

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПОСОБА

Ни Зо, Николаев А.Б.

Термоэлектрические явления - совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в металлах и полупроводниках. К термоэлектрическим явлениям относятся: Эффект Зеебека, Эффект Пельтье и Эффект Томсона[1].

Эта система базируется на теплопроводности полупроводниковой пластины и сопротивлении перехода R_c ($P-N$). В результате, получается активный охлаждающий эффект для полупроводниковых микросхем. При соединении двух различных материалов ($P-N$), электрический ток движется в этих двух материалах, в которых происходят режимы нагрева и режимы охлаждения так называемый Пельтье эффект, возможно написать $q = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I$. Где $(\alpha_p - \alpha_n)$ - это направление тока, который определяет режим нагрева и режим охлаждения в переходе ($P-N$). В этих случаях, (P)- материал обеспечивающий охлаждение и (N)- материал обеспечивающий нагревание (ΔT_c -режим охлаждения и ΔT_s - режим нагрева). Охлаждение эффекта на первом материале (P) влияет на нагрев Джозефа от второго материала (N) и происходит термо-электропроводность из второго материала (N).

Суть эффекта Пельтье заключается в преобразовании разности потенциалов в разность температур. Для анализа и синтеза САУ желательно иметь математическое описание объекта управления. Аналитическое определение динамических свойств объекта управления по конструктивным и физическим данным часто является сложной задачей. В таких случаях обращаются к идентификации объекта по экспериментальным данным.

Представленные ниже экспериментальные переходные характеристики объекта $h(t)$ с достаточной точностью могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью $h(t) = k_0(1 - \exp(-t/T_0))$. где k_0 – коэффициент передачи, T_0 – постоянная времени объекта. Такая временная характеристика соответствует линейной математической модели в виде передаточной функции типового апериодического (инерционного) звена: $W_0(p) = \frac{K_0}{1 + T_0 p}$ с достаточно большой инерционностью $T_0 = 500 -$

2000 , которую можно оценить моментом времени с координатой $h(T_0) = 0.63h_{уст}$, где $h_{уст}$ – установившееся значение $h(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Коэффициент передачи объекта определяется согласно выражению $K_0 = \Delta t / \Delta U \cup K$, где $\Delta U \cup$ - приращение входного воздействия, Δt – соответствующее приращение выходного сигнала. По экспериментальным данным определено $K_0 = 10,3 K/B$. Постоянная времени $T_0 = 640 c$

на показана на рисунке 1. Обработка исходных данных эксперимента проводилась с помощью электронных таблицы MS Excel. Экспериментальную переходную характеристику объекта $h(t)$ с достаточной точностью можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. Такая временная характеристика соответствует линейной математической модели в виде передаточной функции типового аperiodического звена. Расхождения между экспериментальными усредненными данными $h(t)$ и теоретическими, определенными по модели, не превышают 2,7%.

