

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-9-17

Оригинальная статья /Original Paper

**Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения
дискретных полупроводниковых приборов**

О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, Т.Ю. Магомедов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка расчетной модели термоэлектрической системы (ТЭС) для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов (ДПП), реализованной в пакете прикладных программ Elcut, и проведение соответствующего численного эксперимента по ней. **Метод.** Разработан новый тип системы охлаждения ДПП, в котором используется несколько секций ТЭМ, обеспечивающих теплосъем, как с нижней, так и с верхней поверхности тепловыделяющих элементов, что увеличивает поверхность теплообмена между источником холода и элементом РЭА и повышает эффективность теплосъема. Методом конечных элементов построена расчетная модель данной системы на основе решения задачи теплопроводности для многоэлементной конструкции сложной конфигурации, каждая составляющая которой характеризуется тепло- и электрофизическими параметрами. **Результат.** Проведен численный эксперимент по расчетной модели. В результате него получены результаты численного эксперимента в виде трехмерной картины температурного поля системы ДПП - ТЭС при выходе ее на стационарный режим, а также графиков изменения во времени температуры в центре дискретных полупроводниковых приборов при различных величинах холодопроизводительности термоэлектрического модуля. **Вывод.** В результате численного эксперимента установлено, что предложенная конструкция охлаждающей ТЭС в полной мере позволяет решить задачу обеспечения требуемого температурного режима ДПП в диапазоне его мощностей до 75 Вт. При этом использование секций термоэлектрических модулей из идентичных по своим геометрическим, электро- и теплофизическим характеристикам термоэлементов позволяет повысить технологичность создания устройства, а также обеспечить его работу в оптимальных токовых режимах.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура (РЭА), дискретный полупроводниковый прибор, охлаждение, термоэлектрическая система, термоэлектрический модуль, расчетная модель, численный эксперимент, температура

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, Т.Ю. Магомедов. Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(2):9-17. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-9-17

Calculation model of thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices

O.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, T.Yu. Magomedov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a computational model of a thermoelectric system (TPS) for cooling discrete semiconductor devices (DSD), implemented in the Elcut application software package, and to conduct a corresponding numerical experiment on it. **Method.** A new type of DPP cooling system has been developed, which uses several TEM sections that provide heat removal from both the lower and upper surfaces of the fuel elements, which increases the heat ex-

change surface between the cold source and the REE element and increases the heat removal efficiency. Using the finite element method, a computational model of this system is constructed based on the solution of the problem of thermal conductivity for a multi-element structure of a complex configuration, each component of which is characterized by thermal and electrical parameters. **Result.** A numerical experiment was carried out using the calculation model. As a result of it, the results of a numerical experiment were obtained in the form of a three-dimensional picture of the temperature field of the DPP - TPP system when it reaches the stationary mode, as well as graphs of temperature changes over time in the center of discrete semiconductor devices at various values of the cooling capacity of the thermoelectric module (TEM). **Conclusion.** As a result of the numerical experiment, it was found that the proposed design of the cooling TPP fully allows solving the problem of ensuring the required temperature regime of the DPP in the range of its power up to 75 W. At the same time, the use of sections of thermoelectric modules from thermoelements identical in their geometric, electrical and thermal characteristics makes it possible to increase the manufacturability of the device, as well as to ensure its operation in optimal current modes.

