

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБЪЕМНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Д. В. ОЗЕРКИН

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Томск, Россия
E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru*

Рассмотрен статистический метод анализа температурной стабильности электронных устройств. Показано, что на основе факторного эксперимента возможно получение уравнение температурной погрешности, в котором устанавливается функциональная взаимосвязь между факторами (температурой электрорадиоизделий) и выходным параметром электронного устройства. Поскольку в условиях пространственной структуры объемных интегральных схем объединение электрорадиоизделий возможно не только планарно, но и на разных уровнях, введено понятие „объемная локальная группа“. Показано, что для этого предварительно необходимо найти распределение температурного поля для пространственной структуры объемной интегральной схемы. Наиболее эффективным методом нахождения температурного поля в настоящее время признан метод конечных элементов как разновидность численных методов решения дифференциального уравнения теплопроводности. Представлены результаты моделирования температурной стабильности для импульсного усилителя мощности, реализованного в виде трехслойной структуры объемной интегральной схемы.

Ключевые слова: *электрорадиоизделие, объемная интегральная схема, импульсный усилитель мощности, температурная стабильность, регрессионный анализ, уравнение температурной погрешности, вычислительный факторный эксперимент, объемная локальная группа, метод конечных элементов*

Введение. Исторически сложилось, что при производстве интегральных микросхем (ИС) используется топологический уровень проектирования планарных однослойных конструкций [1]. Эффективным способом решения задачи увеличения плотности упаковки элементов ИС является применение объемных топологических уровней проектирования и, как следствие, переход к конструктивному исполнению в виде объемных (многослойных) ИС (ОИС) [2].

Однако вопрос температурной стабильности выходных электрических параметров ОИС, как показывает анализ работ [3—13], в должной мере еще не рассмотрен. В связи с этим цель настоящей статьи — исследование влияния неравномерности (B_i) температурного поля пространственной структуры ОИС на стабильность электрических выходных параметров.

Теоретическая часть. В работе [14] предложен способ определения коэффициентов B_i методом статистического планирования эксперимента в сочетании с регрессионным анализом:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \right] \Delta T, \quad (1)$$

где $\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} = B_i$, q_i — параметры электрорадиоизделий (ЭРИ); α_i — температурный коэффициент i -го параметра, ΔT — интервал варьирования температуры.

Температурные зависимости параметров ЭРИ случайны по величине и знаку в пределах заданных значений, поэтому для математического описания температурной погрешности электронных устройств применение статистического анализа оправданно. Уравнение регрессии, получаемое по результатам эксперимента, может быть представлено в общем виде как

$$m = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i q_i + \sum_{i < j} b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} q_i^2 + \dots, \quad (2)$$

где m — оценка генерального значения выходного параметра N ; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} — эмпирические коэффициенты уравнения регрессии, являющиеся оценками соответствующих генеральных коэффициентов.

В отличие от [14], автором настоящей статьи предлагается при реализации плана эксперимента производить варьирование не величины термозависимых параметров, а непосредственно температуры ΔT_i ЭРИ. В этом случае уравнение температурной погрешности приобретает вид

$$\frac{\Delta N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВЫХ}}} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots, \quad (3)$$

где $a_i = \frac{b_i T_0}{\Delta T b_0}$ — коэффициент влияния i -го ЭРИ; T_0 — номинальная температура (нулевой уровень варьирования); $\Delta T_i/T_i$ — относительное изменение рабочей температуры ЭРИ; ΔT_j — абсолютное изменение рабочей температуры для смежного ЭРИ по отношению к i -му ЭРИ.

Для определения $\Delta T_i/T_i$ в (3) необходимо найти температурное поле ОИС. Эта задача сводится к анализу обобщенной теплофизической модели твердотельной системы, созданной по объемной многослойной технологии [15]. Графическое представление указанной задачи приведено на рис. 1. Структура параллелепипеда из n слоев имеет размер l_x и l_y по осям абсцисс и ординат соответственно. По оси аппликат отмечены слои ОИС размером $h_1, h_2, \dots, h_i, h_n$. Общая толщина ОИС равна $H = \sum h_n$. В каждом слое h_i ОИС может находиться источник тепловыделения с плотностью тепловыделения $q_i(x, y)$, причем координаты расположения источника по осям абсцисс и ординат могут быть произвольными, а по оси аппликат — фиксированы.

