

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

© 2024 г. Е. Н. Васильев^{1,*}

¹ Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения
Российской академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: ven@icm.krasn.ru

Поступила в редакцию 19 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Рассмотрена термоэлектрическая система охлаждения и терморегулирования электронных устройств. На основе математической модели, использующей в качестве исходных данных рабочие характеристики серийного термоэлектрического модуля, проведены расчеты энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения с учетом ее термических сопротивлений. Результаты расчетов представлены в виде диаграмм, которые позволяют производить согласованный выбор термических сопротивлений системы, обеспечивающий заданные значения холодопроизводительности и температурного перепада.

Ключевые слова: теплонагруженный элемент, термоэлектрическая система охлаждения, термическое сопротивление, холодильный коэффициент, холодопроизводительность

DOI: 10.31857/S0544126924050068

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших факторов, необходимых для обеспечения ресурса и стабильности функционирования радиоэлектронной аппаратуры, является поддержание оптимального температурного режима всех её элементов. Для выполнения этой задачи используются различные методы и технические средства. Отвод теплоты от теплонагруженных элементов может осуществляться механизмами излучения и конвекции [1, 2], для более эффективного охлаждения за счет теплопроводности, используются современные материалы, имеющие коэффициент теплопроводности в несколько раз превышающий соответствующее значение для меди [3, 4]. В то же время эти методы зачастую не имеют достаточной эффективности охлаждения и требуемой точности поддержания заданного температурного режима. Термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования являются перспективными для обеспечения оптимальных тепловых режимов электроники [5–7]. Они дают возможность плавного и точного регулирования температуры, а также прецизионного термостабильности [8]. Термоэлектрические устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с другими системами охлаждения и терморегулирования: высокую надежность, отсутствие движущихся частей, практически неограниченный ресурс работы, не-

большие габариты и вес, малую инерционность, независимость от ориентации в пространстве.

Основной задачей термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования является поддержание заданной температуры электронного устройства, имеющего мощность тепловыделения Q . Выбор оптимальной конструкции системы охлаждения является достаточно сложной и неоднозначной задачей, поскольку зависит от целого набора исходных параметров, характеризующих отдельные элементы конструкции. Причем взаимное тепловое влияние этих элементов имеет нелинейный характер, поэтому наибольшая эффективность работы системы охлаждения достигается при согласованном наборе параметров, обеспечивающем минимизацию тепловых потерь. В работе [9] был проведен анализ влияния термических сопротивлений на характеристики процесса охлаждения, направленный на обоснование выбора оптимального термоэлектрического модуля (ТЭМ) для системы охлаждения. При этом было показано, что применение высокопроизводительного ТЭМ не дает автоматического повышения эффективности системы охлаждения, оно может быть обеспечено только при выполнении достаточно жестких требований к величине термических сопротивлений. Помимо выбора оптимального ТЭМ важной задачей при разработке термоэлектрической системы

охлаждения и терморегулирования является согласованный выбор ее основных параметров. В настоящей работе представлена методика согласования, которая обосновывает выбор такого соотношения термических сопротивлений и рабочих характеристик ТЭМ, при которых обеспечиваются заданные значения холодопроизводительности и температурного перепада.

2. КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования приведена на рис. 1. Теплота от теплонагруженного элемента 1 с мощностью тепловыделения Q передается на холодную сторону ТЭМ через два тепловых контакта и теплораспределитель 2, которые имеют суммарное термическое сопротивление R_T . Теплораспределитель, обычно представляющий собой прямоугольную пластину из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, необходим для выравнивания распределения тепловой мощности, поступающей от теплонагруженного элемента на поверхность термоэлектрического модуля при несоответствии их поперечных размеров. Термоэлектрический модуль 3 отводит тепловую мощность Q и обеспечивает при собственном энергопотреблении W заданный перепад температуры ΔT_0 между основанием теплонагруженного элемента и внешней средой. Устройство отвода теплоты 4, имеющее термическое сопротивление R_S , передает теплоту $Q + W$ с горячей стороны ТЭМ во внешнюю среду.