Keywords: radio-electronic equipment (REA) element, electronic board, thermoelectric system, thermoelectric battery, experimental bench, measurement technique, temperature, full-scale tests

For citation: O.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, T.Yu. Magomedov. Calculation model of thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 9-17. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-9-17

Введение. Одной из основных тенденций создания РЭА на сегодняшний день является включение в ее состав большого количества дискретных полупроводниковых приборов (ДПП), характеризующихся высокой плотностью тепловых потоков [1-3]. Одновременно расширяется температурный диапазон эксплуатации такой аппаратуры, усложняются другие условия ее работы (влажность, давление и т. п.), при этом растут требования к стабильности характеристик элементов, входящих в ее состав. Работа большинства ДПП должна проходить в условиях значительных внутренних и внешних тепловых нагрузок, колебаний температуры окружающей среды, а параметры устройств при этом должны оставаться в заданных пределах. Стабильной и продолжительной работы таких элементов РЭА удается добиться, лишь создав им необходимые температурные условия эксплуатации. Как правило, они формируются за счет применения специальных охлаждающих систем, которые разнообразны в своем конструктивном исполнении, принципе работы, а также имеют существенный разброс в массогабаритных, энергетических и технологических характеристиках [4-8].

Среди существующих технических средств для отвода теплоты и термостабилизации малогабаритной РЭА, к элементам которой относятся ДПП, с точки зрения соответствия последним по массогабаритным и энергетическим показателям, необходимо выделить охлаждающие ТЭС [9-14]. Охлаждающие ТЭС, обладая высокой экологичностью, большим ресурсом работы, надежностью, независимостью от ориентации в пространстве, возможностью термостатирования, могут обеспечить температурный режим работы малогабаритных радиоэлементов с высокой точностью при минимальных габаритных размерах и мощностях питания, соответствующих мощностям питания самих РЭА.

В [15] рассмотрена ТЭС для охлаждения малогабаритной РЭА. В ней проблема повышения эффективности охлаждения малогабаритных ДПП, находящихся в составе РЭА с плотной упаковкой, решается путем использования нескольких секций стандартных ТЭМ, образующих ТЭС и осуществления теплосъема, как с нижней, так и с верхней поверхности тепловыделяющих элементов.

Структурная схема прибора показана на рис.1. Обозначено: 1 - основная секция ТЭМ, 2 - дополнительные секции ТЭМ, 3 - основная теплообменная система, 4 - ДПП, 5 - дополнительная теплообменная система, 6 - теплоизоляция (обладающая также электроизоляционными

свойствами), 7 - источник постоянного электрического тока. В данной конструкции эффективность охлаждения повышается за счет увеличения площади теплообмена между ТЭС и тепловыделяющим элементом.

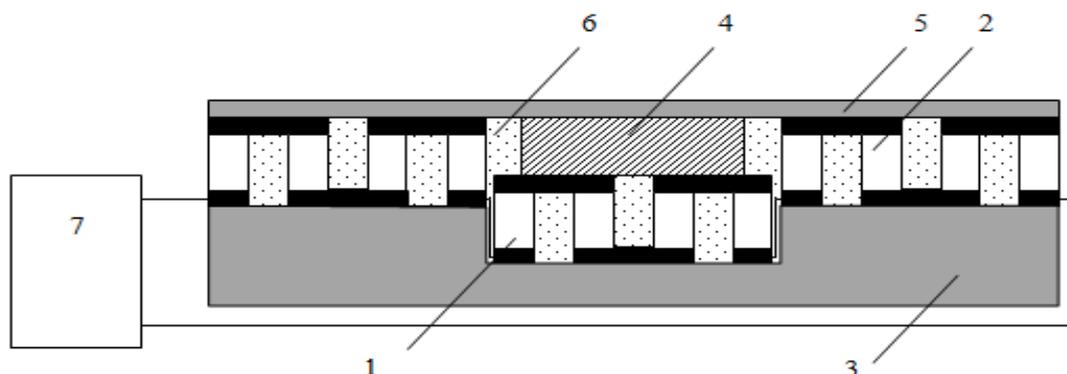


Рис.1. Структурная схема термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов
Fig.1. Structural diagram of a thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices

Постановка задачи. Целью работы является разработка расчетной модели ТЭС для охлаждения ДПП, реализованной в пакете прикладных программ Elcut, проведение соответствующего численного эксперимента по ней.

Методы исследования. Физическая модель ТЭС совместно с ДПП и конечно-элементной сеткой изображена на рис.2.

