

Уравнение погрешности имеет вид [1]:

$$\frac{\Delta N_{\text{вых}}}{N_{\text{вых}}} = b_1 \frac{\Delta U_1}{U_1} + b_2 \frac{\Delta U_2}{U_2} + \dots + b_i \frac{\Delta U_i}{U_i} + \dots + b_n \frac{\Delta U_n}{U_n}, \quad (11)$$

где  $\frac{\Delta N_{\text{вых}}}{N_{\text{вых}}}$  — относительное изменение выходного

параметра;

$\frac{\Delta U_i}{U_i}$  — относительное изменение фактора;

$n$  — число факторов.

Таким образом, нами создана программа статистической обработки массивов непрерывных данных по методике, предложенной в [2].

С помощью разработанной программы нами были обработаны массивы данных, полученных на четырех месторождениях ООО «Ноябрьск-Газодобыча», которые позволили выявить причины высокой погрешности приборов влагометрии природного газа семейства «Конг-Прима». По результатам исследований были приняты технические, программные и организационные меры по снижению влияния внешних и внутренних факторов на результаты измерений. Указанные меры позволили, в конечном итоге, повысить качество природного газа, поставляемого потребителю.

## Литература

1. Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Основы научных исследований. Томск, 2003.
2. Алексеев В.П., Зайцев О.Ю. Теория планирования эксперимента в задачах влагометрии природного газа // Газовая промышленность. 2003. № 4.

УДК 621.396.6

В.П. Алексеев

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Современные представления о методах прогнозирования (расчета) надежности как отечественных, так и зарубежных радиотехнических устройств (РТУ) отражены в [1]. Там же приведены рассчитанные уровни надежности ЭРИ зарубежного производства. Согласно [1], надежностью является функцией многих аргументов (факторов, влияющих на надежность РТУ), в общем случае индивидуальных для каждого класса РТУ. Одним из наиболее важных факторов, определяющих надежность РТУ, является температура электрорадиоизделий, а особенно полупроводниковых приборов, так, например, достаточно давно известно, что повышение температуры даже до относительно умеренных значений +40–60°C может приводить [2, 3] к увеличению прямых и обратных токов полупроводниковых переходов, повышению проводимости утечки в полупроводниковых приборах и другим эффектам, непосредственно оказывающим влияние

на надежность РЭА. Помимо этого, в [1] отмечен факт резкого увеличения в последние годы количества отказов интегральных микросхем из-за дефектов кристалла и корпуса. А дефекты такого рода в значительной степени обусловлены температурной неоднородностью и температурными напряжениями [4].

Для анализа температурных полей в элементах и блоках радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) до настоящего времени наиболее часто использовались модели с сосредоточенными параметрами [5] или «нуль-мерные». Такой подход позволяет существенно упростить процедуру анализа и расчета температурных полей благодаря положенному в основу базовому допущению о том, что как в малоразмерных ЭРИ, так и в достаточно крупных деталях аппаратуры отсутствуют градиенты температуры по всем координатным направлениям. Соответственно, температурное поле любого ЭРИ или

блока РЭА является однородным и характеризуется некоторой средней температурой, которая зависит только от времени. Поэтому в этом случае достаточно реально может быть отражено тепловое состояние лишь узлов радиоэлектронной аппаратуры, в которых неравномерность температурного поля невелика – порядка единиц градусов. В других случаях обычно остается открытым вопрос о погрешности такой интерпретации реальных температурных полей.

Известны также многомерные математические модели, описывающие процессы теплопереноса в РЭА в рамках двумерных и трехмерных постановок [6]. Но в настоящее время отсутствуют такие их реализации, в которых одновременно сочетались бы следующие важные признаки: пространственные области соответствуют реальным узлам и (или) элементам РЭА (например, интегральным схемам); учитываются механизмы конвективного и радиационного теплообмена с внешней средой и режим работы РЭА (нестационарность). Модель, отвечающая всем этим требованиям, требует вычислительных ресурсов, практически недоступных до недавнего времени для исследователей. Важным является и то, что реальная аппаратура космического, авиационного, морского, транспортного базирования в основном работает в нестационарных режимах, обусловленных спецификой ее использования. Поэтому известные аналитические и численно-аналитические методы [6–8], достаточно эффективные при решении сложных стационарных линейных и даже некоторых нелинейных задач теплопроводности, не всегда могут применяться при анализе тепловых режимов реальной радиоэлектроники.

