

УДК 621.396.6

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧЁТА ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ГИБРИДНО-ПЛЁНОЧНОГО МИКРОТЕРМОСТАТА

В.М. Карабан

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: karaban_vm@mail.ru

Выполнено численное моделирование двумерных нестационарных температурных полей термостатируемой подложки для пропорционального регулятора температуры гибридно-плёночного микротермостата с учётом изменения мощности нагревателя, вызванного нестабильностью питающих напряжений. Использован метод конечных разностей совместно со схемой расщепления по координатам и методом прогонки. Предложена математическая модель определения уровней изменения мощности нагревателя для пропорционального регулятора температуры гибридно-интегральных схем, позволяющая обеспечить устойчивость работы системы автоматического регулирования температуры.

Введение

Система термостатирования, реализованная в виде гибридно-плёночного микротермостата (МТ) с подогревом, выполняет функцию стабилизации температуры термостатируемого объекта (подложки гибридно-интегральных схем). Эффективность функционирования МТ и, как следствие, температурная стабильность работы всего радиоэлектронного аппарата, в значительной степени определяется эффективностью функционирования системы автоматического регулирования (САР) температуры подложки и, в частности, выбранным типом регулирования.

В микротермостатах применяется пропорциональное, астатическое, изодромное и пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование. Каждый из указанных типов регулирования имеет определенные особенности и применяется в зависимости от предъявляемых требований к регулированию: устойчивости к дестабилизирующим воздействиям, точности термостатирования, времени выхода на режим и др.

Следует отметить, что усложнение типа регулирования не всегда эффективно. Напротив, при переходе к микротермостатированию, т. е. к уменьшению объёма термостатирования, преимущества более сложных типов регуляторов (к таким можно отнести последние три типа) должны проявляться реже.

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) специального назначения в каждом конкретном случае необходимо иметь представление об уровнях изменения дестабилизирующих факторов, при которых обеспечивается устойчивая работа САР, а значит и всего РЭА. Проведение исследований по определению указанных уровней посредством натурального эксперимента представляется затруднительным, т. к. при их реализации требуется изготовление большого количества макетных образцов с учётом зависимости устойчивости от:

- конструктивно-технологических параметров МТ — габаритных размеров и материала подложки, взаимного пространственного размещения нагревателя и датчика, габаритных разме-

ров и мощности нагревателя, материала заполнения камеры МТ и т. д.;

- природы дестабилизирующего воздействия — нестабильности питающих напряжений, изменения температуры внешней среды, сбоя в работе и пр.

Поэтому представляет собой особый интерес применение математического моделирования теплофизических процессов регулирования температуры в рассматриваемых системах МТ.

С учётом вышесказанного, автором рассматривается математическая модель учёта изменения мощности нагревателя, вызванного нестабильностью питающих напряжений, для пропорционального регулятора температуры в системе гибридно-плёночного МТ.

Под устойчивостью работы обозначенного регулятора будем понимать сходимость процесса регулирования температуры термостатируемой подложки.

Математическая формулировка задачи

Обобщенная физическая модель исследуемого класса МТ представлена в [1. С. 227]. На рис. 1 приводится геометрия области решения.

Основные допущения, используемые при постановке задачи:

1. Теплоделениями термостатируемых элементов на подложке по сравнению с мощностью нагревателя можно пренебречь.
2. Подложка представляет собой однородное изотропное тело, теплофизические параметры которого не зависят от координат и температуры.
3. Тепловой контакт на границах между телами (областями) считается идеальным.
4. Сток тепла с верхней и нижней поверхностей термостатируемой подложки во внешнюю среду за счёт радиационного теплообмена (подложка находится в вакууме) учитывается в уравнении теплопроводности дополнительными источниками тепловыделения.

5. Теплообмен с боковых граней учитывается в уравнении теплопроводности за счет увеличения мощности дополнительных источников тепловыделения (см. допущение 4).