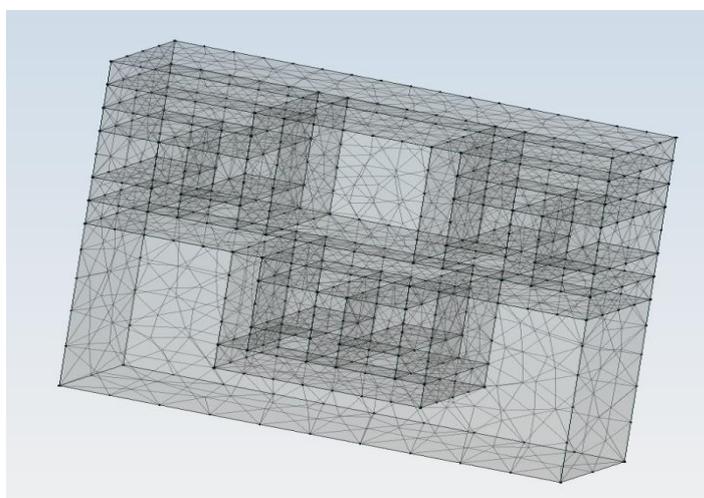


Рис.2. Объемная модель термоэлектрической системы совместно с дискретными полупроводниковыми приборами и конечно-элементной сеткой
Fig.2. 3D Model of a Thermoelectric System Together with Discrete Semiconductor Devices and a Finite Element Mesh

В модели выделяются следующие области: ветвь термоэлемента из полупроводника p-типа, ветвь термоэлемента из полупроводника n-типа, коммутационные элементы, теплоизоляция, основная теплообменная система (предназначена для съема теплоты с горячих спаев ТЭМ, обеспечивающих охлаждение нижней поверхности ДПП), дополнительная теплообменная система (предназначена для сопряжения холодных спаев ТЭМ, обеспечивающих отвод теплоты от ДПП с его верхней поверхности, с последним).

В расчетной модели в соответствии с рекомендациями, изложенными в [16, 17], каждый ТЭМ представлен в виде единичного термоэлемента, а все его характеристики являются приведенными. При практических расчетах каждый термомодуль состоит из m единичных термоэлементов. Все электро- и теплофизические характеристики термоэлементов идентичны.

Математическая модель представляет собой систему трехмерных дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с учетом выделения в объеме ветвей термоэлементов, контактов и ДПП Джоулевой теплоты [18, 19].

Начальные, граничные условия и условия сопряжения - система уравнений для тепловых потоков на границах слоев, в том числе учитывающих поглощение (выделение) теплоты Пельтье, а также наличие конвективного теплообмена в остальных частях системы ТЭС - ДПП. Математическая формулировка задачи моделирования выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.p} &= \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau}, \\ \lambda_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.n} &= \rho_n C_n \frac{\partial T_n}{\partial \tau}, \\ \lambda_k \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.k} &= \rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial \tau}, \\ \lambda_{ДПП} \left(\frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial z^2} \right) + P_{ДПП} &= \rho_{ДПП} C_{ДПП} \frac{\partial T_{ДПП}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{отс} \left(\frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{отс} C_{отс} \frac{\partial T_{отс}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{дтс} \left(\frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{дтс} C_{дтс} \frac{\partial T_{дтс}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{\tau} \left(\frac{\partial^2 T_{\tau}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\tau}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\tau}}{\partial z^2} \right) &= \rho_{\tau} C_{\tau} \frac{\partial T_{\tau}}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные условия:

$$T_p = T_n = T_k = T_{\tau} = T_{ДПП} = T_{отс} = T_{дтс} = T_{срс} \text{ при } \tau = 0.$$

Граничные условия:

