

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОР

Украина, г. Киев, Минпромполитики;
г. Черновцы, Ин-т термоэлектричества
E-mail: vikhor@fromru.com

Дата поступления в редакцию
12.03 2001 г.
Оппоненты д. ф.-м. н. С. Ю. ПАРАНЧИЧ,
к. т. н. В. А. СЕМЕНЮК

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМАЛЬНОГО КАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Моделирование нагрузочных характеристик после оптимального проектирования конструкции позволяет уже на этапе разработки ТЭО выбрать эффективное решение.

Современные электронные приборы и устройства характеризуются малыми габаритами и высокой плотностью тепловой энергии, которая выделяется ими в процессе работы, что приводит к перегреву активных элементов и снижению надежности. Наиболее чувствительными к температурным перегревам являются полупроводниковые элементы. Например, для надежной работы микролазерных модулей необходимо обеспечить высокую стабильность рабочей температуры лазерных полупроводниковых кристаллов [1], а для обеспечения таких характеристик фоточувствительных элементов как спектральная чувствительность и обнаружительная способность требуется поддержание рабочей температуры фотоэлементов на уровне значительно ниже температуры окружающей среды [2].

Для термостабилизации электронных элементов на низких уровнях температуры широко используются термоэлектрические охладители (ТЭО) [3]. Термостабилизация фотоэлектрических приемников (ФЭП) при низких температурах ($-60 \dots -80^\circ\text{C}$) лучше всего обеспечивается с помощью каскадных ТЭО [4; 5, с. 339–341], проектирование которых достаточно сложно.

Вместе с тем проектирование оптимальных ТЭО — чрезвычайно важная задача при разработке и конструировании фотоприемников. Методика проектирования оптимальных ТЭО разработана Анатолем Л. И. и Семенюком В. А. [6]. Пользуясь этой методикой, можно спроектировать оптимальный по своим характеристикам ТЭО для каждого конкретного случая.

Работа оптимально спроектированного термоэлектрического охладителя заданной конструкции характеризуется его энергетическими или, как их принято называть, нагрузочными характеристиками. Нагрузочные характеристики представляют собой зависимости холодопроизводительности охладителя Q_0 и электрического напряжения U от перепада температур ΔT , определенные для различных токов I питания ТЭО. Как правило, эти характеристики определяют-

ся экспериментальным путем и приводятся в качестве паспортных данных, характеризующих качество уже изготовленного термоэлектрического модуля.

Было бы экономически более оправданным попытаться получить информацию о нагрузочных характеристиках ТЭО еще до его изготовления. С этой целью предлагается на стадии разработки ТЭО после оптимального проектирования конструкции провести математическое моделирование его нагрузочных характеристик, чтобы оценить изменение температуры охлаждения и потребляемой ТЭО электроэнергии ($W=U \times I$) при изменении тепловой нагрузки на холодильник со стороны охлаждаемого объекта.

Рассмотрим метод моделирования таких характеристик.

Расчет нагрузочных характеристик основывается на решении системы дифференциальных уравнений для распределения температуры $T(x)$ и удельных (отнесенных к силе тока I) тепловых потоков $q(x)$ в ветвях термоэлементов, записанных для N каскадов [6, с. 168]:

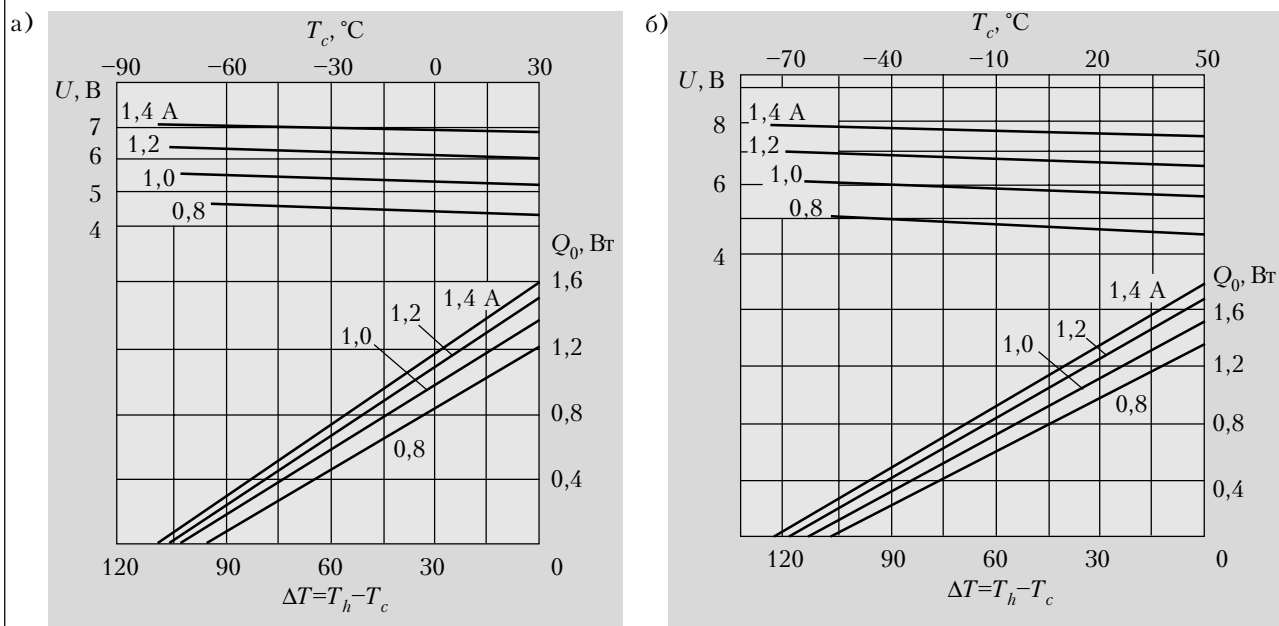
$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha i}{k} T - \frac{i}{k} q \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 i}{k} T + \frac{\alpha i}{k} q + \frac{i}{\sigma} \end{aligned} \right\} k=1, \dots, N, \quad (1)$$