Термическое сопротивление теплораспределителя зависит от материала и размеров теплонагруженного элемента, для медного теплораспределителя $40 \times 40 \text{ мм}^2$ его минимальное термическое сопротивление составляет примерно 0.03 К/Вт при размере элемента $22.5 \times 22.5 \text{ мм}^2$ [10]. Значение термического сопротивления тепловых контактов зависит от теплопроводности наполнителя, толщины и площади зазора. При использовании стандартной термопасты КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.85 \text{ Вт/мК}$ величина термического сопротивления $R = \delta/(\lambda S)$ при толщине слоя $\delta = 0.1\text{--}0.2 \text{ мм}$ составит $0.074\text{--}0.15 \text{ К/Вт}$ для площади контакта $S = 40 \times 40 \text{ мм}^2$ и $0.23\text{--}0.46 \text{ К/Вт}$ для площади контакта $S = 22.5 \times 22.5 \text{ мм}^2$. Значение R может быть существенно снижено при использовании паяных контактов, так низкотемпературный припой ПОСВ-50 имеет $\lambda = 16 \text{ Вт/мК}$. Анализ возможных значений термического сопротивления устройства отвода теплоты R_S приведена в [11, 12]. Характерный диапазон термического сопротивления устройств теплоотвода на основе воздушного теплообменника (кулера) составляет $0.1\text{--}0.5 \text{ К/Вт}$.

Расчет энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения производился с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад ΔT_0 между основанием теплонагруженного элемента и внешней средой с перепадами температур на отдельных элементах конструкции

$$\Delta T_0 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q) + R_S(Q + U(I, Q)I),$$

где U , I — напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. Первое и третье слагаемые в правой части формулы соответствуют перепаду температуры в теплораспределителе и устройстве теплоотвода, второе слагаемое — разность температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ. Зависимости $U(I, Q)$ и $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ определяются на основе рабочих характеристик ТЭМ с помощью интерполяционных полиномов, методика расчета этих зависимостей представлена в [11, 13]. Для серийно выпускаемых ТЭМ их рабочие характеристики обычно приводятся в технической документации производителя. Вычислительная модель, основанная на численном решении нелинейной алгебраической системы уравнений, позволяет рассчитать энергетические характеристики термоэлектрической системы охлаждения для заданных значений исходных параметров R_S , R_T , ΔT_0 и силы тока I . Расчеты проведены на примере серийного ТЭМ «S-199–14–11» с максимальными значениями холодопроизводительности $Q = 124.2 \text{ Вт}$ и перепада температуры $\Delta T = 72.5 \text{ К}$, достигаемыми при силе тока $I_{\text{max}} = 7.9 \text{ А}$ и напряжении $U_{\text{max}} = 25.3 \text{ В}$ [14].

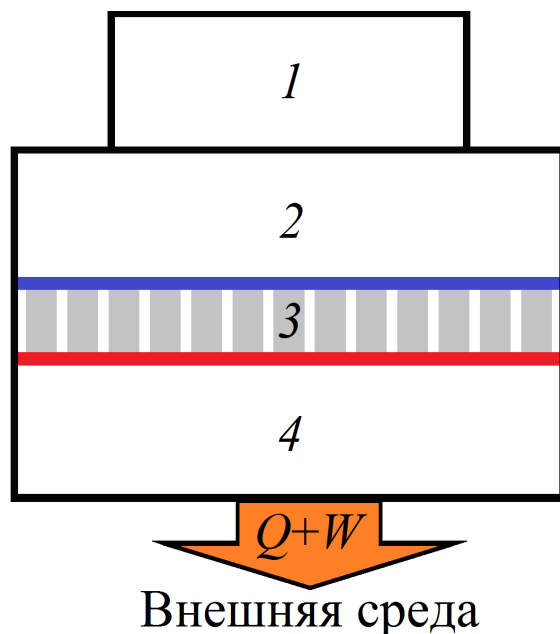


Рис. 1. Схема термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования: 1 — теплонагруженный элемент, 2 — теплораспределитель, 3 — термоэлектрический модуль, 4 — устройство отвода теплоты.

Выбор режима работы ТЭМ и его согласование с другими параметрами системы охлаждения основывается на анализе энергетических характеристик с учетом заданной мощности тепловыделения теплонагруженного элемента и требуемого температурного перепада между основанием элемента и внешней средой. Такими энергетическими характеристиками являются холодопроизводительность и холодильный коэффициент, которые прежде всего зависят от силы тока электропитания ТЭМ. Из технической документации производителя известно, что максимальная холодопроизводительность отдельного ТЭМ достигается при значении силы тока $I_{\max}$. Для термоэлектрической системы охлаждения в целом дополнительное влияние оказывают тепловые потери на термических сопротивлениях теплораспределителя, устройства теплоотвода и тепловых контактов. Эти потери приводят к ухудшению энергетических характеристик.