$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} - \alpha j_{ТЭМ} T_p = \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x}$ на холодной контактной поверхности ветви из полупроводника р-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} + j_{ТЭМ} T_p = \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x}$ на горячей контактной поверхности ветви из полупроводника р-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} - \alpha j_{ТЭМ} T_n = \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x}$ на холодной контактной поверхности ветви из полупроводника п-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} + j_{TЭМ} T_n = \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x}$ на горячей контактной поверхности ветви из полупроводника p-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} = \lambda_t \frac{\partial T_t}{\partial x}$ на контактной поверхности коммутационного элемента - теплоизоляции,

$\lambda_{дтс} \frac{\partial T_{дтс}}{\partial x} = \lambda_{дпп} \frac{\partial T_{дпп}}{\partial x}$ на контактной поверхности дополнительной теплообменной системы - ДПП,

$\lambda_{отс} \frac{\partial T_{отс}}{\partial x} = \beta_{отс} (T_{отс} - T_{ср})$ на контактной поверхности основной теплообменной системы - окружающей среды,

$\lambda_{дтс} \frac{\partial T_{дтс}}{\partial x} = \beta_{дтс} (T_{дтс} - T_{ср})$ на контактной поверхности дополнительной теплообменной системы - окружающей среды,

где T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; C - теплоемкость; ρ - плотность; x, y, z - координаты; β - коэффициент теплообмена; $Q_{дж}$ - количество теплоты Джоуля, выделяемое в единицу времени в единице объема; $R_{дпп}$ - мощность тепловыделений ДПП в единице объема; $j_{TЭМ}$ - плотность электрического тока ТЭМ; индексы при переменных: p - полупроводник p-типа, n - полупроводник n-типа, k - коммутационный элемент, t - теплоизоляция, отс - основная теплообменная система, дтс - дополнительная теплообменная система, ср - окружающая среда.

Решение системы уравнений (1) осуществлено методом конечных элементов, непосредственно реализованном в пакете прикладных программ Elcut [20].

Обсуждение результатов. На основе рассмотренной постановки задачи произведен численный эксперимент. В результате него получены трех-, двух- и одномерные температурные поля системы прибор - ДПП для различных мощностей и плотностей электрических токов питания ТЭМ, условий теплообмена с окружающей средой.

Также получены графики изменения во времени температуры в контрольных точках системы (ДПП, спаи ТЭМ, основной и дополнительной теплообменной системы) при изменении тех же параметров.

На рис.3 в качестве примера показано трехмерное температурное поле данной системы при выходе ее на стационарный режим, на рис. 4 - графики изменения во времени температуры в центре ДПП при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ. $T_{ср}=23$ С, $R_{дпп}=25$ Вт, для рис.3 мощность одного ТЭМ $Q_{TЭМ}=12$ Вт.

Согласно полученным соотношениям, картина распределения температуры в системе ТЭС - ДПП существенно не однородна.

Минимум температуры приходится на холодные спаи дополнительных секций ТЭМ, а максимум - на горячие спаи основной секции ТЭМ.

При этом температура в центре ДПП в стационарном режиме при оговоренных выше условиях колеблется в пределах от 15 до 20 С. Продолжительность выхода на режим системы составляет порядка 4 мин, что объясняется ее относительно небольшими габаритными размерами.

В качестве ТЭМ могут использоваться стандартные термомодули российских фирм производителей, в частности, ООО «Криотерм» (г. Санкт-Петербург).

Для определения их характеристик (тока и напряжения питания, потребляемой мощности, холодильного коэффициента) по найденным в результате расчета величинам $Q_{TЭМ}$ применена программа Thermoelectric system calculation [21], размещенная на сайте этой же фирмы.

В результате расчета характеристик ТЭМ, определено, что для эффективного охлаждения ДПП мощностью вплоть до 75 Вт, целесообразным является использование стандартного термомодуля типа ICE-71.

При этом его рабочий диапазон мощностей будет находиться в пределах от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К. При этом ток питания будет составлять $2 \div 8$ А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,38 до 0,43.

