

УДК 621.382.029

В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СУБМОДУЛЕЙ ВЫХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА ПО ПЕРЕХОДНЫМ ТЕПЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ



Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].



Тарасов Руслан Геннадьевич, окончил Ульяновское высшее военное инженерное училище связи, директор АО «НПП «Завод Искра», соискатель базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки методов и средств измерения параметров и контроля качества изделий радиоэлектроники. [e-mail: rgtarasov@yandex.ru].

Аннотация

Представлен краткий обзор способов и средств выявления скрытых дефектов электронных модулей (ЭМ) методами тепловой диагностики и способов измерения тепловых параметров активных элементов в составе ЭМ. Показано, что качество сборки современных субмодулей выходных усилителей мощности (ВУМ) X-диапазона с двумя параллельно включенными GaAs монокристаллическими интегральными схемами (МИС) СВЧ-усилителей можно оценивать по разности температур МИС при работе ВУМ. Для описания и анализа тепловых процессов ВУМ рассмотрена тепловая эквивалентная схема ЭМ в представлении Фостера с двумя гальванически связанными активными элементами – бескорпусными полупроводниковыми изделиями (ППИ). Описан новый способ измерения теплового сопротивления переход-корпус и тепловой постоянной времени переход-корпус ППИ по переходным тепловым характеристикам в начале нагрева при подаче на ЭМ импульсов греющей мощности двух различных уровней. Особенностью и преимуществом предложенного способа по сравнению с известными является то, что не требуется измерять мощность, потребляемую каждым ППИ в отдельности; при измерении задается только полная мощность, потребляемая ЭМ от источника питания. Погрешность способа по оценкам не превышает 10%. Рассмотрены условия и особенности реализации способа применительно к субмодулям ВУМ.

Ключевые слова: субмодуль выходного усилителя мощности, активные элементы, электронный модуль, полупроводниковые изделия, греющая мощность, тепловые параметры, измерение, переходные тепловые характеристики.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-124-129

QUALITY CONTROL OF X-BAND OUTPUT POWER AMPLIFIER SUBMODULES BY TRANSIENT THERMAL CHARACTERISTICS

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Sciences in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Physics of the Lobachevsky State University of Gorky; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an invention holder and

author of monographs, articles in the field of the performance analysis and thermal parameter measurement of semiconductor devices and integrated circuits. e-mail: sva@ulstu.ru.

Ruslan Gennadievich Tarasov, graduated from the Ulyanovsk Higher Military Command School of Communications; Director of JSC 'NPP 'Zavod Iskra'; an applicant at the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of publications in the field of development of methods and instruments for parameter measurements and quality control of radioelectronic devices. e-mail: rgtarasov@yandex.ru.

Abstract

A brief review of techniques and facilities for detecting hidden defects in electronic modules by thermal diagnostic and measuring methods for characterizing the thermal properties of active devices in electronic modules is presented. It is shown that the assembly quality of modern submodules of X-band output power amplifiers (OPA) with two parallel-connected GaAs monolithic microwave integrated circuits can be assessed by the temperature difference of these monolithic integrated circuits during the OPA operation. A Foster-type thermal equivalent circuit with two galvanic-coupled active devices (unpacked semiconductor devices) is examined in order to describe and analyse thermal processes in OPA. A new method for measuring the thermal junction-to-case resistance and thermal junction-to-case time constant of semiconductor devices by transient thermal characteristics at the start of heating process when applying heat power of two different levels to the electronic module is described. The method is distinguished and favoured among others, due to the fact that it is not required to measure power consumed by each semiconductor device; only the total power consumed by the electronic module from the power supply is specified when measuring. The error of this estimation method does not exceed 10 percent. Conditions and features of the method applied to the OPA submodules are considered.

Key words: submodule of output power amplifier, active devices, electronic module, semiconductor devices, heat power, thermal parameters, measurement, transient thermal characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Субмодуль выходного усилителя мощности (ВУМ) X-диапазона является основным узлом приемопередающих модулей активных фазированных антенных решеток (ППМ АФАР). Современные субмодули ВУМ представляют собой электронный модуль (ЭМ) с двумя параллельно включенными мощными активными элементами в виде СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), которые размещены, как правило, симметрично на теплопроводящей пластине [1, 2]. Качество изготовления субмодуля ВУМ во многом определяет качество всего ППМ АФАР.

