

01

Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения

© Е.Н. Васильев

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

Поступило в Редакцию 22 октября 2020 г.
В окончательной редакции 8 декабря 2020 г.
Принято к публикации 9 декабря 2020 г.

Рассмотрена термоэлектрическая система охлаждения и терморегулирования, состоящая из термоэлектрического модуля, устройств подвода и отвода теплоты. На основе математической модели, использующей в качестве исходных данных рабочие характеристики серийного термоэлектрического модуля, проведены расчеты холодильного коэффициента системы охлаждения с учетом термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты. Получены зависимости холодильного коэффициента от силы тока при различных значениях параметров охлаждения. Проведен анализ оптимальных значений силы тока питания термоэлектрического модуля.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, холодопроизводительность, термическое сопротивление.

DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50684.296-20

Введение

В настоящее время термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования (ТЭСОТ) активно используются для охлаждения как микрообъектов, так и холодильных камер большого объема [1–3]. ТЭСОТ сохраняют работоспособность в любом пространственном положении, имеют высокую надежность и ресурс, возможность плавного и точного регулирования температурного режима вплоть до изменения режима охлаждения на режим нагрева. Главным недостатком ТЭСОТ является сравнительно низкий холодильный коэффициент [4,5]. Повышение эффективности ТЭСОТ может быть обеспечено как путем получения новых термоэлектрических материалов с улучшенными показателями добротности [6,7], так и за счет оптимизации конструкции и режимов работы системы, что позволяет максимально использовать потенциал существующих термоэлектрических материалов и устройств [8–10].

Термоэлектрический модуль (ТЭМ) по своей сути является тепловым насосом, производящим отрицательный температурный перепад за счет передачи теплоты с холодной стороны на горячую. Эффективность работы ТЭМ в значительной степени определяется потерями температурного перепада вследствие обратной теплопередачи от горячего спая к холодному за счет теплопроводности и джоулева тепловыделения. Величина таких потерь определяется добротностью термоэлектрического материала и режимом работы ТЭМ. На эффективность работы ТЭСОТ в целом дополнительное влияние оказывают потери температурного перепада в устройствах теплоподвода и теплоотвода, величина таких потерь зависит от термических сопротивлений этих устройств. В настоящей работе исследуется

влияние термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты на холодильный коэффициент ТЭСОТ, анализ проведен на примере серийного модуля „S–127–14–11“, имеющего максимальные значения перепада температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 72.5^\circ\text{C}$ и холодопроизводительности $Q = 79.3 \text{ W}$ при максимальной силе тока $I_{\text{max}} = 7.9 \text{ A}$ [11].

1. Тепловые процессы и холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения

Принципиальная схема ТЭСОТ приведена на рис. 1. Тепловая мощность Q , выделяемая теплонагруженным элементом 1, передается устройством теплоподвода 2 на холодную сторону ТЭМ 3. Теплопередающая способность устройства теплоподвода интегрально характери-

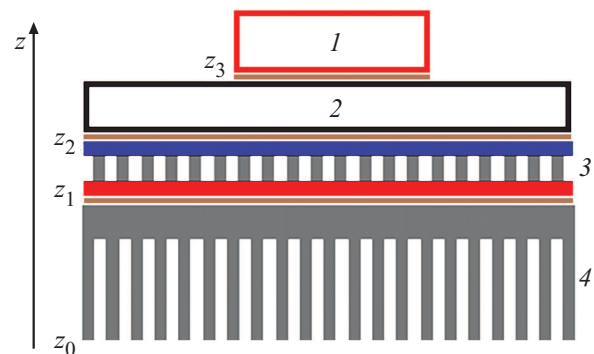


Рис. 1. Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования: 1 — теплонагруженный элемент; 2 — устройство теплоподвода; 3 — ТЭМ; 4 — устройство теплоотвода.

