

Модель тепловыделения в гибридных интегральных микросхемах

Р.Р. Бабаян (ИПУ РАН)

Рассмотрена математическая модель тепловых процессов, протекающих в интегральных гибридных микросхемах, рекомендуемая к применению на этапе автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: интегральная гибридная микросхема, тепловые процессы, математическая модель.

Автоматизация проектирования интегральных гибридных микросхем (ГИС) сталкивается с проблемой тепловыделения, которое существенно влияет на надежность и качество таких устройств. Постановка "чистого" физического эксперимента для измерения тепловыделения в различных узлах схемы весьма сложная, а зачастую и невозможная задача. Однако повышение степени интеграции микросхем делает весьма актуальной задачу расчета и отвода тепла.

Для расчета температур элементов конструкции гибридных микросхем можно воспользоваться уравнением для теплового потока, являющимся аналогом закона Ома. Достоинство моделирования на основе электрических аналогий тепловых процессов – сравнительная простота и дешевизна. Недостаток этого метода – невысокая точность (погрешность 12..15%) и неудобства при использовании метода в системах автоматизированного проектирования [1].

В настоящей статье предлагается математическая модель тепловых процессов, обеспечивающая достаточно высокую точность и качество выпускаемой продукции. Рассмотрим математическую модель ГИС металлокерамической или бескорпусной конструкции с подложкой, приклеенной к основанию корпуса или к теплоотводящей шине (рис. 1), где кондуктивный теплообмен осуществляется с одной или обеих больших поверхностей подложки и торцов.

Тепловая модель такой конструкции ГИС – двухслойный прямоугольный параллелепипед с плоскими источниками тепла (рис. 2) $2\Delta 1$ и $2\Delta 2$ и мощностью P . Коэффициенты теплопроводности материалов слоев обозначим $\Delta 1$ и $\Delta 2$.

Температурное поле на поверхности подложки как прямоугольного источника тепла (суперпозиция температурных полей от элементов ГИС) определяется уравнениями

$$\frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} + \frac{d^2\theta_1}{dx_2^2} + \frac{d^2\theta_1}{dx_3^2} = 0, \quad \frac{d^2\theta_2}{dx_1^2} + \frac{d^2\theta_2}{dx_2^2} + \frac{d^2\theta_2}{dx_3^2} = 0,$$

$$\theta_1|_{x_3=l_4} = \theta_2|_{x_3=l_4} \quad (1)$$

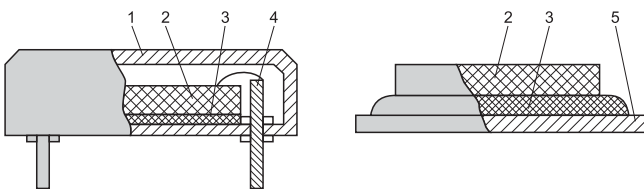


Рис. 1. Конструкция ГИС: 1 – корпус; 2 – подложка; 3 – клей (компаунд); 4 – выводы; 5 – теплоотводящая шина

$$\lambda_1 \frac{d\theta_1}{dx_3} \Big|_{x_3=l_4} = \lambda_2 \frac{d\theta_2}{dx_3} \Big|_{x_3=l_4}$$

с граничными условиями:

$$\frac{d\theta_2}{dx_3} \Big|_{x_3=h} = \begin{cases} \frac{P_0 - \alpha\theta_2}{\lambda_2} & \text{при } \begin{cases} E_1 - \Delta 1 \leq x_1 \leq E_1 + \Delta 1, \\ E_2 - \Delta 2 \leq x_2 \leq E_2 + \Delta 2, \end{cases} \\ -\frac{\alpha\theta_2}{\lambda_2}, & \text{во всей остальной области,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_1|_{x_3=0} = 0, \quad \frac{d\theta_i}{dx_1} \Big|_{x_1=0} = \frac{d\theta_i}{dx_2} \Big|_{x_2=0} = 0, \quad i=1,2,$$

$$P_0 = P_i / (2\Delta 1 \cdot 2\Delta 2),$$

где E_1, E_2 – координаты центра источника тепла; $\theta_1 = T_1 - T_k$; $\theta_2 = T_2 - T_k$; $\Delta 1, \Delta 2$ – полуразмеры источника тепла по координатам (x_1, x_2) ; T_1, T_2 – температуры в слоях; T_k – температура основания ГИС; P_0 – поверхностная плотность тепловыделения, $h = l_3 + l_4$, α – коэффициент.