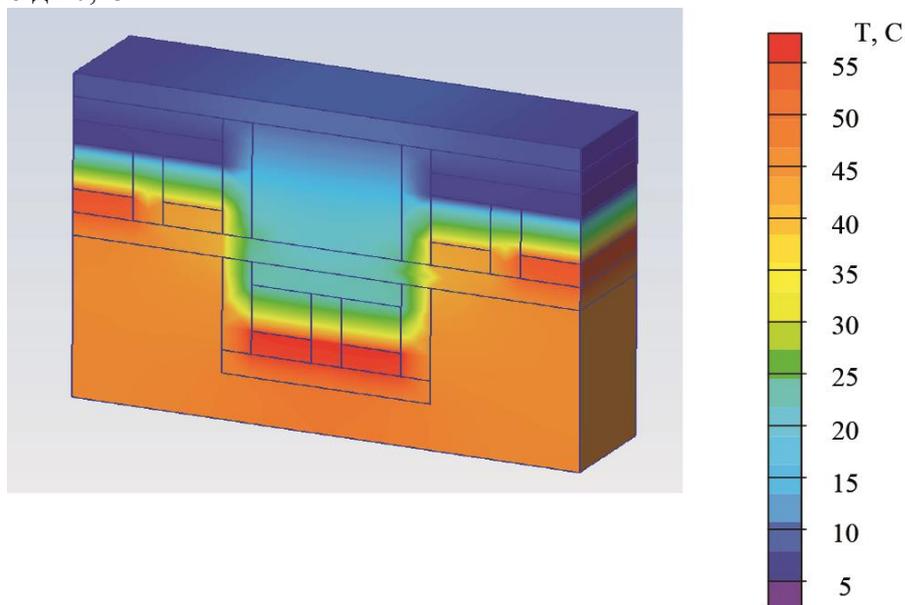


Рис. 3. Трехмерное температурное поле термоэлектрической системы при выходе на стационарный режим

Fig. 3. Three-dimensional temperature field of a thermoelectric system when reaching a stationary regime

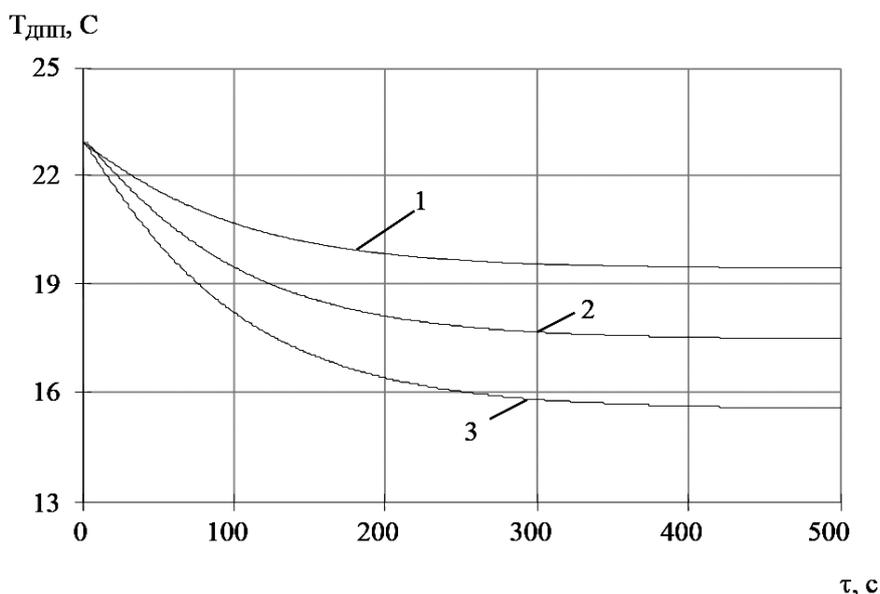


Рис. 4. Изменения во времени температуры в центре дискретных полупроводниковых приборов при различных мощностях одного термоэлектрического модуля