Задача в такой постановке сводится к решению двумерного нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности термостатируемой подложки (с соответствующими начальными и граничными условиями) совместно с уравнением пропорционального регулятора температуры, модель работы которого представлена на рис. 2, и уравнением изменения мощности нагревательного элемента с течением времени. В граничных условиях учитывается радиационный теплообмен с поверхности подложки по закону Стефана-Больцмана. Сток тепла во внешнюю среду за счёт конвекции отсутствует, это допущение обусловлено расстоянием до поверхности корпуса МТ менее 5 мм.

$$\left\{ \begin{aligned} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{P_H(x, y, T_D)}{S_H h} + \\ &+ \frac{P_{\text{ВОЗМ}}(x, y, t)}{S_H h} - k(x, y) \frac{\varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T^4 - T_{\text{ВН}}^4)}{h}; \end{aligned} \right.$$

$$P_H(T_D) = P_{\text{Н.МАКС}}, \text{ при } T_D \leq T_{\text{СТ}};$$

$$P_H(T_D) = P_{\text{Н.МАКС}} - \frac{P_{\text{Н.МАКС}}}{\Delta T_{\text{СТ.З}}} (T_D - T_{\text{СТ}}),$$

$$\text{при } T_{\text{СТ}} < T_D < T_{\text{СТ.МАКС}};$$

$$P_H(T_D) = 0, \text{ при } T_D \geq T_{\text{СТ.МАКС}};$$

$$P_H(x, y) = P_H(T_D), \text{ при } x, y \in [S_H];$$

$$P_H(x, y) = 0, \text{ при } x, y \notin [S_H];$$

$$P_{\text{ВОЗМ}}(x, y) = P_{\text{ВОЗМ}}(t), \text{ при } x, y \in [S_H];$$

$$P_{\text{ВОЗМ}}(x, y) = 0, \text{ при } x, y \notin [S_H],$$

(*)

$$\left\{ \begin{aligned} t &\in [0; t_{\text{МАКС}}], \quad x \in [0; L_x], \quad y \in [0; L_y]; \quad T|_{t=0} = T_0(x, y); \\ x = 0, y \in [0; L_y]: \quad &-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T^4 - T_{\text{ВН}}^4); \\ x = L_x, y \in [0; L_y]: \quad &-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T^4 - T_{\text{ВН}}^4); \\ y = 0, x \in [0; L_x]: \quad &-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T^4 - T_{\text{ВН}}^4); \\ y = L_y, x \in [0; L_x]: \quad &-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T^4 - T_{\text{ВН}}^4), \end{aligned} \right.$$

где x, y – пространственные координаты; c_p, ρ, λ – удельная теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала подложки, соответственно; $t, t_{\text{МАКС}}$ – текущее и максимальное время расчёта, соответственно; S_H – площадь нагревателя; h – толщина подложки; $T, T_{\text{ВН}}$ – температура подложки и внешней среды; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{\text{ПР}}$ – приведенный коэффициент черноты поверхности и внешней среды; k – коэффициент, учитывающий теплообмен с боковых граней; $P_H, P_{\text{Н.МАКС}}$ – текущая и максимальная мощности на-

гревателя; $P_{\text{ВОЗМ}}$ – мощность возмущения; $\Delta T_{\text{СТ.З}}$ – заданный диапазон температуры статирования; $T_D, T_{\text{СТ}}$ – температура датчика и температура статирования; T_0 – начальная температура подложки; L_x, L_y – размеры подложки по осям x и y , соответственно.

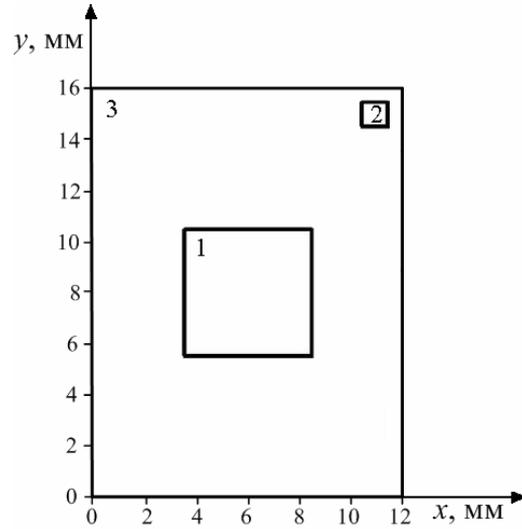


Рис. 1. Геометрия области решения (вид сверху): 1) нагреватель; 2) датчик температуры; 3) термостатируемая подложка