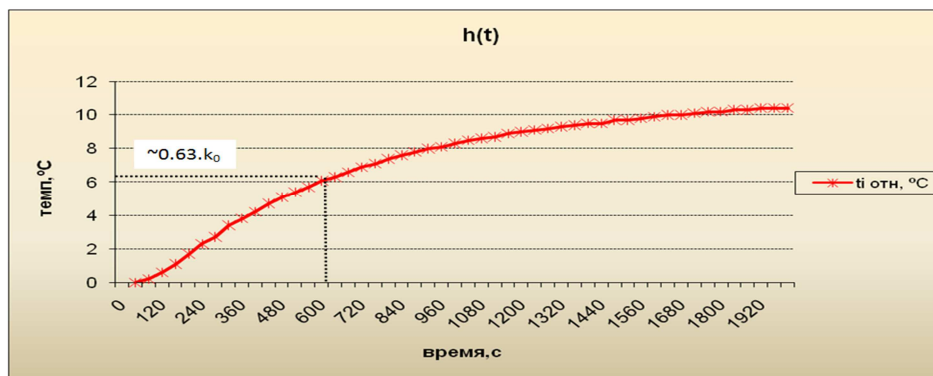


Рисунок 1 - Графическое изображение результатов эксперимента

Микропроцессорная система управления (МПСУ) высокоточным термическим оборудованием с точки зрения теории автоматического управления представляет собой классическую систему регулирования с контуром отрицательной обратной связи (ООС)[2,3]. Структурная схема такой системы показана на рисунке 2, где блок задания (БЗ), схема сравнения (СС) и устройство управления (УУ) реализованы программно на однокристалльной микро-ЭВМ. Исполнительное устройство (ИУ) и объект управления (ОУ) – это в типовом случае термическое оборудование.

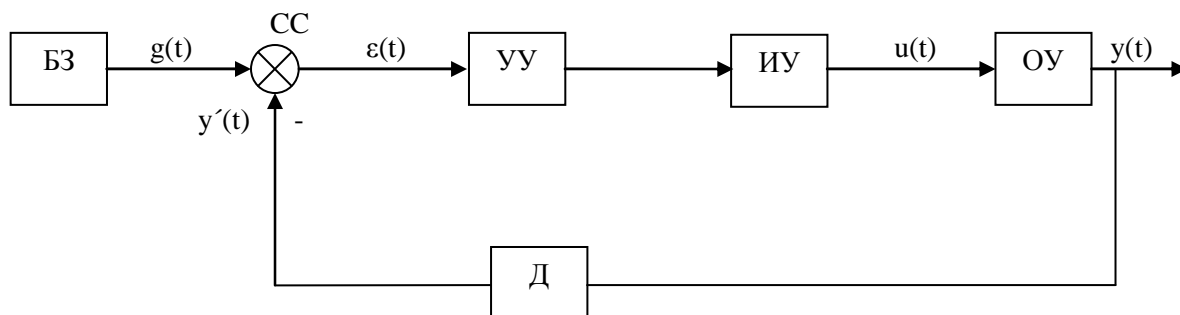


Рисунок 2 - Структурная схема системы управления термическим оборудованием

$$W(p) = W_{УУ}(p) \cdot W_{ИУ}(p) \cdot W_{ОУ}(p) \cdot W_{Дам}(p)$$

$$\Phi(p) = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_{np}(p) \cdot W_{oc}(p)} = \frac{W_{УУ}(p) \cdot W_{ИУ}(p) \cdot W_{ОУ}(p)}{1 + W_{УУ}(p) \cdot W_{ИУ}(p) \cdot W_{ОУ}(p) \cdot W_{Дам}(p)}$$

Микропроцессорная система управления (МПСУ) высокоточным термическим оборудованием с точки зрения теории автоматического управления представляет собой классическую систему регулирования с контуром отрицательной обратной связи (ООС).

Микропроцессорная система управления (МПСУ) высокоточным термическим оборудованием с точки зрения теории автоматического управления представляет собой классическую систему регулирования с контуром отрицательной обратной связи (ООС).. Математическое описание анализируемой системы дает возможность использовать специализированные программные пакеты (ПП) CALLISTO и MODOS при оценке значений оптимальных параметров настройки T_{II} , T_{II} , $T_{д}$ микропроцессорных блоков управления для различных модификаций термических приборов. Рассматривается схема моделирования системы управления термическим оборудованием с ПИ законом. По переходной характеристике исследуемой системы определены показатели качества.

В ПП МОДОС предусмотрена возможность проведения режима параметрической оптимизации. В качестве критерия оптимизации можно использовать интегральные оценки качества.

В данной работе была проведена параметрическая оптимизация для САУ с ПИ – законом управления с малоинерционным датчиком $T_{дат} = 2с$. Схема моделирования для режима параметрической оптимизации приведена на рисунке 3.

В качестве критерия оптимизации используется улучшенный интегральный критерий $I = \int_0^{\infty} [e^2(t) + \alpha^2(e'(t))^2] dt$. Области оптимальных значений в плоскости параметров T_v и K_C . Исключительным преимуществом термических устройств является возможность регулирования температуры как выше, так и ниже температуры окружающей среды с помощью переключения полярности питания этих устройств. Как показывает сравнительный анализ результатов оптимизации параметров настроек, области оптимальных значений для режима нагрева и режима охлаждения термического объекта исследования различаются.

