——— ПРИБОРЫ ——

УДК 537.32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

© 2020 г. Е. Н. Васильев*

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской АН, Академгородок, 50, стр. 44, г. Красноярск, 660036 Россия

> **E-mail: ven@icm.krasn.ru* Поступила в редакцию 06.11.2019 г. После доработки 05.12.2019 г. Принята к публикации 11.12.2019 г.

Представлен вычислительный алгоритм для определения режимов термоэлектрического охлаждения, обеспечивающих заданный перепад температур основания теплонагруженного элемента и окружающей среды. Полученные аналитические выражения позволяют определять силу тока питания термоэлектрического модуля с учетом его рабочих характеристик, термических сопротивлений системы охлаждения и мощности теплонагруженного элемента. Рассчитаны зависимости силы тока от величины заданного температурного перепада и проведен анализ параметров, влияющих на режимы термоэлектрического охлаждения.

DOI: 10.31857/S0544126920030072

введение

Ресурс и стабильность рабочих характеристик теплонагруженных элементов электроники существенно зависят от их теплового режима, так при повышении температуры от 20 до 60°С интенсивность отказов аппаратуры увеличивается более чем в 2 раза [1]. Применение термоэлектрических модулей значительно расширяет возможности охлаждения, управления тепловыми режимами и термостабилизации теплонагруженных элементов. Термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования обладают рядом достоинств по сравнению с другими системами охлаждения, а именно: возможностью плавного регулирования температуры в достаточно широком диапазоне путем изменения величины и направления тока питания термоэлектрического модуля, малой тепловой инерционностью, высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, компактностью и небольшим весом, бесшумностью работы. Термоэлектрические системы охлаждения используются для охлаждения как миниатюрных объектов электроники, так и холодильных камер большого объема [2-4]. Исследованию влияния параметров термоэлектрической системы охлаждения на температурный режим теплонагруженных элементов посвящены работы [5-7], анализ критериев, влияющих на выбор термоэлектрического модуля и режимов работы системы охлаждения, проведен в [8].

Для поддержания рабочей температуры электронных устройств на оптимальном уровне термоэлектрическая система охлаждения должна работать в режиме терморегулирования, обеспечивая заданный температурный перепад ΔT_s между основанием теплонагруженного элемента и внешней средой. При изменении внешних условий задача терморегулирования может быть выполнена с помощью управления силой тока питания термоэлектрического модуля, поскольку сила тока І является фактически единственным параметром управления, задающим режим работы системы охлаждения и определяющим как точность термостабилизации, так и энергетическую эффективность. Для определения режимов системы охлаждения и алгоритма управления необходимо установить функциональную связь величины силы тока, при которой обеспечивается заданный температурный перепад ΔT_s , с характеристиками термоэлектрического модуля и узлов, обеспечивающих подвод и отвод теплоты и определяющих величину термических сопротивлений. Целью настоящей работы является определение зависимости силы тока $I(\Delta T_s)$ с учетом рабочих характеристик и параметров всех элементов конструкции термоэлектрической системы охлаждения и термостабилизации.



Рис. 1. Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования: *1* – теплонагруженный элемент; *2* – теплораспределитель; *3* – термоэлектрический модуль; *4* – кулер.

٨

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПЕРЕПАДЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Распространенным типом термоэлектрической системы охлаждения, применяемой для охлаждения теплонагруженных элементов 1, является конструкция, которая состоит из теплораспределяющей пластины 2, термоэлектрического модуля 3 и кулера 4 (рис. 1). Теплораспределяющая пластина необходима для выравнивания распределения тепловой мощности, поступающей от теплонагруженного элемента на поверхность термоэлектрического модуля при несоответствии их поперечных размеров. Термоэлектрический модуль выполняет функцию теплового насоса, передающего теплоту с холодной стороны на горячую. Кулер отводит во внешнюю среду суммарную тепловую мощность Q + W, выделяемую как теплонагруженным элементом, так и термоэлектрическим модулем. Составные части системы охлаждения на своих границах имеют тепловые контакты. По площади контактной поверхности z₀ кулер отводит теплоту во внешнюю среду, имеющую температуру Т₀. Горячей и холодной сторонам термоэлектрического модуля соответствуют границы z_1 и z_2 . Нижняя поверхность основания теплонагруженного элемента (поверхность z_3) характеризуется средним значением температуры T_1 .