1 - $Q_{ТЭМ}=8$ Вт, 2 - $Q_{ТЭМ}=12$ Вт, 3 - $Q_{ТЭМ}=16$ Вт

Fig. 4. Temperature changes in time at the center of discrete semiconductor devices at different powers of one thermoelectric module

1 - $Q_{ТЕМ}=8$ W, 2 - $Q_{ТЕМ}=12$ W, 3 - $Q_{ТЕМ}=16$ W

На рис.5 показаны графики, отражающие зависимость мощности данного типа ТЭМ от перепада температур $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ между его спаями для различных величин тока питания $I_{\text{ТЭМ}}$.

$Q_{\text{ТЭМ}}$, Вт

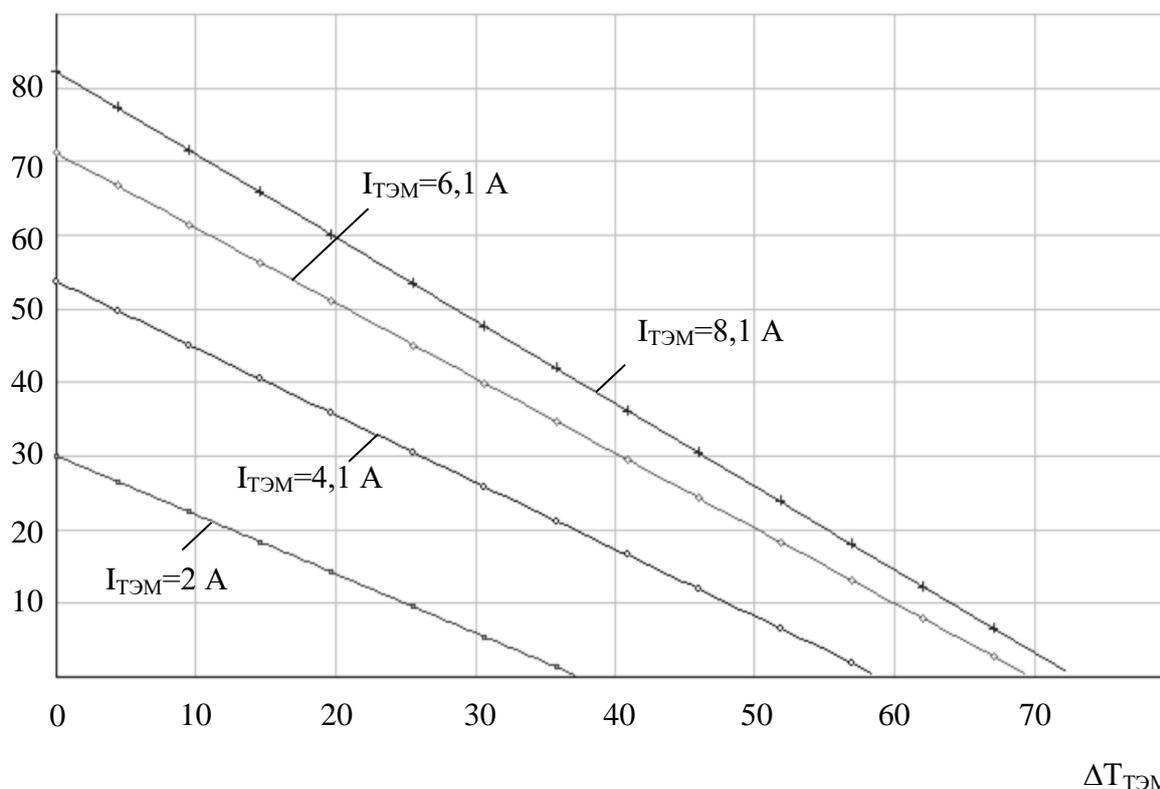


Рис. 5. Зависимость мощности ТЭМ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания
Fig. 5. Dependence of the TEM power on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

Вывод. Разработан новый тип системы охлаждения ДПП, в котором используется несколько секций ТЭМ, обеспечивающих теплосъем, как с нижней, так и верхней поверхности тепловыделяющих элементов, что увеличивает поверхность теплообмена между источником холода и элементом РЭА и повышает эффективность теплосъема.

