

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

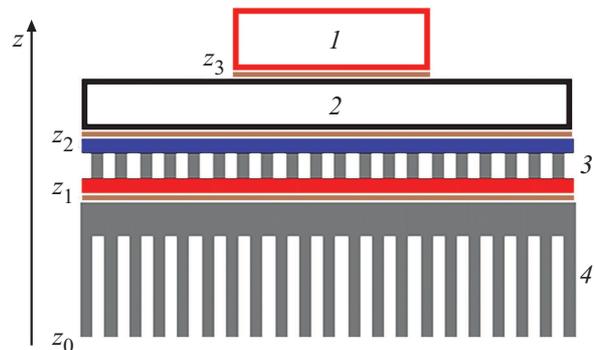
В настоящее время термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования (ТЭСОТ) активно используются для охлаждения как микрообъектов, так и холодильных камер большого объема [1–3]. ТЭСОТ сохраняют работоспособность в любом пространственном положении, имеют высокую надежность и ресурс, возможность 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

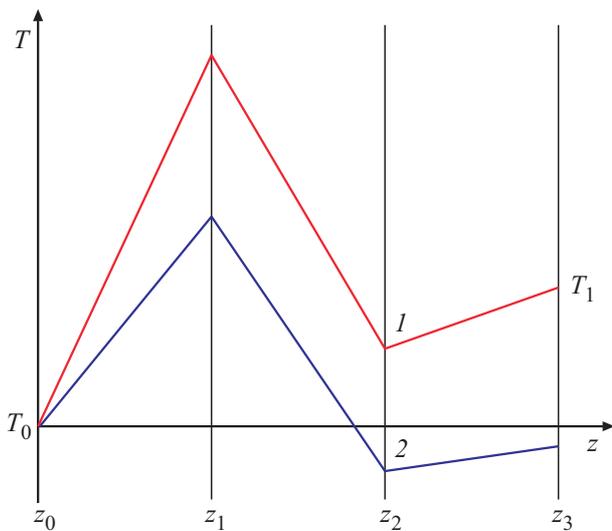
влияние термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты на холодильный коэффициент ТЭСОТ, анализ проведен на примере серийного модуля „S–127–14–11“, имеющего максимальные значения перепада температуры  $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 72.5^\circ\text{C}$  и холодопроизводительности  $Q = 79.3 \text{ W}$  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  $\Delta T_e$  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  $\varepsilon$  у ТЭСОТ будет ниже, чем значение COP у отдельного ТЭМ при равных перепадах температуры на их границах. Влияние потерь температурного перепада на величину  $\varepsilon$  происходит неявным образом. Для обеспечения заданной величины  $\Delta T_e$  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

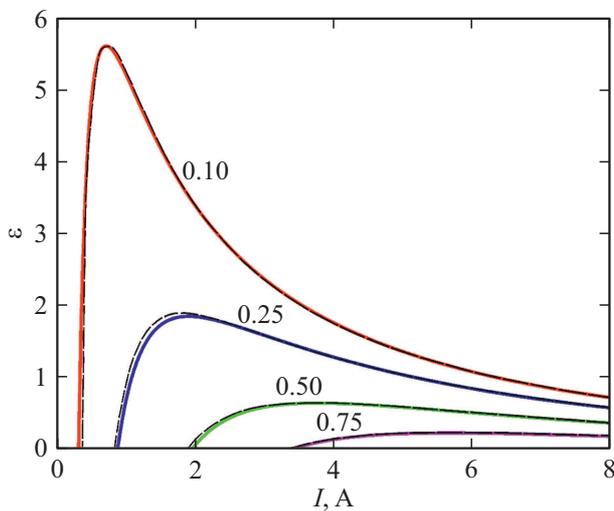
$$\begin{aligned} \Delta T_e = R_T Q + R_S(Q + W) - \Delta T_{\text{ТЕМ}} = (R_S + R_T)Q \\ + R_S U(I, Q)I - \Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q). \end{aligned}$$

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  $\varepsilon$ .

