

07
**Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения
 теплонагруженных элементов**

© Е.Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
 660036 Красноярск, Россия
 e-mail: ven@icm.krasn.ru

(Поступило в Редакцию 29 декабря 2015 г. В окончательной редакции 30 марта 2016 г.)

Представлены результаты расчета характеристик процесса теплообмена в термоэлектрической системе охлаждения и терморегулирования. Определено влияние неоднородности теплового потока и тепловых контактов на увеличение температуры теплонагруженного элемента. Проведен анализ эффективности охлаждения в зависимости от рабочих характеристик и силы тока питания термоэлектрических модулей, параметров теплонагруженного элемента и отдельных узлов системы, условий теплообмена с внешней средой. Показано, что при определенных условиях применение термоэлектрических модулей может приводить не к охлаждению элемента, а, наоборот, к его нагреву. Рассмотрена возможность оптимизации режимов охлаждения с целью снижения температуры теплонагруженного элемента и энергопотребления термоэлектрического модуля.

DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44022.1725

Введение

Общими тенденциями современной техники и электроники являются миниатюризация устройств, повышение степени интеграции и удельной мощности. В результате этого резко возрастает уровень тепловыделения и обостряется проблема обеспечения оптимальных тепловых режимов теплонагруженных элементов (ТНЭ). Наиболее распространенными примерами ТНЭ являются электронные компоненты (транзисторы, процессоры, трансформаторы), светодиоды и другие миниатюрные устройства с высоким удельным тепловыделением. Традиционные системы теплоотвода на основе свободно конвективного теплопереноса или принудительного вентилирования [1,2] уже не всегда справляются с задачей охлаждения ТНЭ. Для устройств, рабочие характеристики которых очень чувствительны к температурному режиму, необходимы системы охлаждения с функцией терморегулирования. Перспективным направлением для повышения интенсивности охлаждения ТНЭ и точности терморегулирования является применение термоэлектрических модулей (ТЭМ), которые наделяют теплоотводящую систему функцией охлаждения, т.е. дают возможность достигать температуры ТНЭ ниже значения внешней среды. Термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования (ТЭСОТ) 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 ТЭМ, малой тепловой инерционностью, высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, компактностью и небольшим весом, бесшумностью работы. ТЭСОТ активно используются для охлаждения как микрообъектов [3], так и холодильных камер большого объема [4].

Основными функциональными назначениями ТЭСОТ являются снижение температуры тепловыделяющего ТНЭ и отвод теплоты во внешнюю среду. Распространенным типом ТЭСОТ является конструкция, приведенная на рис. 1. Составными элементами данной конструкции являются теплораспределяющая пластина (ТРП), ТЭМ и кулер. ТРП необходима для выравнивания распределения тепловой мощности, поступающей от ТНЭ на поверхность ТЭМ. При этом ТЭМ выполняет функцию теплового насоса, передающего теплоту с холодной стороны на горячую. Кулер отводит во внешнюю среду суммарную тепловую мощность, выделяемую как ТНЭ, так и ТЭМ. Эффективность работы ТЭСОТ зависит от параметров и рабочих характеристик всех составных элементов конструкции и их взаимного влияния.

В публикациях по термоэлектрическому охлаждению основное внимание обычно уделяется исследованию процессов и оптимизации режимов ТЭМ без детального исследования влияния конфигурации систем подвода

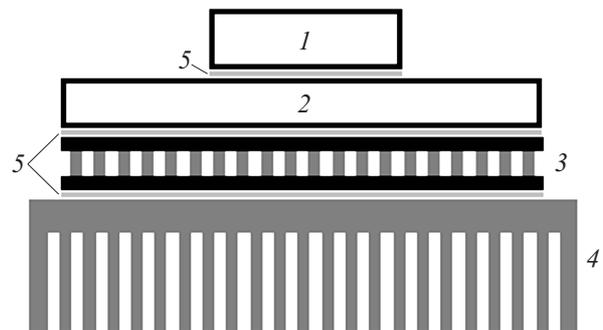


Рис. 1. Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования: 1 — ТНЭ, 2 — ТРП, 3 — ТЭМ, 4 — кулер, 5 — тепловые контакты.

и отвода теплоты. Целью настоящей работы является определение влияния параметров системы отвода и подвода теплоты на характеристики ТЭСОТ. В рамках исследования рассмотрен стационарный процесс теплопередачи в системе ТНЭ–ТРП–ТЭМ–кулер–внешняя среда. Для системы теплоподвода проведен расчет температурного поля ТРП и установлено влияние неоднородности температуры холодной стороны ТЭМ на эффективность охлаждения. Создана расчетная методика для анализа эффективности ТЭСОТ в зависимости от термического сопротивления системы отвода теплоты, мощности теплонагруженного элемента и нагрузочных характеристик ТЭМ. Под эффективностью охлаждения в работе понимается достижение минимальной температуры ТНЭ при заданной мощности тепловыделения.