Целью данной работы является анализ надежности элементов РТУ с применением современного аппарата теории надежности [1] и методов математического моделирования температурных полей. Достижение поставленной цели планируется путем численного моделирования нестационарных полей температур

в типичном элементе (печатном узле с радиоэлементами) по пространственной теплофизической математической модели с учетом реальных механизмов теплообмена с внешней средой и последующего сопоставления показателей надежности типичных ЭРИ, полученных на базе пространственных температурных полей и средних по объему температур ЭРИ.

### Постановка задачи

Решается задача расчета температурного поля в параллелепипеде, размеры которого ограничены по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  величинами, равными  $L_x$ ,  $L_y$  и  $L_z$ . Параллелепипед включает в себя несколько элементов (также параллелепипедов) с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами. На границах между элементами реализуется идеальный тепловой контакт. Внутри параллелепипеда действует локальный источник тепловыделения заданной интенсивности  $Q$ . На границах заданы граничные условия III рода с излучением (смешанный теплообмен).

Геометрия области решения представлена на рис. 1. Реальная конструкция представляет собой интегральную микросхему (ИС) стабилизатора напряжения, расположенную на двухслойной печатной плате из стеклотекстолита толщиной 1,5 мм.

Представленная на рис. 1 модель ЭРИ была выбрана не только как одна из наиболее типичных реализаций современных электрорадиоизделий [6]. По данному объекту удалось получить экспериментально значения температур в ряде точек рассматриваемой модели при контролируемых условиях теплообмена с окружающей средой в типичных режимах работы. Погрешность определения температуры  $T$  при этом не превышала  $\pm 6\%$  для достаточно большого ( $t_{\max} = 180$  с) времени работы изделия.

Задача в такой постановке сводится к решению нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$C(x, y, z)\rho(x, y, z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(x, y, z)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(x, y, z)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(x, y, z)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q(t, x, y, z)$$

$$t \in [0; t_{\max}]; x \in [0; L_x]; y \in [0; L_y]; z \in [0; L_z];$$

$$T_{t=0} = T_0(x, y, z);$$

$$\begin{aligned}
 x = 0; y \in [0; L_y]; z \in [0; L_z] & \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4); \\
 x = L_x; y \in [0; L_y]; z \in [0; L_z] & \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4); \\
 y = 0; x \in [0; L_x]; z \in [0; L_z] & \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4); \\
 y = L_y; x \in [0; L_x]; z \in [0; L_z] & \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4); \\
 z = 0; y \in [0; L_y]; x \in [0; L_x] & \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4); \\
 z = L_z; y \in [0; L_y]; x \in [0; L_x] & \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T_B - T) + \varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4);
 \end{aligned}$$

где  $C$  – удельная теплоемкость;  $x, y, z$  – координаты;  $\rho$  – плотность;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Q$  – удельное тепловыделение источника;  $t_{\max}$  – время работы;  $L_x, L_y, L_z$  – размеры параллелепипеда по осям  $x, y$  и  $z$  соответственно;  $T_0$  – начальная температура;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_B$  – температура внешней среды;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент черноты тела и окружающей среды;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана.

Сформулированная краевая задача решена методом конечных разностей [9]. Разностный аналог исходного нелинейного пространственного дифференциального уравнения решен методом расщепления по координатам. Одномерные разностные уравнения решены методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации.

#### Модель с сосредоточенными параметрами

В основу моделей с сосредоточенными параметрами положено допущение о том, что градиенты температуры по всем координатным направлениям отсутствуют [5, 6]. Таким образом, параллелепипед заменяется однородным телом, теплофизические характеристики которого вычисляются путем объемного осреднения теплофизических характеристик элементов, составляющих параллелепипед. Для однородного тела запишем уравнение теплового баланса [6]:

$$C\rho \frac{dT}{dt} + \frac{\alpha(T_B - T)}{L_z} + \frac{\varepsilon_{пр} \sigma(T_B^4 - T^4)}{L_z} = Q;$$

$$t \in [0; t_{\max}]; T_{t=0} = T_0.$$

где  $C$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_B$  – температура внешней среды;  $L_z$  – размеры тела по оси  $z$ ;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент черноты тела и окружающей среды;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $Q$  – удельное тепловыделение источника;  $t_{\max}$  – время работы;  $T_0$  – начальная температура.