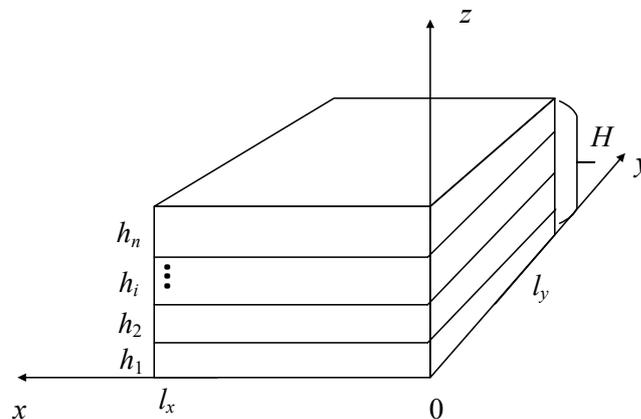


Рис. 1

На шести поверхностях ОИС (верхней, нижней и четырех боковых) заданы параметры конвективно-радиационного теплообмена с окружающей средой, которые в общем случае различны: $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$, α_{δ_1} , α_{δ_2} , α_{δ_3} , α_{δ_4} . Кроме этого, на нижней и верхней поверхностях ОИС, т.е. на внешних слоях, также могут находиться источники тепловыделения (ЭРИ) с плотностью $q_{\text{н}}(x, y)$ и $q_{\text{в}}(x, y)$ соответственно. Уравнение теплопроводности для i -го слоя ОИС имеет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{j=1}^m q_j(x, y), \quad (4)$$

где c и ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность i -го слоя материала; λ — коэффициент теплопроводности i -го слоя материала.

Граничные условия III рода (для слоев h_1 , h_n) и IV рода (для слоев h_i) определяются как

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z=0} + \alpha_{\text{н}} (T_1 - T_{\text{ср}}) + q_{\text{н}}(x, y) = 0; \quad (5)$$

$$T_i \Big|_{z=h_i} = T_{i+1} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z_i} \Big|_{z=h_i} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z_{i+1}} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad (6)$$

$$-\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z_n} \Big|_{z=h_n} + \alpha_{\text{в}} (T_n - T_{\text{ср}}) + q_{\text{в}}(x, y) = 0; \quad (7)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{i,x=0}(y); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=l_x} = -q_{i,x=l_x}(y); \quad (8)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_{i,y=0}(x); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=l_y} = -q_{i,y=l_y}(x). \quad (9)$$

Начальное условие имеет вид

$$T \Big|_{\tau=0} = T_{\text{ср}}(x, y, z). \quad (10)$$

Искомой в задаче (4)—(10) является функция $T(x, y, z, \tau)$, заданная в непрерывной области:

$$\Omega = \{0 \leq x \leq l_x\} \times \{0 \leq y \leq l_y\} \times \{0 \leq z \leq H\} \times \{0 \leq \tau \leq \tau_{\text{max}}\}.$$

Наиболее распространенным методом решения дифференциального уравнения (4) в частных производных является метод конечных элементов.

Эксперимент. Объект исследования — мостовой импульсный усилитель мощности (ИУМ) — предназначен для построения блоков управления приводами космических аппаратов. Электрическая принципиальная схема объекта исследования (рис. 2) состоит из малогабаритной элементной базы:

- $R1 \dots R6$ — полупроводниковые интегральные резисторы;
- TI — импульсный трансформатор в микромодульном исполнении ММТИ;
- $VD1 \dots VD4$ — быстровосстанавливающиеся диоды 2Д717А9;
- $VT1 \dots VT4$ 2Т690АС и $VT5, VT7$ 2Т665А91 — биполярные транзисторы со структурой $n-p-n$;
- $VT9 \dots VT12$ 2Т689АС и $VT6, VT8$ 2Т664А91 — биполярные транзисторы со структурой $p-n-p$.