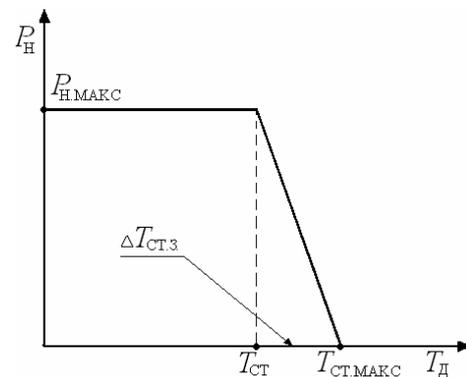


Рис. 2. Модель работы пропорционального регулятора температуры

С помощью третьего слагаемого в правой части дифференциального уравнения теплопроводности (*) моделируются возникающие в области нагревателя возмущения ($P_{\text{ВОЗМ}}$), вызванные нестабильностью питающих напряжений; четвертое слагаемое – учитывает сток тепловой энергии во внешнюю среду за счёт теплового излучения [2].

Графики функции соответствующих изменений представлены на рис. 3.

Сформулированная таким образом краевая задача решена методом конечных разностей [2–6] с применением схемы расщепления по координатам (локально-одномерной) и метода прогонки, хорошо себя зарекомендовавшим при решении задач теплообмена [2, 5–7]. На каждом шаге по времени строится итерационный процесс для уточнения значений коэффициентов зависящих от решения. В этом случае контролируется устойчивость вычислительного процесса по числу итераций, необходимых для получения требуемой точности [6].

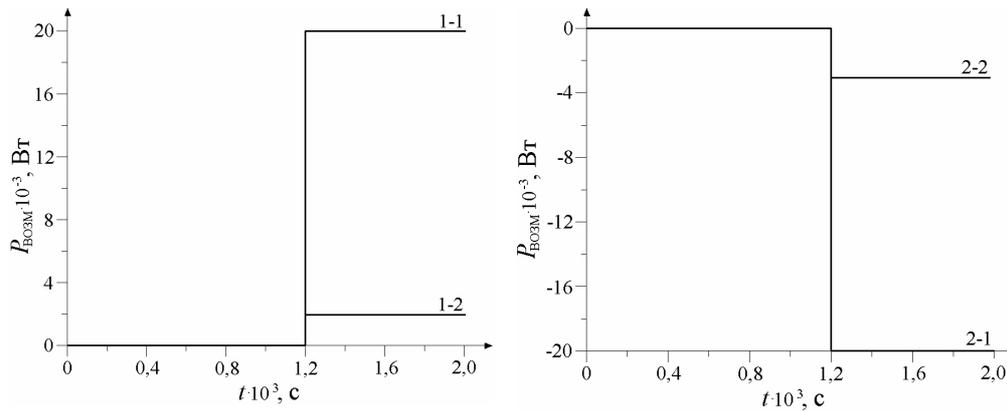


Рис. 3. Графики функции возмущающего воздействия $P_{\text{возм}}=f(t)$ для температуры внешней среды: 223 К (1-1, 2-1); 323 К (1-2, 2-2); $P_{\text{возм}}=0,1 \cdot P_{\text{н.уст}}$