Для ЭМ с полупроводниковыми активными элементами фундаментальным фактором, определяющим их функциональную и физическую надежность, является температура активных элементов [3]. Коэффициент полезного действия современных субмодулей ВУМ X-диапазона на основе арсенид-галлиевых МИС обычно не превышает 20%, и активные элементы ВУМ рассеивают значительную мощность, что приводит к существенному разогреву как самих МИС, так и других элементов субмодуля. Обеспечение эффективного теплоотвода от активных элементов ВУМ с учетом конструктивных особенностей и особенностей эксплуатации субмодулей в составе ППМ АФАР представляет важную и сложную конструкторско-технологическую задачу. В настоящее время существует большое число программных средств (АСОНИКА-Т, Thermodel, ANSYS, Flotherm, Package Thermal Designer), позволяющих на этапе проектирования рассчитывать тепловые режимы работы как отдельно взятого электрорадиоэлемента, так и

устройства в целом. Технологический разброс параметров МИС, дефекты монтажа МИС на подложку и несовершенство полосковых входных и выходных цепей МИС приводят к отличию реальных тепловых режимов от расчетных и неодинаковому разогреву МИС при работе ВУМ. Причиной неодинакового разогрева МИС в процессе работы может быть как различие их тепловых параметров (ТП), определяемых качеством монтажа МИС и параметрами слоя контактного соединения, так и разный уровень рассеиваемой мощности, что обусловлено неравномерным распределением мощности между МИС, то есть качеством СВЧ-тракта [1, 2].

Таким образом, неравномерный разогрев МИС свидетельствует о дефектности субмодуля и задачей диагностики является выявление конкретных причин, приводящих к такому несовершенству для соответствующей корректировки технологического процесса. Для этого необходима разработка методов и средств определения тепловых параметров отдельных, в том числе гальванически связанных активных элементов в составе ЭМ. В данной статье показана возможность диагностики причин неравномерного нагрева МИС ВУМ по результатам измерения их переходных тепловых характеристик.

ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭМ

Задача тепловой диагностики ЭМ радиоэлектронных средств (РЭС) сводится, как правило, к выявлению anomalously перегретых (по сравнению с расчетными значениями) элементов ЭМ при заданном (номинальном) уровне потребляемой мощности [4–8]. Перегре-

тые области определяются с помощью системы термодатчиков либо методами инфракрасной термометрии [4–7]. Так порядок тепловых испытаний РЭС, установленный ГОСТ РВ 20.57.306-98 [8], предусматривает измерение температуры в различных точках РЭС с помощью термодатчиков, размещенных либо вблизи, либо непосредственно на корпусе электрорадиоэлементов. Недостатком ИК-термометрии является необходимость учета излучательной способности поверхности различных элементов РЭС. Точность контактных датчиков зависит от места расположения и способа закрепления датчика. Указанные выше методы тепловой диагностики не позволяют определять ТП активных элементов РЭС.

В ЭМ с возможностью независимого задания и изменения параметров электрического режима каждого полупроводникового изделия (ППИ) по отдельности для измерения их ТП можно использовать (в зависимости от класса ППИ) один из способов, установленных ОСТ 11 0944-96 [9] или описанных в литературе [10]. Относительная погрешность большинства из этих способов определяется правильностью выбора длительности импульса греющей мощности и может достигать 25%.

Несмотря на активное развитие средств тепловой диагностики, в настоящее время отсутствуют эффективные методы и автоматизированные средства определения параметров тепловых схем ЭМ с гальванически связанными активными элементами. Общий подход к решению такой задачи с произвольным числом активных элементов рассмотрен нами в работе [11]. Этот подход сводится к многократному измерению температуры ППИ при разных уровнях полной греющей мощности. Там же рассмотрен частный случай определения ТП ЭМ с двумя активными элементами по температуре активных элементов в стационарном тепловом режиме.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ

В submodule ВУМ активные элементы – МИС – включаются симметрично относительно источника питания в схеме ЭМ и должны иметь одинаковые параметры электрического режима в номинальном режиме работы ЭМ. Это означает и равенство рассеиваемых ППИ мощностей; при работе на переменном или импульсном токе имеются в виду мощности, усредненные за период колебаний тока. Заметим, что мощность, выделяющаяся в активных элементах ЭМ, определяется как разность между мощностью, потребляемой от источника питания, и мощностью, выделяющейся в нагрузке.

