

УДК 621.396.6

В.М. Карабан, М.П. Сухоруков

Исследование и выбор закона автоматического регулирования температуры гибридно-интегральных схем на основе математического моделирования

Проведено теоретическое исследование и выбран закон автоматического регулирования температуры применительно к гибридно-интегральным схемам.

Ключевые слова: закон автоматического регулирования температуры, термостат, гибридно-интегральные схемы, математическое моделирование.

Актуальность. Следует отметить, что вопросы проектирования микротермостатов (МТ) в отечественной и зарубежной научно-технической литературе освещены недостаточно полно [1–4].

Вопросы выбора схемы регулятора в научно-технической литературе по термостатированию преобладают над вопросами выбора оптимальных конструктивных параметров. Около 80% всех публикаций в этой области посвящено разработке и исследованию схем регулирования с высокой точностью и только в части работ [1–3] указывается на тесную связь конструктивных и схемных параметров МТ. Если при проектировании дискретных МТ и «классических» термостатов схема регулирования определяет точность термостатирования, то в интегральных МТ, как показано в [1], схема регулирования и конструкция тесно связаны, и разделить процесс проектирования схемы регулирования и конструкции МТ не представляется возможным.

В интегральных МТ, к которым относятся и гибридно-пленочные, к схеме регулирования температуры предъявляются жесткие требования по простоте и минимальному числу элементов, поскольку регулятор выполняется совместно с термостатируемой схемой на одной подложке и занимает на ней определенную площадь. В работах [2–4] показано, что простейшим регулятором является пропорциональный, но он имеет невысокую точность – до 0,1 К. Настоящая публикация показывает, что в интегральных МТ с применением пропорционального регулятора точность регулирования может удовлетворять самым высоким требованиям по стабилизации температурных характеристик различных устройств.

Постановка задачи исследования и метод её решения. К основным параметрам термостатов относятся [1]: температура статирования $T_{СТ}$, мощность потерь $P_{П}$, время выхода на режим $\tau_{ВЫХ}$, а также конструктивно-технологические показатели, такие как габаритные размеры, масса, форма, технология изготовления.

Для термостатов с нагревом $T_{СТ} > T_{ВН\ МАКС}$, где $T_{ВН\ МАКС}$ – максимальная температура внешней среды; с охлаждением – $T_{СТ} < T_{ВН\ МИН}$; для реверсивных – $T_{ВН\ МИН} < T_{СТ} < T_{ВН\ МАКС}$.

Мощность потерь характеризует экономичность термостата, так как условием термостатирования является $P_{П} = P_{ПОТР}$, где $P_{ПОТР}$ – мощность, потребляемая термостатом в рабочем режиме.

Время выхода на режим зависит от типа термостата, его конструктивно-технологических показателей и может быть от нескольких секунд до нескольких часов.

К точностным параметрам термостатов относится ошибка регулирования температуры:

$$\delta = T_{СТ} - T_{Д}, \quad (1)$$

где $T_{Д}$ – температура датчика.

Величина δ зависит от выбранного закона регулирования. Наибольшее распространение получили позиционный, пропорциональный, интегральный и дифференциальный законы регулирования, а также любые производные последних трех: пропорционально-интегральное (ПИ), пропорционально-дифференциальное (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) и т.п.

Если под управляющим воздействием понимать изменение мощности исполнительного элемента (нагревателя или охлаждающего устройства) $P_{УПР}$, то для двухпозиционного регулятора можно записать:

$$P_{УПР} = P_{УПР \text{ МАКС}}, \text{ если } T_{Д} \leq T_{СТ},$$

$$P_{УПР} = 0, \text{ если } T_{Д} > T_{СТ}, \quad (2)$$

для пропорционального:

$$P_{УПР} = K_{Р} \delta, \quad (3)$$

для интегрального:

$$P_{УПР} = K_{I} \int_0^t \delta dt, \quad (4)$$

для дифференциального:

$$P_{УПР} = K_{D} \frac{d(\delta)}{dt}, \quad (5)$$

для ПИД-регулятора:

$$P_{УПР} = K_{Р} \delta + K_{I} \int_0^t \delta dt + K_{D} \frac{d(\delta)}{dt}, \quad (6)$$

где t – время; $K_{Р}$, K_{I} , K_{D} – коэффициенты усиления по замкнутому контуру регулирования пропорционального, интегрального и дифференциального регуляторов – параметры настройки соответствующих регуляторов.