Нагрузочные характеристики ТЭМ

При протекании электрического тока на спаях ТЭМ устанавливается разность температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, обусловленная эффектом Пельтье. Величина $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, тепловые и электрические параметры процесса зависят от режима электропитания и условий внешней среды, нагрузочных характеристик ТЭМ. При известных свойствах термоэлектрического материала нагрузочные характеристики ТЭМ могут быть рассчитаны [5,6]. В настоящей работе использованы нагрузочные характеристики серийных ТЭМ „РЕ–287–10–15“, которые приведены на рис. 2 и 3 и соответствуют данным производителя (ОАО НПФ ТФП ОСТЕРМ СПб, г. Санкт-Петербург) [7].

Нагрузочные характеристики отражают обратно пропорциональную зависимость холодопроизводительности Q от температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ (рис. 2). Так, при силе тока $I = 3.4 \text{ А}$ и $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 0$ максимальное значение $Q = 75 \text{ Вт}$, и наоборот, максимальная величина $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 74^\circ\text{С}$ при $Q = 0$. При своей работе ТЭМ

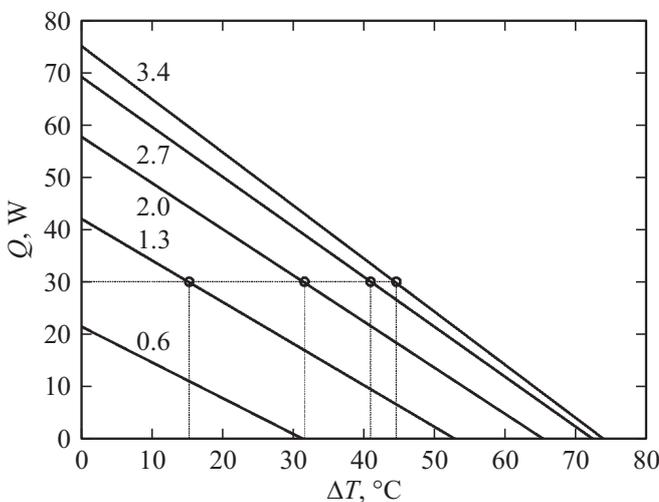


Рис. 2. Зависимости $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ для значений силы тока $I = 0.6, 1.3, 2.0, 2.7$ и 3.4 А .

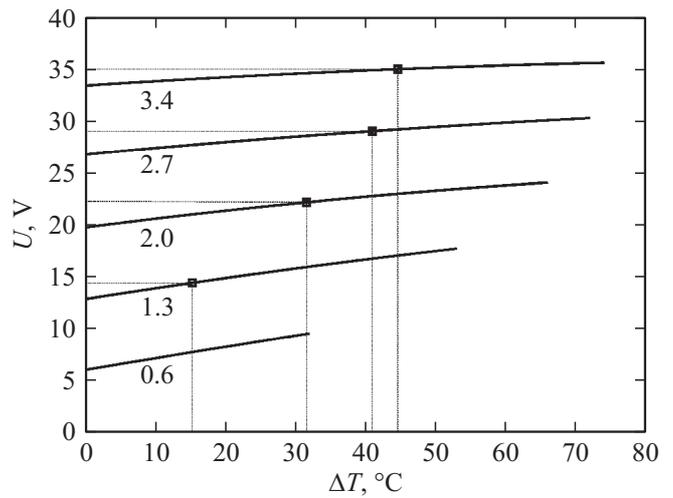


Рис. 3. Зависимости напряжения $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ для значений силы тока $I = 0.6, 1.3, 2.0, 2.7$ и 3.4 А .

потребляет электрическую мощность W , которая выделяется в объеме ветвей в виде джоулевой теплоты. Величина W определяется произведением силы тока и напряжения, зависимости $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ для различных значений силы тока приведены на рис. 3. Характеристики ТЭМ даны производителем для условий вакуума при температуре горячего спая 25°С . При расчете параметров ТЭСОТ следует учитывать, что в воздушной среде показатели снижаются примерно на 5%, в случае конденсации влаги в объеме ТЭМ снижение будет более значительным. Кроме того, не все серийные ТЭМ обеспечивают заявленные показатели.

Помимо рабочих характеристик ТЭМ на эффективность охлаждения влияют факторы, связанные с условиями подвода и отвода теплоты. При подводе теплоты негативным фактором является неоднородность теплового потока, поступающего к холодной стороне ТЭМ. При теплообмене ТЭМ с внешней средой от его горячей стороны необходимо отводить суммарную тепловую мощность $Q + W$, которая, как правило, значительно выше мощности тепловыделения ТНЭ из-за относительно низкого коэффициента полезного действия (КПД) ТЭМ. Это обуславливает соответствующий рост температурных перепадов на тепловых контактах и кулере, что в итоге приводит к потерям произведенного ТЭМ температурного перепада и снижению эффективности охлаждения. По этой причине при определенных условиях не исключено повышение температуры ТНЭ вместо ожидаемого охлаждения.