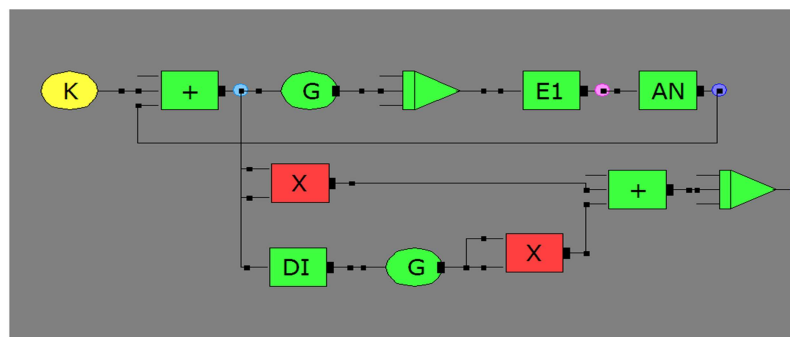


Рисунок 3 - Схема моделирования системы управления термическим оборудованием с ПИ законом

В таблице 1 и на рисунке 4 приведены значения оптимального коэффициента усиления системы $K_{\text{сопт}}$ для двух значений постоянной времени термического объекта управления ($T_0 = 640\text{с}$ - режим нагрева, $T_0 = 1680\text{с}$ - режим охлаждения) при изменении параметра настройки управляющего устройства T_y от 100с до 600с.

Таблица 1 - Значения оптимального коэффициента усиления системы $K_{\text{сопт}}$

	$T_y, \text{с}$	100	200	300	400	500	600
$K_{\text{сопт}}$	$T_0 = 640$	0,62	0,3	0,2	0,15	0,12	0,104
$K_{\text{сопт}}$	$T_0 = 1680$	1,6	0,8	0,53	0,4	0,32	0,27

Полученные соотношения T_y и $K_{\text{сопт}}$ показывают, что при переключении термоэлектрического устройства с охлаждения на нагрев при постоянном значении T_y величину коэффициента K_c необходимо увеличить соответственно таблице .1.1.

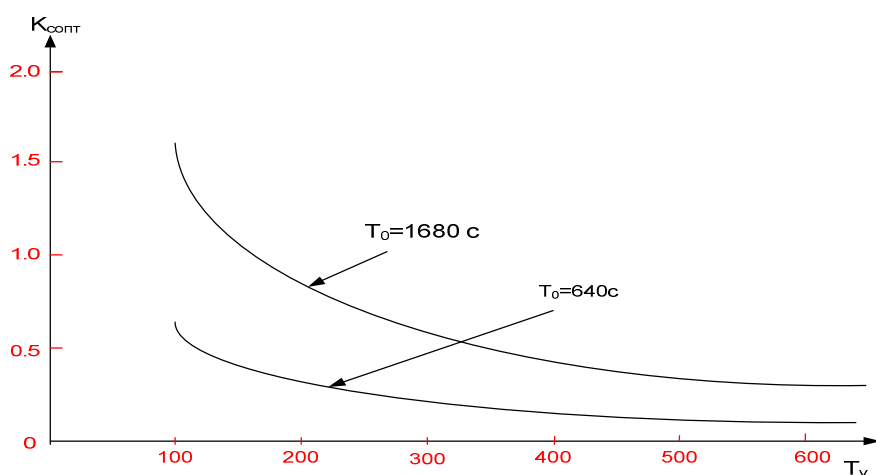


Рисунок 4 - Значения оптимального коэффициента усиления для двух режимов работы ОУ

