impact on electronic devices reliability. The analysis of component failures is conducted. They occur due to violation of the thermal regime. Possible causes of their occurrences are presented. We demonstrated how the methods of non-contact thermal imaging diagnostics are used to detect latent defects that result in violations of the thermal regime as well as in parametric or sudden failures in electronic equipment components.

Keywords: thermal imaging, infrared thermography, latent defects, parametric failures.

Введение. Надежность изделий электронной техники на уровне отдельных плат, модулей и ячеек в значительной мере определяется надежностью используемой элементной базы, т.е. электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и режимами их работы, соблюдением технологии сборки и качеством используемых материалов. Наличие скрытых дефектов в ЭРЭ, нарушения технологии сборочных операций могут привести к

внезапным или параметрическим отказам, связанным зачастую с термическим разрушением или перегревом элементов, нарушением теплового режима модуля или ячейки. В таком случае входной контроль ЭРЭ не всегда может обеспечить надежность работы всего модуля, поскольку не учитывает разброс параметров элементов обвязки, колебаний питающих напряжений и т.д. Выходной контроль готовых модулей сводится, как правило, к измерениям заданных параметров (токов, напряжений) в контрольных точках. В то же время при наличии скрытых дефектов параметрические или внезапные отказы, связанные с перегревом, могут возникнуть даже в номинальных режимах работы модуля.

В современных условиях совершенствование методов бесконтактной тепловизионной диагностики, снижение стоимости и расширение функциональных возможностей оборудования позволяет все чаще применять их для исследования тепловых режимов электронной аппаратуры.

В настоящей работе предпринята попытка продемонстрировать эффективность тепловизионных методов диагностики для выявления скрытых дефектов и оценить влияние тепловых режимов на надежность электронной аппаратуры.

Модель интенсивности отказов компонентов аппаратуры в зависимости от температуры. Рассмотрим зависимость интенсивности отказов компонентов от температуры для случая, когда отказ вызывается термически активируемыми процессами. Допустим, что компонент имеет запас прочности ΔX при данной нагрузке по параметру X , а уменьшение запаса прочности происходит вследствие протекания некоторого термически активируемого процесса. Компонент откажет, когда запас прочности ΔX уменьшится до нуля. При этом наработка до отказа компонента определяется по отношению [1]: $t_n = \Delta X / V_n$, где V_n — скорость уменьшения запаса прочности.

Усредняя наработки до отказа множества компонентов данного типа, работающих при одинаковых нагрузках, получаем среднюю наработку до отказа $t_{cp} = \Delta X_{cp} / V_n$, где ΔX_{cp} — средний запас прочности компонентов.

В соответствии с приведенной выше формулой имеем $\lambda = \frac{1}{t_{cp}} = \frac{V_n}{\Delta X_{cp}} = \frac{V_0}{\Delta X_{cp}} e^{-W_n/(kT)}$. Таким образом, с увеличением температуры интенсивность отказов экспоненциально возрастает. На практике отказ компонента может определяться многими термически активируемыми процессами. При этом экспоненциальный характер зависимости интенсивности отказов от температуры сохраняется [1].

Рассмотрим общую схему формирования отказа изделия (рис. 1), когда, например, различные процессы повреждения компонентов изделия приводят к изменению во времени выходного параметра Y .