Теплопередача в ТРП

Идеальным вариантом теплопередачи от ТНЭ к ТЭМ является конфигурация, когда имеется полное соответствие их габаритов, в этом случае ТНЭ может крепиться непосредственно на холодную сторону ТЭМ. При охла-

ждении мощных и миниатюрных объектов поперечные размеры ТЭМ, как правило, превышают габариты посадочной площадки ТНЭ, поскольку холодопроизводительность ТЭМ имеет прямо пропорциональную зависимость от суммарной площади сечения ветвей. Из-за несоответствия габаритов ТЭМ и посадочной площадки ТНЭ возникает неоднородность полей температуры и теплового потока, и это негативным образом влияет на эффективность охлаждения и тепловой режим ТНЭ. Для уменьшения данного эффекта обычно используют переходную ТРП из металла с высоким коэффициентом теплопроводности λ . Определим неоднородность температуры в объеме ТРП и степень ее влияния на эффективность охлаждения при различных значениях λ и толщины ТРП.

Расчеты температурного поля в объеме ТРП проведены на основе численного решения уравнения теплопроводности вида

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c, ρ — удельная теплоемкость и плотность материала, T — температура, t — время, x, y, z — пространственные координаты. Уравнение (1) дополнено граничными условиями второго рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{l=0,L} = q \Big|_{l=0,L}, \quad (2)$$

где $l = x, y, z$, L — размер ТРП, соответствующий этим координатам. На верхней стороне ТРП по месту контакта с ТНЭ задается однородный тепловой поток q , величина которого определяется отношением тепловой мощности, поступающей от ТНЭ, к его посадочной площади. С нижней стороны распределение теплового потока, отводимого от ТРП, рассчитывается исходя из холодопроизводительности ТЭМ с учетом его нагрузочной характеристики $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$. Теплообмен боковых сторон и части свободной верхней поверхности ТРП с внешней средой не учитывался.

Для решения уравнений (1) и (2) применялся метод суммарной аппроксимации с расщеплением задачи по пространственным координатам [8]. Из решения (1) и (2) определялось установившееся стационарное распределение температуры в объеме ТРП.

Исследование процесса теплопередачи проведено для случая, когда поперечные габариты ТЭМ превышают размеры ТНЭ. Расчеты проведены при следующих параметрах: поперечные размеры ТРП по осям x и y равны 40×40 mm, толщина $\delta = 2, 4$ mm (ось z), коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 200, 400$ W/(m · K), ТНЭ расположен в центре и имеет площадь посадочного места 20×20 mm, мощность тепловыделения $Q = 45$ W. С учетом симметрии задачи относительно осей x и y в качестве расчетной области рассмотрена 1/4 часть объема пластины. Нагрузочная характеристика

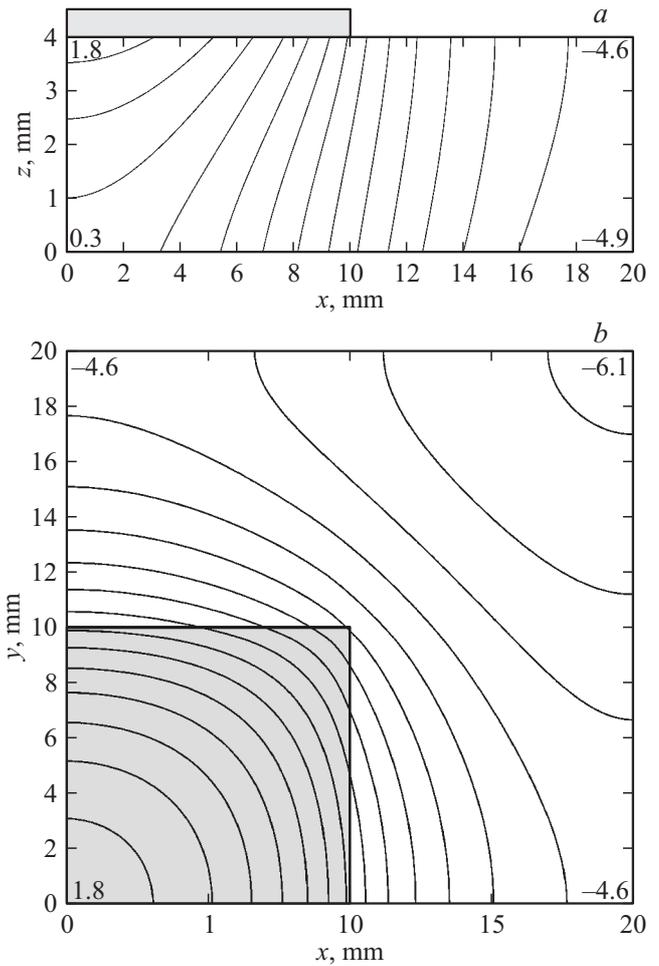


Рис. 4. Распределения $T(x, z)$ в среднем сечении ТРП (а) и $T(x, y)$ на верхней стороне ТРП (б).