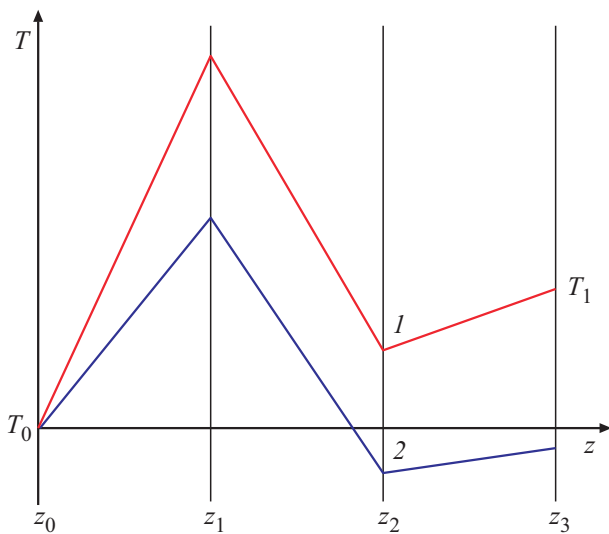


Рис. 2. Распределения температуры в термоэлектрической системе охлаждения при двух разных соотношениях температурных перепадов.

зается величиной термического сопротивления R_T , результаты расчетов и анализ значений R_T для устройства теплоподвода в виде теплораспределяющей пластины приведены в [12]. ТЭМ при своей работе выделяет теплоту, равную мощности собственного энергопотребления W . Тепловая мощность $Q + W$ отводится с горячей стороны ТЭМ во внешнюю среду устройством теплоотвода 4, имеющим суммарное термическое сопротивление R_S . Информация по устройствам теплоотвода и характерным значениям R_S приведена в [10]. По площади контакта z_0 устройством теплоотвода теплота передается во внешнюю среду, имеющую температуру T_0 . Горячей и холодной сторонам ТЭМ соответствуют контактные границы z_1 и z_2 . Нижняя поверхность основания теплонагруженного элемента (поверхность z_3) характеризуется средним значением температуры T_1 .

Характерные варианты температурных распределений в направлении z , которые могут реализоваться в ТЭСОТ, приведены на рис. 2. Температура внешней среды T_0 является исходным значением, напрямую влияющим на температуру посадочного места теплонагруженного элемента. На термическом сопротивлении R_S устройства теплоотвода устанавливается положительный температурный перепад, равный $R_S(Q + W)$. ТЭМ производит отрицательный температурный перепад $-\Delta T_{\text{ТЕМ}}$. Устройство теплоподвода с термическим сопротивлением R_T обеспечивает положительный температурный перепад $R_T Q$. В зависимости от соотношения величины температурных перепадов общий перепад $\Delta T_e = T_1 - T_0$, как показано на рис. 2, может иметь как положительное (линия 1), так и отрицательное значение (линия 2).

Энергетическая эффективность работы ТЭМ описывается известной характеристикой COP (coefficient of performance), равной отношению холодопроизводи-

тельности ТЭМ к потребляемой им электрической мощности. Зависимости величины COP от силы тока и температурного перепада серийных ТЭМ, как правило, предоставляются производителями. Холодильный коэффициент ТЭСОТ определяется аналогичным образом

$$\varepsilon = \frac{Q}{W}.$$

Характеристика COP соответствует идеализированному случаю, когда процессы теплоподвода к холодной стороне и теплоотвода от горячей стороны ТЭМ полагаются идеальными. В отсутствие потерь температурного перепада справедливо соотношение $\Delta T_e = -\Delta T_{\text{ТЕМ}}$. Традиционно для ТЭМ указывается значение температурного перепада, равное разности температур между горячей и холодной сторонами модуля, следовательно, $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ определено в противоположном направлении по сравнению с ΔT_e и поэтому имеет отрицательный знак.

На величину холодильного коэффициента реальной системы охлаждения, включающей в себя устройства подвода и отвода, оказывают влияние потери температурного перепада на термических сопротивлениях. Поэтому величина ε у ТЭСОТ будет ниже, чем значение COP у отдельного ТЭМ при равных перепадах температуры на их границах. Влияние потерь температурного перепада на величину ε происходит неявным образом. Для обеспечения заданной величины ΔT_e в ТЭСОТ потери температурного перепада могут быть скомпенсированы только соответствующим увеличением $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, которое достигается за счет повышения энергопотребления W и уменьшения холодопроизводительности. В итоге увеличение $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ приводит к снижению COP модуля, что подтверждается зависимостью COP ($\Delta T_{\text{ТЕМ}}$), и холодильного коэффициента ТЭСОТ в целом.