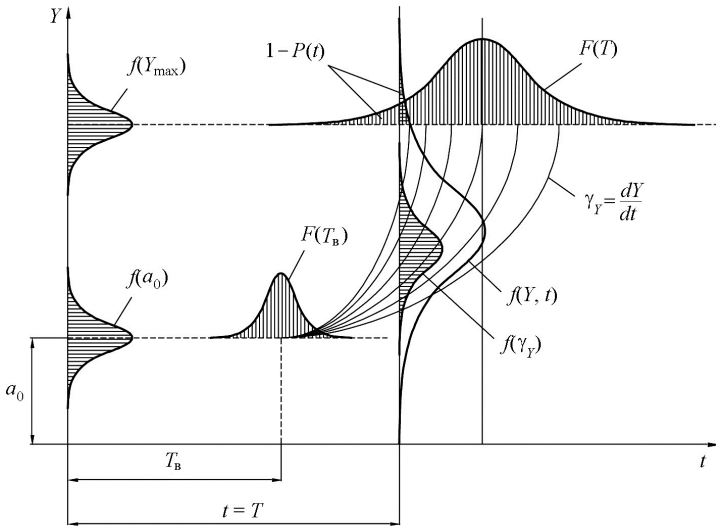


Рис. 1. Общая схема формирования отказа ЭРЭ

Отказ возникает при достижении параметром своего предельно допустимого значения Y_{\max} , что происходит через некоторый случайный промежуток времени работы изделия. На схеме показаны основные этапы формирования закона распределения $f(t)$. Вначале имеет место рассеивание параметров изделия $f(a)$ относительно своего математического ожидания a_0 . Это связано как с рассеиванием значений начальных показателей нового изделия, так и с возможностью его работы при различных режимах (действии вибраций, тепловых полей и т.п.), которые проявляются сразу же при работе изделия. Далее на ухудшение параметров изделия в процессе эксплуатации влияют медленно протекающие процессы деградации (старения) компонентов. В общем случае процесс изменения параметра Y может начаться через некоторый промежуток времени T_b , который также является случайной величиной и связан с накоплением повреждений и действием внешних дестабилизирующих факторов. Процесс изменения параметра Y со скоростью γ_Y случаен и зависит от изменения повреждений отдельных компонентов изделия ($\gamma_1 \dots \gamma_k$).

В результате всех перечисленных явлений происходит формирование закона распределения $f(Y, t)$, который определяет вероятность выхода параметра Y за границу Y_{\max} , т.е. вероятность отказа $F(t) = 1 - P(t)$.

В общем виде приведенная схема описывает процесс возникновения отказа и при частных значениях входящих параметров отказов изделия [2]. Так, если процесс изменения параметра Y начинается сразу ($T_b = 0$), то получается схема возникновения параметрического постепенного отказа. Если в процессе формирования отказа основную роль играет возникновение (зарождение) процесса повреждения, т.е.

функция $f(T_B)$, а затем процесс протекает с большой интенсивностью $Y(t) \rightarrow \infty$, то это модель внезапного отказа.

Особенности бесконтактного теплового метода контроля. Исследования возможности применения бесконтактного теплового метода для контроля электронной аппаратуры начали проводиться еще в 1970-х годах, а первые попытки промышленного применения были предприняты в 1980-х годах. Одной из первых компаний, начавших внедрять бесконтактный тепловой контроль, была фирма IBM, которая применяла тепловизор для проверки качества конструкций при разработке источников питания. Однако в 1980-х годах уровень развития тепловизионной техники еще не обеспечивал необходимого для контроля отдельных ЭРЭ разрешения. Кроме того, камеры были громоздкими, а процедура теплового контроля трудоемкой и неудобной. В 1990-х годах с развитием тепловизионной техники, когда на смену громоздким и малочувствительным камерам пришли более компактные чувствительные модели тепловизоров, контактный метод был практически полностью вытеснен бесконтактным [3].

Бесконтактный тепловой контроль во многих случаях является конкурентом классическому методу контроля с помощью измерения электрических параметров схемы. В то же время тепловой метод контроля для поиска неисправностей в электронных устройствах более оперативен: для поиска неисправности классическим методом необходимо просмотреть множество узлов, прежде чем будет найден узел с отклоняющимися характеристиками. Кроме того, даже после нахождения узла с неисправностью, необходимо проанализировать множество компонентов, связанных с этим узлом, для локализации конкретного неисправного компонента. При использовании тепловизора на экране неисправный компонент будет сразу виден по тепловой аномалии в термограмме. Тепловой метод эффективнее при обнаружении компонентов со скрытыми дефектами, поскольку такие компоненты могут не влиять на электрические характеристики схемы, однако через некоторое время выйти из строя.

Метод бесконтактного теплового контроля применяется в электронных устройствах как вид неразрушающего контроля для поиска дефектов в материалах — активный тепловой контроль и как способ визуализации тепловых полей готовых изделий в естественных условиях работы — пассивный тепловой контроль.

При активном тепловом контроле для поиска дефектов в материалах используется внешняя стимуляция объекта контроля тепловыми импульсами, после чего по прошествии заданного времени снимается термограмма, на которой температурный сигнал от внутреннего дефекта достигает максимума.

Однако при производстве электронной аппаратуры чаще применяют пассивный тепловой контроль для визуализации тепловых полей готовых изделий при поиске неисправностей и скрытых дефектов.