ТЭМ соответствует приведенной на рис. 2 зависимости $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ при силе тока $I = 3.4$ A.

Результаты расчета температурного поля при $\delta = 4$ mm и $\lambda = 200$ W/(m · K) приведены на рис. 4. На рисунке представлены двумерные распределения в среднем сечении плоскости xz (а) и верхней поверхности ТРП в плоскости xy (б), температурный шаг между изолиниями равен 0.5°C , также указаны значения температуры, соответствующие угловым точкам. Серой областью на верхней границе обозначено месторасположение ТНЭ, нижняя сторона контактирует с холодной стороной ТЭМ. Как видно из рисунка, температурное поле в ТРП является существенно неоднородным, максимальное значение температуры на верхней стороне находится в центре под элементом и равно $T_{\text{max}} = 1.8^\circ\text{C}$, минимальное значение — в наиболее удаленной, угловой точке $T_{\text{min}} = -6.1^\circ\text{C}$. Перепад температуры по толщине ТРП ΔT_z обусловлен термическим сопротивлением слоя материала, величина перепада переменна по площади (под элементом $\Delta T_z = 1.5^\circ\text{C}$ и на краях $\Delta T_z = 0.3^\circ\text{C}$), поскольку зависит от распределения плотности тепло-

вого потока. В идеальном случае (без использования ТРП) при равномерном подводе такой же тепловой мощности (45 W) к поверхности ТЭМ и при всех остальных неизменных условиях температура холодной стороны ТЭМ $T_c = -4.0^\circ\text{C}$. Таким образом, использование ТРП толщиной $\delta = 4\text{ mm}$ приводит к увеличению температуры в центре посадочного места ТНЭ на 5.8°C по сравнению с идеальным случаем. Частично данное увеличение вызвано наличием температурного перепада по толщине ТРП, но в большей степени со снижением эффективности работы ТЭМ в условиях неоднородного подвода теплоты. Периферийные (за границами посадочного места ТНЭ) участки ТЭМ работают в условиях повышенного перепада температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ с меньшей холодопроизводительностью, поэтому возрастает тепловая нагрузка на центральную область, здесь $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, наоборот, уменьшается, приводя к росту температуры по площади посадочного места ТНЭ. С учетом того что общий перепад температуры на ТЭМ в данном режиме составил $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 29^\circ\text{C}$, это повышение на 5.8°C является достаточно значительным снижением эффективности охлаждения (20%).

Влияние толщины и коэффициента теплопроводности материала ТРП на эффективность охлаждения исследовано с помощью сравнительных расчетов. Очевидно, что величина температурных перепадов в ТРП обратно пропорциональна λ , при этом их зависимость от δ в направлениях x и y является обратно пропорциональной, а в направлении z прямо пропорциональной. В расчете второго варианта ТРП с уменьшенной толщиной $\delta = 2\text{ mm}$ и неизменных остальных параметрах задачи, максимальное значение температуры на верхней стороне составило $\Delta T_{\text{max}} = 5.5^\circ\text{C}$, минимальное значение $T_{\text{min}} = -8.5^\circ\text{C}$, под элементом $\Delta T_z = 0.8^\circ\text{C}$, снижение эффективности охлаждения $\approx 33\%$. Уменьшение толщины ТРП в 2 раза привело к практически такому же росту температурных перепадов по площади пластины, по толщине ТРП, наоборот, значения ΔT_z стали вдвое ниже. Наименьшее снижение эффективности ($\approx 17\%$) соответствует третьему варианту ТРП с $\delta = 2\text{ mm}$ и $\lambda = 400\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, при этом характерные значения температуры следующие: $T_{\text{max}} = 0.9^\circ\text{C}$, $T_{\text{min}} = -6.3^\circ\text{C}$, $\Delta T_z = 0.4^\circ\text{C}$.

Помимо влияния неоднородности температуры и теплового потока в ТРП на температурный режим ТНЭ также влияют температурные перепады на тепловых контактах ТНЭ–ТРП, ТРП–ТЭМ. Величина температурных перепадов имеет прямо пропорциональную зависимость от плотности теплового потока и величины термических сопротивлений. Значение термического сопротивления определяется толщиной зазора и коэффициентом теплопроводности вещества, которым заполнен зазор. Например, для распространенной теплопроводной пасты КПТ-8, имеющей в зависимости от производителя и температуры величину $\lambda = 0.7\text{--}1\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, перепад температуры на тепловом контакте ТРП–ТЭМ при $Q = 45\text{ W}$ и толщине слоя пасты 0.1 mm составит $2.8\text{--}4^\circ\text{C}$.