Характерные варианты температурных распределений, которые могут реализоваться в термоэлектрической системе охлаждения, приведены на рис. 2. Температура внешней среды T_0 является исходным значением, напрямую влияющим на температуру посадочного места теплонагруженного элемента. На кулере и его тепловом контакте с термоэлектрическим модулем с суммарным термическим сопротивлением R_S устанавливается положительный температурный перепад, равный $R_S(Q + W)$. Термоэлектрический модуль производит отрицательный температурный перепад — $\Delta T_{T \ni M}$. Теплораспределяющая пластина и два прилегающих тепловых контакта с суммарным термическим сопротивлением R_T обеспечивают положительный температурный перепад R_TQ . В зависимости от соотношения величины температурных перепадов общий перепад $T_1 - T_0$, как показано на рис. 2, может иметь как положительное (линия I), так и отрицательное значение (линия 2).

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СИЛЫ ТОКА ПИТАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Количественно общий температурный перепад в термоэлектрической системе охлаждения описывается следующим выражением

$$\Delta T_{S} = T_{1} - T_{0} = R_{S}(Q + UI) - \Delta T_{T \ni M} + R_{T}Q,$$
 (1)

здесь Q – мощность тепловыделения теплонагруженного элемента, U- напряжение питания термоэлектрического модуля. Слагаемое $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ в формуле имеет знак "минус", поскольку традиционно для термоэлектрических модулей указывается абсолютное значение температурного перепада, равное разности температур между горячей и холодной сторонами модуля. Рабочие характеристики термоэлектрического модуля $Q(I, \Delta T_{\text{ТЭМ}})$ и $U(I, \Delta T_{\text{ТЭМ}})$ являются исходными данными для определения зависимостей $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ и U(I, Q), используемых в (1). Рабочие характеристики для заданной конструкции термоэлектрического модуля могут быть рассчитаны [9] или получены из информации производителя. В настоящей работе использованы рабочие характеристики серийных модулей "S-199-14-11" производства НПО

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 49 № 4 2020



Рис. 2. Распределение температуры в термоэлектрической системе охлаждения.

"Кристалл", имеющих максимальные значения $\Delta T_{\text{TЭM}} = 72.5^{\circ}$ С и Q = 124 Вт при силе тока $I_{\text{max}} = 7.9$ А [10]. Характеристики термоэлектрических модулей даны производителем для условий вакуума при температуре горячего спая 25°С, при их использовании следует учитывать, что в среде сухого воздуха показатели снижаются примерно на 5%, в случае конденсации влаги в объеме термоэлектрического модуля снижение может более значительным. Величина $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ также имеет определенную растущую зависимость от температуры горячего спая, значение которой равно $T_0 + R_5(Q + W)$, степень зависимости можно оценить по экспериментальным данным [11].

Для определения зависимостей $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ и U(I, Q) использованы графики производителя термоэлектрического модуля. На график $Q(\Delta T_{T \ni M})$, приведенный на рис. 3, нанесен заданный уровень Q (в данном примере 60 Вт) и по точкам его пересечения с нагрузочными прямыми для $I = 0.5 I_{\text{max}}$, $0.75I_{\text{max}}$ и I_{max} определяются значения $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$, по которым далее с помощью рис. 4 устанавливаются соответствующие величины напряжения U. Полученные значения $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ и U отмечены на рис. 5 и 6 кружками, для использования этих данных в формуле (1) необходимо построить аналитические зависимости $\Delta T_{T \ni M}(I)$ и U(I). Для построения таких зависимостей, как и в работе [7], применены интерполяционные полиномы. Зависимость $\Delta T_{T \ni M}(I)$ построена с помощью интерполяционного полинома второго порядка, который наиболее компактно записывается относительно центрального узла $I_0 = 0.75 I_{\text{max}}$,