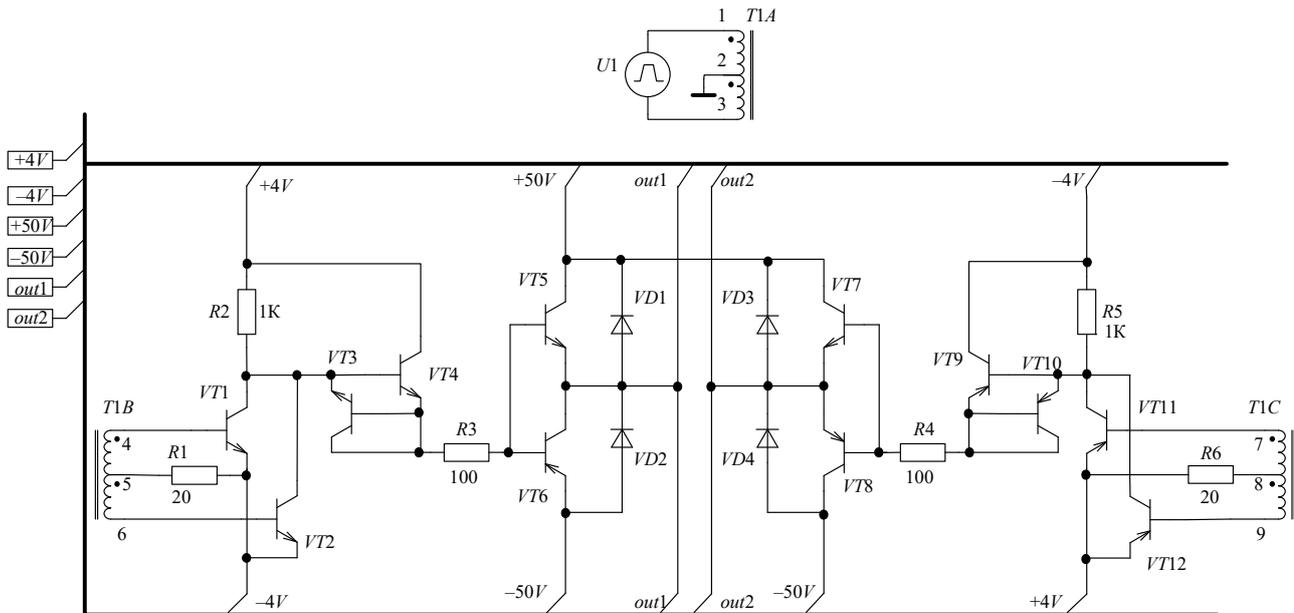


Рис. 2

Схемотехническое моделирование мостового ИУМ проведено в программной среде Spectrum Software MicroCAP 11. Математические SPICE-модели элементной базы ИУМ представляют авторскую разработку по методологии, изложенной в [16]. Вычислительный факторный эксперимент также реализуется в программной среде Spectrum Software MicroCAP 11. Критерий оптимизации — минимизация относительной погрешности при удвоении амплитуды выходного напряжения ИУМ как функции относительных изменений рабочих температур ЭРИ:

$$\frac{\Delta 2U_{\text{ВЫХ}}}{2U_{\text{ВЫХ}}} = f\left(\frac{\Delta T_i}{T_i}\right).$$

Факторы в вычислительном эксперименте — рабочие температуры ЭРИ, входящих в электрическую схему усилителя. В ходе предварительных тестовых испытаний отобраны шесть ЭРИ, изменение температуры которых влияет на выходной параметр усилителя: транзисторы $VT3$, $VT4$, $VT5$, $VT7$, $VT9$, $VT10$. Число опытов в матрице планирования составляет $R = 2^6 = 64$. Номинальная температура всех ЭРИ $T_{\text{ЭРИ}} = 300 \text{ K}$ (27°C). Интервалы варьирования факторов — $\Delta T_{\text{ЭРИ}} = 10 \text{ K}$.

Уравнение температурной погрешности в соответствии с (3) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta 2U_{\text{ВЫХ}}}{2U_{\text{ВЫХ}}} = & 0,072 \frac{\Delta T_{VT3}}{T_{VT3}} + 0,079 \frac{\Delta T_{VT4}}{T_{VT4}} + 0,015 \frac{\Delta T_{VT5}}{T_{VT5}} + \\ & + 0,053 \frac{\Delta T_{VT7}}{T_{VT7}} + 0,060 \frac{\Delta T_{VT9}}{T_{VT9}} + 0,026 \frac{\Delta T_{VT10}}{T_{VT10}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ уравнения (11) позволяет утверждать следующее:

— для достижения минимального значения температурной погрешности ИУМ следует стремиться к минимальным значениям изменения рабочей температуры ЭРИ $\Delta T_{\text{ЭРИ}}$ при поддержании максимальных значений рабочей температуры этих же ЭРИ;

— выдвинутое требование минимизации конструктивно может быть достигнуто либо с помощью микротермостатирования, либо с помощью определения местоположения ЭРИ в пространственной структуре ОИС, где

$$\{\Delta T_{VT3}, \Delta T_{VT4}, \Delta T_{VT5}, \Delta T_{VT7}, \Delta T_{VT9}, \Delta T_{VT10}\} \rightarrow \min, \quad (12)$$

$$\{T_{VT3}, T_{VT4}, T_{VT5}, T_{VT7}, T_{VT9}, T_{VT10}\} \rightarrow \max. \quad (13)$$