Для оперативного измерения ТП двух гальванически связанных ППИ в составе ЭМ нами разработан способ [12], основанный на измерении переходных тепловых характеристик ППИ в начале нагрева. Для пояснения способа проведем анализ переходных тепловых процессов в ЭМ при подаче ступеньки греющей мощности на основе дискретной тепловой схемы ЭМ в представлении Фостера (рис. 1) [1, 11].

В таком приближении изменение температуры активной области (перехода) кристалла ППИ при подаче

на модуль мощности P_0 в момент времени $t = 0$ будет описываться следующими выражениями:

$$\Delta T_{П1}(t) = P_1 R_{ТП-к1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ТП-к1}}\right) \right) + P_2 R_{ТК-с} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ТК-с}}\right) \right); \quad (1)$$

$$\Delta T_{П2}(t) = P_2 R_{ТП-к2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ТП-к2}}\right) \right) + P_1 R_{ТК-с} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ТК-с}}\right) \right), \quad (2)$$

где $\Delta T_{Пi}(t) = T_{Пi}(t) - T_0$, $T_{Пi}(t)$ – температура перехода i -го ППИ;

T_0 – температура окружающей среды;

$T_к(t)$ – температура корпуса ЭМ;

$\tau_{ТП-ки} = R_{ТП-ки} C_{ТП-ки}$ – тепловая постоянная времени переход-корпус i -го ППИ;

$\tau_{ТК-с} = R_{ТК-с} C_{ТК-с}$ – тепловая постоянная времени корпус-среда ЭМ;

P_i – мощность, рассеиваемая i -м ППИ: $P_2 + P_1 = P_0$.

Для определенности положим, что $P_1 > P_2$, то есть мощность, рассеиваемая первой МИС, больше мощности, рассеиваемой второй МИС, тогда для P_1 и P_2 можно записать выражение:

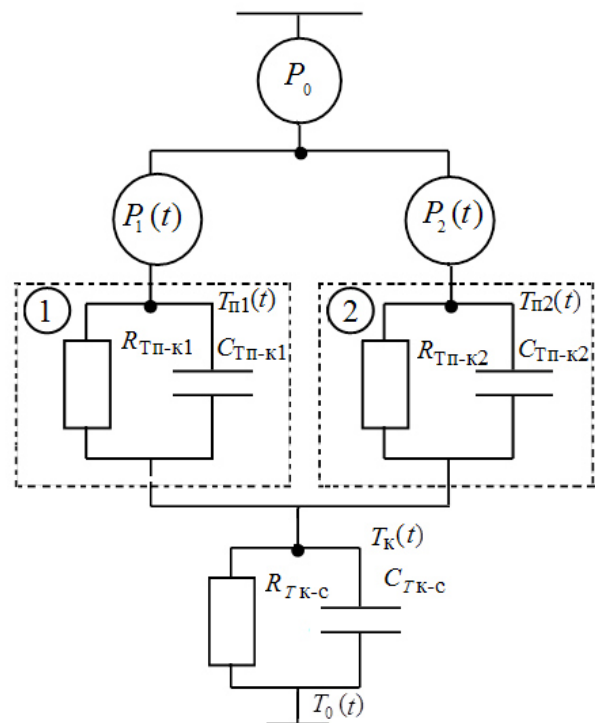


Рис. 1. Дискретная тепловая модель ЭМ с двумя активными элементами (ППИ) в представлении Фостера

$$P_1 = \frac{P_0}{2}(1 + \delta) \text{ и } P_2 = \frac{P_0}{2}(1 - \delta), \quad (3)$$

где δ – величина относительного разбаланса мощности МИС.

В таком представлении δ является информативным параметром, характеризующим качество СВЧ-трактов.

Практически во всех ЭМ (и мощных ППИ в корпусном исполнении) выполняется условие $\tau_{Тк-с} \gg \tau_{Тп-к}$ и ключевой задачей контроля тепловых свойств ЭМ является определение теплового сопротивления переход-корпус и тепловой постоянной времени переход-корпус кристаллов ППИ в их составе. Переходные тепловые характеристики ППИ в составе ЭМ при подаче импульсов мощности разного уровня и разной длительности показаны на рисунке 2.