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 49 № 4 2020

$$\Delta T_{\text{T}\Im\text{M}}(I) = a(I - I_0)^2 + b(I - I_0) + c,$$

$$a = 0.5(\Delta T_{-1} - 2\Delta T_0 + \Delta T_1)/h_I^2,$$

$$b = 0.5(\Delta T_1 - \Delta T_{-1})/h_I, \quad c = \Delta T_0.$$
(2)

Для мощности Q = 60 Вт полином использует значения $\Delta T_{-1} = 15.2^{\circ}$ С, $\Delta T_0 = 30.5^{\circ}$ С и $\Delta T_1 =$ = 37.35°С, соответствующие значениям силы тока $I = 0.5I_{\text{max}}$, 0.75 I_{max} и I_{max} , в данном случае величина интерполяционных коэффициентов составила a = -1.08, b = 5.61, c = 30.5. Полученная зависимость отображена на рис. 5 сплошной линией внутри интервала и пунктиром за его пределами.

Значения U лежат практически на одной прямой, поэтому график U(I) (рис. 6) может быть аппроксимирован линейной зависимостью (полиномом первого порядка)

$$U = R_{\rho}I, \tag{3}$$

где R_e — электрическое сопротивление термоэлектрического модуля, определяемое как отношение узловых величин U к соответствующим значениям силы тока. Значение $R_e = 2.82\Omega$ было получено как средняя арифметическая величина отношения U/I для трех узлов. Следует отметить, что по данным производителя электрическое сопротивление термоэлектрического модуля, измеряемое при 25°C, равно 2.43 Ω .

При построении интерполяционного полинома для мощности 40 Вт на рис. 3 будет уже 4 точки пересечения нагрузочных прямых $Q(\Delta T_{T \ni M})$ с этим уровнем. В данном случае для построения полинома предпочтительнее выбрать узлы для значений $I = 0.25I_{max}$, $0.5I_{max}$ и $0.75I_{max}$, поскольку к этому интервалу относятся более энергетически выгодные режимы. Для этой мощности



Рис. 3. Зависимости $Q(\Delta T_{T \to M})$, 1 соответствует $I = 0.1I_{max}$, $2 - 0.25I_{max}$, $3 - 0.5I_{max}$, $4 - 0.75I_{max}$, $5 - I_{max}$.



Рис. 4. Зависимости $U(\Delta T_{\text{ТЭМ}})$, 1 соответствует $I = 0.1I_{\text{max}}$, $2 - 0.25I_{\text{max}}$, $3 - 0.5I_{\text{max}}$, $4 - 0.75I_{\text{max}}$, $5 - I_{\text{max}}$.

значения интерполяционных коэффициентов равны a = -1.46, b = 9.82, c = 29.6, величина $R_e = 2.97\Omega$.

В результате подстановки выражений (2) и (3) в (1) получим квадратное алгебраическое уравнение относительно *I*

$$(R_{s}R_{e}-a)I^{2}+(2aI_{0}-b)I+(R_{s}Q+R_{T}Q+bI_{0}-aI_{0}^{2}-c-\Delta T_{s})=0.$$

Область существования решения уравнения определяет величина дискриминанта D

$$D = (2aI_0 - b)^2 - 4(R_sR_e - a)(R_sQ + R_TQ + bI_0 - aI_0^2 - c - \Delta T_S).$$
(4)

Действительные корни существуют при неотрицательных D, этим значениям соответствуют режимы термоэлектрической системы охлаждения, обеспечивающие заданное значение ΔT_S . Граничное условие D = 0 позволяет определить минимально значение ΔT_s , соответствующее максимальному охлаждению теплонагруженного элемента при заданных параметрах термоэлектрической системы охлаждения,



0

Рис. 5. Зависимость $\Delta T_{T \ni M}(I)$.

4

5

I, A

6

7

8

Рис. 6. Зависимость *U*(*I*).