Конструкция ОИС ИУМ представлена на рис. 3, а, где 1 — тепловыделяющие ЭРИ (кристаллы транзисторов $VT5$ — $VT8$), 2 — диэлектрические слои (SiO_2), 3 — подложки (Si), 4 — теплоотводящая пластина (Cu), 5 — корпус ОИС (керамика). Основа конструкции — керамическая пластина корпуса ОИС, толщина пластины 1 мм. На ней расположена многослойная структура ОИС, реализованная по технологии 3D TSV [17]. По результатам схемотехнического моделирования установлено, что электрическая схема ИУМ (см. рис. 2) содержит четыре ЭРИ со значительным тепловыделением: $VT5$ ($P = 530$ мВт), $VT6$ ($P = 60$ мВт), $VT7$ ($P = 60$ мВт), $VT8$ ($P = 530$ мВт). Эти ЭРИ расположены в углах стека ОИС, что способствует более эффективному теплоотводу за счет конвекции. Размеры кристаллов транзисторов $VT5$... $VT8$ составляют $2 \times 2 \times 0,5$ мм.

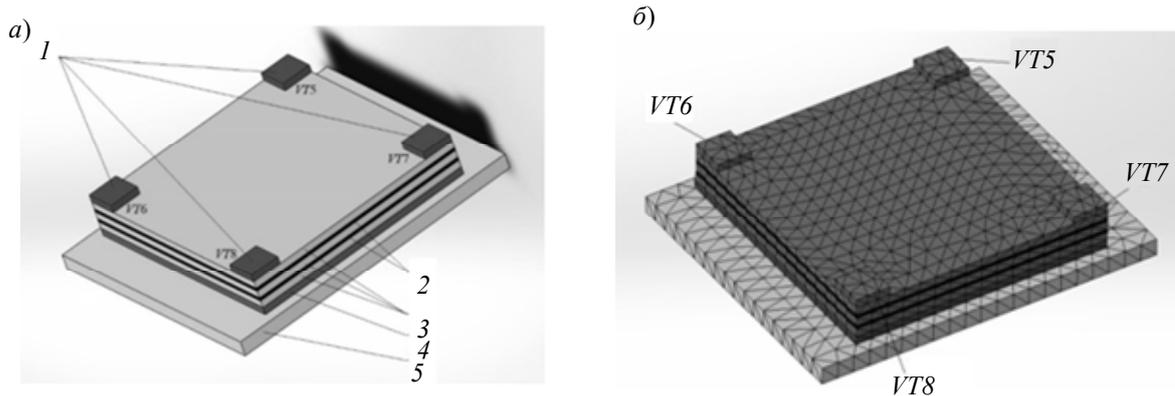


Рис. 3

Теплофизическое моделирование конструкции ОИС ИУМ проведено в среде SolidWorks Simulation, которая позволяет бесшовно перейти от создания 3D-модели ОИС непосредственно к анализу особенностей ее температурного поля (рис. 3, б, здесь размер элемента сетки $\Delta = 0,602$ мм, коэффициент формы $k = 1,5$). Четыре тепловыделяющих объекта — транзисторы $VT5$... $VT8$ — характеризуются постоянным во времени тепловыделением. Начальные условия теплофизического моделирования: температура окружающей среды и температура конструкции ОИС равна $T_{cp} = 0$ °С (273 К). Теплообмен с окружающей средой происходит за счет конвективного механизма теплопередачи. Коэффициент конвективной теплоотдачи в процессе моделирования является величиной постоянной и составляет $\alpha_k = 17,5$ Вт/(м²·К), что соответствует среднему диапазону для свободной конвекции газов по источнику [18]: $\alpha_k \in [5...30]$. Конвективный теплообмен происходит со всех граней конструкции ОИС, обращенных в окружающую среду.