где T_n и T_p — температуры соответствующих ветвей;
 $\sigma_{n,p}, k_{n,p}$ — соответственно коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности $i=I/s$ — электропроводности и теплопроводности s — (функции температуры);
 N — плотность тока питания;
площадь поперечного сечения ветвей термоэлементов;
число каскадов охладителя.

Граничные условия для этих уравнений записываются как равенства температур между каскадами с учетом межкаскадных потерь температуры δT :

$$\begin{aligned} T_n(0^+) &= T_p(0^+) = T_h; & T_n(x_N^-) &= T_p(x_N^-); \\ T_n(x_k^+) &= T_p(x_k^+); & T_n(x_k^-) &= T_p(x_k^-), \\ T_n(x_k^+) &= T_n(x_k^-) + \delta T; \end{aligned} \quad (2)$$

где T_h — температура горячих спаев батареи (знаки “+” и “-” означают положение справа и слева от координаты точки стыка каскадов x_k).



Нагрузочные характеристики ТЭО для ФЭП при $T_h=30^\circ\text{C}$ (а) и $T_h=50^\circ\text{C}$ (б)

Должны быть заданы условия теплового сопряжения каскадов, которые записываются в виде

$$q_1^{k+1}n_{k+1} = q_0^k n_k, \quad k=1, \dots, N-1, \quad (3)$$

где n_k — количество термоэлементов в k -м каскаде; q_0^k и q_1^k — удельные потоки тепла на холодных и горячих спаях, соответственно, которые определяются выражениями

$$q_0^k = \sum_{n,p} \left[q(x_k^-) + i r_0 + \frac{\alpha_T}{i} (T_h - T(x_k^-)) \right]; \quad (4)$$

$$q_1^k = \sum_{n,p} (q(x_{k-1}^+) - i r_0).$$

Здесь r_0 — контактное сопротивление; α_T — коэффициент теплообмена с окружающей средой.

К граничным условиям добавляется условие равенства холодопроизводительности ТЭО величине тепловой нагрузки охлаждаемого объекта Q_0 :

$$-q_0^N n^N I = Q_0. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (1) с граничными условиями (2)–(5), определяют температуру охлаждения T_c и вычисляют перепад температур $\Delta T = T_h - T_c$. Потребляемая охладителем мощность вычисляется как

$$W = -\sum_{k=1}^N n_k I (q_1^k - q_0^k), \quad (6)$$

а напряжение равно $U = W / I$.

Используя выражения (1)–(6), изменяя величину тепловой нагрузки Q_0 и ток питания I , вычисляя при этом ΔT и U , можно получить нагрузочные характеристики для термоэлектрического модуля охлаждения определенной оптимальной конструкции. Для этого на основе уравнений (1)–(6) были разработаны алгоритм и компьютерная программа для расчета нагрузочных характеристик каскадного ТЭО.

Используя математические методы оптимального управления, разработанные в [6] для расчета многокаскадных термоэлектрических охладителей, нами было проведено проектирование оптимальной конструкции термоэлектрического охладителя для фотоприемника инфракрасного излучения со следующими техническими характеристиками:

- температура холодной стороны модуля — не выше -60°C ;
- рабочий диапазон температур окружающей среды — от -50 до $+60^\circ\text{C}$;
- размер площадки под фоточувствительный элемент — не более 28 мм^2 ;
- ток питания ТЭО — не более $1,2 \text{ А}$;
- напряжение питания — не более 7 В ;
- перепад температур между горячей и холодной сторонами — от 105 до 110°C ;
- максимальная холодопроизводительность — $1,5 \text{ Вт}$;
- высота ТЭО — не более 11 мм ;
- размеры тепловыделяющей пластины первого каскада — не более $14 \times 15 \text{ мм}$;
- максимальная температура тепловыделяющей пластины первого каскада — не более $+45^\circ\text{C}$.

