

УДК 621.382.017.7

В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, Р.Г. Тарасов

## ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ



**Сергеев Вячеслав Андреевич**, доктор технических наук, доцент, 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 базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].



**Смирнов Виталий Иванович**, доктор технических наук, профессор, окончил Горьковский государственный университет по специальности «Физика», профессор кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии, изобретения в области автоматизации средств измерения. [e-mail: smirnov-vi@mail.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@mail.ru].

### Аннотация

Представлен краткий обзор методов и средств диагностики качества радиоэлектронных средств (РЭС). Применительно к электронным модулям (ЭМ) РЭС с полупроводниковыми активными элементами показана эффективность средств тепловой диагностики. Рассмотрены основные причины и механизмы, определяющие существенно нелинейный характер тепловых моделей ЭМ и требующие учета при тепловом проектировании современных РЭС и при разработке методов и средств диагностики их качества. Приведена классификация тепловых моделей ЭМ, в том числе и по характеру нелинейности. Для оценки качества ЭМ предложено использовать матрицу тепловых параметров распределенной тепловой модели ЭМ. Обсуждаются возможности определения параметров указанной матрицы по переходным тепловым характеристикам активных элементов ЭМ при подаче на него ступеньки греющей мощности и по амплитуде переменной составляющей температуры элементов при модуляции рассеиваемой элементами мощности по гармоническому закону. Приведена методика определения параметров тепловой модели двухэлементного ЭМ с симметричным включением элементов на примере submodule выходного усилителя мощности активной фазированной антенной решетки без учета тепловых связей между элементами.

Ключевые слова: электронный модуль, диагностика качества, нелинейная тепловая модель, матрица тепловых параметров, измерение, переходная тепловая характеристика, модуляция греющей мощности.

### Abstract

The article reviews methods and diagnostic aids of radioelectronic means (REM) quality. The efficiency of thermal diagnostic aids as applied to the electronic modules (EMs) of REM with semiconductor active elements is shown. The main reasons and mechanisms defining significantly nonlinear character of the EMs thermal models and demanding account at thermal

design of modern REM and when developing methods and diagnostic aids of their quality are considered. Classification of the EMs thermal models including the classification on the nonlinearity nature is given. A matrix of distributed EMs thermal model parameters is proposed for estimation of the EMs quality. Possibilities for parameter determination of the specified matrix according to transition thermal characteristics of the EMs active elements when giving a step of the heating power and on amplitude of a variable temperature of elements at modulation of the power disseminated by elements under the harmonious law are considered. The parameter determination technique of the thermal two-element EMs model with symmetric inclusion of elements is presented by the example of the output power amplifier submodule of an active phased-array antenna without considering thermal connections between elements.

**Key words:** electronic module, diagnostics of quality, nonlinear thermal model, a matrix of thermal parameters, measurement, transition thermal characteristic, modulation of heating power.

## ВВЕДЕНИЕ

К качеству и надежности современных радиоэлектронных средств (РЭС), в особенности специального назначения, предъявляются все возрастающие требования. Показатели надежности так же, как и функциональные характеристики, РЭС закладываются на стадии их проектирования [1], но обеспечиваются в процессе производства и эксплуатации. Наличие технологических дефектов в исходных материалах и элементах, возникновение дефектов при сборке и монтаже компонентов приводят к снижению надежности изделий и ухудшению их технических характеристик.

Одним из ключевых направлений обеспечения качества и надежности РЭС являются разработка и применение эффективных методов и средств контроля и диагностики скрытых дефектов. В условиях массового производства указанные средства должны обеспечивать высокую информативность, достоверность и автоматизацию анализа результатов. Оборудование для обнаружения скрытых дефектов очень быстро окупается за счет повышения выхода годных изделий. В современной радиоэлектронной промышленности применяется широкий спектр методов и средств диагностического контроля РЭС [2–11].

Повсеместно применяемый визуальный контроль [2, 3] – простой и эффективный способ обнаружения видимых дефектов (обрывы, трещины, сколы и т. д.), возникающие на разных стадиях технологического процесса. Недостатками визуального контроля являются ограниченные возможности оптики, человеческий фактор, невозможность выявления скрытых или потенциальных дефектов. Возможности повышения эффективности этого способа контроля связаны с внедрением средств машинного зрения.

На заключительных стадиях сборки применяются такие методы обнаружения скрытых дефектов, как рентгеновский контроль и ультразвуковая микроскопия [2–6]. За последние годы достигнуты значительные успехи в повышении разрешающей способности этих методов в автоматизации процедуры контроля и визуализации результатов диагностики [4–6]. Однако, указанные средства весьма дороги, сложны в настройке и эксплуатации и имеют невысокую производительность. Их применение оправдано на стадиях квалификационных испытаний, при отладке технологических процессов и для

контроля ответственных изделий. В условиях массового производства эти средства применяются, как правило, для выборочного контроля. Тенденцией современного производства является создание РЭС на основе унифицированных и стандартных модулей [7]. Объемы производства таких модулей могут составлять на отдельном предприятии сотни и тысячи штук в смену. Обеспечить сплошной контроль такой программы средствами рентгеновской или акустической микроскопии не представляется возможным.