Поскольку применение ТРП не устраняет полностью негативное влияние неоднородности подвода теплоты от ТНЭ к ТЭМ, температурные перепады на ТРП и тепловых контактах могут быть значительными и их необходимо учитывать при расчете характеристик ТЭСОТ. Значительно большие возможности по выравниванию теплового потока имеют гипертеплопроводящие панели (плоские тепловые трубы) — устройства, в которых высокая эффективность теплопередачи обеспечивается за счет фазовых превращений теплоносителя при движении в пористой среде [9].

Исследование теплообмена с внешней средой и выбор оптимальных режимов

В рассматриваемой конструкции ТЭСОТ (рис. 1) теплообмен с внешней средой осуществляется с помощью кулера. Интегральным параметром, характеризующим эффективность теплопередачи, является термическое сопротивление кулера R . Величина R зависит от конструкции и характеристик кулера, значение R указывается производителем или определяется экспериментально [10]. Термическое сопротивление современных кулеров для компьютерных процессоров обычно лежит в диапазоне $R = 0.3\text{--}0.7\text{ K/W}$, лучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают $R = 0.1\text{ K/W}$. Значение термического сопротивления теплового контакта ТЭМ–кулер при заполнении зазора пастой КПТ–8 составит сравнимую с R величину $0.07\text{--}0.1\text{ K/W}$. Возможность многократного снижения величины термического сопротивления этого контакта дают ТЭМ с металлизированной поверхностью при паянном соединении с кулером.

Эффективность охлаждения ТЭСОТ зависит от параметров ТЭМ, тепловых контактов и кулера [11]. Температура холодной стороны модуля T_c определяется из соотношения температурных перепадов на ТЭМ и термических сопротивлениях

$$T_c = T_0 + R_s Q + R_s W - \Delta T_{\text{ТЕМ}}, \quad (3)$$

где T_0 — температура внешней среды, R_s — суммарное термическое сопротивление кулера и теплового контакта ТЭМ–кулер, W — электрическая мощность, потребляемая ТЭМ. В формуле (3) влияние ТЭМ на температуру ТНЭ определяют два последних слагаемых. Охлаждение ТНЭ обеспечивается за счет разницы температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ между сторонами ТЭМ, а слагаемое $R_s W$, наоборот, приводит к повышению температуры, обусловленному дополнительным температурным перепадом на термическом сопротивлении R_s за счет тепловой мощности, выделяемой ТЭМ. Таким образом, величина и знак разности $\Delta T_e = R_s W - \Delta T_{\text{ТЕМ}}$ определяют эффективность работы ТЭСОТ, отрицательное значение ΔT_e дает величину снижения температуры на посадочном месте ТНЭ, при $\Delta T_e > 0$, здесь температура, наоборот, повышается. При $\Delta T_e = 0$ ТЭМ не меняет

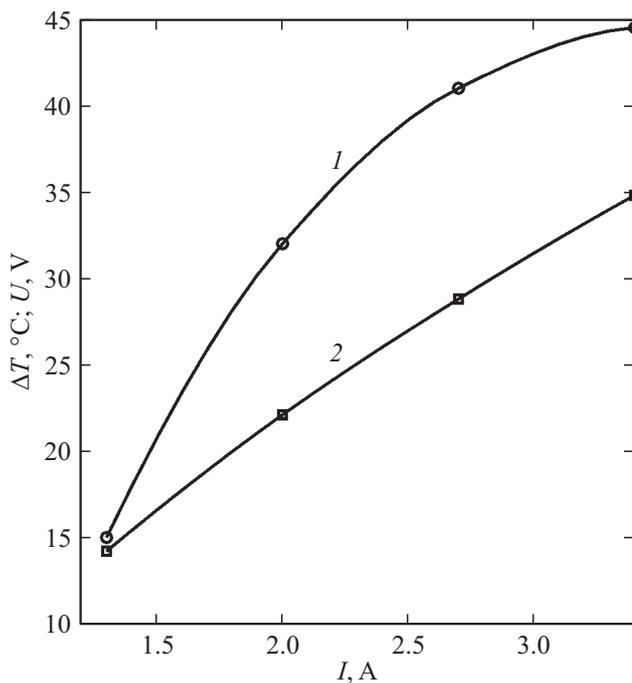


Рис. 5. Зависимости $\Delta T_{\text{TEM}}(I)$ (кривая 1) и $U(I)$ (кривая 2) при $Q = 30$ W.

температурный режим ТНЭ, поэтому такой случай соответствует обычной (нетермоэлектрической) системе теплоотвода ТНЭ–ТРП–кулер.