Величина холодопроизводительности численно равна тепловой мощности, которая будет отведена от теплонагруженного элемента при заданных параметрах системы охлаждения. Зависимость холодопроизводительности $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$ приведена на рис. 2 для следующих значений термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$. Представленные зависимости $Q(I)$ имеют максимумы, величина которых зависит от термических сопротивлений. Из сравнения графиков видно более существенное влияние изменения величины R_S , это обусловлено тем, что через устройство теплоотвода во внешнюю среду помимо теплоты от теплонагруженного элемента дополнительно передается собственное тепловыделение ТЭМ. Значения силы тока, при которых достигаются максимумы Q , также в большей степени зависят от

термического сопротивления R_S . Значениям Q , которые ниже максимальных, соответствуют по два значения силы тока, более эффективный режим работы обеспечивается при меньшем значении силы тока, поскольку в этом случае собственное энергопотребление ТЭМ ниже.

Значительное влияние на холодопроизводительность термоэлектрической системы оказывает степень охлаждения теплонагруженного элемента. Для сравнения на рис. 3 приведена зависимость $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и тех же значений термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$. В данном случае характер зависимостей не изменился, но значения максимумов кривых от 27% ($R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$) до 47% ($R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$) ниже, чем на рис. 2. Следует отметить, что производители термоэлектрических систем в сопроводительной документации обычно предлагают в качестве оптимального параметра электропитания ТЭМ уровень напряжения или тока, составляющий 75% от максимальной величины [15, 16]. Рассчитанные зависимости $Q(I)$ дают возможность определить с учетом термических сопротивлений оптимальные значения силы тока, которые могут существенно отличаться от рекомендации производителя. Так при $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$ зависимости $Q(I)$, приведенные на рис. 2 и 3 (синие линии), имеют максимумы в диапазоне силы тока 4.1–4.3 А, что существенно ниже рекомендованного значения $I = 0.75 I_{\max} \approx 6 \text{ А}$.

Энергетическая эффективность системы охлаждения определяется холодильным коэффициентом ε , который равен отношению холодопроизводительности Q к величине потребляемой электрической мощности W . Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент исследовано в [17], где было установлено,

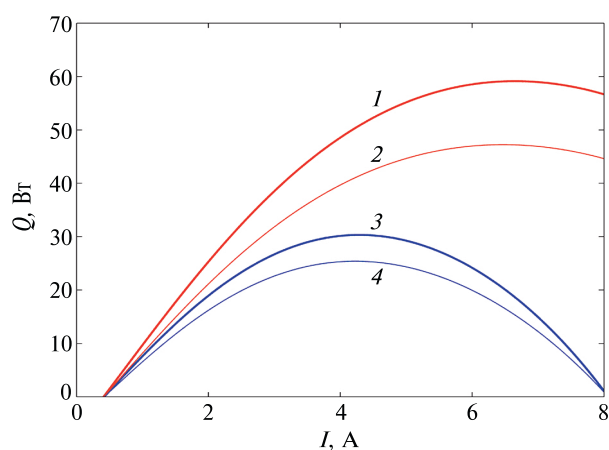


Рис. 2. Зависимости $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$.

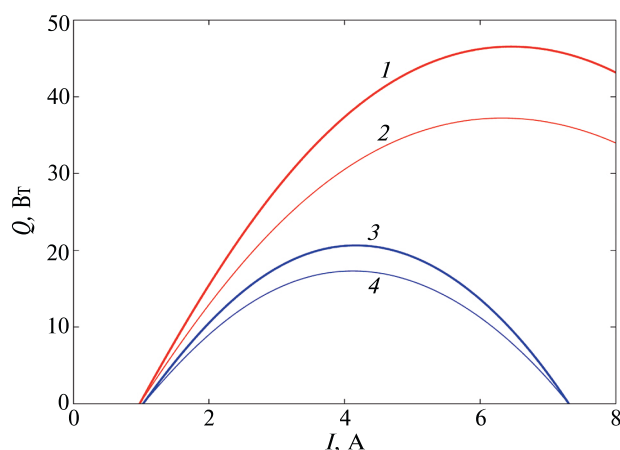


Рис. 3. Зависимости $Q(I)$ для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$: 1 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 2 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1 \text{ К/Вт}$, 3 – $R_T = 0.1 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$, 4 – $R_T = 0.3 \text{ К/Вт}$, $R_S = 0.3 \text{ К/Вт}$.