Правильный выбор измерительного оборудования имеет решающее значение для получения достоверных данных при организации процедуры теплового контроля. При всей сложности изделий электроники как объекта теплового контроля, при большой плотности упаковки и маленьких размерах контролируемых элементов на первый план выходят технические характеристики используемого оборудования.

Важнейшая характеристика тепловизоров, применяемых для бесконтактного контроля, — рабочий спектральный диапазон 3...5 или 8...13 мкм [3]. Каждый диапазон имеет свои особенности и несет значительный объем диагностической информации. Важнейшими критериями выбора наиболее информативного диапазона являются коэффициенты излучения объектов контроля, мощность излучения объектов, тепловой контраст, характеристики приемников излучения.

Энергия инфракрасного излучения, испускаемого объектом при заданной температуре, наиболее велика, когда коэффициент излучения объекта близок к единице (черные тела). Многие материалы имеют изменяющийся по спектру коэффициент излучения (например, он может варьироваться от 0,3 до 0,9 в пределах одной электронной ячейки), поэтому существуют области длин волн, в которых значения коэффициента излучения более благоприятны для проведения измерений. На основе кривых изменения спектрального коэффициента излучения рассматриваемого материала можно сделать вывод об эффективности использования того или иного диапазона.

Термографические исследования поверхностей материалов, коэффициент излучения которых меньше 0,2 (полированные металлы), практически невозможны. Такая ситуация очень часто встречается при исследованиях изделий электроники, где многие компоненты заключены в металлические корпуса. В этом случае для выравнивания коэффициента излучения часто применяют чернение поверхностей металлов.

При выборе спектрального диапазона важным критерием является температура исследуемых объектов. Средневолновой инфракрасный диапазон более информативен при исследовании объектов, имеющих более высокую температуру, а длинноволновой диапазон — для исследований объектов с температурой менее 80...100 °С, которая характерна для элементов несилевой электроники.

Следующий фактор, определяющий выбор спектрального диапазона, — тепловой контраст. Понятие теплового контраста связано с возможностью различить две зоны объекта, характеризующиеся разными температурами или разными коэффициентами излучения. Этот критерий определяет дифференциальную чувствительность тепловых

измерений. Для малых разностей температур или коэффициентов излучения спектральный диапазон 3...5 мкм обеспечивает примерно в 2,2 раза более высокую дифференциальную чувствительность, чем диапазон 8...13 мкм.

Характеристики приемника излучения определяют геометрическую и температурную разрешающие способности. Максимальное геометрическое разрешение современных тепловизоров составляет 1024×1024 точек, хотя более распространенными остаются модели с разрешением 640×480 точек. Такое разрешение часто не позволяет визуализировать мелкие детали электронных устройств, например, распределение температуры на выводах микросхемы.

Высокое разрешение по температуре позволяет выделить наиболее нагретые части корпуса элемента или выявить незначительный нагрев элементов относительно температуры окружающей среды. В настоящее время существуют тепловизоры с температурной разрешающей способностью менее $0,02^\circ\text{C}$, и такое значение можно считать достаточным для контроля широкого спектра изделий электронной техники.

Дефекты, выявляемые бесконтактным тепловым методом контроля. Типы дефектов различных изделий электронной техники, которые могут быть выявлены с использованием бесконтактного теплового метода контроля, приведены в таблице.

В качестве иллюстрации применения бесконтактного теплового метода для диагностики и выявления скрытых дефектов узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры рассмотрим ряд конкретных примеров.

Термограмма печатной платы ячейки, полученной с нарушениями технологического процесса сборки, приведшими к недопустимо высокому сопротивлению пайки в разъеме, приведена на рис. 2, а.

Термограммы двух одинаковых электронных ячеек работоспособной и вышедшей из строя представлены на рис. 2, б, в. Причиной неисправности ячейки, приведенной на рис. 2, в, является перегрев микросхем.

Отдельного внимания заслуживает такая область применения теплового контроля, как микроэлектроника. Тепловой контроль в микроэлектронике начал активно использоваться лишь в последнее десятилетие, что связано с развитием как аппаратного обеспечения (увеличение геометрической и тепловой разрешающей способности), так и методик контроля.

Для изделий микроэлектроники применяют тепловизоры с максимальным доступным разрешением, а также специальными объективами. В этом случае возможно получение термограмм объектов с различными деталями размером 25 мкм. Термограмма с разрешением 1024×1024 точек кристалла микросхемы с объектами размером 7 мкм показана на рис. 3 [4].