Расчет величины холодильного коэффициента ТЭСОТ проводился с учетом рабочих характеристик ТЭМ с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад $\Delta T_e = T_1 - T_0$ с перепадами температур на отдельных элементах ТЭСОТ

$$\begin{aligned} \Delta T_e = R_T Q + R_S(Q + W) - \Delta T_{\text{ТЕМ}} = (R_S + R_T)Q \\ + R_S U(I, Q)I - \Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q). \end{aligned}$$

Здесь $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ — перепад температуры между горячей и холодной сторонами ТЭМ, U, I — напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. Рабочие характеристики термоэлектрического модуля $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ и $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ являются исходными данными для определения зависимостей $U(I, Q)$ и $\Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q)$ с помощью интерполяционных многочленов, методика расчета этих зависимостей приведена в [13]. Решение нелинейной алгебраической системы уравнений для заданных значений $R_S, R_T, \Delta T_e$ и I позволяет рассчитать величины Q, W и ε .

2. Обсуждение результатов

Максимальное значение холодильного коэффициента ТЭСОТ достигается при отсутствии потерь температурного перепада ($R_S = R_T = 0$), в этом идеальном случае величина холодильного коэффициента равна COP. Зависимости $\varepsilon(I)$ на рис. 3 отображены сплошными линиями для значений $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 0.1, 0.25, 0.5$ и $0.75\Delta T_{\text{max}}$, штриховыми линиями для тех значений $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ отображены графики COP производителя ТЭМ [11]. Соответствие результатов расчета с данными производителя свидетельствует об адекватности вычислительного алгоритма.

Учет потерь температурного перепада на термических сопротивлениях неизбежно приводит к снижению холодильного коэффициента. Для определения влияния термического сопротивления устройства теплоотвода рас-

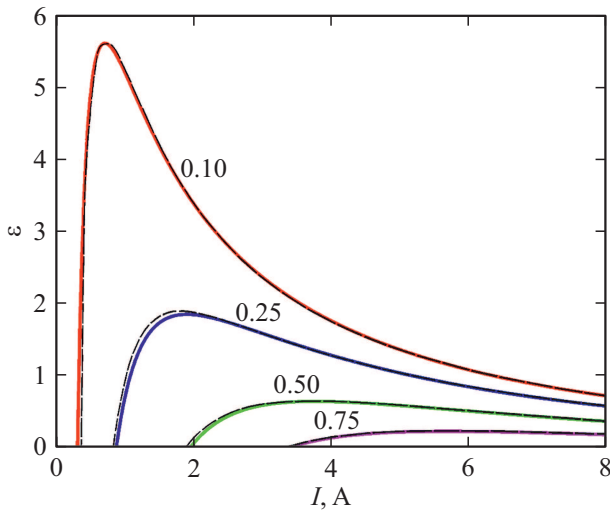


Рис. 3. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при значениях $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 0.1, 0.25, 0.5$ и $0.75\Delta T_{\text{max}}$.

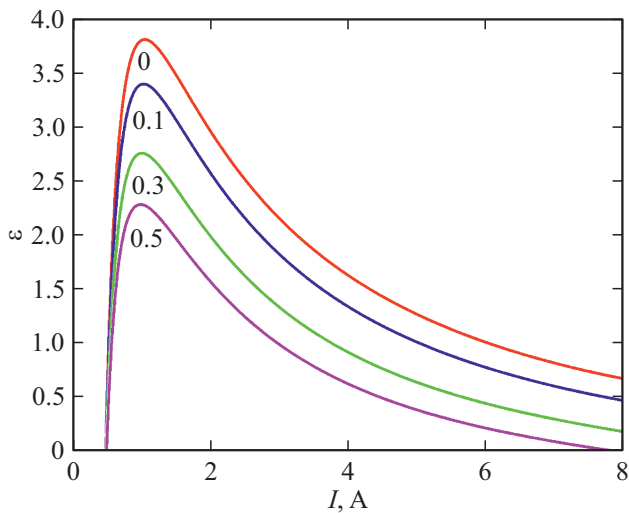


Рис. 4. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$. Числа у кривых — значения сопротивления R_S .