Результаты моделирования стационарного теплового режима ОИС ИУМ представлены на рис. 4, а, б. Зондирование поверхностей корпусов кристаллов ЭРИ позволяет определить их рабочую температуру: $T_{VT6} = T_{VT7} = 330,1$ К (57,1 °С); $T_{VT5} = T_{VT8} = 335,4$ К (62,4 °С). Функциональные возможности программной среды позволяют определить координаты точек в пространственной структуре стека ОИС для последующего размещения ЭРИ. Заметим, что тепловыделяющие ЭРИ уже фиксированы, следовательно, речь идет об определении местоположения для оставшихся ЭРИ в соответствии с (11): $VT3$, $VT4$, $VT9$, $VT10$. Как было отмечено выше, согласно (11) оптимальный вариант распределения температуры характеризуется условиями (12), (13). С учетом стационарного теплового режима условие (12) соблюдается по всей конструкции ОИС и соответствует изменению температуры окружающей среды $\Delta T_i = \Delta T_{cp}$. Условие (13) может быть достигнуто путем размещения кристаллов ЭРИ $VT3$, $VT4$, $VT9$, $VT10$ в две объемные локальные группы (ОЛГ1, ОЛГ2) на изотермической поверхности вблизи источников тепловыделения с необходимыми технологическими зазорами между ЭРИ. В конструкции ОИС существуют две такие изотермические поверхности (симметричные относительно центра) с температурой $T_{ОЛГ1} = T_{ОЛГ2} = 333$ К (60 °С) и координатами

центров поверхностей (2,42, -5,46, 3,4) мм и (13,3, -15,2, 3,4) мм. Начало координат показано на рис. 4, б, оно совпадает с левым ближним углом (относительно наблюдателя) корпуса ОИС.

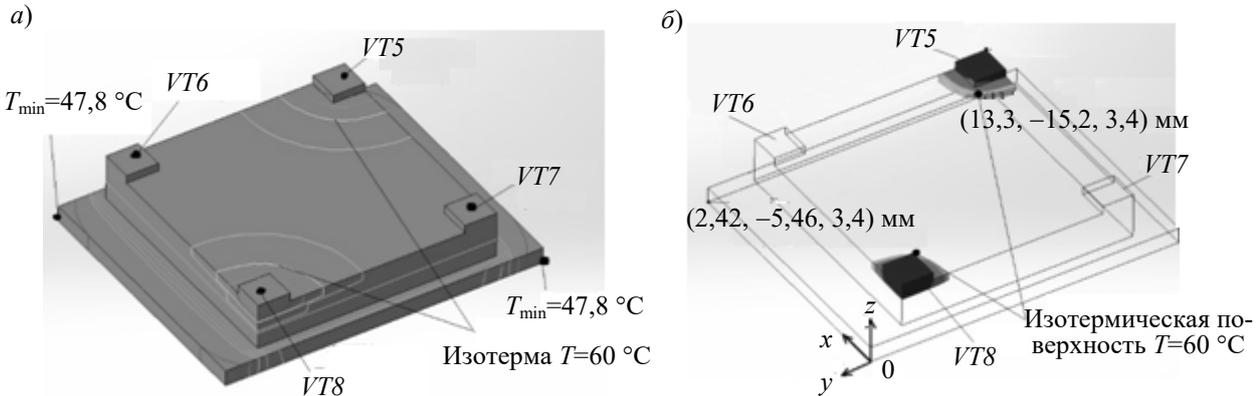


Рис. 4

Проведем анализ конструктивного исполнения ОИС ИУМ с целью определения диапазонов изменения температурной стабильности выходного параметра согласно (11). По справочным данным [19] определим предельную рабочую температуру эксплуатации для транзисторов $VT3$ — $VT5$, $VT7$, $VT9$, $VT10$:

$$T_{p \min} = 213 \text{ К } (-60 \text{ }^\circ\text{C}); T_{p \max} = 398 \text{ К } (125 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Согласно проведенному теплофизическому моделированию в стационарном режиме температура ОЛГ с ЭРИ $VT3$, $VT4$, $VT9$, $VT10$ составила $T_{\text{ОЛГ}} = 333 \text{ К } (60 \text{ }^\circ\text{C})$ при температуре окружающей среды $T_{\text{ср}} = 273 \text{ К } (0 \text{ }^\circ\text{C})$, следовательно, перегрев ОЛГ составляет $\theta_{\text{ОЛГ}} = T_{\text{ОЛГ}} - T_{\text{ср}} = 60 \text{ К}$. Рабочая температура тепловыделяющих транзисторов $VT5$, $VT7$ составляет $T_{p \text{ } VT5} = 335,4 \text{ К } (62,4 \text{ }^\circ\text{C})$ и $T_{p \text{ } VT7} = 330,1 \text{ К } (57,1 \text{ }^\circ\text{C})$ соответственно (см. рис. 4, а). Перегрев транзистора $VT5$ относительно ОЛГ — $\theta_{VT5} = T_{p \text{ } VT5} - T_{\text{ОЛГ}} = 335,4 - 333 = 2,4 \text{ К}$.