Результаты параметрической оптимизации САУ в термоэлектрическом режиме нагрева и охлаждения термоэлектрического объекта управления использованы для анализа переходных процессов в замкнутой САУ. На рисунках 5,6 показаны переходные процессы в САУ в режиме охлаждения ($T_0 = 1680\text{с}$) с оптимальными параметрами УУ: $K_c = 0,3\text{C}^{-1}$, $T_y = 200\text{с}$, приведены переходные процессы в САУ в режиме нагрева ($T_0 = 640\text{с}$) при этих же параметрах K_c и T_y . Значение показателя колебательности σ увеличилось с 3% до 8%, значение времени регулирования t_p также увеличилось с 24с до 244с. Для того, чтобы показатели качества переходного процесса не изменились (или изменились незначительно), необходимо изменить коэффициент усиления в режиме нагрева, например, при $T_y = 200\text{с}$ увеличить его с $0,3\text{C}^{-1}$ до $0,8\text{C}^{-1}$. При измененном коэффициенте $K_c = 0,8\text{C}^{-1}$, показатели качества переходного

процесса улучшились и приняли значения , близкие к полученным в режиме охлаждения: $\sigma = 4\%$, $t_p = 23\text{с}$.

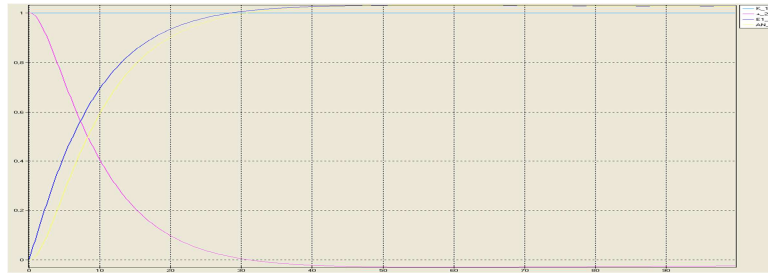


Рисунок 5 - Переходные процессы в САУ при оптимальных параметрах настроек уу

Таблица 2

	T_o	K_c, c^{-1}	T_Y, c	t_p, c	$\sigma \%$
Рисунок 4	640	0.3	200	24	3
Рисунок 5	1680	0.3	200	244	8

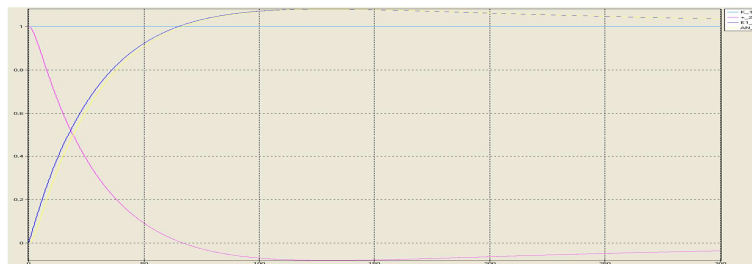


Рисунок 6 - Переходные процессы в САУ при оптимальных параметрах настроек уу

Параметрической оптимизации Пельтье эффекта определяет тепловые и электрические процессы в металлах полупроводниках. Таким образом, для получения наилучших показателей качества переходных процессов в САУ при переключении режима работы термического объекта следует проводить адаптацию настроек управляющего устройства.

Термоэлектрическое явление зависит от отношения между разностью потенциала и разностью температуры. Эта может характеризоваться двумя выражениями. Эти два выражения определяют скорость теплопередачи $q[W]$ и максимальную редукцию температуры $\Delta T_{Мак} = (T_s - T_c)$.

$$q[w] = (\alpha_p - \alpha_n)T_c I - K(T_s - T_c) - \frac{I^2 R}{2} \quad (1)$$

$$(T_s - T_c)_{Мак} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T_c^2}{2KR} = \frac{zT^2}{2} \quad (2)$$

Более того, теплопередача зависит от итога коэффициента теплопроводности (K) и электрического сопротивления (R), многопараметрический метод показано на выражение (3).

$$K = \frac{\lambda_n A_n}{L_n} + \frac{\lambda_p A_p}{L_p} \quad \text{и} \quad R = \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \quad (3)$$