Управление режимами работы ТЭСОТ осуществляется путем изменения силы тока I электропитания ТЭМ. При этом сила тока определяет величину W , ΔT_{TEM} и, следовательно, ΔT_e . Обычно производители рекомендуют номинальный режим работы ТЭМ при значении силы, равном $(0.75-0.8)I_{\text{max}}$. Однако в общем случае эффективность охлаждения также зависит от тепловой нагрузки Q и других параметров ТЭСОТ. Зависимости $W(I)$ и $\Delta T_{\text{TEM}}(I)$ при заданном Q определяются из технических характеристик ТЭМ. Для получения данных зависимости на графики $Q(\Delta T_{\text{TEM}})$ наносится заданный уровень Q (в данном примере 30 W) и по точкам его пересечения с нагрузочными прямыми для разных I устанавливаются значения ΔT_{TEM} (рис. 2). Дополнительно по этим значениям ΔT_{TEM} с помощью рис. 3 определяются соответствующие величины напряжения U и электрической мощности $W = IU$. На рис. 5 приведены полученные зависимости $\Delta T_{\text{TEM}}(I)$ и $U(I)$ при $Q = 30$ W.

Температура холодной стороны ТЭМ рассчитывалась по формуле (3) с учетом зависимостей $W(I)$ и $\Delta T_{\text{TEM}}(I)$ для температуры внешней среды $T_0 = 20^\circ\text{C}$ при заданных значениях силы тока I , мощности тепловыделения Q и термического сопротивления R_s . На рис. 6 сплошными линиями приведены зависимости $T_c(I)$ для трех значений $R_s = 0.1, 0.3$ и 0.5 K/W при $Q = 15$ W. Пунктирными линиями на рисунке отмечены температурные уровни, соответствующие обычной системе теплоотвода, также

рассчитанные по формуле (3) при $\Delta T_e = 0$. Минимумы на кривых $T_c(I)$ соответствуют оптимальным режимам с максимальной эффективностью системы охлаждения, при которых достигаются наименьшие значения T_c . С ростом величины R_s положение минимумов зависимостей $T_c(I)$ смещается в область меньших значений силы тока, для $R_s = 0.1, 0.3$ и 0.5 K/W оптимальные значения силы тока соответственно равны $I_{\text{opt}} = 2.75, 2.1$ и 1.75 A. Как видно из рис. 6, величина термического сопротивления оказывает значительное влияние на эффективность охлаждения, так минимальные значения T_c при $R_s = 0.1$ и 0.5 K/W отличаются более, чем на 25°C . При этом ТЭСОТ эффективнее обычной системы теплоотвода во всем диапазоне значений I , за исключением значений силы тока $I \approx 3.4$ A для $R_s = 0.5$ K/W.

Величина мощности тепловыделения ТНЭ также влияет на рабочие характеристики ТЭСОТ. Зависимости $T_c(I)$ для $Q = 30$ W приведены на рис. 7. При значениях $R_s = 0.1$ и 0.3 K/W ТЭСОТ эффективнее обычной системы теплоотвода во всем диапазоне значений I . Для $R_s = 0.5$ K/W при значениях силы тока $I > 2.8$ A величина T_c выше, чем в случае обычной системы теплоотвода. Следовательно, при этих условиях применение ТЭМ уже не обеспечивает охлаждение посадочного места ТНЭ, а, наоборот, приводит к его нагреву.

Повышение мощности ТНЭ до 45 W еще больше сужает диапазон эффективного охлаждения (рис. 8). Здесь термоэлектрическое охлаждение ТНЭ невозможно для $R_s = 0.5$ K/W во всем диапазоне силы тока и для $R_s = 0.3$ K/W при $I > 3$ A. Из сравнения рис. 6–8 следует, что с увеличением мощности тепловыделения ТНЭ растет температура T_c , а диапазон эффективных

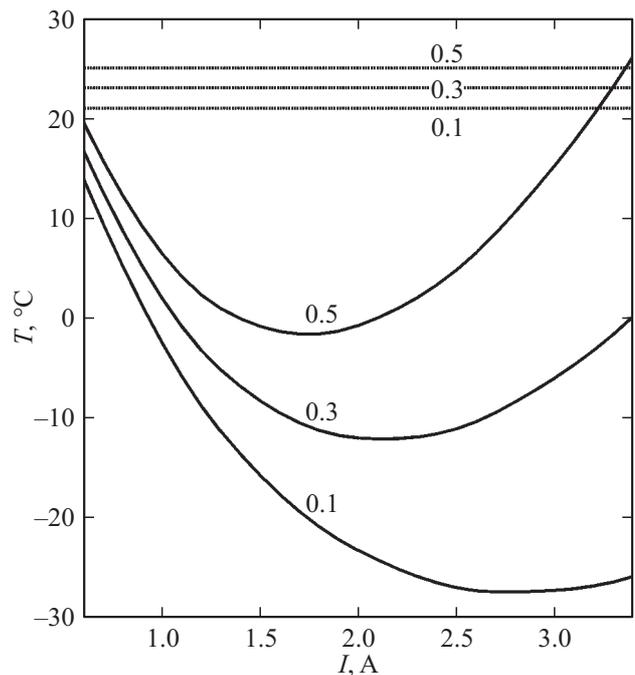


Рис. 6. Зависимости $T_c(I)$ при $Q = 15$ W.