4

I, A

6

$$\Delta T_{S} = -\frac{(2aI_{0} - b)^{2}}{4(R_{s}R_{e} - a)} + R_{s}Q + R_{T}Q + bI_{0} - aI_{0}^{2} - c.$$
(5)

2

Из двух решений уравнения

3

40

35

30

25

15

10

5

0

2

²⁵ ⁰, 20 ¹√

$$I_1 = \frac{-(2aI_0 - b) - \sqrt{D}}{2(R_s R_e - a)}, \quad I_2 = \frac{-(2aI_0 - b) + \sqrt{D}}{2(R_s R_e - a)}$$
(6)

более энергетически эффективному режиму соответствует значение I_1 , поскольку заданное значение ΔT_S достигается при меньшем значении силы тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Одними из основных исходных параметров при расчете режимов термоэлектрической системы охлаждения являются термические сопротивления R_S и R_T, поэтому проведем предварительную оценку диапазона их значений. Величина R_s зависит от характеристик кулера и параметров теплового контакта "термоэлектрический модуль-кулер". Значение термического сопротивления кулера указывается производителем или определяется экспериментально [12]. Термическое сопротивление стандартных кулеров для компьютерных процессоров обычно лежит в диапазоне 0.3-0.5 К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок могут достигать значения 0.1 К/Вт и даже ниже. При этом, как правило, повышение эффективности кулеров сопровождается увеличением веса, габаритов и цены. Значение термического сопротивления теплового контакта зависит от теплопроводности наполнителя, толщины и площади зазора. Для стандартной термопасты КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.85$ Вт/(м · K) величина термического сопротивления $R = \delta/(\lambda S)$ при толщине слоя $\delta =$ = 0.1 мм и площади контакта $S = 40 \times 40$ мм² составит 0.074 К/Вт. Коэффициент теплопроводности лучших современных термопаст может достигать уровня 10 Вт/(м · К). Величина R_T складывается из термических сопротивлений теплораспределяющей пластины и двух тепловых контактов и зависит от теплопроводности материалов, а также геометрических размеров пластины и теплонагруженного элемента. В [13] проводились расчеты термического сопротивления теплораспределяющей пластины, его характерная величина составляет 0.05-0.1 К/Вт. При соответствии поперечных размеров теплонагруженного элемента и термоэлектрического модуля в применении теплораспределяющей пластины нет необходимости, в этом случае теплонагруженный элемент крепится через слой термопасты непосредственно на холодную сторону термоэлектрического модуля.

Расчет диапазона достижимых значений ΔT_S для термоэлектрического модуля "S-199-14-11" проведен с помощью выражения (5). Результаты расчета представлены на рис. 7 в виде зависимостей $\Delta T_S(R_S)$, кривые 1 и 2 соответствуют Q = 40 Вт при $R_T = 0.05$ и 0.1 K/Вт, кривые 3 и 4 - Q = 60 Вт для тех же значений R_T . В рассматриваемом диапазоне R_S величина ΔT_S меняется в большом интервале значений 40–50°С. Разница значений ΔT_S для мощности 40 и 60 Вт составляет 15–25°С в зависимости от величины R_S , при этом влияние R_T сказывается существенно меньше 2–3°С.

8



Рис. 7. Зависимости $\Delta T_{S}(R_{S})$.



Рис. 8. Зависимости $I(\Delta T_S)$.

Значения силы тока *I*, обеспечивающие заданную величину ΔT_S , определялись из выражения (6), зависимости $I(\Delta T_S)$ приведены на рис. 8 для различных значений *Q*, R_S и R_T . Представленные зависимости соответствуют следующим наборам параметров: 1 - Q = 60 Вт, $R_S = 0.3$ К/Вт, $R_T = 0.1$ К/Вт, 2 - Q = 60 Вт, $R_S = 0.3$ К/Вт, $R_T = 0.05$ К/Вт, 3 - Q = 60 Вт, $R_S = 0.1$ К/Вт, $R_T = 0.1$ К/Вт, 4 - Q = 40 Вт, $R_S = 0.3$ К/Вт, $R_T = 0.1$ К/Вт, $R_S = 0.3$ К/Вт, $R_T = 0.1$ К/Вт, $R_T = 0.1$

нейного увеличения силы тока при прочих равных условиях.