Параметры K и R включают в себя температуропроводность (λ). (ρ) - это термическое удельное сопротивление и геометрический параметр - (поперечное сечение (A) и длина (L)). Нижний индекс (n) и (p) указывают полупроводниковые типы ($N - \text{тип}$, $P - \text{тип}$). $\Delta T_{\text{макс}}$ отображает функции коэффициента добротности (z)[4] по исходному выражению (1 и 3). Для получения лучшего охлаждающего эффекта, необходимо свести к минимуму Джоулева нагрев теплопроводности из горячего перехода, можно записать ($z = \alpha^2 \sigma T / \lambda$). Где, α^2 - это коэффициент Зеебека, σ - удельная электропроводность, λ - теплопроводность, T - абсолютная температура. Высокое значение (z) обеспечивает лучшее охлаждение. Трансформация стандартного устройства Пельтье интегрирует около трех лимитирующих факторов. Первый – интегрированные микросхемы требуют использования поддержки мембраны, которая начинает паразитическую теплопроводность по переходу ($P-N$). Во - вторых, обработка полупроводниковых пластин сильно способствует устройству структуры Пельтье элементов в параллельных двух материалах ($P-N$) с поверхностью мембраны. Эти два фактора обеспечивает достаточную поддержку структуры в полупроводниковых микросхемах. В третьих, - контактное сопротивление обеспечивает все более важную роль с уменьшением размеров элементов.

Интегральная схема поликристаллического SiGe (кремний и германий) (polySiGe) термоэлементов оптимизирован в соответствии с выражением (4). Использование материальных параметров приведено в таблице 3.

Эффект Пельтье обеспечивает электрический ток для создания разности температур так называемая термоэлектрическая энергия преобразования. А также, электрическое напряжение Зеебека обеспечивает электроэнергию преобразования[5]. Поэтому важно соединить Эффект Пельтье и Эффект Зеебека в одном универсальном элементе как показано на рисунке 7

Таблица 3 - Термоэлектрические свойства (SiGe)

Поликристалл (SiGe)	N - тип	P - тип
Зеебек коэффициента α [μ V/K]	-136	144
Удельное сопротивление ρ [$\mu\Omega m$]	10.1	13.2
удельная электропроводность λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]	4.45	4.80
коэффициента добротности z [$10^{-3} K^{-1}$]	0.328	0.413
концентрация легирующей примеси [$10^{20} cm^{-3}$]	1 - 3	2 - 4

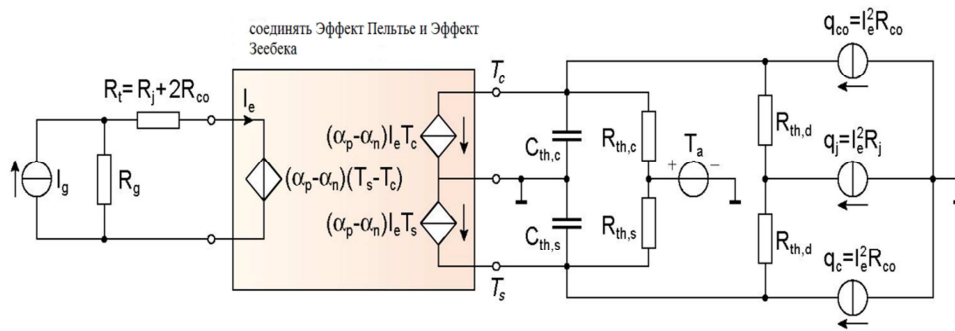


Рисунок 7 - Термоэлектрический элемент с сосредоточенными параметрами для полупроводниковых приборов по соединению двух эффектов с Джоулем нагревом эффектом

R_t - электрическое эквивалентное сопротивление; $(\alpha_p - \alpha_n)(T_s - T_c)$ - моделирование источника напряжения эффект Зеебека (P-N) перехода; $(\alpha_p - \alpha_n)(I_e - T_s)$ и $(\alpha_p - \alpha_n)(I_e - T_s)$ - охлаждение и нагрев эффекта Пельтье; $C_{th,c}$ и $C_{th,s}$ - теплоёмкость на охлажденной стороне и горячей стороне; $R_{th,s}$ и $R_{th,c}$ - потери теплопередачи и излучения от температуры окружающей среды; q_{co} и q_j - нагрев Джоуля который соответствует термоэлектрическим материалам и контактам