Типы дефектов различных изделий электронной техники, выявляемых тепловым контролем

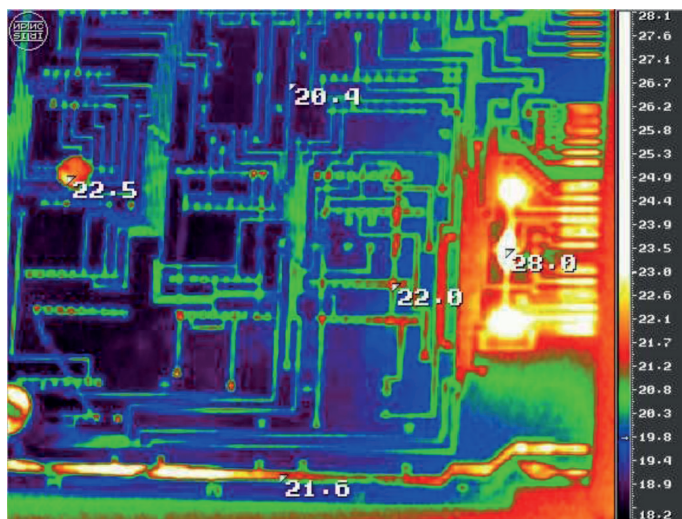
Объект теплового контроля	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
Полупроводниковые изделия	Дефекты $p-n$ перехода (поверхностная деградация, электромиграция, межметаллические соединения, “шнурование” тока, мезоплазма); неравномерная плотность тока; трещины, газовые пузыри между кристаллом и основанием, неоднородность состава исходного материала; дефекты теплоотвода, диффузионной сварки; повреждения кристалла; обрыв проводов и короткие замыкания.	Во многих случаях показателем дефектности является тепловое сопротивление. Перспективно импульсное питание, при котором определяют время устойчивости и переходную тепловую характеристику. Скрытые дефекты хорошо локализируются на термограммах.
Интегральные схемы	Дефекты теплоотвода; обрыв выводов, короткие замыкания; некачественная металлизация; сколы резистивной пленки; плохая адгезия и термокомпрессия; пробой конденсаторов; объемные дефекты полупроводникового материала.	Пространственное разрешение достигает 20...50 мкм. Испытания проводят со снятой крышкой в 50–100 информативных точках.
Многослойные печатные платы	Утонение и коррозионный износ проводников; некачественная металлизация; отслоение проводников.	Используют импульсный нагрев электрическим током (в ряде случаев оптический нагрев). Температурное поле имеет сложную топологию, требуются эталоны.
Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры	Неправильное подключение элемента в схеме; некачественный монтаж; неудачное размещение элементов на плате.	Тепловой контроль эффективен при проектировании, изготовлении и функционировании узлов. Рекомендуется в массовом производстве однотипных узлов при наличии эталона. Оптимизация теплового контроля состоит в выборе информативных точек, тестового воздействия и подавлении излучательных помех.
Резисторы	Локальные утонения; проводящие включения; плохие контакты; трещины.	В случае теплового контроля цилиндрических резисторов снимают четыре профиля по образующей и сравнивают с эталоном. Размер обнаруживаемого дефекта 15×15 мкм.

Объект теплового контроля	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
Конденсаторы	Пробой электролитических конденсаторов; замыкания слоев конденсаторов в микросхемах.	Контроль осложнен низким уровнем сигнала и наличием излучательной помехи.
Проводники	Утонения; трещины.	Используют контактный нагрев электрическим током и бесконтактный СВЧ-нагрев. Производительность теплового контроля до 4 м в минуту. Фиксируют изменения толщины проволоки до 20 мкм.
Катодные узлы	Неравномерность покрытия.	Повышение температуры на 50...60 °С снижает долговечность катода на порядок. Тепловой контроль в режиме глубокого недокала уменьшает производственные допуски и исключает рентгеновотелевизионный контроль.
Высокотемпературные пленочные покрытия	Отслоения от подложки; неравномерность толщины.	Наиболее эффективен нестационарный тепловой контроль. Время существования полезных сигналов до десятков миллисекунд.
Контроль сварки выводов интегральной схемы	Несплавление вывода с площадкой; расплавление золотого покрытия в межэлектродном зазоре; стекание золота на контактную площадку; расплавление выводов интегральной схемы и появление углублений; перегорание вывода и контактной площадки.	При стандартном точечном тепловом воздействии температурные отклики бездефектных сварных соединений характеризуются определенными значениями амплитуды и характерного времени теплопередачи. Проблема — разброс излучательных свойств.

