

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**«Исследование путей температурной стабилизации первичных
преобразователей датчиков геомагнитного поля в составе
навигационных платформ»**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 252 группы

направления 03.04.02 «Физика»

физического факультета

Гриднева Дмитрия Сергеевича

Научный руководитель

к. ф.-м. н., доцент

С.В. Овчинников

Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор

А.А. Игнатьев

Саратов, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения теплового режима радиоэлектронных аппаратов остается актуальной и в настоящее время.

Известно, что надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) падает как с повышением их температуры, так и с ее резкими изменениями. Увеличение температуры РЭА вызывает ухудшение изоляционных свойств отдельных материалов, изменение плотности и подвижности носителей тока в полупроводниках, общее увеличение интенсивности деградации материалов и т. д. Все эти факторы могут привести к искажению сигналов на выходе аппарата или даже к выходу аппарата из строя. Следовательно, нормальный тепловой режим радиоэлектронного аппарата является необходимым условием его надежной работы.

Моделирование теплового режима РЭА на этапе конструкторской разработки позволит выявить параметрическую надежность устройства в различных режимах эксплуатации, а также откроет возможности экономического обоснования того или иного варианта конструкции как самого проектируемого аппарата, так и системы его теплового обеспечения.

Существует ряд радиоэлектронных устройств, для которых фактор температурного воздействия является недопустимым. В первую очередь это относится к высокоточным измерительным и сенсорным системам. Для таких устройств приходится разрабатывать оригинальные системы теплового обеспечения, учитывающие индивидуальные особенности конструкции устройства и условия его предполагаемой эксплуатации.

Одним из возможных путей построения системы теплового обеспечения термочувствительного электронного устройства является использование термоэлектрических модулей Пельтье (ТЭМ).

Модули на эффекте Пельтье удобны при использовании автоматического управления терморегулированием, поскольку их режим работы может быть автономно зарегулирован (с применением соответствующего датчика температуры), включая возможность инверсной работы. Это очень эффективно для систем с малым собственным тепловыделением.

Охлаждающие модули, функционирующие на эффекте Пельтье, имеют как ряд преимуществ, так и ряд весомых недостатков.

Модули Пельтье компактны, удобны, надежны и обладают очень высокой эффективностью работы.

Их наиболее значимым недостатком является необходимость многократных энергетических затрат относительно отводимой от объекта тепловой мощности. Также модуль Пельтье в случае выхода его из строя, способен привести к очень быстрому нарушению теплового режима защищаемого элемента и скорому выходу его из строя от последующего перегрева.

Тем не менее, в определенных условиях применению ТЭМ нет альтернативы, поскольку модуль Пельтье является уникальным термостабилизирующим элементом при применении несложной автоматики управления током питания ТЭМ.

Существует два пути реализации модулей Пельтье в качестве термостабилизирующего компонента РЭА:

1. Разработка и изготовление индивидуальных ТЭМ под конкретные условия. Данный метод, теоретически, позволяет конструировать ТЭМ, идеально подходящий для решения определенных задач, однако, следует принимать во внимание факт, что разработка будет вестись не на базе соответствующей аккредитованной организации, что неизбежно повышает вероятность отказа ТЭМ и, следовательно, значительно снижает надежность всей РЭА.

2. Использование выпускаемых ТЭМ промышленного назначения. Этот метод является решением проблемы изложенной в п.1, однако, требует дополнительных исследований. В частности, необходимо установить возможности отдельно взятого модуля для реализации конкретных целей.

В «Институте критических технологий» (г. Саратов) и на кафедре общей физики СГУ ведется исследовательские работы по созданию навигационных систем, использующих геофизические поля Земли. В частности, одним из компонентов такой системы является гетеромагнитный датчик геомагнитного поля. Информационным сигналом датчика является частота генерации его первичного преобразователя – полупроводникового автогенератора, в цепь обратной связи которого включен ферритовый микрорезонатор (обычно ЖИГ-сфера или элемент пленки ЖИГ). Указанный информационный сигнал проявляет довольно сильную температурную зависимость, что приводит к необходимости коррекции показаний тем или иным способом. Однако имеется возможность температурной стабилизации первичного преобразователя датчика термостатирующей системой на основе модуля Пельтье.

Поэтому целями настоящей работы является:

1. Методика оценки возможностей использования промышленного термоэлектрического модуля применительно к конкретному электронному компоненту, в частности, для тепловой стабилизации термочувствительных элементов геомагнитного датчика.
2. Расчет тепловых сопротивлений некоторых элементов сопряжения активных поверхностей термоэлектрического модуля с элементами конструкции электронного устройства.

В настоящей выпускной квалификационной магистерской работе материал изложен в 5 разделах, выстроенных в логической последовательности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Некоторые результаты исследований, проведенных сотрудниками Конструкторского бюро критических технологий (ОАО «Институт критических технологий»), по анализу температурного влияния на частоту генерации гетеромагнитных генераторов на основе полевого GaAs транзистора показаны на рис. 1. Гетеромагнитный автогенератор помещался в камеру тепла и холода, выдерживался при каждой температуре определенное время и приводился в действие. Так определяется зависимость частоты генерации от температуры [3].