Нагрев джоулевым теплом q_j распределяется симметрично по конденсаторам $C_{th,c}$ и $C_{th,s}$ которые представляют собой теплоёмкость охлаждаемой области. Далее, $R_{th,s}$ и $R_{th,c}$ указывают тепловые потери из системы на охлаждение стороны и подложки стороны. ЭДС Зеебека является частью источниковой токовой нагрузки и обработка устройство Пельтье действует на источник тока I_g благодаря обратной связи. Эта обратная связь базирует элемент с сосредоточенными параметрами, которые уже показаны на Рис (7). В дальнейшем, параметрические материалы и геометрические параметры могут определены с помощью таблицы 1. $L_p = L_n = L_m = 100 \mu m$, $A_p = A_n = 30 \cdot 10^{-12} m^2$, $A_m = 63 \cdot 10^{-12} m^2$, $\lambda_m = 5 W / mk$ и $R_{co} = 5 \Omega$.

В качестве ЭДС Зеебека формируется с ΔT . Электрический ток I_g может компенсироваться для поддержания константа I_e . Для определения этого ЭДС Зеебека, необходимо оптимизировать значение электрического тока $I_{g,опт}$ и ΔT_{max} , показанное на рисунке 8. В результате использования правильно спроектированной цепи получается соответствующий энергетический баланс между двумя эффектами (Пельтье и Зеебек).

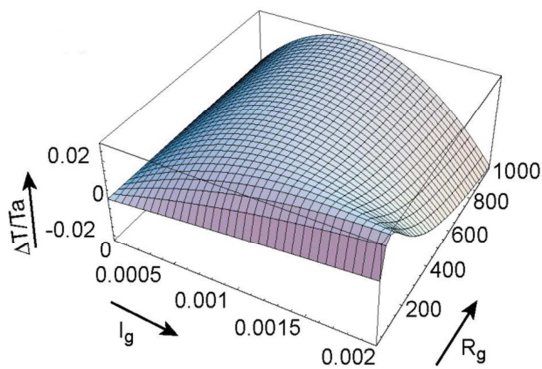


Рисунок 8

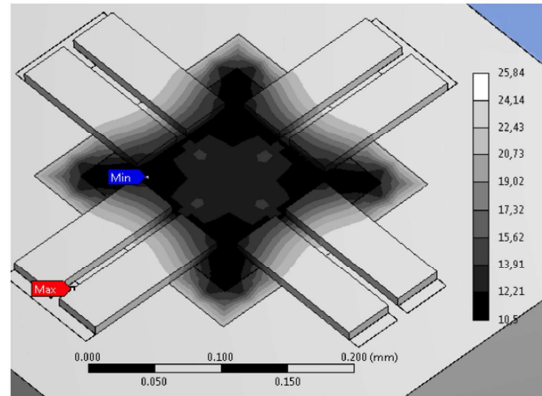


Рисунок 9

На рисунке 9 показано уменьшение температуры по отношению источника тока и комплексного сопротивления R_g и На Рис (9) показано моделирование полупроводниковых микросхем который показывается разные температуры между холодной стороной и горячей стороной. На рисунке 10, отображается распределение потенциала на поверхности подложки, исходные данные 350 мА. Джоулев нагрев рассчитывается . распределением потенциала на поверхности подложки с помощью программы Simulation (ANSYS).