Так как все элементы термостабильной подложки геометрически представляют собой параллелепипеды с размерами по осям x , y , значительно превосходящими размер по оси z , исследование и выбор закона регулирования могут быть проведен на основании формулировки задачи теплопереноса в рамках двумерной математической модели [5–7].

При постановке двумерной задачи использованы следующие допущения:

1. Тепловыделениями термостатируемых элементов на подложке по сравнению с мощностью нагревателя можно пренебречь.

2. Подложка представляет собой однородное изотропное тело, теплофизические характеристики (ТФХ) которого не зависят от координат и температуры.

3. Тепловой контакт на границах между телами (областями) считается идеальным. Снижение теплового сопротивления между элементами термостабильной подложки достигается за счет применения серебросодержащего припоя.

4. Сток тепла с верхней и нижней поверхности термостабильной подложки во внешнюю среду за счет радиационного теплообмена учитывается в уравнении теплопроводности дополнительными источниками тепловыделения. Сток тепла во внешнюю среду за счет механизмов конвекции отсутствует.

5. Теплообмен с боковых граней учитывается в уравнении теплопроводности за счет увеличения (пропорционально отношению площадей боковых и верхней грани) мощности дополнительных источников тепловыделения (см. допущение 4).

С учетом вышесказанного задача сводится к решению дифференциального двумерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности термостабильной подложки (7) совместно с уравнением закона регулирования (2)–(6).

$$C_{р} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{P_{Н}(x, y, T_{Д})}{S_{Н} h} - k(x, y) \frac{\varepsilon_{ПР} \sigma [T^4 - T_{ВН}^4]}{h}, \quad (7)$$

где x , y – пространственные координаты (в декартовой системе координат); $C_{р}$, λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала подложки соответственно; T , $T_{ВН}$, $T_{Д}$ – температура подложки, внешней среды и датчика температуры; t – текущее время расчета; $S_{Н}$ – площадь подложки, занимаемой нагревателем; h – толщина подложки; σ , $\varepsilon_{ПР}$ – постоянная Стефана–Больцмана и приведенный коэффициент черноты поверхности и окружающей среды; k – коэффициент, учитывающий излучение с боковых поверхностей; $P_{Н}$ – текущая мощность нагревателя.

Третье слагаемое в правой части дифференциального уравнения теплопроводности (7) учитывает сток тепловой энергии во внешнюю среду за счет механизмов лучистого теплообмена.

Область решения ограничивается следующими временным и геометрическими условиями:

$$t \in [0; t_{\text{МАКС}}], \quad x \in [0; L_x], \quad y \in [0; L_y], \quad (8)$$

где $t_{\text{МАКС}}$ – максимальное время расчета; L_x, L_y – размеры подложки по осям x и y .

При задании начальных условий считаем, что температура подложки в начальный момент времени распределена равномерно. В граничных условиях учитывается лучистый теплообмен с поверхности термостабильной подложки по закону Стефана–Больцмана [1, 5–7].

Решение дифференциального двумерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности подложки (7), с соответствующими начальными и граничными условиями, совместно с уравнением рассматриваемого закона регулирования (2)–(6) проводится методом конечных разностей. При этом для производных по пространству использовалась центрально-разностная аппроксимация второго порядка точности, а для производных по времени применялась неявная аппроксимация первого порядка точности.

Для решения разностных аналогов двумерного уравнения теплопроводности используются схема расщепления по координатам (локально-одномерная) и метод прогонки. Нелинейности в граничных условиях преодолеваются при помощи итераций, проводимых до получения заданной точности.

Основные особенности конструкции разностного алгоритма для решения нелинейных дифференциальных задач на примере простейшего квазилинейного уравнения теплопроводности подробно рассмотрены в [8].

Аппроксимация дифференциальных операторов (производных) конечно-разностными выражениями основана на разложении в ряд Тейлора гладких функций.

Для построения разностных аналогов исходного дифференциального уравнения теплопроводности (7) введем равномерную прямоугольную сетку с пространственными узлами в точках x_i, y_j

и временными узлами в точках t^n :

$$\begin{aligned} x_i = i\Delta x, \quad \Delta x = \frac{L_x}{I}, \quad i = 1, 2, \dots, I-1, I; \\ y_j = j\Delta y, \quad \Delta y = \frac{L_y}{J}, \quad j = 1, 2, \dots, J-1, J; \\ t^n = n\Delta t, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, N, \end{aligned} \quad (9)$$

где Δt – шаг сетки по времени; $\Delta x, \Delta y$ – шаги сетки по пространственным координатам x, y .