Для электронных модулей (ЭМ) РЭС с полупроводниковыми активными элементами фундаментальным фактором, определяющим их функциональную и физическую надежность, является температура активных элементов. Задача теплового проектирования и обеспечения теплового режима РЭС состоит в расчете температурного поля в конструкции радиоэлектронного изделия и в выборе соответствующей системы охлаждения при заданном распределении источников тепла [8]. В настоящее время существует большое число программных средств (ProEngineer, АСОНИКА-Т, ТРИАНА, BetaSoft, Thermodel, ANSYS, Flotherm, Package Thermal Designer), позволяющих рассчитывать тепловые режимы работы как отдельно взятого электрорадиоэлемента, так и устройства в целом [9].

Применительно к ЭМ одним из эффективных видов диагностики является тепловая диагностика, которая позволяет оценить качество монтажа элементов путем фиксации и анализа их теплового режима. Задача тепловой диагностики качества ЭМ сводится, как правило, к выявлению аномально перегретых (по сравнению с расчетными значениями) элементов ЭМ при заданном (номинальном) уровне потребляемой мощности. Перегретые области определяются с помощью системы термодатчиков либо методами инфракрасной термометрии [9–11]. Так методика тепловых испытаний РЭС по ГОСТ РВ 20.57.306-98 «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие требования, методы контроля и испытаний. Методы испытаний на соответствие требованиям по устойчивости к климатическим воздействиям» предусматривает осуществление контроля температуры РЭС с помощью термодатчиков, установленных вблизи от электрорадиоэлементов [10].

Несмотря на активное развитие средств тепловой диагностики, в настоящее время отсутствует аналити-

ческий подход к разработке эффективных методов и автоматизированных средств определения параметров тепловых моделей ЭМ РЭС. В данной статье рассматриваются возможности разработки таких методов и средств с учетом особенностей тепловых моделей ЭМ.

### 1 ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЭМ

С точки зрения обеспечения работоспособности и заданного уровня надежности ЭМ, при традиционном подходе к тепловому проектированию обязательным и практически единственным ограничением, накладываемым на поле температур, является условие  $T_j \leq T_{j\text{пред}}$ , где  $T_j$  – расчетная температура  $j$ -го элемента ЭМ,  $T_{j\text{пред}}$  – предельно допустимое значение температуры этого элемента. В качестве  $T_j$  при практических расчетах берут некоторое усредненное по объему элемента значение температуры, а расчеты тепловых режимов проводят для наиболее жесткого по выделению тепла электрического режима работы ЭМ. Такой подход реализован в большинстве программных средств теплового проектирования.

Вместе с тем ряд важных аспектов теплового проектирования ЭМ с полупроводниковыми активными элементами остаются за рамками традиционного подхода. Для полупроводниковых изделий характерна сильная степенная или экспоненциальная зависимость электрических параметров от температуры [12]. В результате ЭМ представляют собой сложные многоэлементные системы с сильными теплоэлектрическими связями между элементами и с температурозависимыми источниками тепла. При этом распределение температуры может быть существенно неоднородным в пределах одного элемента. Теплоэлектрическая связь между элементами модуля приводит к появлению ряда нежелательных эффектов: дополнительных нелинейных искажений и погрешностей преобразования сигналов, температурному дрейфу параметров, паразитных колебаний, тепловой неустойчивости и т. д. [12, 13]. Неоднородное распределение температуры в конструкции ЭМ и его отдельных элементах приводит к механическим напряжениям и термомодеформациям в конструкции ЭМ.

Перечисленные выше особенности современных ЭМ делают весьма актуальной проблему адекватности тепловых моделей (ТМ) как всего ЭМ, так и его отдельных элементов. При этом необходимо учитывать следующие

принципиально важные факторы и эффекты.

1. Мощности источников тепла, поглощаемого отдельным элементом ЭМ в результате действия тепло-электрической связи, зависят от параметров электрического и теплового режимов как рассматриваемого элемента, так и других элементов, входящих в состав ЭМ [12, 13].

2. Распределение плотности источников тепла в каждом отдельном полупроводниковом элементе неоднородно и зависит от параметров электрического режима в результате действия внутренней тепловой обратной связи, что приводит к зависимости параметров ТМ отдельного элемента от параметров электрического режима.

3. Теплофизические параметры полупроводниковых материалов являются функциями температуры, что является еще одной причиной нелинейности ТМ ЭМ.

4. В процессе работы ЭМ происходит перераспределение источников тепла между элементами, и мгновенная неоднородность температурного поля в конструкции ЭМ может значительно превышать неоднородность в статическом режиме.

С учетом отмеченных выше особенностей тепловых свойств современных ЭМ можно предложить следующую классификацию их ТМ (рис. 1).