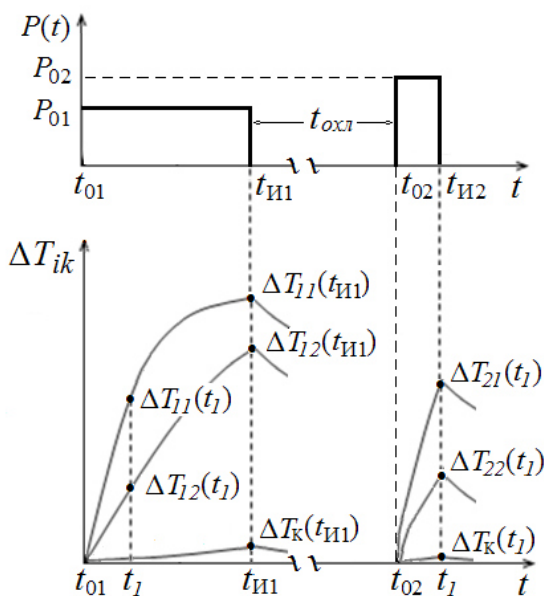


Рис. 2. Переходные тепловые характеристики ППИ в составе ЭМ при подаче двух импульсов мощности P_{01} и P_{02} длительностью $t_{И1}$ и $t_{И2}$ соответственно

Если подать на ЭМ импульс мощности уровня P_{01} и измерить приращение температуры ППИ через интервалы времени t_1 и $t_{И1}$, удовлетворяющие условиям $\tau_{Тп-к} \approx t_1 \ll \tau_{Тк-с}$ и $(3 \div 5)\tau_{Тп-к} \approx t_{И1} \ll \tau_{Тк-с}$ то, считая изменение температуры корпуса $\Delta T_k(t_{И1})$ за время $t_{И1}$ пренебрежимо малым, можно составить систему уравнений:

$$\Delta T_{11}(t_1) = P_{11} R_{Тп-к1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Тп-к1}}\right) \right); \quad (4)$$

$$\Delta T_{11}(t_{И1}) = P_{11} R_{Тп-к1}; \quad (5)$$

$$\Delta T_{21}(t_1) = (P_{01} - P_{11}) R_{Тп-к2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Тп-к2}}\right) \right); \quad (6)$$

$$\Delta T_{21}(t_{И1}) = (P_{01} - P_{11}) R_{Тп-к2}. \quad (7)$$

Если после охлаждения ЭМ до исходной температуры на него подать импульс мощности уровня P_{02} длительностью $t_{И2} = t_1 \approx \tau_{Тп-к}$ и измерить приращение температуры ППИ в момент окончания импульса, то получим еще два уравнения:

$$\Delta T_{12}(t_1) = P_{12} R_{Тп-к1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Т1}}\right) \right); \quad (8)$$

$$\Delta T_{22}(t_1) = (P_{02} - P_{12}) R_{Тп-к2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Т2}}\right) \right). \quad (9)$$

Разделив (4) на (8) и (5) на (9), получим систему уравнения для нахождения P_{11} и P_{12} :

$$\frac{\Delta T_{11}(t_1)}{\Delta T_{12}(t_1)} = \frac{P_{11}}{P_{12}} = \frac{P_{01}}{P_{02}} \frac{1 + \delta_1}{1 - \delta_2}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta T_{21}(t_1)}{\Delta T_{22}(t_1)} = \frac{(P_{01} - P_{11})}{(P_{02} - P_{12})} = \frac{P_{01}}{P_{02}} \frac{1 - \delta_1}{1 - \delta_2}. \quad (11)$$

$$\text{Откуда } \delta_1 = \frac{1 - a}{1 + a}, \delta_2 = 1 - b(1 - \delta_1),$$

$$\text{где } a = \frac{P_{01} \Delta T_{12}(t_1)}{P_{02} \Delta T_{11}(t_1)}, b = \frac{P_{01} \Delta T_{22}(t_1)}{P_{02} \Delta T_{21}(t_1)}.$$

Значения тепловых сопротивлений переход-корпус ППИ находятся из уравнений (5) и (7)

$$R_{Тп-к1} = \frac{2\Delta T_{11}(t_{И1})}{P_{01}(1 + \delta_1)}, R_{Тп-к2} = \frac{2\Delta T_{21}(t_{И1})}{P_{01}(1 - \delta_1)}.$$