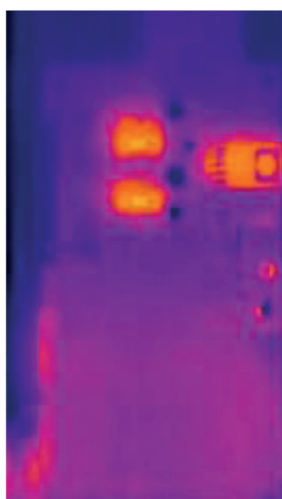
Пример применения теплового контроля в микроэлектронике — неразрушающий контроль качества корпусирования интегральных схем [5]. Схема обнаружения дефектов сварки выводов кристалла микросхемы с контактными площадками корпуса приведена на рис. 4.

В таком случае источником теплового излучения является увеличение плотности тока через дефектное соединение. Причины дефектов — повышение электрического и теплового сопротивления при сварке. Термограмма корпуса микросхемы с дефектами корпусирования представлена на рис. 5, а.

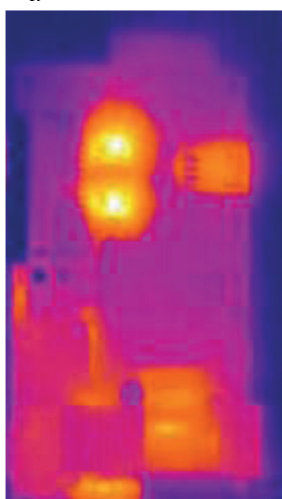
Кроме описанных выше дефектов, которые могут быть выявлены на этапе контроля при производстве, тепловой контроль также с успехом применяется при разработке электронной аппаратуры для



a



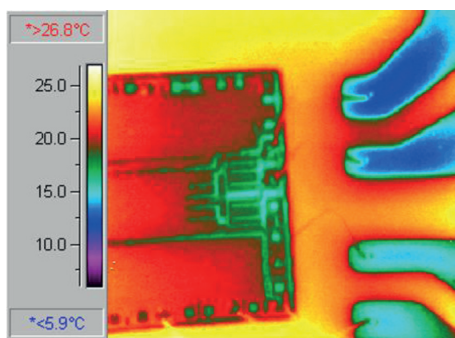
б



в

Рис. 2. Термограммы печатной платы электронной ячейки с высоким сопротивлением пайки (*a*), работоспособной (*б*) и вышедшей из строя (*в*) электронных ячеек

Рис. 3. Термограмма кристалла микросхемы, полученная с помощью тепловизора ThermaCAM, с проводниками размером 7 мкм [4]



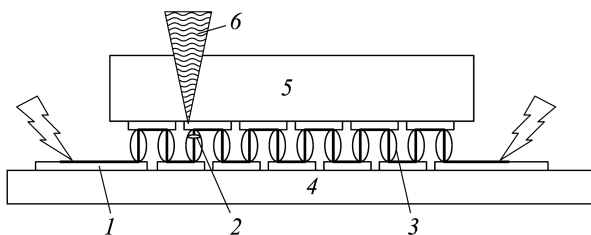
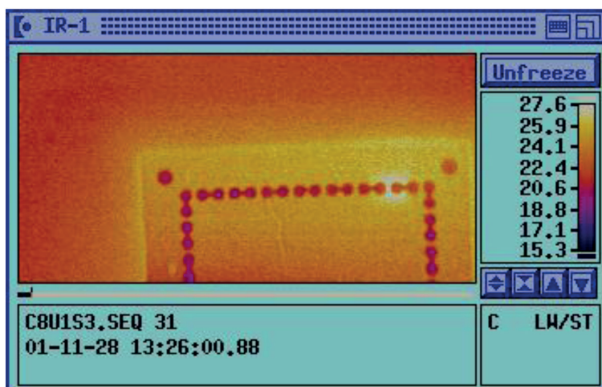
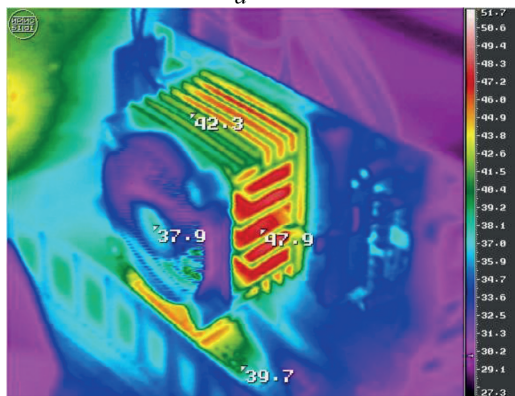