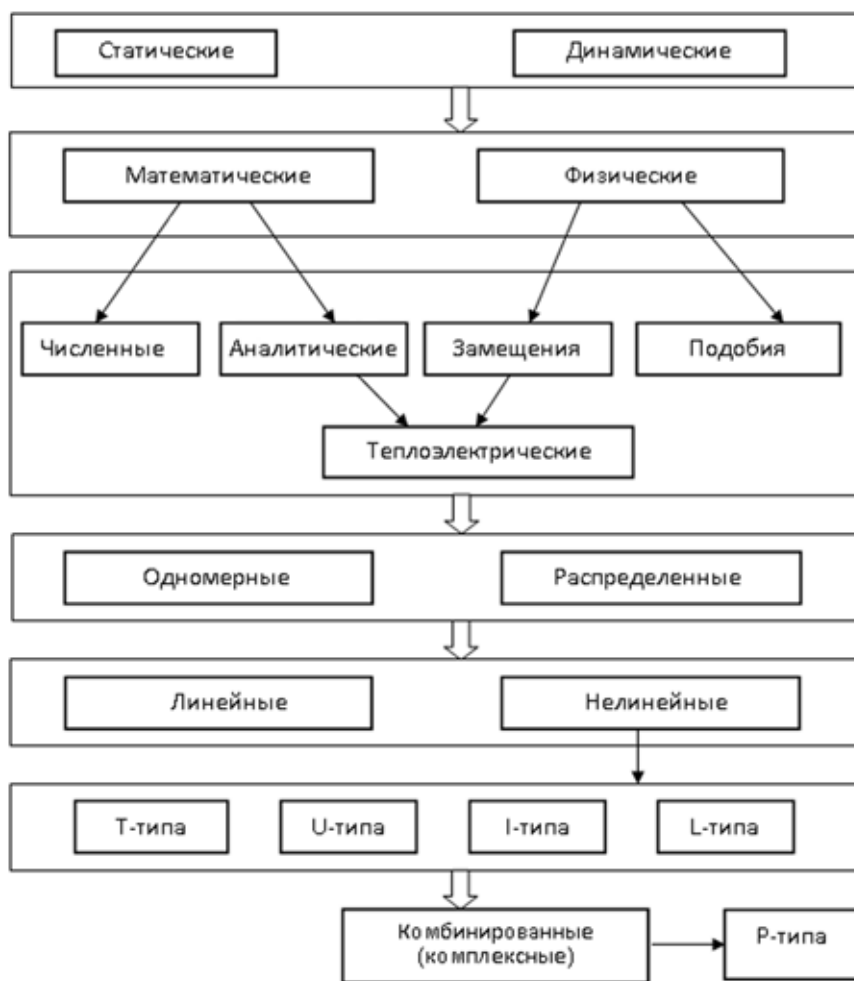


Рис. 1. Классификация и иерархия тепловых моделей ЭМ

Поскольку в общем случае идет речь о моделировании тепловых процессов, то предполагается разделение всех ТМ на **динамические** и **статические**. По способу моделирования различают **математические** (символьные) и **физические** (объектные) модели.

Физические модели разделяются на **модели замещения**, в которых реальный объект заменяется другим объектом и процесс теплопереноса заменяется другим процессом, описываемым уравнением, аналогичным уравнению теплопереноса, и **модели подобия**, в которых реальный объект заменяется его копией увеличенного или уменьшенного размера.

Эффективным методом теплового моделирования, соединяющим физический и математический способы представления объекта, является метод, основанный на принципе теплоэлектрической аналогии [8, 12], согласно которому тепловые процессы в твердотельных элементах аналогичны электрическим процессам в электрических цепях. Поэтому выделен отдельный класс электротепловых (или теплоэлектрических) моделей.

По форме описания и способу нахождения параметров ТМ и теплового режима ЭМ математические модели делятся на **численные** и **аналитические**.

В зависимости от характера распределения источников тепла в структуре элемента различают **одномерные**

и **распределенные** ТМ. При этом критерием размерности модели предлагается считать число независимых источников тепла в объеме элемента, а не характер тепловых потоков в его структуре.

По степени зависимости параметров модели от температуры и параметров электрического режима изделия ТМ разделяются на **линейные** и **нелинейные**. Если параметры ТМ зависят только от приложенного напряжения, то нелинейность предлагается называть **нелинейностью U-типа**, при зависимости параметров модели только от протекающего тока – **нелинейностью I-типа**. ТМ с зависимостью параметров только от температуры предлагается называть моделями с **нелинейностью T-типа**. От температуры и электрического режима, например из-за краевых и размерных эффектов в микрообъектах, могут зависеть не только параметры ТМ самого изделия, но и условия теплоотвода. Нелинейность этой природы предлагается называть **нелинейностью L-типа**.

ТМ, параметры которых зависят от нескольких факторов, выделены в класс комбинированных моделей. В отдельную группу выделены ТМ с зависимостью параметров только от рассеиваемой мощности – ТМ с **нелинейностью P-типа**.

## 2 РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ ТМ ЭМ

Согласно принципу теплоэлектрической аналогии дискретная ТМ ЭМ, содержащих  $N$  пространственно разделенных элементов – источников тепла, представляет собой электрическую цепь с сосредоточенными параметрами, содержащую  $N$  узлов, подключенных к источникам мощности  $P_i$  (рис. 2) [12]. Сумма мощностей этих источников в каждый момент времени, очевидно, равна полной мощности  $P_0$ , потребляемой ЭМ от источника питания.