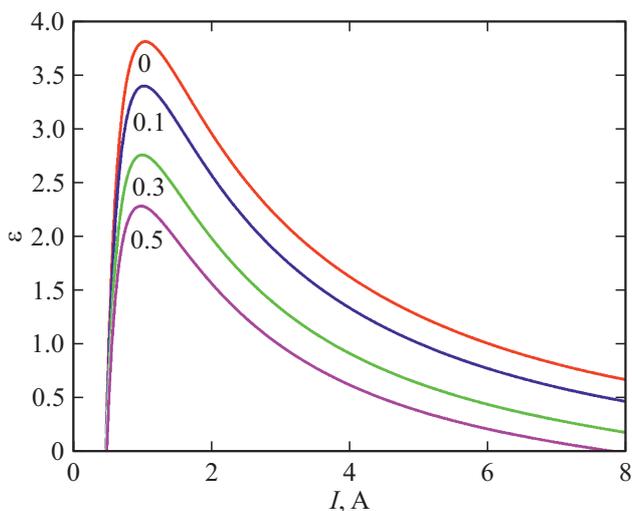
## 2. Обсуждение результатов

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  $0.75\Delta T_{\text{макс}}$ , 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.

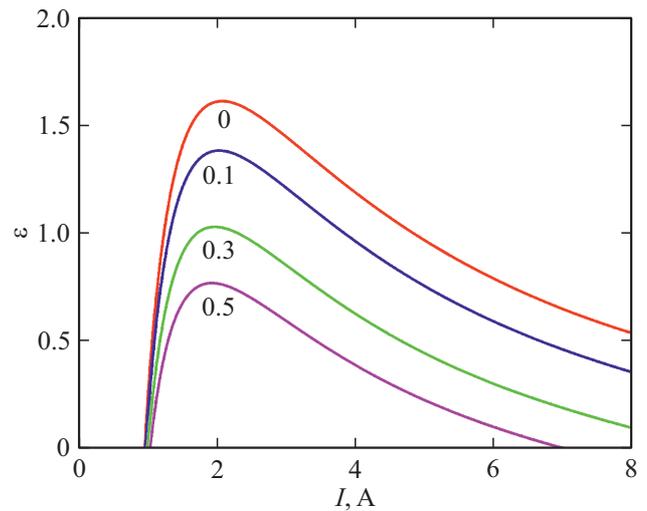
Учет потерь температурного перепада на термических сопротивлениях неизбежно приводит к снижению холодильного коэффициента. Для определения влияния термического сопротивления устройства теплоотвода рас-



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



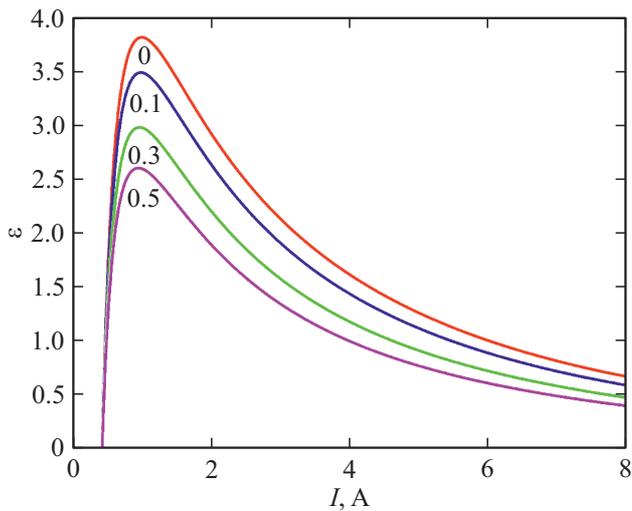
**Рис. 4.** Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при  $\Delta T_e = -10^\circ\text{C}$ . Числа у кривых — значения сопротивления  $R_S$ .



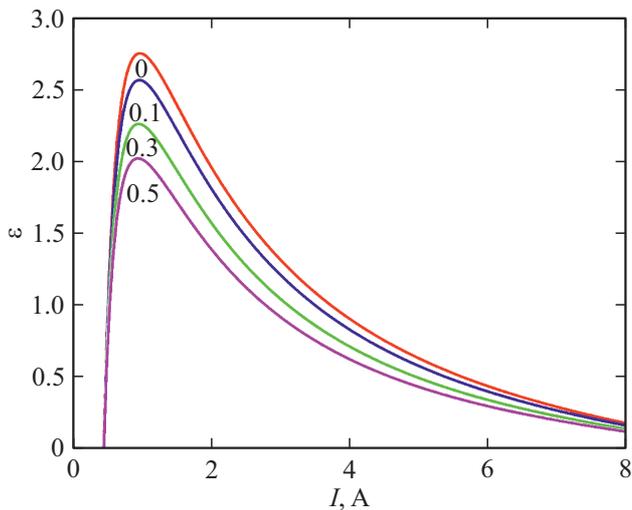
**Рис. 5.** Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при  $\Delta T_e = -20^\circ\text{C}$ . Числа у кривых — значения сопротивления  $R_S$ .