Решается это дифференциальное уравнение методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности.

#### Модель расчета надежности ЭРИ

Согласно [1] современные методы анализа и прогнозирования надежности ЭРИ опираются на определенные математические модели, в основе которых лежит предположение об экспоненциальном распределении числа наработок до отказа и параметр распределения  $\lambda$  является функцией факторов испытаний. При этом в качестве важнейшего фактора всегда принимается температура  $T$ , а типичной моделью является модель Аррениуса:

$$\lambda(T) = C \cdot \exp\left(\frac{-E}{kT}\right). \quad (1)$$

где  $C$  – константа,  $E$  – энергия активации,  $k$  – постоянная Больцмана.

Вычисленное по модели с сосредоточенными параметрами значение температуры  $T$ , является среднеобъемной для моделируемого узла РЭА, поэтому значение числа наработок до отказа  $A$ , вычисленное по (1), также будет средним по объему.

Пространственная модель позволяет определять значение температуры в тех местах моделируемого узла РЭА (для тех элементов), которые фактически определяют надежность узла РЭА.

Поэтому вычисленное с помощью уравнения (1) по пространственной модели значение числа наработок до отказа  $\lambda$  будет реальнее отражать действительное состояние надежности узла РЭА.

**Результаты и обсуждение**

Основные численные и экспериментальные исследования проведены при следующих значениях исходных данных и параметров:  $L_x = 60$  мм,  $L_y = 55$  мм,  $L_z = 6$  мм.

Температура окружающей среды  $T_{в} = 300$  К. Мощность источника 1,6 и 2,1 Вт. Теплофизические характеристики областей 1–6 (рис. 1) взяты из справочных данных [5].

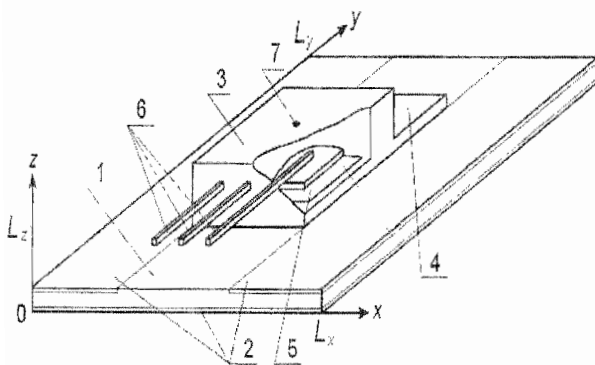


Рис. 1. Геометрия области решения: 1) плата; 2) фольга; 3) корпус ИС; 4) теплопровод ИС; 5) кристалл ИС, 6) выводы ИС; 7) точка измерения температуры термопарой

Для расчетов по пространственной модели использовалась разностная сетка размерами  $301 \times 276 \times 31$ , шаг по времени 0,06 с.

Коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой  $\alpha$  в обеих моделях рассчитывался по методикам [6] и составлял от 0 до 2,9 Вт/(м<sup>2</sup>-К).

Для анализа результатов численного эксперимента по пространственной модели выделена температура в фиксированной точке корпуса ИС  $T_{р}$ .

Для проверки точности полученных результатов были проведены эксперименты. В фиксированной точке верхней поверхности корпуса ИС термопарой измерялась температура  $T_{э}$  соответствующая  $T_{р}$  для численного исследования. Результаты расчетов и измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Измеренная и вычисленная по пространственной модели температуры корпуса*

Время, с	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Мощность источника 1,6 Вт										
Измеренная температура корпуса $T_{э}$ , °С	29	38	47	54	59	66	69	74	76	78
Расчетная температура корпуса $T_{р}$ , °С	29	40	48	55	60	65	69	72	76	78
Мощность источника 2,1 Вт										
Измеренная температура корпуса $T_{э}$ , °С	27	42	52	61	68	76	81	85	88	92
Расчетная температура корпуса $T_{р}$ , °С	27	42	53	61	68	74	79	84	88	92

Сопоставление результатов численного моделирования по пространственной модели с экспериментальными данными показало, что их расхождение не превышает  $\pm 2$  °С при абсолютных значениях  $T$  до 92 °С. То есть отклонение теоретических результатов от опытных данных не превышает  $\pm 3$  %, или (другими словами) укладывается в диапазон погрешности средств измерения (термопар).