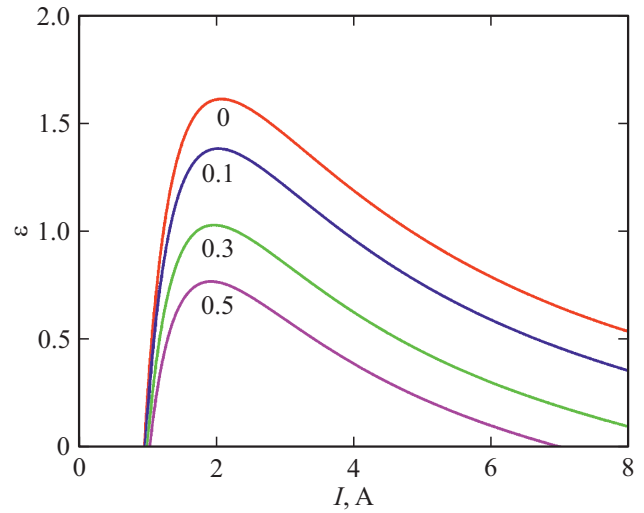


Рис. 5. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при $\Delta T_e = -20^\circ\text{C}$. Числа у кривых — значения сопротивления R_S .

считаны зависимости $\varepsilon(I)$ без учета системы теплоотвода ($R_T = 0$) при значениях $R_S = 0, 0.1, 0.3$ и 0.5 K/W . Для поддержания стабильной температуры теплонагруженного элемента система охлаждения должна работать в режиме терморегулирования, обеспечивая заданный температурный перепад ΔT_e между его основанием и внешней средой. На рис. 4 и 5 приведены зависимости $\varepsilon(I)$ для значений $\Delta T_e = -10$ и -20°C , величины R_S указаны на соответствующих кривых. Из сопоставления зависимостей видно, что увеличение значения R_S с 0 до 0.5 существенно снижает максимальное значение холодильного коэффициента: с 3.8 до 2.3 при $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$ и с 1.6 до 0.77 при $\Delta T_e = -20^\circ\text{C}$. При этом положение максимума зависимостей $\varepsilon(I)$ незначительно смещается в сторону уменьшения силы тока соответственно с 1 до 0.94 А для $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$ и с 2.08 до 1.93 А для $\Delta T_e = -20^\circ\text{C}$. Сравнение рис. 4 и 5 свидетельствует о значительном влиянии величины ΔT_e на холодильный коэффициент, при снижении величины ΔT_e на 10°C максимальные значения ε упали примерно в 2.4 и 3 раза для $R_S = 0$ и 0.5 K/W соответственно.

Для определения влияния термического сопротивления устройства теплоотвода сначала рассмотрим зависимости холодильного коэффициента от силы тока, полученные при $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$ и значениях $R_T = 0, 0.1, 0.3$ и 0.5 K/W без учета системы теплоотвода ($R_S = 0$). На рис. 6 приведены зависимости $\varepsilon(I)$, на которых указаны соответствующие значения R_T . Сравнение зависимостей на рис. 4 и 6 показывает, что величина R_T оказывает на холодильный коэффициент меньшее влияние, чем R_S . Отличие наиболее существенно при больших значениях силы тока, так, при $I = 6 \text{ A} \approx 0.75I_{\text{max}}$ изменение R_T с 0 до 0.5 K/W приводит к уменьшению ε с 1 до 0.6 (рис. 6), а при аналогичном изменении R_S величина ε снижается с 1 до 0.2 (рис. 4). Такая разница обусловлена со-