Соответствующие параметры настройки регуляторов (3)–(6) были подобраны опытным путем (табл. 1).

Таблица 1

Параметры настройки регуляторов температуры

| Координаты размещения датчика температуры, мм | [10; 8] | | | [11; 15] | | |
|---|---------|--------|-------|----------|--------|-------|
| | K_P | K_I | K_D | K_P | K_I | K_D |
| Значение параметра настройки | 0,625 | 0,0044 | 2,625 | 0,625 | 0,0219 | 1,75 |

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования применимости различных законов регулирования представлены в табл. 2.

Анализируя полученные результаты (см. табл. 2), можно отметить следующие особенности применения того или иного закона регулирования относительно объекта исследования.

Двухпозиционный закон регулирования

Преимущества: 1) простота реализации; 2) не требует дополнительных затрат на настройку параметров работы; 3) благодаря наличию лишь одной составляющей элементы схемы имеют малую площадь размещения.

Недостатки: присутствует только динамическая погрешность регулирования, которая может достигать недопустимых значений.

Пропорциональный закон регулирования

Преимущества: 1) простота реализации; 2) не требует дополнительных затрат на настройку параметров работы; 3) благодаря наличию лишь одной составляющей элементы схемы имеют малую площадь размещения.

Недостатки: 1) не позволяет исключить статическую ошибку регулирования температуры; 2) может иметь затянутый колебательный процесс выхода на режим.

Таблица 2

Сводная таблица результатов численного исследования

| Координаты размещения датчика температуры, мм | [10; 8] | | | | | |
|---|------------|--------|-----|------------|--------|-----|
| Температура внешней среды, К | 223 | | | 323 | | |
| Закон регулирования | Двухпозиц. | П | ПИД | Двухпозиц. | П | ПИД |
| $\tau_{\text{ВЫХ}}^*$, с | – | 404 | 781 | – | 61 | 89 |
| $\Sigma\delta^{**}$, К | 0,01+0 | 0+0,32 | 0+0 | 0,08+0 | 0+0,05 | 0+0 |
| $\Delta T_{\text{П}}^{***}$, К | – | 1,3 | 1,3 | – | 0,2 | 0,2 |
| Координаты размещения датчика температуры, мм | [11; 15] | | | | | |
| Температура внешней среды, К | 223 | | | 323 | | |
| Закон регулирования | Двухпозиц. | П | ПИД | Двухпозиц. | П | ПИД |
| $\tau_{\text{ВЫХ}}^*$, с | – | 565 | 496 | – | 221 | 131 |
| $\Sigma\delta^{**}$, К | 0,67+0 | 0+0,33 | 0+0 | 1,58+0 | 0+0,05 | 0+0 |
| $\Delta T_{\text{П}}^{***}$, К | – | 1,1 | 1,1 | – | 0,2 | 0,2 |

* Под ($\tau_{\text{ВЫХ}}$) подразумевается время выхода на установившийся режим.

** Под $\Sigma\delta$ подразумевается сумма: динамической ($\delta_{\text{ДИН}}$) и статической ($\delta_{\text{СТ}}$) ошибок регулирования температуры в области датчика с течением времени, т.е. $\Sigma\delta = \delta_{\text{ДИН}} + \delta_{\text{СТ}}$.

*** $\Delta T_{\text{П}}$ – температурный перепад, под которым понимается разница между максимальным ($\Delta T_{\text{П. МАКС}}$) и минимальным ($\Delta T_{\text{П. МИН}}$) значениями температуры по поверхности подложки в конечный момент времени, т.е. $\Delta T_{\text{П}} = \Delta T_{\text{П. МАКС}} - \Delta T_{\text{П. МИН}}$.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования

Преимущества: 1) сокращает время выхода на режим и повышает стабильность системы за счет содержания Д-составляющей; 2) исключает статическую погрешность регулирования температуры в области датчика температуры за счет содержания И-составляющей.

Недостатки: 1) наличие трех составляющих (П, И и Д) требует значительных пространственно-временных затрат на размещение элементов схемы регулирования и настройку параметров работы; 2) вследствие значительной тепловой инерционности объекта регулирования (низкое давление в камере МТ и как следствие отсутствие конвекции) применение Д-составляющей регулятора требуется в переходные моменты пуска, которые могут достигать всего лишь нескольких процентов от времени работы схемы регулирования. Все остальное время работа ПИД-регулятора осуществляется за счет ПИ-составляющей; 3) наличие И-составляющей не позволяет исключить статическую ошибку в области подложки не занятой датчиком температуры и приводит к затянутому времени выхода на режим.