Тепловые свойства такой системы описываются матрицей тепловых сопротивлений  $\{R_{Tij}\}$ , которые определяют тепловую связь в стационарном режиме между  $i$ -м и  $j$ -м элементами (источниками тепла) ЭМ, где  $R_{Tii}$  – тепловое сопротивление между  $i$ -ым элементом и монтажным основанием ЭМ, а так же матрицей теплоемкостей  $\{C_{Tij}\}$ , элементы которой можно определить как теплоемкость части основания ЭМ, разделяющей  $i$ -й и  $j$ -й элементы, соответственно  $C_{Tii}$  – теплоемкость  $i$ -го элемента. Тепловые параметры  $\{R_{Tij}, C_{Tij}\}$  в общем случае являются функциями температуры  $T_i$  и  $T_j$  элементов и рассеиваемой ими мощности. Температурные зависимости параметров опреде-

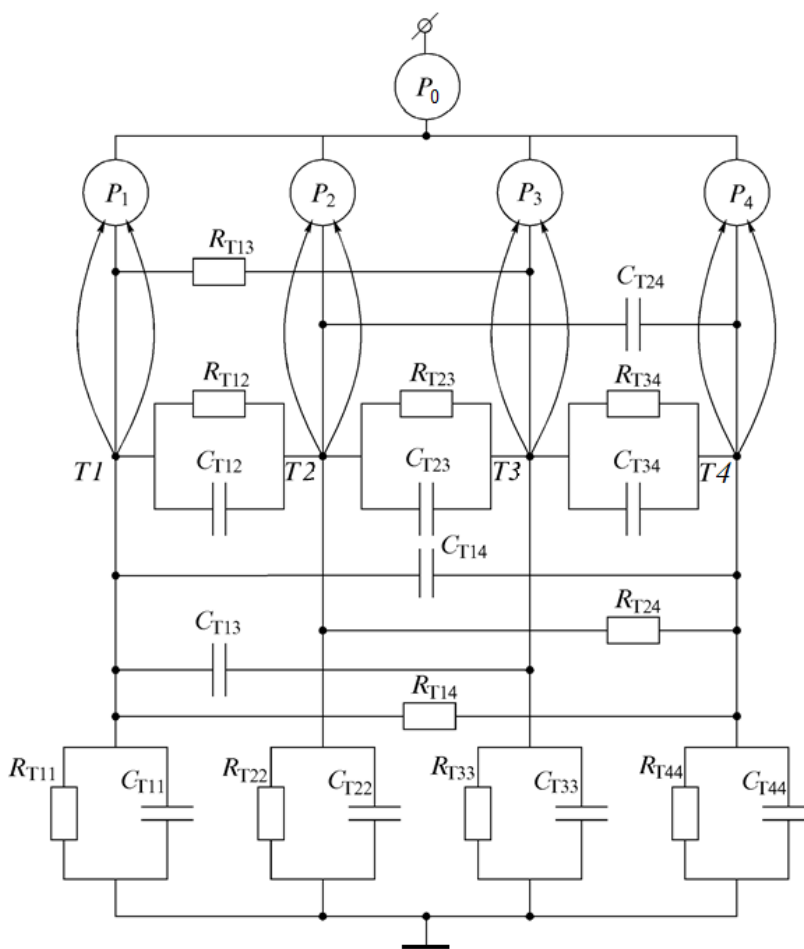


Рис. 2. Дискретная теплоэлектрическая модель четырехэлементного ЭМ

ляются теплофизическими свойствами применяемых материалов. Таким образом, тепловые свойства ЭМ, содержащего  $N$  элементов, описываются набором  $2N^2$  тепловых параметров.

Прямая тепловая задача для многоэлементного ЭМ с теплоэлектрической связью при заданных начальных условиях при подаче ступеньки греющей мощности сводится к решению системы дифференциальных уравнений вида:

$$C_{Tii} \frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{T_i - T_0}{R_{Tii}} + \sum_{j \neq i}^N \left[ \frac{\partial(T_i - T_j)}{\partial t} C_{Tij} + \frac{T_i - T_j}{R_{Tij}} \right] = P_i(T_i), \quad (1)$$

где  $P_i(T_i)$  – мощность, рассеиваемая  $i$ -м элементом, в общем случае зависящая от температуры этого элемента.

Вид функциональной зависимости  $P_i[T_i(t)]$  определяется типом элементов. Без ограничения общности аналитического рассмотрения для любого типа элементов в достаточно широком диапазоне мощностей с достаточной точностью можно считать, что мощность  $P_i(t)$  зависит только от температуры  $i$ -го элемента [13]. Применяя принцип линеаризации, температурную зависимость мощности можно представить в виде:

$$P_i(T_i) = P_i^0(\bar{T}_n) \left[ 1 + \hat{\xi}_{Ti} (T_i - \bar{T}) \right], \quad (2)$$

где  $\bar{T}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k$  – средняя температура ЭМ;

$$\hat{\xi}_{Ti} = \frac{1}{P_i} \frac{dP_i}{dT} \Big|_{T=\bar{T}} - \text{относительный температурный}$$

коэффициент мощности при температуре  $T = \bar{T}$ ;

$P_i^0(\bar{T})$  – мощность, поглощаемая  $i$ -м элементом, при температуре всех элементов, равной средней.