что зависимости $\varepsilon(I)$ имеют максимумы, величины и расположение которых существенно зависят от значений R_S и R_T . Максимальные значения характеристик $Q(I)$ и $\varepsilon(I)$ характеризуют потенциал применяемого ТЭМ при заданных ΔT_0 , R_T и R_S , поскольку позволяют определить предельно достижимый предел энергетической эффективности термоэлектрической системы охлаждения. Поэтому дальнейший анализ энергетических характеристик проведен применительно к максимальным значениям $Q_{\max}$ и $\varepsilon_{\max}$.

Результаты расчетов холодопроизводительности для значений $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ и -20°C приведены на плоскости $R_S - R_T$ в виде изолиний, на которых указаны соответствующие им значения $Q_{\max}$ в Ваттах (рис. 4). Данная диаграмма дает общую картину зависимости максимальной холодопроизводительности от термических сопротивлений термоэлектрической системы охлаждения и позволяет оценивать величины R_S и R_T , при которых обеспечивается заданный температурный

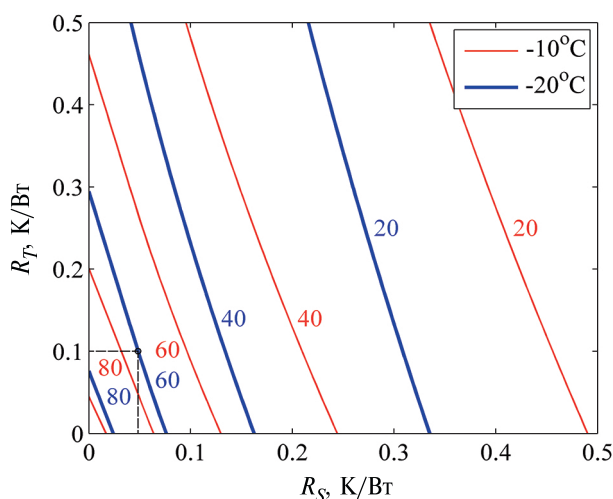


Рис. 4. Диаграмма холодопроизводительности, на кривых указаны значения $Q_{\max}$ в Ваттах.

режим теплонагруженного элемента с известной мощностью тепловыделения. Так, например, для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ значение $Q = 60$ Вт может быть достигнуто при $R_T = 0.1$ К/Вт и $R_S \approx 0.05$ К/Вт, эти значения отмечены на рисунке штриховыми линиями, а место пересечения на изолинии выделено кружком. При этом каждой точке на изолинии соответствует своя согласованная пара значений R_S и R_T . В то же время холодопроизводительность 60 Вт не может быть получена при $R_S > 0.08$ К/Вт для $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и $R_S > 0.13$ К/Вт для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$. Термическое сопротивление теплораспределителя в меньшей степени ограничивает величину холодопроизводительности, величина $Q = 60$ Вт не может быть получена при $R_T > 0.29$ К/Вт для

$\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$ и $R_T > 0.46$ К/Вт для $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$. Более сильное ограничивающее влияние величины R_S на холодопроизводительность объясняется увеличенным перепадом температуры в устройстве теплоотвода при отводе суммарной тепловой мощности $Q + W$. Из проведенного анализа следует, что представленная диаграмма позволяет определить диапазоны значений R_S и R_T , при которых достигается заданная холодопроизводительность термоэлектрической системы охлаждения. Определение силы тока, обеспечивающей заданную холодопроизводительность, производится с помощью зависимостей $Q(I)$ (рис. 2).

Как было показано выше, заданная холодопроизводительность может быть достигнута в определенных диапазонах термических сопротивлений теплораспределителя и устройства теплоотвода, но при этом возможны различные сочетания пар значений R_S и R_T . Для выбора значений термических сопротивлений, соответствующих наибольшей эффективности системы охлаждения, на рис. 5

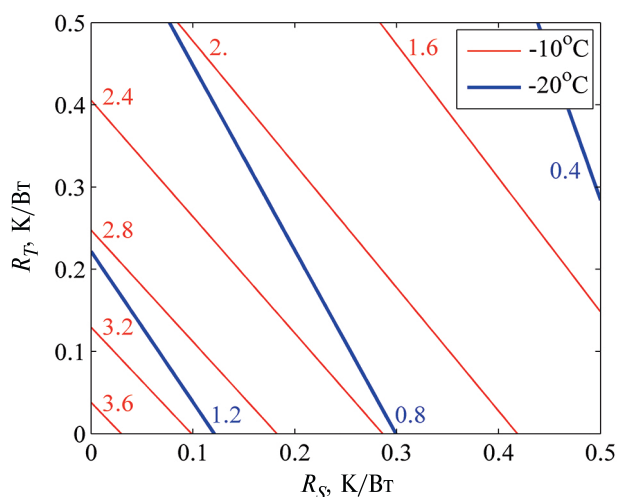


Рис. 5. Диаграмма холодильного коэффициента, на кривых указаны значения $\varepsilon_{\max}$.