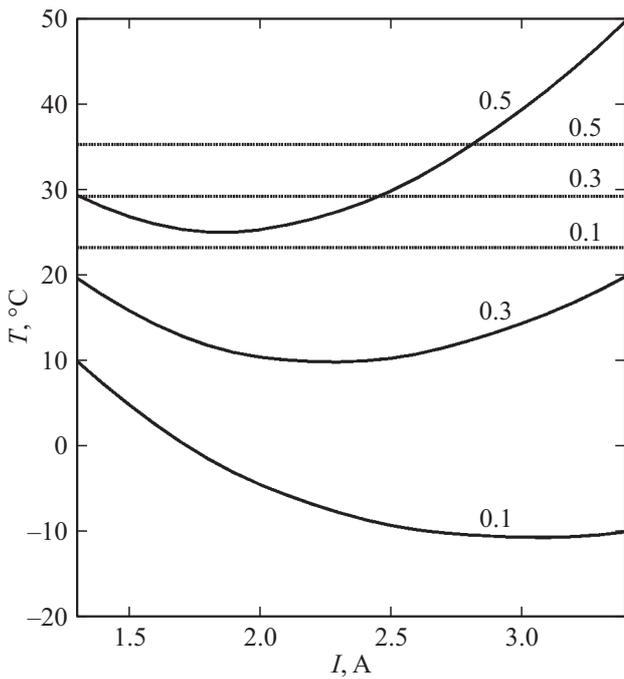


Рис. 7. Зависимости $T_c(I)$ при $Q = 30$ W.

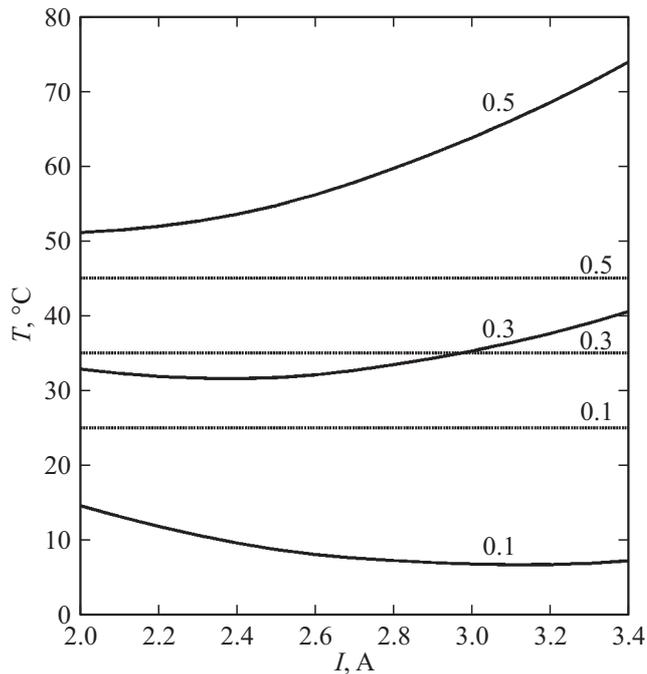


Рис. 8. Зависимости $T_c(I)$ при $Q = 45$ W.

режимов ТЭСОТ сужается. Снижение эффективности ТЭСОТ с ростом Q обусловлено как увеличением вклада слагаемого $R_s Q$ в формуле (3), так и уменьшением величины $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, имеющей обратно пропорциональную зависимость от Q . При последовательном увеличении мощности тепловыделения $Q = 15, 30$ и 45 W растут и оптимальные значения силы тока $I_{\text{опт}} = 2.1, 2.3$

и 2.4 А (для $R_s = 0.3$ К/В). Изменение нижней границы диапазона I на этих рисунках обусловлено тем, что при возрастании тепловой нагрузки для обеспечения режима охлаждения требуются более высокие значения силы тока.

Проведенное исследование процессов теплообмена в ТЭСОТ показало, что режимам с максимальной эффективностью охлаждения соответствует определенная сила тока питания ТЭМ. Это значение не является фиксированным, а зависит от мощности тепловой нагрузки и параметров теплообмена системы с внешней средой.

Зависимости $T_c(I)$ являются основой для анализа эффективности ТЭСОТ и выбора оптимального рабочего режима. Такой анализ представлен на примере набора режимов с $R_s = 0.3$ К/В и $Q = 30$ W. Этим режимам соответствует зависимость $T_c(I)$ (кривая 2 на рис. 7), которая отображена отдельно на рис. 9 (кривая 1). Максимальная эффективность охлаждения (минимальная температура холодной стороны ТЭМ $\Delta T_{\text{мин}} \approx 10^\circ\text{C}$) в этом режиме достигается при значении $I \approx 2.3$ А. На рис. 9 жирной линией отображен диапазон, в котором значения температуры близки к $T_{\text{мин}}$, а энергопотребление ТЭМ ниже. Так, на левой границе диапазона ($I = 1.7$ А) температура T_c всего на 3°C выше $T_{\text{мин}}$, а мощность энергопотребления при этом ниже на 45% по сравнению с режимом при $I = 2.3$ А. Следовательно, с точки зрения снижения энергопотребления и повышения КПД, силу тока питания ТЭМ выгодно выбирать не в точке минимума зависимости $T_c(I)$, а на ее левой ветви, величина сдвига от этой точки зависит от „жесткости“ технических условий по температурному режиму рас-