Как уже отмечалось, для ЭМ любой сложности при известной заданной полной мощности, рассеиваемой изделием должно выполняться условие:

$$P_0(t) = \sum_{i=1}^N P_i[T_i(t)]. \quad (3)$$

В стационарном тепловом режиме уравнение баланса запишется в виде:

$$\frac{T_i - T_0}{R_{Tii}} + \sum_{j \neq i}^N \frac{T_i - T_j}{R_{Tij}} = P_i(T_i). \quad (4)$$

Число тепловых параметров в системе уравнений (4) равно  $N^2$ , то есть в два раза меньше, чем в системе уравнений (1) для нестационарного режима.

Решение прямой задачи, то есть нахождение изменения температуры каждого элемента ЭМ при заданных параметрах ТМ и заданном изотермическом распределении поглощаемой элементами мощности, в общем

виде для произвольного числа элементов возможно лишь численными методами.

Заметим также, что во многих случаях тепловой связью между элементами ЭМ можно пренебречь и матрицы  $\{R_{Tij}\}$  и  $\{C_{Tij}\}$  становятся диагональными, и задача теплового анализа существенно упрощается.

### 3 ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНОЙ ТМ ЭМ

При тепловой диагностике ЭМ необходимо решать обратную задачу нахождения значений  $2N^2$  параметров  $\{R_{Tij}\}$  и  $\{C_{Tij}\}$  ТМ ЭМ по результатам измерения изменения температуры элементов при заданном законе изменения полной электрической поглощаемой мощности.

Рассмотрим простой случай, когда значения греющей мощности каждого из элементов ЭМ в каждый момент времени известны (могут быть измерены или получены расчетным путем). В этом случае для нахождения  $2N^2$  неизвестных тепловых параметров в общем случае необходимо составить  $2N^2$  уравнений. Практически это может быть реализовано путем одновременного измерения температуры каждого из элементов ЭМ в заданные моменты времени после включения греющей мощности  $P_0$ , получения на основе этих измерений регрессионных зависимостей  $\{T_i(t)\}$  и определения параметров  $\{R_{Tij}\}$  и  $\{C_{Tij}\}$  путем решения системы алгебраических уравнений, полученной после подстановки  $\{T_i(t)\}$  в (1), для  $2N^2$  моментов времени.

В случае, когда тепловой связью между элементами ЭМ можно пренебречь, идентификации и определению подлежат всего  $2N$  тепловых параметров, т. е. число необходимых уравнений существенно сокращается. Поскольку основную информацию о качестве монтажа несут только тепловые сопротивления (теплоемкости определяются материалом и геометрией элементов), то для идентификации этих тепловых сопротивлений достаточно  $N$  уравнений вида (4), которые могут быть получены по измерению температуры элементов и рассеиваемой ими мощности в стационарном тепловом режиме.

В общем случае задача усложняется тем, что реальная мощность, рассеиваемая каждым конкретным элементом ЭМ, неизвестна. В этом случае задача идентификации параметров ТМ может быть решена, если контролируемый ЭМ может работать с различным уровнем поглощаемой мощности. Во многих случаях (например, для усилителей мощности) это достаточно легко реализуется и, измеряя зависимости  $T_i(t)$  при  $N$  различных уровнях общей потребляемой мощности, можно построить необходимое число уравнений. При этом время диагностики, разумеется, в  $N$  раз возрастает. Этот подход можно применить к ЭМ без тепловой связи между элементами. В этом случае число задаваемых режимов с различной рассеиваемой мощностью

будет определяться числом элементов и можно составить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} P_{ik} R_{Tii} = (T_{ik} - T)_0; \\ \sum_{i=1}^N P_{ik} = P_{0k}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_{ik}$  – мощность, рассеиваемая  $i$ -м элементом ЭМ,  $T_{ik}$  – температура  $i$ -го элемента ЭМ в  $k$ -м режиме,  $P_{0k}$  – полная мощность, рассеиваемая ЭМ в  $k$ -м режиме.

**Применение модуляции греющей мощности.** Относительно небольшие изменения температуры элементов ЭМ в переходном тепловом режиме его работы не могут быть измерены с достаточной точностью из-за наличия различного рода помех и погрешностей. С целью повышения чувствительности при измерении тепловых параметров ТМ ЭМ может быть использована гармоническая модуляция греющей мощности с частотой  $\Omega$  по закону:

$$P_i = P_{i0} + \tilde{P}_i \sin \Omega t. \quad (6)$$

Этот подход реализован нами для дискретных полупроводниковых приборов с  $p$ - $n$ -переходами [14–16] и может быть достаточно легко перенесен на ЭМ с независимым доступом к активным элементам модуля и возможностью отдельного изменения греющей мощности и измерения температуры элементов, например для транзисторных и диодных матриц. При этом надо учитывать, что активные элементы в ЭМ имеют единый теплоотвод.