Для решения краевой задачи использовался конечно-разностный метод: объем параллелепипеда подложки ГИС разбивается сеткой равностоящих узлов (рис. 2). На отрезке оси $0x_1(0, l_1) - k_1$ узлов на расстоянии $h_1 = l_1 / (k_1 - 1)$ друг от друга, на отрезке оси $0x_2(0, l_2) - k_2$ узлов на расстоянии $h_2 = l_2 / (k_2 - 1)$; на отрезке оси $0x_3(l_4, l_4 + l_3) - k_3$ узлов на расстоянии $h_3 = l_3 / (k_3 - 1)$; на отрезке оси $0x_3(0, l_4) - k_4$ узлов на расстоянии $h_4 = l_4 / (k_4 - 1)$.

Текущий узел трехмерной координатной сетки имеет координаты

$$x_1 = h_1(i_1 - 1), \quad \text{где } 1 < i_1 < k_1,$$

$$x_2 = h_2(i_2 - 1), \quad \text{где } 1 < i_2 < k_2,$$

$$x_3 = \begin{cases} h_4(i_3 - 1) & \text{при } 1 < i_3 < k_4, \\ l_4 + h_3(i_3 - k_4 - 1) & \text{при } k_4 < i_3 < k_4 + k_3, \end{cases}$$

где i_1, i_2, i_3 – дискретные координаты узла.

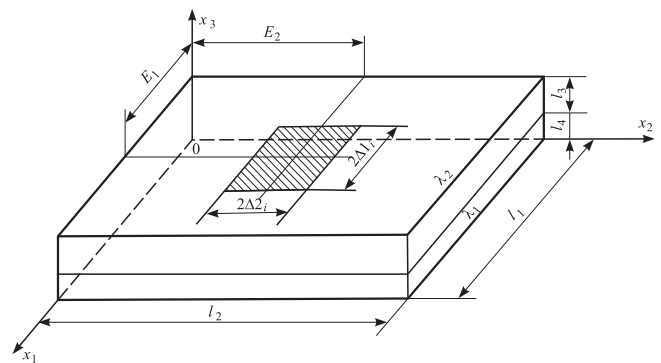


Рис. 2. Тепловая модель ГИС

Номер узла в одномерной последовательности узлов связывается с его дискретными координатами зависимостью

$$I = k_2(i_3 - 1) + k_1(i_2 - 1) + i_1.$$

Заменив дифференциальные уравнения с частными производными в уравнениях (1) и (2) конечными разностями, получим систему линейных алгебраических уравнений, $A\theta = F$, коэффициенты которой – разреженная матрица с большинством нулевых элементов, а ненулевые элементы находятся на семи диагоналях, включая главную [2].

Для рассчитываемых подложек ГИС (1×30×48 мм) наибольший порядок системы $N \approx 1,5 \cdot 10^4$, а коэффициенты удовлетворяют условию

$$|a_{ii}| \geq \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N |a_{ij}|.$$

Таким образом, достаточные условия сходимости методов простой итерации и некоторых других итерационных методов не выполняются строго, так как диагональный элемент матрицы A недостаточно преобладает над остальными элементами и матрица A лишь

частично симметрична, но достаточно обусловлена и применение итерационных методов для решения данной системы уравнений возможно. Последовательное приближение вычисляется следующим образом:

$$\theta_i^{(k+1)} = f_i/a_{ii} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{a_{ij}}{a_{ii}} \theta_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij}}{a_{ii}} \theta_j^{(k)} \right), \quad (3)$$

где $\theta_i^{(k+1)}$ – текущее приближение i -го неизвестного; $\theta_i^{(k)}$ – предыдущие приближения i -го неизвестного; $a_{ij}(j, i = 1, 2, \dots, N)$ – коэффициенты системы; f_i – i -я правая часть системы.