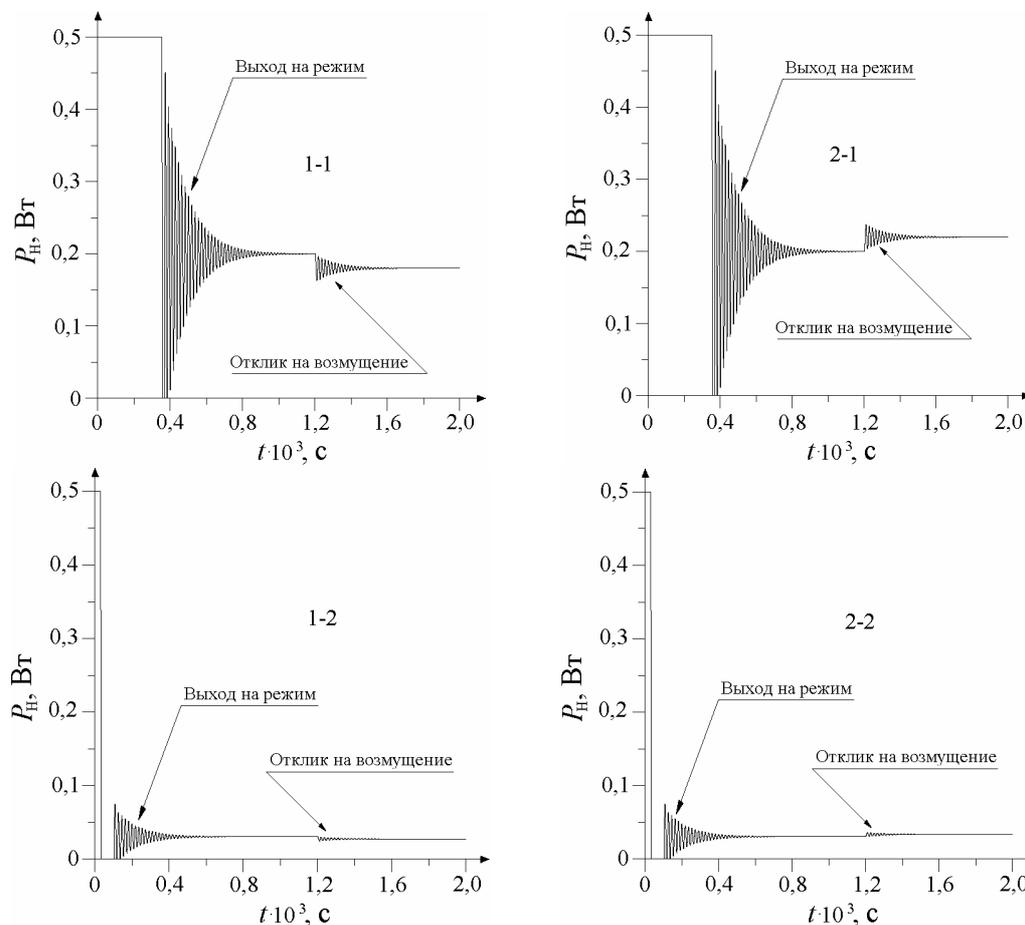


Рис. 4. Изменение мощности нагревателя при величине возмущающего воздействия $0,1 \cdot P_{\text{н.уст}}$ для значений температуры внешней среды: 223 К (1-1, 2-1); 323 К (1-2, 2-2)

Обсуждение результатов

Адекватность реализованной математической модели и метода решения проверена тестовым экспериментом [8]. Получено хорошее (в пределах погрешности метода измерения и погрешности, заложенных в математическую модель эмпирических формул) согласование с экспериментальными данными, что может свидетельствовать о достоверности результатов численного моделирования температурных полей в таких конструкциях.

Основные численные результаты работы (рис. 4, 5) приведены при следующих значениях исходных данных и параметров:

- габаритные размеры термостатируемой подложки: $12 \times 16 \times 1$ мм;
- материал подложки – керамика марки ВК-94 [10]: $c_p=1888$ Дж/(кг·К), $\rho=3800$ кг/м³, $\lambda=13,4$ Вт/(м·К);
- нагреватель: размерами $5 \times 5 \times 1$ мм и мощностью – 0,5 Вт;