Результаты расчетов показывают существенно большее влияние величины R_S относительно R_T на характеристики термоэлектрического охлаждения. Это связано с тем, что через термическое сопротивление R_T передается тепловая мощность Q, а кулером отводится значительно большая тепловая мощность Q + W. Так при силе тока $I = 0.5I_{\text{max}}$ собственное тепловыделение термоэлектрического модуля W сопоставимо с величиной Q и равно 46 и 44 Вт для значений Q = 40 и 60 Вт соответственно. Таким образом, повышение эффективности термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования может быть обеспечено преж-

де всего за счет минимизации термического сопротивления теплоотводящей системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для расчета режимов термоэлектрической системы охлаждения представлен вычислительный алгоритм на основе аналитической математической модели, в которой рабочие характеристики термоэлектрического модуля аппроксимированы полиномами первого и второго порядка. Алгоритм расчета силы тока питания термоэлектрического модуля для заданных значений Q и ΔT_S включает в себя следующие шаги.

1. Определяется конструкция термоэлектрической системы охлаждения (выбор термоэлектрического модуля, кулера, теплораспределяющей пластины, термопасты) и соответствующие ей значения R_S и R_T .

2. По нагрузочным прямым $Q(I, \Delta T_{T \ni M})$ и величине Q графически определяются значения $\Delta T_{T \ni M}$, далее по зависимостям $U(I, \Delta T_{T \ni M})$ устанавливаются соответствующие им напряжения U(I).

3. По формулам (2) рассчитываются значения *a*, *b* и *c*.

4. По значениям U(I) определяется R_{e} .

5. По формуле (4) вычисляется величина дискриминанта D, при $D \ge 0$ заданный режим охлаждения теплонагруженного элемента может быть реализован.

6. По формуле (6) определяется значение силы тока питания термоэлектрического модуля I, обеспечивающее заданное значение ΔT_S .

Представленный алгоритм позволяет определять силу тока с учетом температуры окружающей среды, рабочих характеристик термоэлектрического модуля, параметров теплонагруженного элемента и системы охлаждения, а также дает возможность адекватного управления величиной тока для поддержания оптимальной температуры теплонагруженного элемента при изменении условий, например, температуры окружающей среды или мощности тепловыделения *Q*.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-47-242005: "Создание эффективных распределенных сетей температурных датчиков для бортовой аппаратуры спутников".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ненашев А.П.* Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высшая школа, 1990. 432 с.
- Chang Y.W., Chang C.C., Ke M.T., Chen S.L. Thermoelectric air-cooling module for Chang electronic devices // Applied Thermal Engineering. 2009. V. 29. № 13. P. 2731–2737.
- 3. *Zhu L., Tan H., Yu J.* Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // Energy Conversion and Management. 2013. V. 76. P. 685–690.
- 4. Васильев Е.Н., Гейнц Э.Р., Деревянко В.А., Коков Е.Г., Кукушкин С.В. Термоэлектрический блок охлаждения // Журн. Сибирского фед. ун-та. Сер. "Техника и технология". 2019. Т. 12. № 2. С. 146–152.
- 5. Васильев Е.Н., Деревянко В.А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов // Вестник СибГАУ. 2013. № 4(50). С. 9–13.
- Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов // Журн. технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 1. С. 80–86.
- Васильев Е.Н. Оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов с учетом термического сопротивления теплоотводящей системы // Журн. технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 9. С. 1290–1296.
- 8. Васильев Е.Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 2. С. 133–141.
- 9. Васильев Е.Н. Математическая модель для расчета характеристик термоэлектрических модулей охлаждения // Журн. Сибирского фед. ун-та. Сер. "Техника и технология". 2015. Т. 8. № 8. С. 1017–1023.
- 10. НПО "Кристалл". Термоэлектрические модули. Режим доступа: http://www.crystalltherm.com/ru/ production/termoelektricheskie-moduli/
- 11. Du C.Y., Wen C.D. Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect // International J. Heat and Mass Transfer. 2011. V. 54. P. 4875–4884.
- 12. Рассамакин Б.М., Рогачев В.А., Хайрнасов С.М. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 4. С. 48–50.
- Васильев Е.Н. Расчет термического сопротивления теплораспределителя системы охлаждения теплонагруженного элемента // Журн. технической физики. 2018. Т. 88. Вып. 4. С. 487–491.