Определим минимально возможную температуру ОЛГ

$$T_{\text{ОЛГ min}} = T_{\text{ср min}} + \theta_{\text{ОЛГ}} = 213 + 60 = 273 \text{ К } (0 \text{ }^\circ\text{C})$$

и температуру среды при максимально возможной рабочей температуре ОЛГ $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К } (120 \text{ }^\circ\text{C})$:

$$T_{\text{ср max}} = T_{\text{ОЛГ max}} - \theta_{\text{ОЛГ}} = 393 - 60 = 333 \text{ К } (60 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Заметим, что при $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К}$ рабочая температура транзистора $VT5$ находится в пределах допустимых значений:

$$T_{p \text{ } VT5} = T_{\text{ОЛГ max}} + \theta_{VT5} = 393 + 2,4 = 395,4 \text{ К}.$$

Примем минимальное значение изменения температуры окружающей среды $\Delta T_{\text{ср min}} = 10 \text{ К}$. Тогда максимальное изменение температуры среды будет определяться пределом рабочей температуры в области низких температур:

$$\Delta T_{\text{ср max}} = T_{\text{ОЛГ min}} - T_{p \min} = 273 - 213 = 60 \text{ К}.$$

Определим максимальную температуру ОЛГ при $\Delta T_{\text{ср max}} = 60 \text{ К}$:

$$T_{\text{ОЛГ}}(\Delta T_{\text{ср max}}) = T_{p \max} - \Delta T_{\text{ср max}} = 398 - 60 = 338 \text{ К } (65 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Аналогичным образом можно вычислить значения $T_{\text{ОЛГ}}$ при $\Delta T = 50, 40, 30, 20 \text{ К}$. В графическом виде проведенный анализ можно представить на координатной плоскости в системе координат $\frac{\Delta 2U}{2U} = f(T_{\text{ОЛГ}})$ как семейство гиперболических кривых (рис. 5). Каждая кривая построена по (11) при соответствующем значении ΔT . Жирными линиями выделены границы допустимых режимов эксплуатации, определяемые $T_{\text{ОЛГ min}}$, $T_{\text{ОЛГ max}}$ и $T_{\text{ОЛГ}}(\Delta T_{\text{ср max}} = 60 \text{ К})$. В четырех крайних точках полученной замкнутой фигуры указаны вычисленные значения температурной погрешности ОИС ИУМ согласно (11): максимальное значение температур-

ной погрешности в точке $T_{\text{ОЛГ min}} = 273 \text{ К}$ при $\Delta T_6 = 60 \text{ К}$ составляет $\frac{\Delta 2U}{2U} = 0,0644$, а минимальное значение в точке $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К}$ при $\Delta T_6 = 10 \text{ К}$ — $\frac{\Delta 2U}{2U} = 0,0081$. Разность максимального и минимального значений температурной погрешности: $0,0644/0,0081 = 7,951$ раза. Зависимость температурной погрешности от температуры объемной локальной группы имеет нелинейный (гиперболический) характер, причем по мере увеличения ΔT нелинейность зависимости также увеличивается. Изменение температурной погрешности в интервале $\Delta T = 10 \text{ К}$ составляет $0,0107/0,0081 = 1,321$ раза.

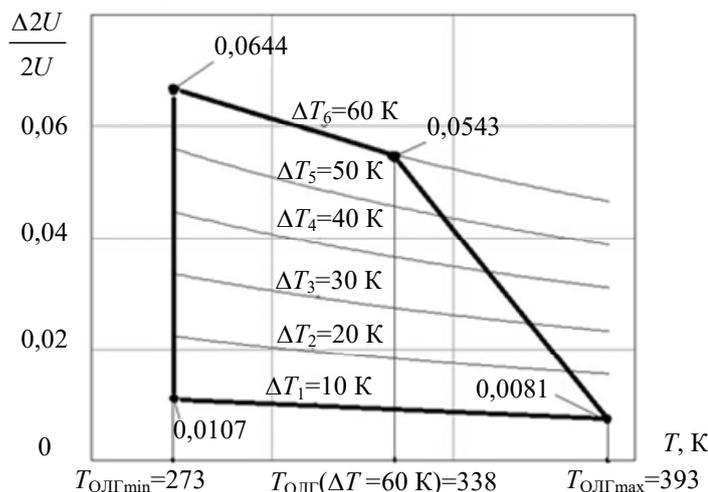


Рис. 5

Заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Рассмотрена конструкция объемной интегральной микросхемы импульсного усилителя мощности, в которой в зависимости от температуры объемной локальной группы ЭРИ и от величины изменения температуры окружающей среды можно достичь снижения температурной погрешности определения выходного параметра в несколько раз. При $\Delta T_{\text{ср}} = \text{const}$ температурная погрешность изменяется в 1,3 раза за счет изменения местоположения ОЛГ в пространственной структуре ОИС.