считаны зависимости  $\varepsilon(I)$  без учета системы теплоотвода ( $R_T = 0$ ) при значениях  $R_S = 0, 0.1, 0.3$  и  $0.5 \text{ K/W}$ . Для поддержания стабильной температуры теплонагруженного элемента система охлаждения должна работать в режиме терморегулирования, обеспечивая заданный температурный перепад  $\Delta T_e$  между его основанием и внешней средой. На рис. 4 и 5 приведены зависимости  $\varepsilon(I)$  для значений  $\Delta T_e = -10$  и  $-20^\circ\text{C}$ , 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  $\Delta T_e$  на холодильный коэффициент, при снижении величины  $\Delta T_e$  на  $10^\circ\text{C}$  максимальные значения  $\varepsilon$  упали примерно в 2.4 и 3 раза для  $R_S = 0$  и  $0.5 \text{ K/W}$  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  $0.5 \text{ K/W}$  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  $I = 6 \text{ A} \approx 0.75I_{\text{макс}}$  изменение  $R_T$  с 0 до  $0.5 \text{ K/W}$  приводит к уменьшению  $\varepsilon$  с 1 до 0.6 (рис. 6), а при аналогичном изменении  $R_S$  величина  $\varepsilon$  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  $R_T$ .



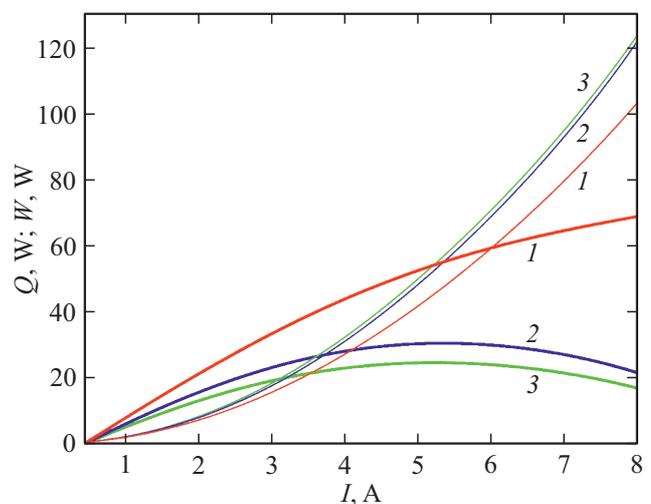
**Рис. 7.** Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при значении  $R_S = 0.3$  К/В. Числа у кривых — значения сопротивления  $R_T$ .

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.

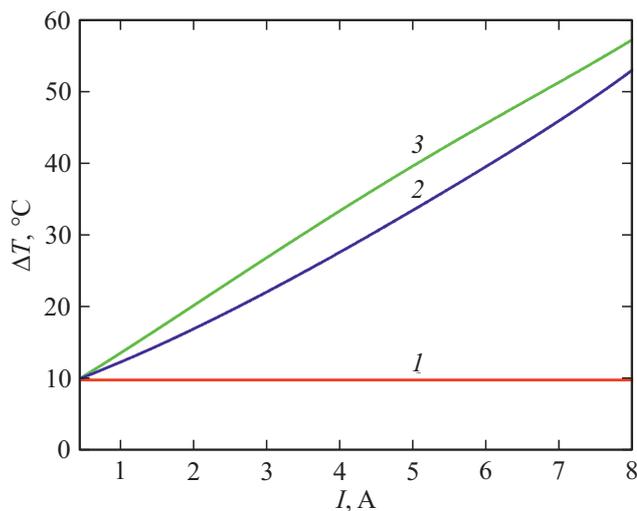
При выборе режима работы ТЭСОТ, помимо учета величины холодильного коэффициента, характеризующего экономичность процесса, также необходимо обеспечить холодопроизводительность, равную мощности тепловыделения теплонагруженного элемента при заданном температурном перепаде  $\Delta T_e$  между его основанием

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  $\Delta T_e$  эти потери компенсируются соответствующим увеличением  $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ , что, согласно нагрузочным прямым, приводит к снижению  $Q$ . На рис. 9 приведены зависимости  $\Delta T_e$  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  $\Delta T_e$  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  $\varepsilon$ . 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  $I_\varepsilon$ , обеспечивающее максимальный холодильный коэффициент  $\varepsilon^*$ ; 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](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/tehnicheskaya-podderzhka.html>