Исходя из данных сводной таблицы (см. табл. 2), также следует, что тот или иной закон регулирования не оказывает существенного влияния на величину температурного перепада, а следовательно, и на диапазон изменения статической ошибки регулирования температуры ($\Delta\delta_{\text{СТ}} = \delta_{\text{СТ. МАКС}} - \delta_{\text{СТ. МИН}}$) по поверхности подложки.

Заключение. Результаты работы свидетельствуют о нецелесообразности усложнения закона регулирования и наводят на мысль поиска альтернативного пути повышения точности регулирования, одними из которых могут явиться: варьирование коэффициентом усиления по замкнутому контуру регулирования и взаимным пространственным размещением датчика температуры и нагревателя, а также теплопроводностью материала подложки.

В дальнейшем для стабилизации температуры микросхем предлагается использовать пропорциональный закон автоматического регулирования как наиболее оптимальный. А требуемое повышение точности стабилизации температуры проводить за счёт оптимизации конструктивно-технологических показателей [7] и размещения термостатируемых элементов на основании уравнения температурной погрешности и эффекта минимальной статической ошибки регулирования температуры, суть которого изложена в материалах статей [5–6], а также патентов [9–10].

Работа выполнена в рамках реализации постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г. и договора от 12.02.2013 № 02.G25.31.0042 между ОАО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева» и Минобрнауки РФ.

Литература

1. Алексеев В.П. Системное проектирование термоустойчивых радиотехнических устройств и систем. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 316 с.
2. Кейн В.М. Конструирование терморегуляторов. – М.: Сов. радио, 1971. – 152 с.
3. Венгеровский Л.В. Системы термостатирования в радиоэлектронике / Л.В. Венгеровский, А.Х. Вайнштейн. – Л.: Энергия, 1969. – 77 с.
4. Венгеровский Л.В. Прецизионные полупроводниковые стабилизаторы / Л.В. Венгеровский, А.Х. Вайнштейн. – Л.: Энергия, 1974. – 114 с.
5. Simulation of nonstationary temperature fields of a thermostable substrate for a proportional temperature regulator / V.P. Alekseev, V.M. Karaban // Journal of Engineering Thermophysics. – 2008. – Vol. 17, № 3. – P. 253–257.
6. Alekseev V.P. Topological Thermal Compensation in a Hybrid-Film Micro Thermostat Containing Thermally Stable Substrate / V.P. Alekseev, V.M. Karaban // Radioelectronics and Communications Systems. – 2008. – Vol. 51, № 11. – P. 585–589.
7. Алексеев В.П. Исследование и оптимизация влияния конструктивно-технологических факторов на точностные параметры гибридно-плёночного микротермостата, содержащего термостабильную подложку / В.П. Алексеев, В.М. Карабан // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 7. – С. 70–75.
8. Берковский Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. – Минск: Наука и техника, 1976. – 144 с.
9. Алексеев В.П. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок / В.П. Алексеев, В.М. Карабан, В.Г. Козлов. Патент Российской Федерации на изобретение № 2348962. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2009.
10. Пат. 2 355 016 РФ, МПК G 05 D 23/19. Устройство для стабилизации температуры электро-радиоэлементов / В.П. Алексеев (РФ), В.М. Карабан (РФ), В.Г. Козлов (РФ). – № 2 007 109 527/28; заявл. 15.03.2007; опубл. 10.05.2009. Бюл. № 13. – 4 с.

Карабан Вадим Михайлович

Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. лаб. теплового и механического анализа и синтеза
НИИ космических технологий ТУСУРа
Тел.: +7-913-872-45-21
Эл. почта: karaban_vm@mail.ru

Сухоруков Максим Петрович

Аспирант, науч. сотр. лаб. теплового и механического анализа и синтеза
НИИ космических технологий ТУСУРа
Тел.: +7-952-882-26-98
Эл. почта: max_sukhorukov@mail.ru

Karaban V.M., Sukhorukov M.P.

Research and choice of the law of automatic temperature control of hybrid integrated circuits based on mathematical modeling

In this research we investigated and selected the law of automatic temperature control with respect to hybrid integrated circuits.

Keywords: law of automatic temperature control, thermostat, hybrid integrated circuits, mathematical modeling.