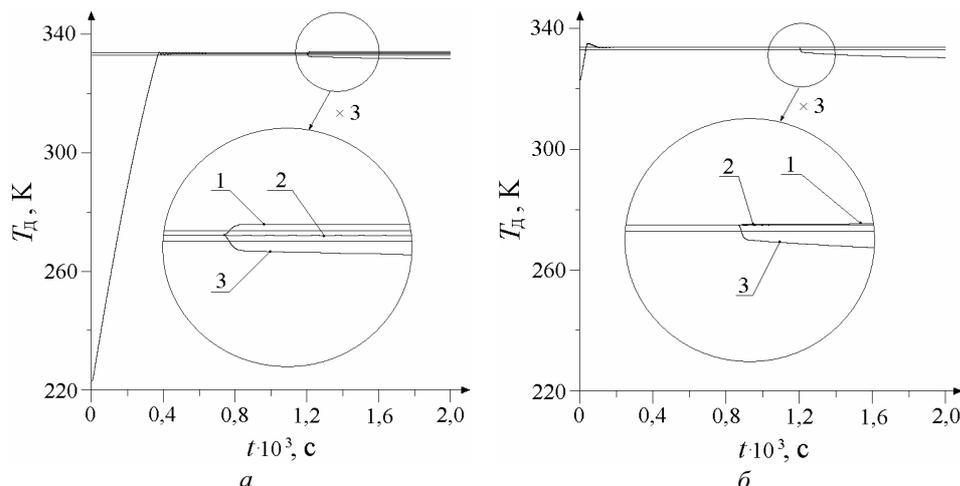


Рис. 5. Изменение температуры подложки при различной величине возмущающего воздействия для значений температуры внешней среды: а) 223 К; б) 323 К

- диапазон изменения температуры внешней среды лежит в пределах 223...323 К;
- температура статирования – 333 К;
- величина возмущающего воздействия – в пределах 0,1...15,7 от мощности нагревателя в установившемся режиме ($P_{н.уст}$);
- датчик температуры имеет размеры: 1×1 мм (см. рис. 1);
- приведенный коэффициент черноты поверхности и окружающей среды – 0,8;
- точность вычислений составляет 0,1 К;
- заданный диапазон температуры статирования – 0,7 К.

Выбранное значение $\Delta T_{стз}$ лежит на границе устойчивости регулирования температуры термостатируемой подложки.

Анализ полученных результатов (рис. 4, 5) показал, что при единичном изменении мощности нагревателя величиной $0,1 \cdot P_{н.уст}$ (рис. 5, кривая 2), вызванном нестабильностью питающих напряжений, система пропорционального регулирования температуры подложки является устойчивой. Скачок величины мощности возмущения:

- в положительную сторону более чем на величину $P_{н.уст}$ (рис. 5, кривая 1);
- в отрицательную сторону на величину $1,5 \cdot P_{н.уст}$ (рис. 5, а, кривая 3), и $16,0 \cdot P_{н.уст}$ (рис. 5, б, кривая 3), приведёт к тому, что система не выйдет на режим термостатирования.

Выводы

1. Выполнено численное моделирование двухмерных нестационарных температурных полей термостатируемой подложки с учётом изменения мощности нагревателя, вызванного нестабильностью питающих напряжений, для пропорционального регулятора температуры гибридно-плёночного микротермостата.
2. Предложена математическая модель определения уровней изменения мощности нагревателя для пропорционального регулятора температуры гибридно-интегральных схем, позволяющая обеспечить устойчивость работы системы автоматического регулирования температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.П. Системное проектирование термоустойчивых радиотехнических устройств и систем. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 316 с.
2. Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В. Прогностическое моделирование надежности элементов радиоаппаратуры // Труды III Росс. национальной конф. по теплообмену. В 8 томах. Т. 7. Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 33–36.
3. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
4. Самарский А.А., Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 798 с.
5. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers: With Programming and Software Applications – 3rd ed. – USA: WCB/McGraw-Hill, 1998. – 916 p.
6. Дорохов А.Р., Заворин А.С., Казанов А.М., Логинов В.С. Моделирование тепловыделяющих систем. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 233 с.
7. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. – 154 с.
8. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
9. Карабан В.М. Моделирование нестационарных температурных полей подложки гибридных толстоплёночных ИМС // Научная сессия ТУСУР-2006: Тезисы Всеросс. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2006. – С. 179–182.
10. Гольдин В.В., Журавский В.Г., Коваленок В.И. и др. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования / Под ред. А.В. Сарафанова. – М.: Радио и связь, 2003. – 456 с.

Поступила 24.09.2007 г.