Во всем диапазоне исходных данных была получена устойчивая сходимость со средней скоростью $V \approx N/5$, где N – порядок системы, V – число итераций, а выбор правой части F системы $A\theta = F$ в качестве начального приближения приводит к тому, что итерационный процесс сходится.

Список литературы

1. Морозов В.П. Система термостабилизации для гибридной микросхемы // Датчики и системы. 2008. №7.
2. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.:Наука. 1997.

*Бабаян Роберт Рубенович – д-р техн. наук, зав. лабораторией ИПУ РАН.
Контактный телефон (495) 334-93-01. E-mail: robab@ipu.rssi.ru*

Испытания универсального USWO-закона управления, повышающего эффективность работы регуляторов в замкнутых САП

В ряду разработок НПП "ПОПА-USWO", направленных на совершенствование систем автоматического управления режимными параметрами технологических объектов разнообразного назначения, особое место занимает универсальный закон управления USWO (<http://uswo.lgg.ru>). Закон разрабатывался с целью наделить регуляторы общепромышленного применения способностью более рационально формировать воздействия на объект управления на основе информации о текущем состоянии регулируемой величины.

Прошел продолжительный период разнообразных испытаний USWO-управления. И теперь можно определенно сказать, что поставленная цель в значительной степени достигнута. Закон управления USWO является полноценным конкурентом классическому ПИД-закону, преобладающему в мировой практике построения систем авторегулирования. Утверждать это позволяют преимущества, получаемые при использовании USWO-закона управления. Как показывают эксперименты, характер этих преимуществ и их размеры получаются разными в каждом конкретном приложении. Они зависят, в первую очередь, от свойств управляемого объекта, а также от назначения системы управления и специфики предъявляемых к ней требований. В некоторых случаях наиболее важно, чтобы система как можно строже удерживала регулируемую величину в пределах установленных допусков; кому-то желательно избежать колебательных процессов в контуре управления; а кто-то хотел бы снизить износ исполнительных органов системы, сократив частоту подачи команд на их переключение.

Применение USWO-управления может оказаться эффективным решением большинства подобного рода проблем. Причем решением малозатратным, при котором в модернизируемой системе управления замене подлежит

только контроллер, а измерительная и исполнительная части системы сохраняются прежними.

В настоящее время НПП "ПОПА-USWO" располагает возможностями, необходимыми для предварительной оценки эффективности USWO-управления в конкретных практических приложениях. Это позволяет заранее знать ожидаемый результат от использования USWO в действующих или проектируемых системах управления. А значит, принимать обоснованные решения относительно его применения.

Желающим получить интересующую предварительную информацию, нужно сообщить в НПП "ПОПА-USWO" передаточную функцию своего объекта управления. Если передаточная функция не известна, то можно предоставить в табличном виде экспериментальную запись кривой разгона объекта. Следует также указать основные показатели (критерии), по которым будет оцениваться качество работы системы.

Очевидно, что точность получаемых предварительных оценок эффективности USWO не может быть выше точности сведений об управляемом объекте, передаваемых для исследования. Это оставляет место для сомнений в достоверности предварительных оценок. Устранить их полностью способна пробная установка USWO-регулятора на "живой" объект управления или на его имитатор реального времени.

Испытание и применение USWO-управления открывают для многочисленных пользователей систем авторегулирования новую реальную возможность улучшить показатели работы автоматики, поддерживающей нормальные режимы эксплуатации установок и агрегатов различного назначения.

Для производителей регуляторов общепромышленного применения установка опции USWO-закона управления в ПО выпускаемых регуляторов позволит повысить эффективность их использования в большинстве практических приложений.

[Http://uswo.lgg.ru](http://uswo.lgg.ru)