С помощью уравнения температурной погрешности (11) возможно проводить аналитическую оценку температурной стабильности конструкции электронных устройств путем размещения термочувствительных ЭРИ в определенных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lakatoş E. Ş. 60 years from the invention of the integrated circuits // EEA — Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2018. N 66 (3). P. 72—80.
2. Garrou P., Koyanagi M., Ramm P. Handbook of 3D Integration. Vol. 3. Weinheim: Wiley-VC H, 2014. 451 p.
3. Gvozdev V. I., Podkovyrin S. I. Optical-microwave electronics in the engineering of bulk integrated circuits // J. of Communications Technology and Electronics. 1995. N 40 (15). P. 74—88.
4. Klyuev S. B., Mezhekova E. V., Nefedov E. I., Popov R. S. High-model in transmission lines for three-dimensional integrated circuits // Doklady Akademii Nauk. 2002. N 383 (5). P. 630—635.
5. Pogudkin A. V., Belyakov I. A., Vertyanov D. V., Kruchinin S. M., Timoshenkov S. P. Research of reconstructed wafer surface planarity on the metall-compound-silicon boundary for multi-chip module with embedded dies // Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg — Moscow, 2019.
6. А. с. 1675908 А1, СССР. Способ теплового контроля качества объемных интегральных схем / В. С. Осадчук, Е. А. Паламарчук, В. В. Стронский, А. Г. Яровенко. 07.09.1991.

7. Яблочников Е. И., Смирнов П. В., Воробьев А. С. Применение систем виртуального моделирования для разработки технологических процессов корпусирования электронных компонентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 33—36.
8. Raghuvanshi S., Nagar P., Singh G. K. A review on thermal aware optimization of three dimensional integrated circuits (3D ICs) // Intern. Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2014. Vol. 4. P. 31—41.
9. Yan H., Zhou Q., Hong X. Thermal aware placement in 3D ICs using quadratic uniformity modeling approach // Integration, the VLSI Journal. 2009. Vol. 42. P. 175—180.
10. Cong J., Luo G. Thermal-Aware 3D Placement // Three Dimensional Integrated Circuit Design. EDA, Design and Microarchitectures; Ed.: Yuan Xie, I. Cong, S. Sapatnekar. Boston, MA: Springer, 2010. P.103—144.
11. Luo G., Shi Y., Cong J. An analytical placement framework for 3-D ICs and its extension on thermal awareness // IEEE Transact. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2013. Vol. 32, iss. 4. P. 510—523.
12. Cong J., Luo G., Shi Y. Thermal-aware cell and through-silicon-via co-placement for 3D ICs // Proc. of the 48th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conf. (DAC), New York, USA, 5—9 June 2011. P. 670—675.
13. Jeong J., Jang S., Choi W., Kim Y., Chun K. Thermal structure design for enhanced heat spreading in 3D ICs // IEEE Tencen Spring, Sydney, NSW, Australia. 2013. P. 544—547.
14. Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973. 128 с.
15. Ovchinnikov S. V., Lyashenko A. V. Synthesized model for analytical calculation of temperature field and thermal resistance elements of solid state electronics // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2012. № 12. С. 11—18.
16. Озеркин Д. В., Русановский С. А. Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 2. С. 49—54.
17. Fukushima T., Bea J., Murugesan M., Lee K.-W., Tanaka T., Koyanagi M. Self-assembly-based 3D integration technologies // Proc. of the 3rd IEEE Intern. Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, Tokyo, 2012. P. 151—151.
18. Дутьнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. школа, 1984. 247 с.
19. Петухов В. М. Полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 224 с.

Сведения об авторе

Денис Витальевич Озеркин

— канд. техн. наук, доцент; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга; декан радиоконструкторского факультета; E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

Поступила в редакцию
15.05.2020 г.

Ссылка для цитирования: Озеркин Д. В. Моделирование анизотропности температурного поля объемных интегральных микросхем // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 657—665.