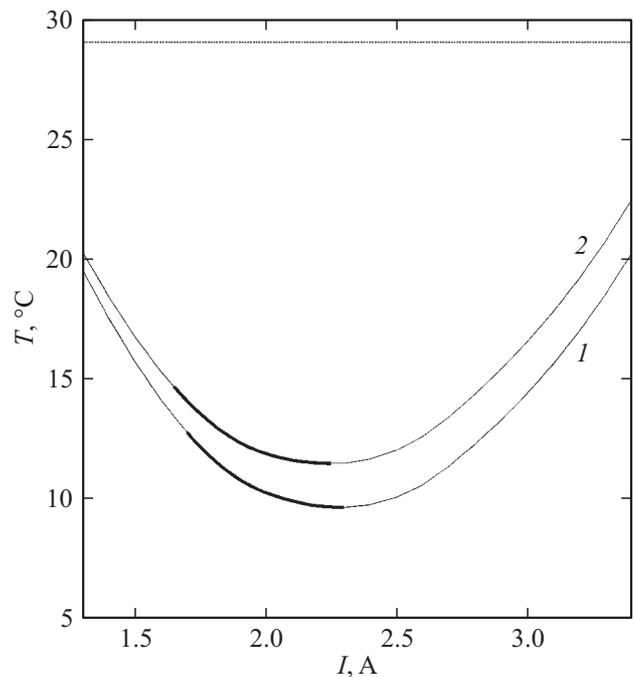


Рис. 9. Зависимости $T_c(I)$ при $Q = 30$ W для вакуума (кривая 1) и воздуха (кривая 2).

смаатриваемого ТНЭ. Зависимость I на рис. 9 получена для нагрузочных характеристик в условиях вакуума, в атмосфере сухого воздуха производительность ТЭМ снижается примерно на 5%, в этом случае зависимость $T_c(I)$ (кривая 2) проходит выше, а точка экстремума незначительно смещается в сторону меньших значений I .

Таким образом, расчет характеристик теплообмена в ТЭСОТ позволяет определить температурный режим ТНЭ. С учетом рабочих характеристик ТЭМ, заданной тепловой мощности ТНЭ, суммарного термического сопротивления кулера и теплового контакта ТЭМ–кулер рассчитывается зависимость $T_c(I)$, по которой выбирается оптимальное значение силы тока и определяется соответствующее значение температуры холодной стороны ТЭМ. Затем к величине T_c прибавляются температурные перепады в ТРП и на тепловых контактах ТНЭ–ТРП, ТРП–ТЭМ, что в итоге дает значение температуры основания ТНЭ. При известном внутреннем термическом сопротивлении ТНЭ (информация производителя) также могут быть рассчитаны температурный перепад в его объеме и температура самого кристалла.

Заключение

В настоящей работе комплексно рассмотрены процессы теплообмена в ТЭСОТ и представлены результаты расчета режимов работы с учетом мощности тепловыделения ТНЭ, рабочих характеристик ТЭМ, параметров ТРП и кулера, величины термических сопротивлений тепловых контактов. Расчетная методика позволяет определять температуру ТНЭ и проводить оптимизацию режимов ТЭСОТ с целью достижения максимальной эффективности охлаждения и снижения энергозатрат. Установлено, что оптимальная сила тока питания ТЭМ, соответствующая режимам с максимальной эффективностью охлаждения, зависит от термического сопротивления системы теплоотвода и мощности тепловой нагрузки.

Список литературы

- [1] *Шеремет М.А.* // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 6. С. 472–480.
- [2] *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.* Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
- [3] *Санин В.Н., Андреков И.К., Цапаев А.П., Копылова Н.А.* // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2003. № 9. С. 60–65.
- [4] *Деревянко В.А., Гладуценко В.Н., Гейнц Э.Р.* и др. Термоэлектрический блок охлаждения. Пат. РФ № 2511922. 10.04.2014.
- [5] *Марков О.И.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 13. С. 7–11.
- [6] *Марков О.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 62–66.
- [7] *Однокаскадные стандартные ТЭМ.* Технические характеристики. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.oosterm.ru/products1.html/>
- [8] *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 656 с.
- [9] *Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Нестеров Д.А.* и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 6. С. 19–28.
- [10] *Рассамакин Б.М., Рогачев В.А., Хайрмасов С.М.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 4. С. 48–50.
- [11] *Васильев Е.Н., Деревянко В.А.* // Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та. 2013. № 4. С. 9–13.