Как показал анализ результатов исследований, с ростом времени разность  $\Delta T = T_{с} - T_{э}$  достигает 46 °С или 50 % от абсолютного значения  $T_{э}$ . То есть даже для такой достаточно простой реализации блока РЭА, работающего в условиях интенсивного теплообмена с внешней средой, имеет место существенная неоднородность температурного поля, обусловленная наличием в области решения сильных неоднородностей теплофизических характеристик и источников тепловыделения.

Моделирование показало, что даже при умеренных тепловых нагрузках (относительно малой мощности тепловыделения источника) температурные поля характеризуются большими градиентами [11]. Перепад температуры  $T$  максимально достигает в пределах платы 65 °С. Естественно, эти перепады температуры не фиксируются моделью с сосредоточенными параметрами.

Для интегральных микросхем, изготовленных по биполярной и МОП (металл-окисел-полупроводник) технологиям по данным [1] с использованием выражения (1) были вычислены показатели интенсивности отказов  $\lambda$  для температуры в фиксированной точке корпуса  $T_p$ , полученной в многомерной постановке, и средней температуры  $T_s$ , полученной по модели с сосредоточенными параметрами.

Как и следовало ожидать, учитывая экспоненциальный характер зависимости  $\lambda(T)$ , отклонение температуры на  $46^\circ\text{C}$  (или на  $\approx 50\%$  от максимальных значений) приводит к падению показателя надежности для всех типов рассмотренных ИС минимально в 5 раз, а для некоторых (полупроводниковые линейные ИС) в 20 раз и более. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, насколько существенны изменения в показателях надежности при переходе к анализу надежности с учетом пространственной неоднородности температурных полей в реальных ЭРИ и деталях РЭА.

Специально исследовалось влияние нестационарности в режиме работы на показатели надежности РЭА. На рис. 2 приведены зависимости расчетного числа отказов от времени для нестационарного теплового режима работы печатной платы.

Хорошо видно, что с ростом времени (и, соответственно, температуры) величина  $\lambda$  растет достаточно существенно для выделенной точки пространственной модели, в то время как рост величины  $\lambda$  для средней

температуры обладает существенно меньшей скоростью (как и рост температуры).

Необходимо отметить, что нестационарность теплового режима объекта исследования была обусловлена, как это обычно бывает, не нестационарностью режима работы РЭА, а поглощением тепла за счет теплоемкости материалов печатной платы до выхода на стационарный режим теплообмена с внешней средой. Аналогичные закономерности проявляются при работе большинства радиотехнических систем в режимах «включение-выключение». Так, например, выход на стационарный тепловой режим приборов бортовой аппаратуры модуля полезной нагрузки спутника связи в негерметичном исполнении составляет от 16 до 22 часов [10]. Поэтому, вероятно, существуют такие режимы работы бортовой радиоэлектроники, когда возможно применение стационарных моделей теплопроводности, но для РЭА космического, авиационного, морского, транспортного базирования нестационарные тепловые режимы являются достаточно типичными. Так, например, бортовая электроника космических аппаратов типа спутников связи, теле- и радиовещания работает в основном в нестационарных режимах. Для ряда систем бортовой аппаратуры спутников связи и контроля стационарные режимы просто недостижимы.

Полученные результаты в целом хорошо соответствуют основным физическим представлениям как о тепловом состоянии элементов РЭА, так и о надежности радиоэлектронной аппаратуры [1].