Рис. 4. Схема обнаружения дефектов сварки выводов в корпусах с высокой плотностью упаковки:

1 — электрический ток; 2 — дефект соединения; 3 — соединение сваркой; 4 — подложка; 5 — кристалл микросхемы; 6 — тепловой поток



а



б

Рис. 5. Термограммы, демонстрирующие некачественное соединение вывода интегральной схемы с контактной площадкой (*а*) и недостатки процессорного модуля с системой охлаждения (*б*)

оценки конструктивных и схемотехнических решений [6]. Например, для оценки правильности выбора режимов работы и мощности компонентов, способа охлаждения, компоновки. В качестве примера на рис. 5, *б* приведена термограмма, показывающая недостатки системы охлаждения процессора.

Заключение. Возможности бесконтактного теплового метода диагностики и поиска скрытых дефектов, безусловно, шире рассмотрен-

ных в работе. Подобные методы все чаще применяются в микро- и наноэлектронике, силовой электронике и энергетике. Однако достижения в указанной области в основном принадлежат зарубежным разработчикам методов бесконтактной диагностики и производителям измерительной аппаратуры. Поэтому одной из целей настоящей работы было привлечение внимания отечественных специалистов к возможностям бесконтактных методов в решении задачи повышения надежности электронной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Неразрушающий контроль*. Справочник. В 7 т. Т. 5. Тепловой контроль. Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2004. 688 с.
2. *Чеканов А.Н.* Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. М.: КНОРУС, 2012. 440 с.
3. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография: Основы, техника, применение; пер. с фр. М.: Мир, 1988. 399 с.
4. *Fishbune R.J.* Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification. IBM Power Technology and Qualification. 2000. 7 p.
5. *Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств / С.П. Панфилова, А.И. Власов, В.Н. Гриднев, А.С. Червинский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 6. С. 1–9.*
6. *Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники / С.П. Панфилова, А.И. Власов, В.Н. Гриднев, А.С. Червинский // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2007. № 3. С. 25–32.*

REFERENCES

- [1] V.V. Klyuev, ed. *Nerazrushayushchiy kontrol'*. Spravochnik. V 7 t. T. 5. Teplovoy kontrol' [Nondestructive Inspection. Handbook. In 7 vol. Vol. 5. Thermal Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 688 p.
- [2] Chekanov A.N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoy apparatury* [Analysis of Electronic Equipment and Ensuring Reliability]. Moscow, KNORUS Publ., 2012. 440 p.
- [3] Gaussorgues Gilbert. *La Thermographie Infrarouge. Principes-Technologie-Applications*. Paris, Technique et documentation-Lavoisier, 1984.
- [4] Fishbune R.J. *Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification*. IBM Power Technology and Qualification, 2000. 7 p.
- [5] Panfilova S.P., Vlasov A.I., Gridnev V.N., Chervinskiy A.S. *Beskontaktnyy teplovoy kontrol' elektronno-vychislitel'nykh sredstv* [Thermography of electronic devices]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2007, no. 6, pp. 1–9 (in Russ.).
- [6] Panfilova S.P., Vlasov A.I., Gridnev V.N., Chervinskiy A.S. *Contactless Thermal Control of Electronic Products. Proizvodstvo elektroniki: tekhnologii, oborudovanie, materialy* [Electronic Production: Technologies, Equipment, Materials], 2007, no. 3, pp. 25–32 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.05.2015

Семенцов Станислав Григорьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sementsov S.G. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Design and Production Technology of Electronic Equipment department, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Гриднев Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gridnev V.N. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Design and Production Technology of Electronic Equipment department, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергеева Наталья Алексеевна — ассистент кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sergeeva N.A. — Assistant Lecturer of Design and Production Technology of Electronic Equipment department, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Семенцов С.Г., Гриднев В.Н., Сергеева Н.А. Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 1. С. 3–14.
DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14

Please cite this article in English as:

Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Infrared thermography methods of assessing temperature effect on reliability of electronic equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 1, pp. 3–14. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14