Если отдельное независимое задание греющей мощности элементов ЭМ невозможно, задача технической реализации указанного подхода усложняется. При модуляции полной потребляемой ЭМ мощности по гармоническому закону греющая мощность отдельных элементов будет изменяться в общем случае не синфазно, при этом амплитуда  $\tilde{P}_i$  и фаза  $\psi_i$  переменной составляющей греющей мощности каждого конкретного элемента ЭМ неизвестны. Число неизвестных переменных возрастает. В ряде случаев для некоторых классов простых ЭМ (например, для модулей выходных усилителей) номинальные значения  $\tilde{P}_i$  могут быть получены расчетным путем.

В данной работе ограничимся рассмотрением простого, но достаточно распространенного случая, когда мощность, рассеиваемые элементами, изменяются синфазно. Амплитуда переменной составляющей температуры  $j$ -го элемента в этом случае будет определяться выражением

$$\Delta \tilde{T}_j = \sum_{k=1}^N |Z_{Tij}(\Omega)| \tilde{P}_i, \quad (7)$$

где  $Z_{Tij} = \frac{R_{Tij}}{1 + j\omega\tau_{Tij}}$  – тепловой импеданс,

$\tau_{Tij} = R_{Tij} C_{Tij}$  – тепловая постоянная времени соот-

ветствующего звена тепловой связи ТМ ЭМ.

Матрица тепловых импедансов  $\{Z_{Tij}\}$  полностью описывает тепловые свойства ЭМ в принятом приближении дискретной ТМ и может быть использована в качестве инструмента диагностического контроля ЭМ. Измеряя переменную составляющую температуры активных элементов на  $2N^2$  различных частотах  $\{\Omega_k\}$  либо на  $2N$  частотах при  $N$  различных векторах греющей мощности  $\{\tilde{P}_i\}$ , можно составить систему уравнений, из решения которой формально могут быть найдены значения тепловых параметров  $N$ -элементной ТМ ЭМ. Отклонение какого либо элемента матрицы тепловых импедансов от номинального значения является диагностической информацией.

Подобный подход был реализован нами для цифровых интегральных схем и показал хорошую эффективность [17].

Определение оптимального набора частот для минимизации погрешности определения искомых параметров представляет отдельную и довольно сложную математическую задачу.

**Возможности технической реализации.** Чисто гармоническая модуляция греющей мощности ЭМ реализуема далеко не всегда. В реальных системах удобными и достаточно легко реализуемыми являются широтно-импульсная или частотно-импульсная модуляции путем, например, соответствующей манипуляции напряжением питания.

Измерение температуры кристаллов дискретных активных элементов в стандартных методах осуществляется контактным способом по изменению электрического температурочувствительного параметра. В ЭМ это затруднено, а зачастую просто невозможно, поэтому для измерения температуры элементов ЭМ предлагается использовать инфракрасные (ИК) радиометры. Современные ИК-радиометры имеют достаточно высокое быстродействие и высокую чувствительность и могут обеспечивать измерение переменной составляющей температуры отдельных элементов ЭМ при частоте модуляции греющей мощности, не превышающей 100 Гц, с погрешностью порядка  $0,1^\circ\text{C}$ .

#### 4 ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭМ С СИММЕТРИЧНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Задача диагностики существенно упрощается для ЭМ, содержащих два активных элемента, расположенных симметрично. Примером такого ЭМ является submodule выходной усилитель модуля (ВУМ) приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки (АФАР), внешний вид которого показан на рисунке 3.

ВУМ содержит два активных элемента – монолитные интегральные схемы, поглощающих основную электрическую мощность от источника питания. В номинальном режиме ВУМ усиливает СВЧ-радиоимпульсы длитель-

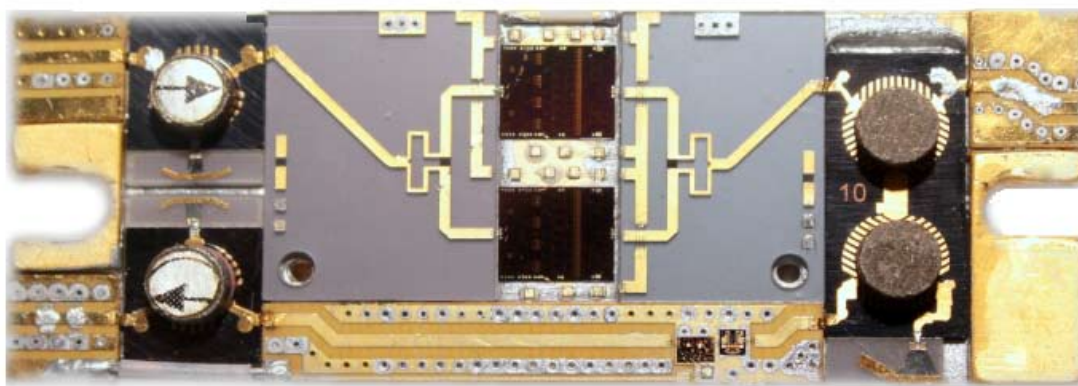


Рис. 3. Внешний вид субмодуля ВУМ АФАР

ностью 5 мкс, скважностью 5, номинальная выходная мощность ВУМ 15 Вт при уровне входной мощности 250 мВт и коэффициенте полезного действия порядка 20%.