Рассмотрена расчетная модель данной системы. Она построена на основе решения задачи теплопроводности для многоэлементной конструкции сложной конфигурации, каждая составляющая которой характеризуется своими тепло- и электрофизическими параметрами, методом конечных элементов.

Представлены результаты численного эксперимента в виде трехмерной картины температурного поля системы ДПП - ТЭС при выходе ее на стационарный режим, а также графиков изменения во времени температуры в центре ДПП при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ.

В результате численного эксперимента установлено, что предложенная конструкция охлаждающей ТЭС в полной мере позволяет решить задачу обеспечения требуемого температурного режима ДПП в диапазоне его мощностей до 75 Вт.

При этом использование секций ТЭМ из идентичных по своим геометрическим, электро- и теплофизическим характеристикам термоэлементов позволяет повысить технологичность создания устройства, а также обеспечить его работу в оптимальных токовых режимах.

Библиографический список:

1. Камышная Э.Н. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры / Э.Н. Камышная, В.В. Маркелов, В.А. Соловьев. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 165 с.
2. Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов / Н.С. Кудрявцева. - М.: МАИ, 2012. - 226 с.
3. Черепанов В.П. Защита радиоэлектронной аппаратуры от перегрузок / В.П. Черепанов, Е.И. Посысаев. - М.: Радио-Софт, 2015. - 216 с.
4. Коновалов Д.А. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов // Вестник ВГТУ. - 2014. - Т. 10. - №. 1. - С. 97-104.
5. Dai Jun. Optimum cooling of data centers / Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.]. - New York: Springer-Verlag, 2014. - 186 p.
6. Shabany Y. Heat transfer: thermal management of electronics / Y. Shabany. - Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. - 471 p.
7. Меркульев А. Ю. Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий / А. Ю. Меркульев, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Молодой ученый. - 2013. - № 11 (58). - С. 143-145.
8. Андреев П.Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. - Пенза: ПГУ, 2012. - 130 с.
9. Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Патент РФ № 2314663. 2008. Бюл. № 1. / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Менафов А.М.
10. Термоэлектрическая батарея//Патент РФ № 2338300. 2008. Бюл. № 31. / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В.
11. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов / Е.Н. Васильев//Журнал технической физики. - 2017. -Т.87, № 1. - С. 80-86.
12. Евдулов О.В. Экспериментальные исследования системы охлаждения электронных плат / О.В. Евдулов, А.М. Хайбулаев//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - Махачкала: ДГТУ. - 2022. - Т. 49, №1. - С. 6-13.
13. Васильев Е.Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники / Е.Н. Васильев // Микроэлектроника. - 2020. - Т. 49, № 2. - С. 133-141.
14. Евдулов О.В. Модель системы неравномерного охлаждения электронных плат / О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2016. - Т. 41, №2 - С. 61-67.
15. Ибрагимова А.М., Евдулов О.В. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для отвода теплоты от элементов РЭА // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: статья в сборнике научных трудов X Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 27-29 окт. 2021 г.). СПб., 2021. С.12-15.
16. Исмаилов Т.А. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения электронной аппаратуры / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2002. - № 7. - С. 59-62.
17. Александров А.А. Теплотехника. / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 880 с.
18. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
19. Bergman T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. - New York: John Wiley & Sons, 2011. - 1076 p.
20. <https://elcut.ru> (дата доступа 19.05.2022).
21. <http://kryotherm.spb.ru> (дата доступа 19.05.2022).