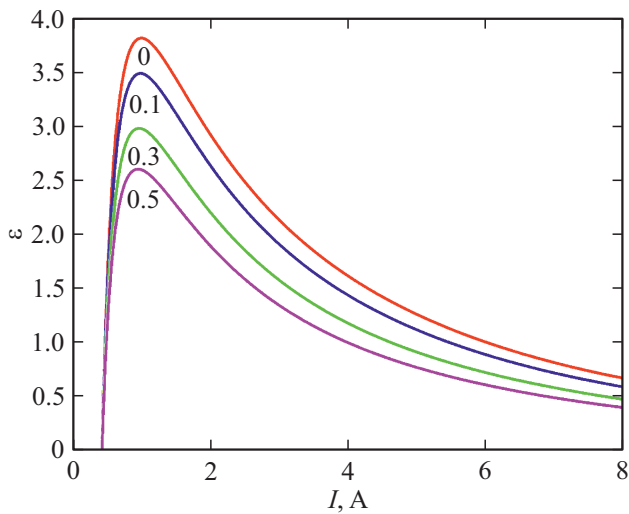


Рис. 6. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при значении $R_S = 0$. Числа у кривых — значения сопротивления R_T .

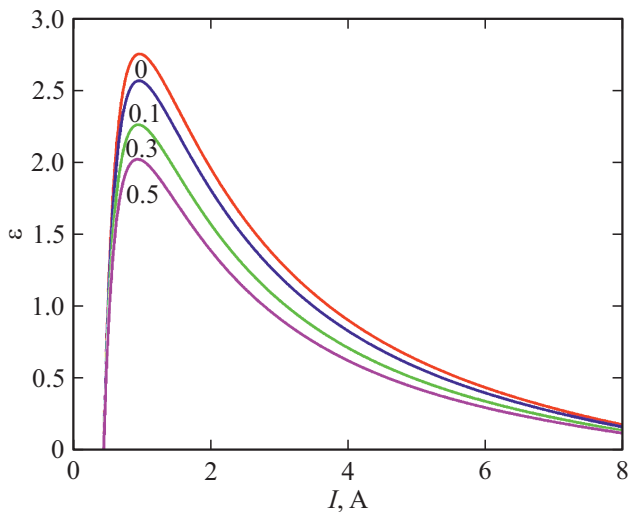


Рис. 7. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при значении $R_S = 0.3$ К/В. Числа у кривых — значения сопротивления R_T .

отношением потерь температурного перепада, которые пропорциональны тепловым мощностям Q и $Q + W$ на устройствах теплоподвода и теплоотвода соответственно. Совместное влияние термических сопротивлений можно оценить по расчетным результатам, приведенным на рис. 7. Зависимости получены при $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$, $R_S = 0.3$ К/В и $R_T = 0, 0.1, 0.3$ и 0.5 К/В, значения R_T указаны на соответствующих кривых.

При выборе режима работы ТЭСОТ, помимо учета величины холодильного коэффициента, характеризующего экономичность процесса, также необходимо обеспечить холодопроизводительность, равную мощности тепловыделения теплонагруженного элемента при заданном температурном перепаде ΔT_e между его основанием

и внешней средой. На рис. 8 приведены зависимости от силы тока величин, определяющих холодильный коэффициент. Жирными линиями отображены графики холодопроизводительности $Q(I)$, тонкими линиями — зависимости мощности энергопотребления $W(I)$. Кривые 1 соответствуют идеальному случаю $R_S = R_T = 0$, при расчете зависимостей 2 задавалось термическое сопротивление теплоотвода $R_S = 0.3$ К/В, при определении 3 учитывались оба термических сопротивления $R_S = R_T = 0.3$ К/В. Как видно из рис. 8, влияние термических сопротивлений приводит к существенному снижению холодопроизводительности, так, при $I = 6$ А величина Q снизилась более чем в 2 раза по сравнению с идеальным случаем. Снижение холодопроизводительности ТЭСОТ обусловлено потерями температурного перепада на термических сопротивлениях, для обеспечения заданной величины ΔT_e эти потери компенсируются соответствующим увеличением $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, что, согласно нагрузочным прямым, приводит к снижению Q . На рис. 9 приведены зависимости ΔT_e для тех же значений термических сопротивлений: 1 — $R_S = R_T = 0$; 2 — $R_S = 0.3$ К/В, $R_T = 0$; 3 — $R_S = R_T = 0.3$ К/В. Для заданного значения силы тока величина потерь температурного перепада, которую необходимо компенсировать, определяется по разнице значений ΔT_e на графиках 2 или 3 относительно идеального случая 1.