Схематичная конструкция и расчетное распределение температуры в конструкции ВУМ показаны на рисунке 4 [18, 19]. Судя по характеру распределения температуры, тепловой связью между активными элементами можно пренебречь. Для ЭМ с симметричным включением двух активных элементов необходимо обеспечивать равномерное распределение мощности между элементами и равенство температур. Ясно, что различие рассеиваемой мощности и качества теплоотвода приведут к различию температуры активных элементов ВУМ.

Полная электрическая мощность  $P_0$ , поглощаемая реальным ЭМ, распределяется между элемента-

ми в общем случае неравномерно, и мощность  $P_1$  и  $P_2$ , поглощаемые каждым отдельным элементом ЭМ, определяются его электрическими характеристиками и в общем случае неизвестны, при этом выполняется условие:  $P_1 + P_2 = P_0$ . В стационарном режиме работы, согласно (5),  $P_i R_{T_i} = \Delta T_i$ , где  $R_{T2,1}$  – тепловые сопротивления элементов ЭМ, которые определяются качеством их монтажа элементов. Полная поглощаемая ЭМ мощность может быть определена по току, потребляемому ЭМ от источника питания, и одно неизвестное может быть исключено  $P_2 = P_0 - P_1$ . Температуру отдельного элемента ЭМ можно измерить бесконтактным способом, например пирометром.

Очевидно, что двух уравнений недостаточно для нахождения трех неизвестных. Однако, если задать режим работы ЭМ с другим значением поглощаемой мощно-

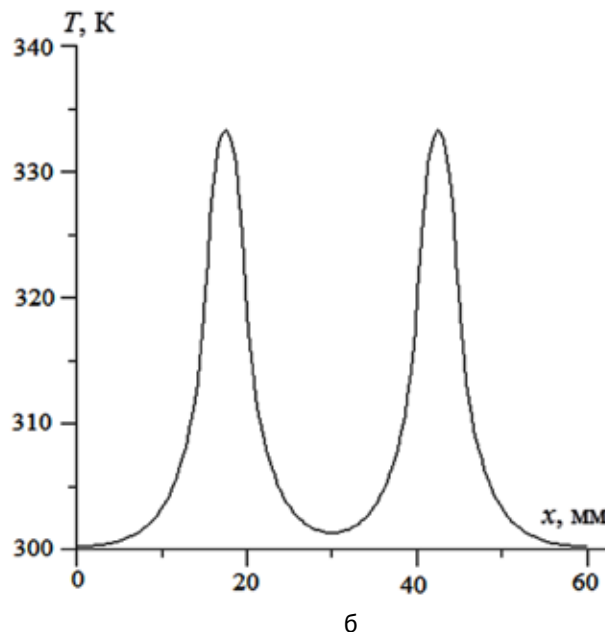
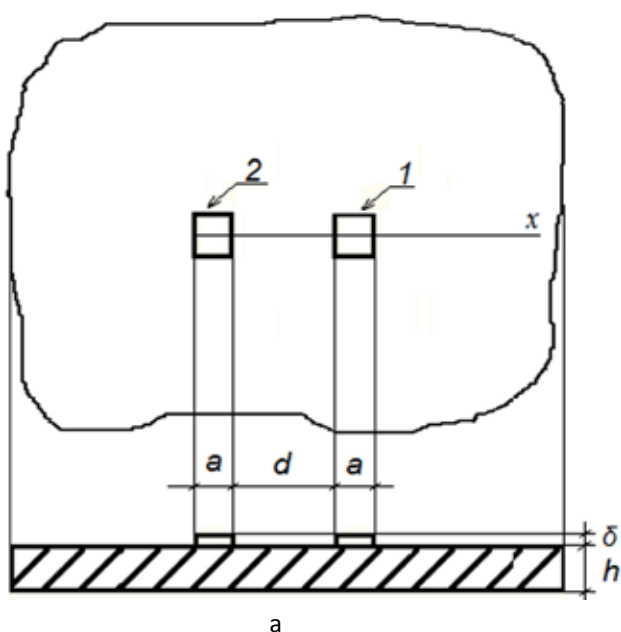


Рис. 4. Схематичная конструкция ВУМ:  
а) 1, 2 – монолитные интегральные схемы ;

б) распределение температуры по рабочей поверхности при  $\delta = 50$  мкм,  $d = 20$  мм, коэффициенте теплопроводности подложки  $\lambda = 50$  Вт/м·К [18]

сти, например путем изменения напряжения питания (в допустимых пределах), и измерить температуру элементов, можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} P_{11}R_{T1} = \Delta T_{11}, \\ (P_{01} - P_{11})R_{T2} = \Delta T_{12}, \\ P_{21}R_{T1} = \Delta T_{21}, \\ (P_{02} - P_{21})R_{T2} = \Delta T_{22}, \end{cases}$$

где  $P_{01,2}$  – полная мощность в первом и втором режимах работы ЭМ соответственно,  $P_{ik}$  – мощность, рассеиваемая  $i$ -м элементом в  $k$ -м режиме, а  $\Delta T_{ik} = (T_{ik} - T_0)$  – приращение температуры  $i$ -го элемента в  $k$ -м режиме.