приведена диаграмма, на изолиниях которой указаны значения $\varepsilon_{\max}$. Значение холодильного коэффициента определяется по выбранной с помощью рис. 4 паре значений R_S и R_T для заданного значения Q , так для выделенной на рис. 4 точки соответствующее ей значение $\varepsilon_{\max} = 1.24$. Изолинии $\varepsilon_{\max}$ на большей части плоскости $R_S - R_T$ имеют меньший угол наклона к оси R_S по сравнению с изолиниями $Q_{\max}$, поэтому наиболее высокое значение холодильного коэффициента будет получено при $R_T = 0$, так в рассматриваемом случае изолинии $Q_{\max} = 60$ Вт соответствует значение $\varepsilon_{\max} = 1.33$. Следует отметить, что на практике нулевые значения термического сопротивления не могут быть получены, поэтому при анализе следует исходить из

значений R_s и R_T для реальных конструкций тепло-распределителя и устройства теплоотвода с массогабаритными параметрами, соответствующими техническим требованиям к термоэлектрической системе охлаждения. Дополнительно диаграммы холодопроизводительности и холодильного коэффициента позволяют рассчитать собственное энергопотребление ТЭМ, определяемое из соотношения $W = Q/\epsilon$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведен анализ зависимостей холодопроизводительности от силы тока при различных значениях общего температурного перепада ΔT_0 и термических сопротивлений R_s и R_T . По результатам расчетов энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения и терморегулирования получены диаграммы, отображающие на плоскости определяющих параметров $R_s - R_T$ изолинии максимальных значений холодопроизводительности и холодильного коэффициента. Диаграммы позволяют на этапе разработки проводить анализ энергетических характеристик и на этой основе осуществлять согласование параметров основных элементов, входящих в конструкцию термоэлектрической системы охлаждения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Два фактора, влияющие на интенсивность охлаждения тепловыделяющих элементов в герметичных блоках // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 5. С. 390–398. <https://doi.org/10.7868/S0544126914050056>
2. Boutina L., Bessaih R. Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 2052–2062. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.021>
3. Глинский И.А., Зенченко Н.В. Расчет теплораспределителя элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 4. С. 269–274. <https://doi.org/10.7868/S0544126915040055>
4. Зуев С.М., Прохоров Д.А., Малеев Р.А., Дебелов В.В., Лавриков А.А. Применение графена в системе охлаждения персональной электронно-вычислительной машины // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 6. С. 445–452. <https://doi.org/10.31857/S0544126921050094>
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.004>
6. Штерн М.Ю., Штерн Ю.И., Шерченков А.А. Термоэлектрические системы для обеспечения тепловых режимов вычислительной техники // Известия вузов. Сер. Электроника. 2011. № 4. С. 30–38.
7. Васильев Е.Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 2. С. 133–141. <https://doi.org/10.31857/S054412692002009X>
8. Загороднов А.П., Якунин А.Н. Прецизионное термостатирование резонатора на объемных акустических волнах. Моделирование и синтез системы управления // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 10. С. 1–14.
9. Васильев Е.Н. О важности термических сопротивлений системы охлаждения при выборе термоэлектрического модуля // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 5. С. 615–621. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.05.55455.13–23>
10. Васильев Е.Н. Расчет термического сопротивления теплораспределителя системы охлаждения теплонагруженного элемента // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 487–491. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.04.45714.2312>
11. Васильев Е.Н. Определение режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 4. С. 297–303. <https://doi.org/10.31857/S0544126920030072>
12. Васильев Е.Н. Оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов с учетом термического сопротивления теплоотводящей системы // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 9. С. 1290–1296. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.09.44899.2094>
13. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 1. С. 80–86. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.01.44022.1725>
14. Электронный ресурс. Режим доступа: https://crystalltherm.com/upload/iblock/5af/1knj372x6ho3v82cw-zufypmaktsqm4ph/TM_S_199_14_11_L2_SPEC.pdf
15. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://kryotherm.ru/ru/assembly-instructions.html>
16. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ecogenthermoelectric.com/ru/technicheskaya-podderzhka.html>
17. Васильев Е.Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 5. С. 743–747. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.05.50684.296–20>