Было проведено проектирование на ПЭВМ двух-, трех- и четырехкаскадного ТЭО для фотоприемника. При этом использованы характеристики традиционных для термоэлектрического охлаждения материалов n - и p -типа на основе теллурида висмута. В результате расчетов получено, что двухкаскадный вариант ТЭО не может обеспечить максимальный перепад температур 110°C , а наилучшим образом необходимым условиям удовлетворяет трехкаскадный вариант ТЭО следующей конструкции:

- количество термоэлементов в каскадах: $n_1=64$ пары, $n_2=25$ пар, $n_3=9$ пар;
- размеры кристаллов: сечение $0,83 \times 0,83 \text{ мм}$, высота $1,5 \text{ мм}$;

— при зазоре между кристаллами 0,4 мм: площадь тепловыделяющей поверхности ТЭО — 193,7 мм², площадь площадки для ФЭП — 27,2 мм²;

— при толщине керамических пластин 1 мм и толщине коммутации 0,6 мм общая высота ТЭО составляет 10,9 мм.

Для оптимально спроектированного трехкаскадного термоэлектрического охладителя для ФЭП были рассчитаны нагрузочные характеристики ТЭО для различных значений температуры T_h горячих спаев. На **рисунке** приведены нагрузочные характеристики при температуре тепловыделяющей поверхности 30 и 50°С. Используя графики, можно определить рабочие характеристики ТЭО при этих температурах. Так, при температуре тепловыделяющей поверхности 30°С (см. рис., а) температура -60°С на холодной стороне обеспечивается при токе 1,2 А, напряжении 6,32 В и мощности 7,58 Вт. Холодопроизводительность при этом составляет 0,245 Вт, а холодильный коэффициент 0,032. Максимальная холодопроизводительность ТЭО (при $\Delta T=0^\circ\text{C}$) составляет 1,5 Вт. Максимальный перепад температуры (при $Q_0=0$) $\Delta T=107^\circ\text{C}$. Аналогичным образом по рис., б можно определить рабочие характеристики ТЭО при температуре тепловыделяющей поверхности 50°С. При промежуточных значениях температуры тепловыделяющей поверхности ТЭО его характеристики можно определить экстраполяцией.

Используя полученные для различных значений T_h нагрузочные характеристики, легко оценить изменение температуры охлаждения фотоприемника при изменении его тепловой мощности Q_0 или тока

питания холодильника и определить потребляемую в каждом случае электрическую мощность, необходимую для охлаждения. Эти характеристики также позволяют сравнить параметры рассчитанной (но оптимальной для какого-то одного рабочего режима) конструкции ТЭО с параметрами уже серийно выпускаемых модулей и ответить на вопрос, нужно ли изготавливать новый модуль для ФЭП или можно использовать уже готовый, близкий по параметрам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Осинский В. И., Вербицкий В. Г., Николаенко Ю. Е. и др. Тепловые процессы в микролазерных устройствах информационных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 2 — 3. — С. 27 — 35.
2. Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А. и др. Фотоприемный модуль для тепловизора // Автоматрия. — 1998. — № 4. — С. 43 — 46.
3. Вайнер А. Л., Моисеев В. Ф. Совмещенные приборы криотермоэлектрической электроники. — Одесса: Студия “Негоциант”, 2000.
4. Алиев Т. Д., Ахундов Н. М., Абдинов Д. Ш. Термоэлектрический охладитель на уровень температуры ~200 К для инфракрасных фотоприемников // Приборы и техника эксперимента. — 1999. — № 2. — С. 164 — 165.
5. Справочник по инфракрасной технике. Т. 3. Приборная база ИК-систем / Под ред. У. Волф, Г. Цисис. — М.: Мир, 1999.
6. Анатъчук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. — Черновцы: Прут, 1992.

Редакция журнала

«ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ» приглашает читателей журнала, предприятия и организации к сотрудничеству

В
Ы
М
О
Ж
Е
Т
Е

подготовить статью — рекомендации авторам по подготовке рукописи опубликованы в 1-м и 3-м номерах журнала этого года.

разместить в журнале рекламу, черно-белую или полноцветную.

заказать издание книги (редакция зарегистрирована как издательское предприятие). В этом случае для удешевления и ускорения работ необходимы контакты на ранних этапах оформления рукописи.

написать письмо по поводу, представляющему, на Ваш взгляд, интерес для читателей журнала.

задать вопрос, который, как Вы считаете, интересуется не только Вас.

Журнал «ТКЭА» — для Вас. Пишите (лучше — по e-mail <tkea@odessa.net>), звоните (048—733—72—83, 733—67—91), приходите (г. Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59).