Для ЭМ симметричной конструкции в качестве критерия качества сборки можно использовать отношение  $R_{T2}/R_{T1}$  тепловых сопротивлений элементов, для которого из решения системы нетрудно получить следующее выражение:

$$R_{T2}/R_{T1} = \frac{b\Delta T_{12} - \Delta T_{22}}{\Delta T_{21} - b\Delta T_{11}},$$

где  $b = P_{02}/P_{01}$  – отношение полных мощностей, рассеиваемых ЭМ во втором и первом режимах работы, соответственно.

В качестве критерия оценки качества активных элементов ЭМ можно использовать отношение мощностей, рассеиваемых элементами в первом (номинальном) режиме:

$$\frac{P_{11}}{P_{21}} = \frac{\Delta T_{11}}{\Delta T_{21}} \frac{b\Delta T_{21} - \Delta T_{22}}{\Delta T_{12} - b\Delta T_{11}}.$$

Для упрощения расчетов отношение полных мощностей, поглощаемых ЭМ, удобнее выбрать равным целому числу, например 2. Для ВУМ АФАР это легко реализуется, например, путем изменения скважности следования радиоимпульсов с 5 до 10.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для описания тепловых свойств ЭМ предложено использовать дискретную распределенную ТМ, учитывающую тепловую связь между элементами. Показана возможность измерения и идентификации параметров распределенной ТМ ЭМ по результатам измерения температуры элементов ЭМ при подаче на него ступеньки греющей мощности и амплитуды переменной составляющей температуры элементов при модуляции рассеиваемой элементами мощности по гармоническому закону.

Методика диагностики существенно упрощается при наличии пространственной симметрии и отсутствии тепловой связи между активными элементами, в этом случае диагностика может быть проведена в стационарном тепловом режиме работы ЭМ при нескольких уровнях греющей мощности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А. Конструирование узлов и устройств электронных средств. – М.: Феникс, 2013. – 540 с.
2. Ланин В., Волкенштейн С., Хмыль А. Методы контроля и диагностики скрытых дефектов в изделиях электроники // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – С. 137–142.
3. Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 407 с.
4. Лавренюк А. Достижения в области рентгеновского контроля в электронной промышленности // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 90. – С. 57–62.
5. Левин В.М., Мороков Е.С., Петронюк Ю.С. Ультразвуковая микроскопия контактных соединений // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2017. – № 8. – С. 1053–1058.
6. Анализ дефектов в электронных компонентах сканирующей акустической микроскопией / Р.Б. Буров, А.А. Стоянов, А.А. Винокуров, В.В. Зенин // Дефектоскопия. – 2017. – № 9. – С. 21–25.
7. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 11 с.
8. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники // А.А. Чернышев, В.И. Иванов, А.И. Аксенов, Д.Н. Глушкова – М.: Энергия, 1980. – 216 с.
9. 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.
10. ГОСТ РВ 20.57.306-98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие требования, методы контроля и испытаний. Методы испытаний на соответствие требованиям по устойчивости к климатическим воздействиям. – М.: Стандартинформ, 2015. – 26 с.
11. Кофанов Ю.Н., Линецкий Б.Л., Сотникова С.Ю. Диагностирование печатных узлов на основе автоматизированного метода бесконтактного контроля температурных полей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 10. – С. 24–29.
12. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – С. 159.
13. Сергеев В.А. Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 3. – С. 22–28.
14. Аппаратно-программный комплекс для измерения тепловых характеристик полупроводниковых приборов / В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков, Д.И. Коруннов // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 1. – С. 135–136.
15. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Apparatus



for measurement of thermal impedance of high-power light emitting diodes and LRD assemblies LED // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – V. 63, № 6. – pp. 2431–2435.

16. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A. A., Shorin A.M. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. PP, № 99. – pp. 1–5.

17. Сергеев В.А., Юдин В.В. Контроль качества сборки цифровых интегральных схем с использованием матрицы тепловых импедансов // Известия вузов. Электроника. – 2009. – № 6. – С. 72–78.

18. Моделирование и исследование тепловых режимов работы ППМ АФАР / В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, А.А. Куликов, А.М. Ходаков // Вузовская наука в современных условиях : сб. матер. 48-й науч.-техн. конф. В 3 ч. Ч. 2 – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – С. 37–40.

19. Сергеев В.А., Ходаков А.М., Тарасов Р.Г. Моделирование нестационарных тепловых процессов в выходных усилителях мощности модулей АФАР // Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – С. 133–137.