Разделив уравнение (4) на (5) и (8) на (9) соответственно, получим систему уравнений для нахождения значений тепловых постоянных $\tau_{Тп-к1}$ и $\tau_{Тп-к2}$:

$$\frac{\Delta T_{11}(t_1)}{\Delta T_{11}(t_{И1})} = \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Тп-к1}}\right) \right); \quad (12)$$

$$\frac{\Delta T_{21}(t_1)}{\Delta T_{21}(t_{И1})} = \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{Тп-к2}}\right) \right), \quad (13)$$

решение которой и дает искомые выражения:

$$\tau_{Тп-к1} = -t_1 \ln \left(1 - \frac{\Delta T_{11}(t_1)}{\Delta T_{11}(t_{И1})} \right), \quad (14)$$

$$\tau_{Тп-к2} = -t_1 \ln \left(1 - \frac{\Delta T_{21}(t_1)}{\Delta T_{21}(t_{И1})} \right).$$

Наиболее информативными параметрами являются разбаланс мощности между МИС и их тепловые сопротивления переход-корпус.

Условия реализации способа. В предлагаемом способе не требуется измерять мощность, потребляемую

каждым ППИ в отдельности, задается только полная мощность, потребляемая ЭМ от источника питания. Для реализации способа необходима возможность изменения полной рассеиваемой ЭМ мощности. Это практически всегда возможно реализовать в определенном диапазоне значений мощности путем, например, изменения напряжения питания модуля либо путем изменения параметров модуляции импульсной мощности [2].

Погрешность измерения обусловлена принятыми допущениями, что изменением температуры корпуса можно пренебречь. В реальных ВУМ значение $\tau_{Тк-с}$ в 30–50 раз больше $\tau_{Тп-к}$, и погрешность, обусловленная изменением температуры корпуса, не превышает 7–10%. Заметим, что в предлагаемом способе при выборе интервалов времени t_1 и $t_{И1}$ необходимо выполнять примерные соотношения $t_1 \approx \tau_{Тп-к}$ и $t_{И1} \approx (3 \div 5) \tau_{Тп-к}$, а выполнения точных соотношений $t_1 \approx \tau_{Тп-к}$ и $t_{И1} \approx (3 \div 5) \tau_{Тп-к}$ не требуется. При этом значение $\tau_{Тп-к}$ можно оценить либо путем предварительного эксперимента или расчетным путем.

Результаты теплового моделирования реального субмодуля ВУМ, приведенные в работе [1], показывают, что при различии тепловых сопротивлений МИС на 10% необходимое различие температур составляет примерно 4 К при перегреве МИС 40 К, и для уверенной регистрации такого различия с погрешностью 10% абсолютная погрешность измерения температуры должна составлять не более 0,4 К. Необходимое время измерения температуры не должно превышать 0,1 от значения $\tau_{Тп-к}$, которое для МИС ВУМ составляет примерно 5 мс.

В тех случаях, когда возможно подключение к выводам активных элементов модуля, температуру ППИ можно измерять по изменению какого-либо температурочувствительного параметра. Для субмодулей ВУМ реализовать такое измерение довольно сложно и не представляется возможным в условиях массового контроля.

Универсальным для всех вариантов ЭМ является измерение температуры кристаллов ППИ с помощью ИК-камеры или ИК-радиометра. Заметим, что при этом не требуется знать точное значение коэффициента излучательной способности поверхности кристаллов ППИ, поскольку все искомые параметры определяются только отношениями приращений температур, и коэффициенты излучательной способности будут сокращаться. Однако существующие ИК-камеры не позволяют измерять температуру быстро с высокой точностью.