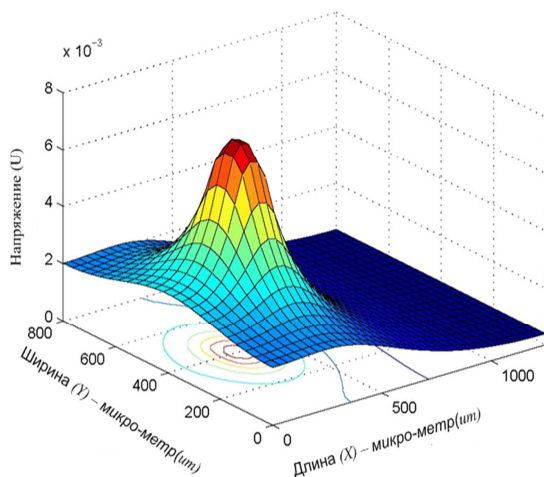


Рисунок 10

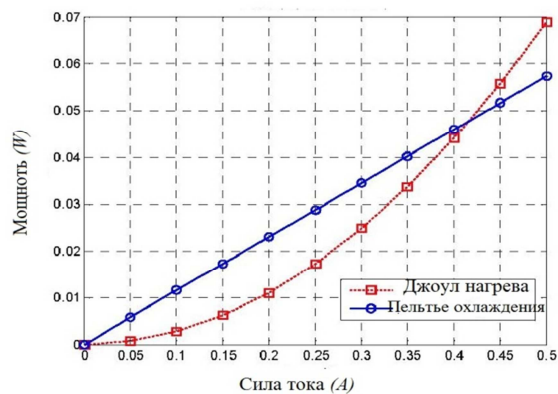


Рисунок 11

Эффект Пельтье нагрева и охлаждения зависят от Зеебек коэффициентов и образуют электрический ток. Зеебек коэффициента представляет собой материальные параметры. Таким образом, эффект Пельтье нагрева и охлаждения является линейными функциями, которые образуют электрический ток. На рисунке 11 показаны результаты сравнения мощность охлаждения Пельтье и мощность Джоулева нагрева. В этом рисунке, максимальное охлаждение равно примерно 350mA. Тем не менее,

доминирование мощность Джоулева нагрева выше, чем мощность охлаждения Пельтье который равно примерно 400 mA . Эти результаты определяют с помощью выражение (1).

На рисунке 12 показано распределение температуры на поверхности микросхемы и подложки. Без активного охлаждения, структура температуры будет контролировать регулирование температуры в устойчивом состоянии. Граница теплопередачи узлов в периметре имеет более низкую температуру, чем в центре температуры с помощью Simulation (ANSYS).

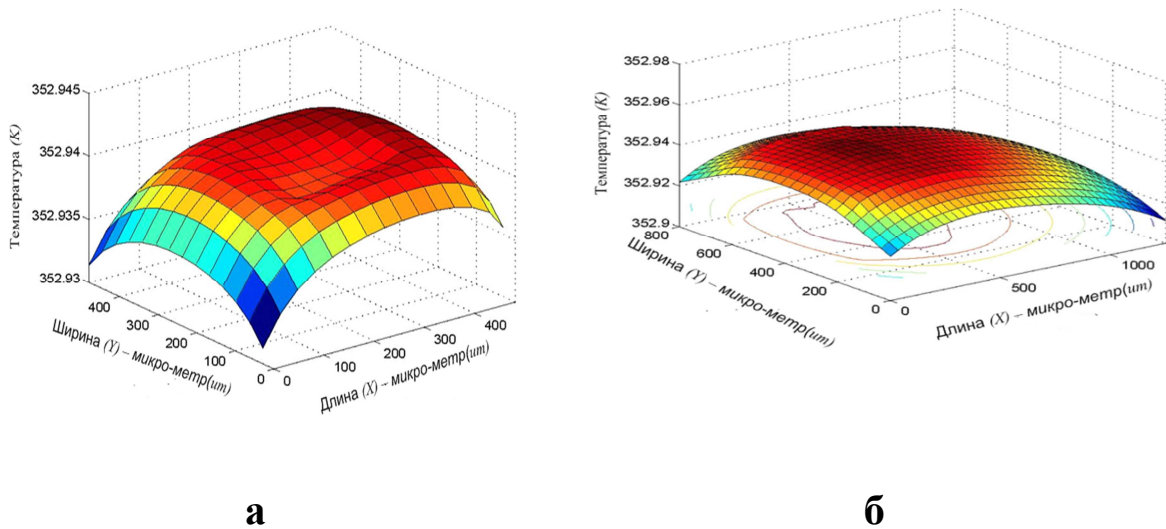


Рисунок 12 - Распределение температуры на поверхности (а) микросхеме (б) подложке без активного охлаждения

На рисунке 13 показано распределение температуры на поверхности микросхемы и подложки с помощью исходных данных 350 mA (максимальное значение охлаждения).