Актуальной задачей, определяющей режим охлаждения ТЭСОТ, является выбор величины тока питания ТЭМ. Производители термоэлектрических систем в сопроводительной документации обычно предлагают в качестве оптимального параметра электропитания ТЭМ уровень 0.75 от максимальных значений тока или напряжения [14,15]. Рассчитанные зависимости $\varepsilon(I)$ и $Q(I)$ дают возможность определить оптимальные значения силы тока с учетом термических сопротивлений. Как видно на рис. 8, зависимости $Q(I)$ (кривые 2 и 3) имеют

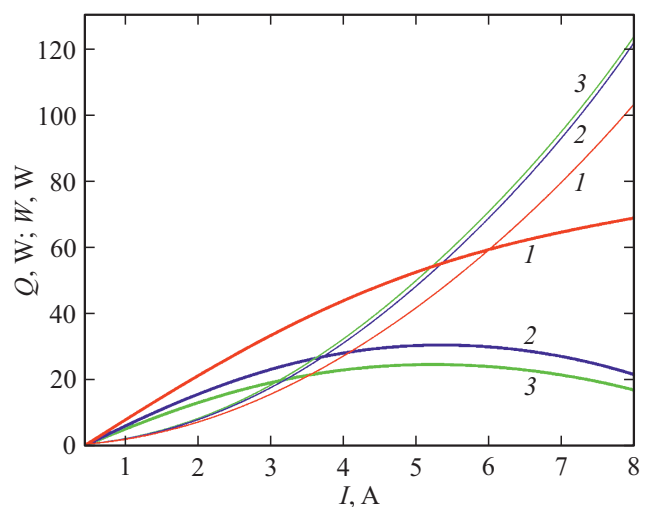


Рис. 8. Зависимости Q (жирные линии) и W (тонкие линии) от силы тока: 1 — $R_S = 0, R_T = 0$; 2 — $R_S = 0.3, R_T = 0$; 3 — $R_S = 0.3$ К/В, $R_T = 0.3$ К/В.

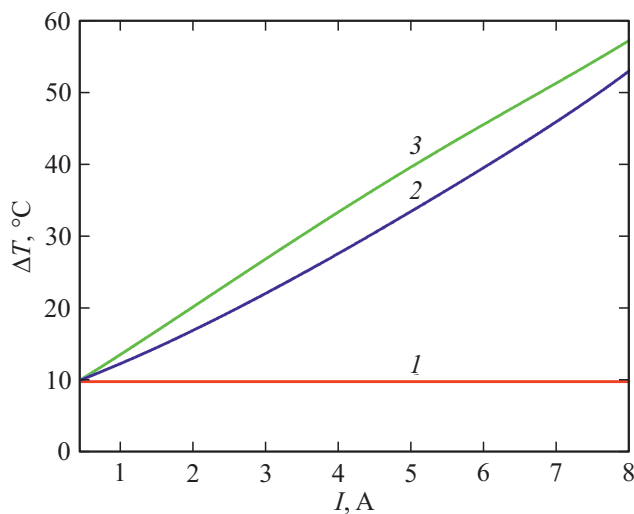


Рис. 9. Зависимости $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ от силы тока ($1 - R_S = 0, R_T = 0$; $2 - R_S = 0.3 \text{ K/W}, R_T = 0$; $3 - R_S = 0.3 \text{ K/W}, R_T = 0.3 \text{ K/W}$).