Одним из вариантов повышения точности является многократное измерение температуры либо измерение среднего значения температуры МИС при периодическом нагреве. Анализ этих вариантов представляет самостоятельную задачу, которая будет рассмотрена в последующих работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен достаточно легко реализуемый способ измерения тепловых параметров гальванически связан-

ных активных элементов в составе ЭМ по переходным тепловым характеристикам. Особенностью и преимуществом способа по сравнению с известными является то, что не требуется измерять мощность, потребляемую каждым ППИ в отдельности, при измерении задается только полная мощность, потребляемая ЭМ от источника питания. При этом возможность изменения полной рассеиваемой ЭМ мощности может быть легко реализована в большинстве практических случаев. В субмодулях ВУМ изменение полной греющей мощности легко обеспечивается путем изменения скважности следования радиоимпульсов или их длительности [2]. Погрешность способа по оценкам не превышает 10%. Способ может быть использован для контроля качества сборки субмодулей ВУМ как на этапах разработки и производства, так и на входном контроле предприятий-потребителей при контроле качества изделий и оценке их температурных запасов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Ходаков А.М. Расчет и измерение тепловых параметров монолитных интегральных схем СВЧ-усилителей в составе выходных усилителей мощности X-диапазона // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/1/text.pdf> (дата обращения: 10.06.2020).
2. Тарасов Р.Г., Сергеев В.А., Куликов А.А. Влияние параметров режима работы на энергетические характеристики субмодулей выходных усилителей мощности X-диапазона // Радиотехника. 2019. № 9 (14). С. 68–72.
3. Методы обеспечения теплового режима радиоаппаратуры / А.К. Гришко, А.Д. Цуприк, К.С. Новиков [и др.] // Надежность и качество – 2019 : тр. междунар. симпозиума. Т. 1 / под ред. Н.К. Юркова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 274–276.
4. Лопин А.В. Метод бесконтактной диагностики радиоэлектронных модулей на основе анализа их тепловых образов : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04. Воронеж, 2014. 150 с.
5. Семенов С.Г., Гриднев В.Н., Сергеева Н.А. Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами // Надежность и качество – 2016 : тр. междунар. симпозиума. Т. 2 / под ред. Н.К. Юркова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. С. 6–10.
6. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Диагностика качества выходных усилителей мощности приемопередающих модулей АФАР по температурным полям // Автоматизация процессов управления. 2019. № 1 (55). С. 112–117.
7. Исаев С.С., Юрков Н.К. Методика тепловизионного контроля неисправностей печатных узлов РЭА на этапе производства // Надежность и качество – 2013 : тр. междунар. симпозиума. Т. 2 / под ред. Н.К. Юркова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. С. 92–95.
8. ГОСТ РВ 20.57.306-98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие климатических факто-

пов. URL: <https://kipsal.ru/wp-content/uploads/2017/03/GOST-RV-20.57.306-98.pdf> (дата обращения: 10.06.2020).

9. ОСТ 11 0944-96 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. М. : ГНПП «Пульсар», 1997.

10. Dupont L., Avenas Y., Jeannin P.-O. Comparison of Junction Temperature Evaluations in a Power IGBT Module Using an IR Camera and Three Thermosensitive Electrical Parameters // *IEEE Transaction on Industrial Applications*. 2013. Vol. 49, № 4. pp. 1599–1608

11. Сергеев В.А., Смирнов В.И., Тарасов Р.Г. Проблемы и возможности диагностики электронных модулей по тепловым характеристикам // *Автоматизация процессов управления*. 2017. № 4 (50). С. 96–102.

12. Пат. 2720185 Российская Федерация, МПК G01R31/26. Способ измерения тепловых сопротивлений переход-корпус и тепловых постоянных времени переход корпус кристаллов полупроводниковых изделий в составе электронного модуля / Сергеев В.А., Тарасов Р.Г. ; № 2019124806, заявл. 02.08.2019, опубл. 27.04.2020, Бюл. № 12.

REFERENCES

1. Sergeev V.A., Tarasov R.G., Khodakov A.M. Raschet i izmerenie teplovykh parametrov monolitnykh integralnykh skhem SVCh-usilitelei v sostave vykhodnykh usilitelei moshchnosti X-diapazona [Calculation and Measurement of Thermal Parameters of Monolithic Integrated Microwave Circuits in X-Band Output Power Amplifiers]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2019, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/1/text.pdf> (accessed 10.06.2020).

2. Tarasov R.G., Sergeev V.A., Kulikov A.A. Vliianie parametrov rezhima raboty na energeticheskie kharakteristiki submodulei vykhodnykh usilitelei moshchnosti X-diapazona [Effect of Operating Mode Parameters on Energy Characteristics of Submodule Output X-Band Power Amplifiers]. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2019, no. 9 (14), pp. 68–72.