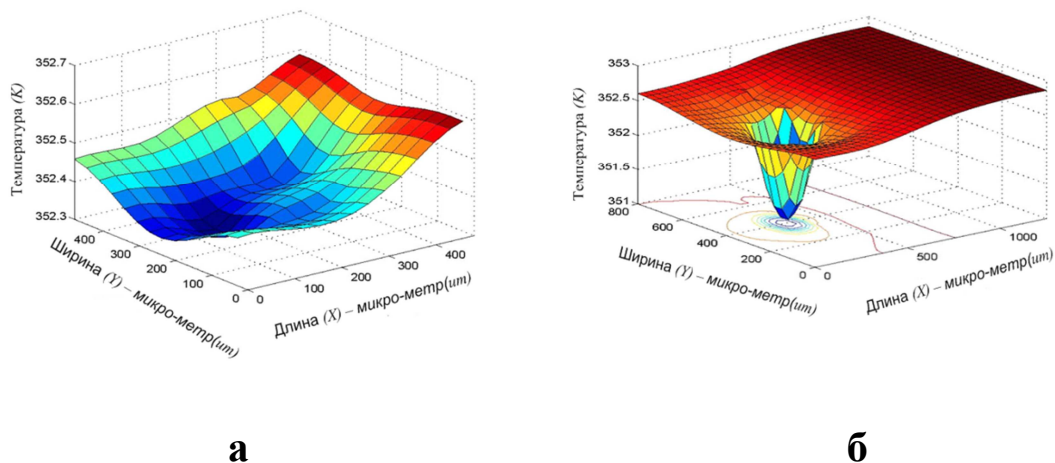


Рисунок 13 - Распределение температуры на поверхности (а) микросхеме (б) подложке с активным охлаждением

В этом Пельтье охлаждении, центр области имеет более пониженную температуру, чем граница теплопередачи в узлах.

Результаты параметрической оптимизации САУ в режиме нагрева и охлаждения термоэлектрического объекта управления использованы для анализа переходных процессов в замкнутой САУ. Таким образом, для получения наилучших показателей качества переходных процессов в САУ при переключении режима работы термического объекта следует проводить адаптацию настроек управляющего устройства. В результате, универсальный эффект определяет потери излучения и теплопередачу из полупроводниковой пластины. Далее, в этой модели учитываются два эффекта. Первый - Пельтье охлаждения и нагрева, второй – Джоулева нагрева и теплопроводности. В моей работе доказано уменьшение максимальной температуры и рассчитывает эффект охлаждения для полупроводниковых микросхем с помощью Simulation (ANSYS).

Список информационных источников

- [1] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике: для инженеров и студентов ВУЗов. Изд. 4-е, перераб.. — Наука - Главная редакция Физико-математической литературы., 1968. — С. 417.
- [2] Микропроцессорные системы автоматического управления / Под редакцией В.А.Бесекерского. -Л.: Машиностроение, 1988. – 366 с.
- [3] Тарасова Г.И. Компьютерное моделирование систем автоматического управления. Методические указания по курсовому и дипломному проектированию. - М., 2004. - 48 с.: ил.
- [4] F. Völklein, G Min и D.M Rowe, Modeling of a microelectromechanical thermoelectric cooler, sensors and actuators, A75(1999) 95 - 101
- [5] A.W. Sloman, P. Buggs, J. Molloy and D. Stewart, A microcontroller-based driver to stabilize the temperature of an optical stage to within 1 mK in the range 4-38°C, using a Peltier heat pump and a thermistor sensor, Meas. Sci. Technol., vol. 7 no. 11 (1996) 1653-1664.