MODELING THE TEMPERATURE FIELD ANISOTROPY OF VOLUMETRIC INTEGRATED CIRCUITS

D. V. Ozerkin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Russia
E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

A statistical method for analyzing the temperature stability of electronic devices is considered. It is shown that, on the basis of a factorial experiment, it is possible to obtain an equation of temperature error, in which a functional relationship is established between factors (temperature of electrical radio products) and the output parameter of an electronic device. Since under the conditions of the spatial structure of volumetric integrated circuits, the unification of electrical and radio products is possible not only in a plane, but also at multiple levels, the concept of "volumetric local group" is introduced. Design of such a group is

demonstrated to necessitate a preliminary determination of temperature distribution for the volumetric integrated circuit spatial structure. Simulation of temperature field distribution is carried out using the finite element method currently recognized as the most effective numerical method for solving the differential equation of thermal conductivity. Results of temperature stability modeling for a pulsed power amplifier designed as a three-layer structure of a volumetric integral circuit are presented.

Keywords: electronic equipment, radioelement, bulk integrated circuit, pulsed power amplifier, temperature stability, regression analysis, temperature error equation, computational factor experiment, local volume group, finite element method

REFERENCES

1. Lakatoş E.Ş. *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 2018, no. 3(66), pp. 72–80.
2. Garrou P., Koyanagi M., Ramm P. *Handbook of 3D Integration*, 2014, vol. 3, 451 p.
3. Gvozdev V.I., Podkovyrin S.I. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1995, no. 15(40), pp. 74–88.
4. Klyuev S.B., Mezhekova E.V., Nefedov E.I., Popov R.S. *Doklady Akademii Nauk*, 2002, no. 5(383), pp. 630–635.
5. Pogudkin A.V., Belyakov I.A., Vertyanov D.V., Kruchinin S.M., Timoshenkov S.P. *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EI-ConRus*, 2019.
6. Certificate of authorship SU 1675908 A1, *Sposob teplovogo kontrolya kachestva ob'yemnykh integral'nykh skhem* (Method for Thermal Quality Control of Volumetric Integrated Circuits), Osadchuk V.S., Palamarchuk E.A., Stronskiy V.V., Yarovenko A.G. 07.09.1991.
7. Yablochnikov E.I., Smirnov P.V., Vorob'yev A.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8(57), pp. 33–36.
8. Raghuvanshi S., Nagar P., Singh G.K. *International Journal of Modern Engineering Research (IJ-MER)*, 2014, vol. 4, pp. 31–41.
9. Yan H., Zhou Q., Hong X. *Integration, the VLSI Journal*, 2009, vol. 42, pp. 175–180.
10. Cong J., Luo G. *Three Dimensional Integrated Circuit Design. EDA, Design and Microarchitectures*, Springer, Boston, MA, 2010, pp. 103–144.
11. Luo G., Shi Y., Cong J. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2013, no. 4(32), pp. 510–523.
12. Cong J., Luo G., Shi Y. *48th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, 2011, pp. 670–675.
13. Jeong J., Jang S., Choi W., Kim Y., Chun K. *IEEE 2013 Tenccon - Spring*, Sydney, NSW, Australia, 2013, pp. 544–547.
14. Fomin A.V., Borisov V.F., Chermoshenskiy V.V. *Dopuski v radioelektronnoy apparature* (Tolerances in Radio Electronic Equipment), Moscow, 1973, 128 p. (in Russ.)
15. Ovchinnikov S.V., Lyashenko A.V. *Geteromagnitnaya mikroelektronika*, 2012, no. 12, pp. 11–18. (in Russ.)
16. Ozerkin D.V., Rusanovskiy S.A. *Proceedings of the TUSUR University*, 2017, no. 2(20), pp. 49–54. (in Russ.)
17. Fukushima T., Bea J., Murugesan M., Lee K.-W., Tanaka T., Koyanagi M. *2012 3rd IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration*, Tokyo, 2012, pp. 151–151.
18. Dul'nev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature* (Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment), Moscow, 1984, 247 p. (in Russ.)
19. Petukhov V.M. *Poluprovodnikovyye pribory. Tranzistory. Dopolneniye pervoye: Spravochnik* (Semiconductor Devices. Transistors. Appendix One: The Handbook), Moscow, 1993, 224 p. (in Russ.)

Data on author

Denis V. Ozerkin — PhD, Associate Professor; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring; Dean of Radio Design Faculty;
E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

For citation: Ozerkin D. V. Modeling the temperature field anisotropy of volumetric integrated circuits. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 657—665 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-657-665