PARAMETERS MATCHING OF THE THERMOELECTRIC SYSTEM PARAMETERS FOR COOLING HEAT-LOADED ELECTRONICS ELEMENTS

© 2024 E. N. Vasil'ev^{1,*}

¹ *Institute of Computational Modelling, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

*E-mail ven@icm.krasn.ru

A thermoelectric cooling and thermal control system for electronic devices is considered. Based on a mathematical model using the operating characteristics of a serial thermoelectric module as initial data, calculations of the energy characteristics of a thermoelectric cooling system were carried out, taking into account its thermal resistances. The calculation results are presented in the form of diagrams, which allow for a coordinated selection of the system's thermal resistances, ensuring the specified values of the cooling capacity and temperature difference.

Keywords: heat-loaded element, thermoelectric cooling system, thermal resistance, coefficient of performance, cooling capacity

REFERENCES

1. *Martyushev S.G., Sheremet M.A.* Two factors affecting the cooling rate of fuel elements in sealed units // *Mikroelektronika*. 2014. V. 43. No 5. P. 390–398. doi: 10.7868/S0544126914050056
2. *Boutina L., Bessaih R.* Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel // *Applied Thermal Engineering*. 2011. V. 31. P. 2052–2062. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.021>
3. *Glinskii I.A., Zenchenko N.V.* Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors // *Russian Microelectronics*. 2015. V. 44, No 4. P. 236–240. doi: 10.1134/S1063739715040058
4. *Zuev S.M., Prokhorov D.A., Maleev R.A., Debelov V.V., Lavrikov A.A.* Application of Graphene in The Cooling System of a Personal Electronic Computer // *Russian Microelectronics*. 2021. V. 50. No 6. P. 404–411. <https://doi.org/10.1134/S1063739721050097>
5. *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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.004>
6. *Shtern M.Yu., Shtern Yu.I., Sherchenkov A.A.* Thermoelectric systems for providing thermal modes of computer technology // *Izvestija Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika*. 2011. No 4. P. 30–38.
7. *Vasil'ev E.N.* Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics // *Russian Microelectronics*. 2020. V. 49. No 2. P. 123–131. <https://doi.org/10.1134/S1063739720020092>
8. *Zagorodnov A.P., Yakunin A.N.* Precision thermostating of a resonator on volume acoustic waves. Modeling and synthesis of a control system // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2013. No 10. P. 1–14, <http://jre.cplire.ru/iso/oct13/12/text.pdf>
9. *Vasil'ev E.N.* On the importance of thermal resistances of the cooling system when choosing a thermoelectric module // *Technical Physics*. 2023. V. 68. No 5. P. 574–579, <https://doi.org/10.21883/tp.2023.05.56062.13-23>
10. *Vasil'ev E.N.* Calculation of the thermal resistance of a heat distributor in the cooling system of a heat-loaded element // *Technical Physics*. 2018. V. 63. No 4. P. 471–475. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.04.45714.2312>
11. *Vasil'ev E.N.* Determination of thermoelectric cooling modes of heat-loaded electronics // *Russian Microelectronics*. 2020. V. 49. No 4. P. 278–284, <https://doi.org/10.31857/S0544126920030072>
12. *Vasil'ev E.N.* Optimization of thermoelectric cooling regimes for heat-loaded elements taking into account the thermal resistance of the heat-spreading system // *Technical Physics*. 2017. V. 62. No 9. P. 1300–1306, <https://doi.org/10.1134/S1063784217090286>
13. *Vasil'ev E.N.* Calculation and optimization of thermoelectric cooling modes of thermally loaded elements // *Technical Physics*. 2017. V. 62. No 1. P. 90–96. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.01.44022.1725>
14. https://crystalltherm.com/upload/iblock/5af/1knj372x6ho3v82cwzufypmaktsqm4ph/TM_S_199_14_11_L2_SPEC.pdf. Accessed September 13, 2024.
15. <http://kryotherm.ru/ru/assembly-instructions.html>. Accessed September 13, 2024.
16. <http://ecogenthermoelectric.com/ru/texnicheskaya-podderzhka.html>. Accessed September 13, 2024.
17. *Vasil'ev E.N.* The Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system // *Technical Physics*. 2021. V. 66. No 6. P. 815–819. <https://doi.org/10.1134/S1063784221050248>