References:

1. Kamyshnaya E.N. Design and technological calculations of electronic equipment. E.N. Kamyshnaya, V.V. Markelov, V.A. Solovyov. M.: MSTU im. N. E. Bauman, 2014: 165. (In Russ)
2. Kudryavtseva N.S. Fundamentals of designing effective systems for thermal control of spacecraft / N.S. Kudryavtsev. - M.: MAI, 2012: 226. (In Russ)
3. V.P. Cherepanov, E.I. Posysaev. Protection of electronic equipment from overloads. M.: Radio-Soft, 2015: 216. (In Russ)
4. D.A. Konovalev, I.N. Lazarenko, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov. Modern approaches to the development and creation of elements of thermal protection systems for radio-electronic components. [Vestnik VGTU] VGTU Bulletin. 2014; 10 (1): 97-104. (In Russ)
5. Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.] Optimum Cooling of Data Centers. New York: Springer-Verlag, 2014: 186.
6. Shabany Y. Heat transfer: thermal management of electronics. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010: 471.
7. A.Yu. Merkuliev, N. V. Goryachev and N. K. Yurkov. Cooling systems for semiconductor electrical and radio products. [Molodoy uchenyy] Young scientist. 2013; 11 (58): 143-145. (In Russ)
8. P.G. Andreev, I.Yu. Naumov. Protection of radio-electronic means from external influences. Penza: PGU, 2012: 130. (In Russ)
9. Pat. 2314663, Ros. Federation: MPK7 H 05 K 7/20, Device for cooling elements of radio-electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.G. Verdiev, A.M. Menafov, No. 2005112476; publ. 01/10/2008, Bull. No. 1. (In Russ)
10. Pat. 2338300, Ros. Federation: MPK7 H 01 L 35/28, Thermoelectric battery. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.G. Verdiev, No. 2007122856; publ. November 10, 2008, Bull. No. 31. (In Russ)

11. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of thermoelectric cooling regimes for heat-loaded elements. [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki] *Journal of technical physics*. 2017; 87(1): 80-86. (In Russ)
12. Evdulov O.V. Experimental studies of the cooling system of electronic boards. O.V. Evdulov, A.M. Khaibulaev [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. Makhachkala: DSTU. 2022; 49(1): 6-13. (In Russ)
13. Vasiliev E.N. Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics elements. *Microelectronics*. 2020; 49(2): 133-141. (In Russ)
14. Evdulov O.V. Model of the system of non-uniform cooling of electronic boards / O.V. Evdulov, D.V. Evdulov [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2016; 41(2): 61-67. (In Russ)
15. Ibragimova A.M., Evdulov O.V. Thermoelectric semiconductor devices for heat removal from REA elements. Low-temperature and food technologies in the XXI century: an article in the collection of scientific papers of the X International Scientific and Technical Conference (St. Petersburg, October 27-29, 2021). SPb., 2021: 12-15. (In Russ)
16. Ismailov T.A. Modeling of heat transfer processes in a thermoelectric device for cooling electronic equipment. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2002; 7: 59-62. (In Russ)
17. Aleksandrov A.A. Heat engineering. A.A. Aleksandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [i dr.]. M: MSTU im. N.E. Bauman, 2017: 880. (In Russ)
18. Theory of heat and mass transfer. Under. ed. A.I. Leontiev. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2018: 464. (In Russ)
19. Bergman T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011:1076.
20. <https://elcut.ru> (дата доступа 19.05.2022).
21. <http://kryotherm.spb.ru> (дата доступа 19.05.2022).

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; ibrasya@mail.ru.

Магомедов Тимур Юсупович, старший преподаватель кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии; Magomedov173@gmail.com.

Information about authors:

Oleg V.Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Asiyat M. Ibragimova, Applicant for the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ib-rasya@mail.ru.

Timur Yu. Magomedov, Senior Lecturer, Department of Electricity and Renewable Energy Sources; Magomedov173@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revided 04.05.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 04.05.2022.