максимум Q^* при значениях $I_Q = 5.2$ и 5.3 А. Следовательно, рекомендуемый производителями уровень $0.75I_{\text{max}} \approx 6$ А при учете термических сопротивлений не является оптимальным по величине Q , и еще в большей степени по величине ε . Значение I_Q задает правую границу диапазона рабочих токов, соответствующую режиму максимальной холодопроизводительности ТЭСОТ. С учетом пологого характера $Q(I)$ целесообразнее выбирать меньшее значение I , например, при токе $I = 3.7$ А, определенном по уровню $0.9Q^*$ (для кривой 3, рис. 8), значение холодильного коэффициента возрастет на 73% (с 0.45 при $I = 5.2$ А до 0.78). Левую границу диапазона рабочих токов устанавливает значение I_ε , обеспечивающее максимальный холодильный коэффициент ε^* ; для значений $R_S = R_T = 0.3 \text{ K/W}$ величина $I_\varepsilon = 0.94$ А (рис. 7). Аналогично увеличение силы тока до значения $I = 1.37$ А, определенного по уровню $0.9\varepsilon^*$, дает рост холодопроизводительности на 78% (с 4.6 до 8.2 W). Таким образом, для рассматриваемых параметров ТЭСОТ (ТЭМ „S-127-14-11“, $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$, $R_S = R_T = 0.3 \text{ K/W}$) диапазон значений силы тока 1.37–3.7 А близок к оптимальному, конкретное значение силы тока определяется с учетом мощности тепловыделения теплонагруженного элемента.

Заключение

Результаты расчетов на примере серийного термоэлектрического модуля „S-127-14-11“ показали значительное влияние термических сопротивлений на характеристики термоэлектрической системы охлаждения. Потери температурного перепада на термических сопротивлениях устройств подвода и отвода теплоты приводят к росту разницы температур на ТЭМ, что обуславливает снижение холодильного коэффициента и холодопроиз-

водительности ТЭСОТ. Кроме того, влияние потерь на термических сопротивлениях приводит к смещению оптимального диапазона силы тока питания ТЭМ в сторону меньших значений.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y.W. Chang, C.C. Chang, M.T. Ke, S.L. Chen. Appl. Thermal Eng., **29**, 2731 (2009). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.01.004
- [2] R. Chein, G. Huang. Appl. Thermal Eng., **24**, 2207 (2004). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001
- [3] М.Ю. Штерн, Ю.И. Штерн, А.А. Шевченко. Известия вузов. Сер. Электроника, **4**, 30 (2011).
- [4] А.Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы (Издание АН СССР, М.-Л., 1960)
- [5] С.В. Ордин. ФТП, **31** (10), 1269 (1997). [S.V. Ordin. Semiconductors, **31**, 1091 (1997). DOI: 10.1134/1.1187031]
- [6] А.В. Дмитриев, И.П. Звягин. УФН, **180** (8), 821 (2010). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008b.0821 [A.V. Dmitriev, I.P. Zvyagin. Physics–Uspekhi, **53** (8), 789 (2010). DOI: 10.3367/UFNe.0180.201008b.0821]
- [7] А.А. Шерченков, Ю.И. Штерн, Р.Е. Миронов, М.Ю. Штерн, М.С. Рогачев. Российские нанотехнологии, **10**, 827 (2015).
- [8] Y.X. Huang, X.D. Wang, C.H. Cheng, D.T.W. Lin. Energy, **59**, 689 (2013). DOI: org/10.1016/j.energy.2013.06.069
- [9] E.S. Jeong. Cryogenics, **59**, 38 (2014). DOI: org/10.1016/j.cryogenics.2013.12.003
- [10] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **87** (9), 1290 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.09.44899.2094 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **62** (9), 1300 (2017). DOI: org/10.1134/S1063784217090286]
- [11] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.crystal-therm.com/upload/iblock/60b/TM-S_127_14_11_L2-SPEC.pdf
- [12] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **88** (4), 487 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45714.2312 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **63** (4), 487 (2018). DOI: org/10.1134/S1063784218040266]
- [13] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **87** (1), 80 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44022.1725 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **62** (1), 90 (2017). DOI: org/10.1134/S1063784217010248]
- [14] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://kryotherm.ru/ru/assembly-instructions.html>
- [15] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ecogenthermoelectric.com/ru/teknicheskaya-podderzhka.html>