3. Grishko A.K., Tsuprik A.D., Novikov K.S. et al. Metody obespecheniia teplovogo rezhima radioapparatury [Methods for Providing Thermal Conditions of Radioequipment]. *Nadezhnost i kachestvo – 2019. Tr. mezhdunar. simpoziuma. T. 1*, pod red. N.K. lurkova [Reliability and Quality – 2019. Proc. of Int. Symposium, vol. 1, eds. by N.K. lurkov]. Penza, PGU Publ., 2019, pp. 274–276.

4. Lopin A.V. *Metod beskontaktnoi diagnostiki radioelektronnykh modulei na osnove analiza ikh teplovykh obrazov*. Dis. kand. tekhn. nauk [Methods of Contactless Diagnostics of Radio Electronic Equipment Based on the Thermal Image Analysis]. Voronezh, 2014. 150 p.

5. Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Issledovanie vliianiia temperaturnykh rezhimov na nadezhnost elektronnoi apparatury teplovizionnymi

metodami [Analysis of Thermal Modes Effected by Thermal Image Methods to the Reliability of Radio Electronic Equipment]. *Nadezhnost i kachestvo – 2016. Tr. mezhdunar. simpoziuma. T. 2*, pod red. N.K. lurkova [Reliability and Quality – 2016. Proc. of Int. Symposium, vol. 2, eds. by N.K. lurkov]. Penza, PGU Publ., 2016, pp. 6–10.

6. Sergeev V.A., Tarasov R.G., Kulikov A.A. Diagnostika kachestva vykhodnykh usilitelei moshchnosti priemopredaiushchikh modulei AFAR po temperaturnym poliam [The Quality Diagnostics of Output Power Amplifiers of the APAA Transceiver Modules by Temperature Fields]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 1 (55), pp. 112–117.

7. Isaev S.S., lurkov N.K. Metodika teplovizionnogo kontroliia neispravnostei pechatnykh uzlov REA na etape proizvodstva [Thermal Image Technique for Monitoring the Printed Board Assembly Malfunctions at the Production Stage]. *Nadezhnost i kachestvo – 2013. Tr. mezhdunar. simpoziuma. T. 2*, pod red. N.K. lurkova [Reliability and Quality – 2013. Proc. of Int. Symposium, vol. 2, eds. by N.K. lurkov]. Penza, PGU Publ., 2013, pp. 92–95.

8. *GOST RV 20.57.306–98. Apparatura, pribory, ustroistva i oborudovanie voennogo naznacheniiia. Metody ispytaniia na vozdeistvie klimaticheskikh faktorov* [State Standard 20.57.306–98. Military Instruments, Devices, Hardware, and Equipment. Climatic Test Methods]. Available at: <https://kipsal.ru/wp-content/uploads/2017/03/GOST-RV-20.57.306-98.pdf>. (accessed 10.06.2020).

9. *OST 11 0944–96 Mikroskhemy integralnye i pribory poluprovodnikovye. Metody rascheta, izmereniia i kontroliia teplovogo soprotivleniia* [Industry Standard 11 0944–96. Integrated Circuits and Semiconductor Devices. Methods for Calculating, Measuring, and Inspecting the Tyhermal Resistance Parameters]. Moscow, GNPP ‘Pulsar’ Publ., 1997.

10. Dupont L., Avenas Y., Jeannin P.-O. Comparison of Junction Temperature Evaluations in a Power IGBT Module Using an IR Camera and Three Thermosensitive Electrical Parameters. *IEEE Transaction on Industrial Applications*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 1599–1608.

11. Sergeev V.A., Smirnov V.I., Tarasov R.G. Problemy i vozmozhnosti diagnostiki elektronnykh modulei po teplovykh kharakteristikam [Problems and Capabilities of Thermal Parameter Diagnostics of Electronic Modules]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 4 (50), pp. 96–102.

12. Sergeev V.A., Tarasov R.G. *Sposob izmereniia teplovykh soprotivlenii perekhod-korpus i teplovykh postoiannykh vremeni perekhod korpus kristallov poluprovodnikovyykh izdelii v sostave elektronnogo modulia* [Method of the Measurement of Junction-to-Case Thermal Resistance and Thermal Time Constants of Semiconductor Dies as Part of Electronic Module]. Patent RF, no. 2720185, MPK G01R31/26, no. 2019124806, Date of filling: July 02, 2019. Date of publication: April 27, 2020. Bull. no. 12.