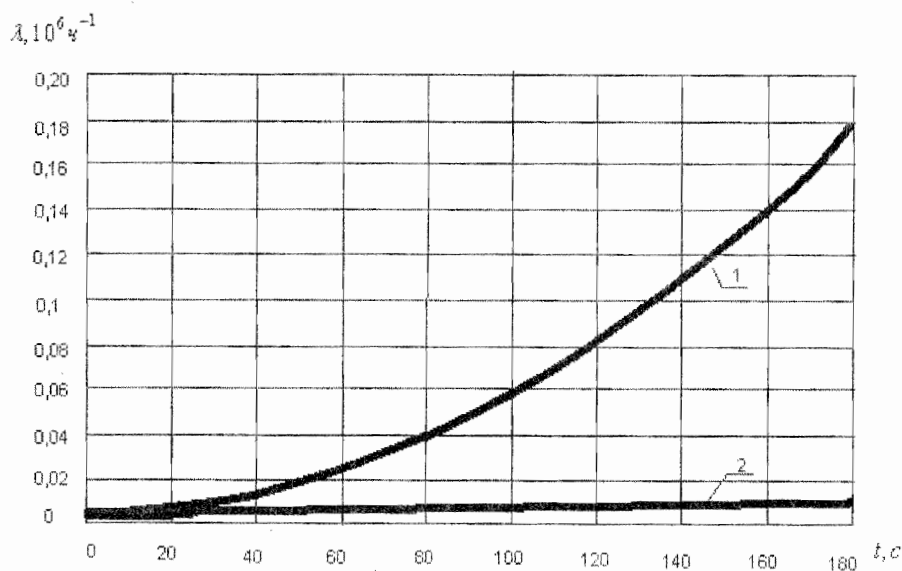


Рис. 2. Изменение во времени интенсивности отказов интегральной микросхемы, вычисленное для температуры фиксированной точки (1) и средней температуры (2) для источника мощностью 2,1 Вт.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что учет неоднородности температурного поля типичных элементов и блоков радиоэлектронной аппаратуры приводит к существенному (от 5 до 20 и более раз) изменению показателей надежности РЭА, рассчитываемых с использованием современных математических моделей надежности [1]. Это позволяет утверждать о перспективности применения пространственных теплофизических моделей узлов и деталей РЭА на этапе

ее конструирования для прогнозирования надежности радиоаппаратуры. Для дальнейшего повышения точности прогностического моделирования необходимо более точное отражение внутренней структуры сложных радиоэлементов, например, интегральных микросхем с большой функциональной насыщенностью и плотностью компоновки (микропроцессоры, большие и сверхбольшие интегральные схемы, оперативные запоминающие устройства).

## Литература

1. Борисов А.А., Горбачева В.М., Карташов Г.Д., Мартынова М.Н., Прыткое С.Ф. Надежность зарубежной элементной базы // Зарубежная радиоэлектроника. 2000. № 5.
2. Бердичевский Б.Е. Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. М., 1977.
3. Маджарова Т.Б., Гаврилова Г.А. Изменение параметров полупроводниковых линейных интегральных микросхем в зависимости от температуры воздуха // Электронная техника. Серия 8. 1975. Вып. 1(31).
4. Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Теплофизические аспекты надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры. Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену. 1998. Т. 1.
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М., 1984.
6. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сиголов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М., 1990.
7. Котляр Я.М., Совершенный В.Д., Стриженев Д.С. Методы и задачи теплообмена. М., 1987.
8. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М., 2001.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. М., 1983.
10. Ашурков Е.А., Бураков В.А., Козлов А.Г., Кожухов В.П. и др. Математическое моделирование нестационарных теплофизических процессов в отсеках бортовой аппаратуры космических аппаратов // Известия вузов. Физика. 1993. №4.
11. Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В. О теплофизическом моделировании надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры // Тезисы докладов XXVI Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск, 2002.

УДК 535.33:535.417:773.93

*Е.А. Довольнов, С.Н. Шарангович*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДВУЧПУЧКОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ И МАЛЫХ КОНТРАСТАХ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Дифракционные решетки (ДР), сформированные в фотополимерных материалах голографическим способом, представляются одними из перспективных методов решения задач динамической голографии и оптической обработки информации [1]. К настоящему времени достаточно подробно изучены процессы формирования пропускающих ДР в поглощающих ФПМ и их дифракционные свойства [2, 3]. В нелинейной модели формирования отражающих ДР, представленной в [4], основное внимание уделено процессу записи при больших контрастах. Одна-

ко в ряде практических ситуаций, например при одновременной записи нескольких ДР путем углового мультиплексирования, запись осуществляется в условиях малых контрастов. В этом случае необходимо принимать во внимание эффекты двухпучкового взаимодействия световых волн на первой гармонике поля формируемой ими голографической решетки.

Целью данной работы является получение аналитической модели формирования отражающей голографической дифракционной решетки (ОГДР) в фотополимерном материале (ФПМ)