Похожие температурные зависимости частоты генерации наблюдаются для всех гетеромагнитных систем независимо от типа используемых полупроводниковых структур и типа магнитной системы.

График, показанный на рис. 1.3, свидетельствует о том, что температурный уход частоты генерации в среднем составляет 0,53 МГц/°С. Следовательно, при постоянных \vec{B}_0 и \vec{B}_a температурная неопределенность измеряемой величины $\vec{B}_{вн}$ составляет $\Delta B_{вн} = 53000 \text{ Гц} / 28 \text{ (Гц/нТл)} \approx 1900 \text{ нТл}$, что недопустимо много для навигационной системы.

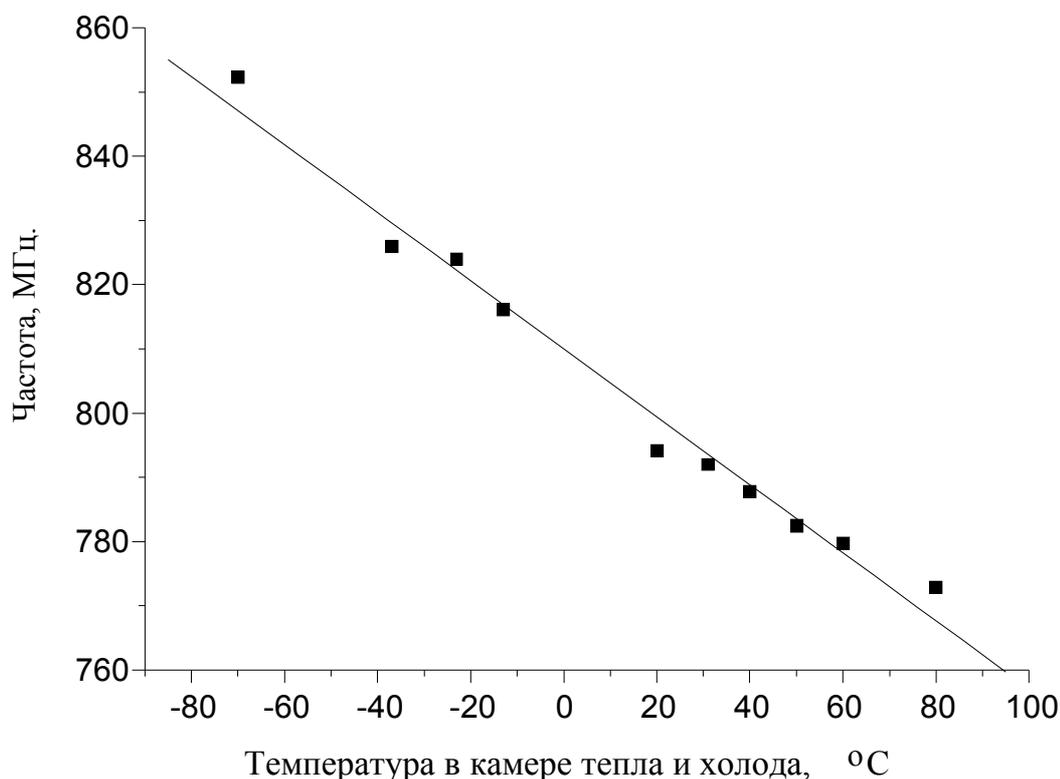


Рисунок 1. Типичная зависимость частоты генерации GaAs гетеромагнитного автогенератора от температуры

Для первичного преобразователя, созданного на принципе дифференциальной системы и на основе высоко стабильных транзисторов, эта температурная неопределенность уменьшена практически в 110 раз, но все равно остается слишком большой. Поэтому в геомагнитных датчиках используется принцип программной (компьютерной) коррекции температурных изменений (в их состав включены датчики температуры).

В рамках настоящей выпускной квалификационной магистерской работы была рассмотрена возможность применения модулей Пельтье для термостабилизации датчиков геомагнитного поля. За основу была взята известная формула расчета тока питания модулей Пельтье, из которой были выражены «скрытые» параметры, и, как следствие была получена зависимость тока питания модулей Пельтье от температуры окружающей среды при различных значениях отводимой тепловой мощности.

Были рассмотрены 5 промышленных модулей Пельтье, рассчитанных на возможность отведения от термостатируемого объекта от 0,2 Вт до 5 Вт тепловой мощности.

Результаты расчетов приведены на графиках рисунка 2, где представлены зависимости тока питания рассмотренных модулей от температуры окружающей среды при отведении от термостабилизируемого блока от 0,2 до 5 Вт тепловой мощности. Температура стабилизации составляет 20°C. Тепловое сопротивление теплоотвода принималось равным 1 К/Вт.

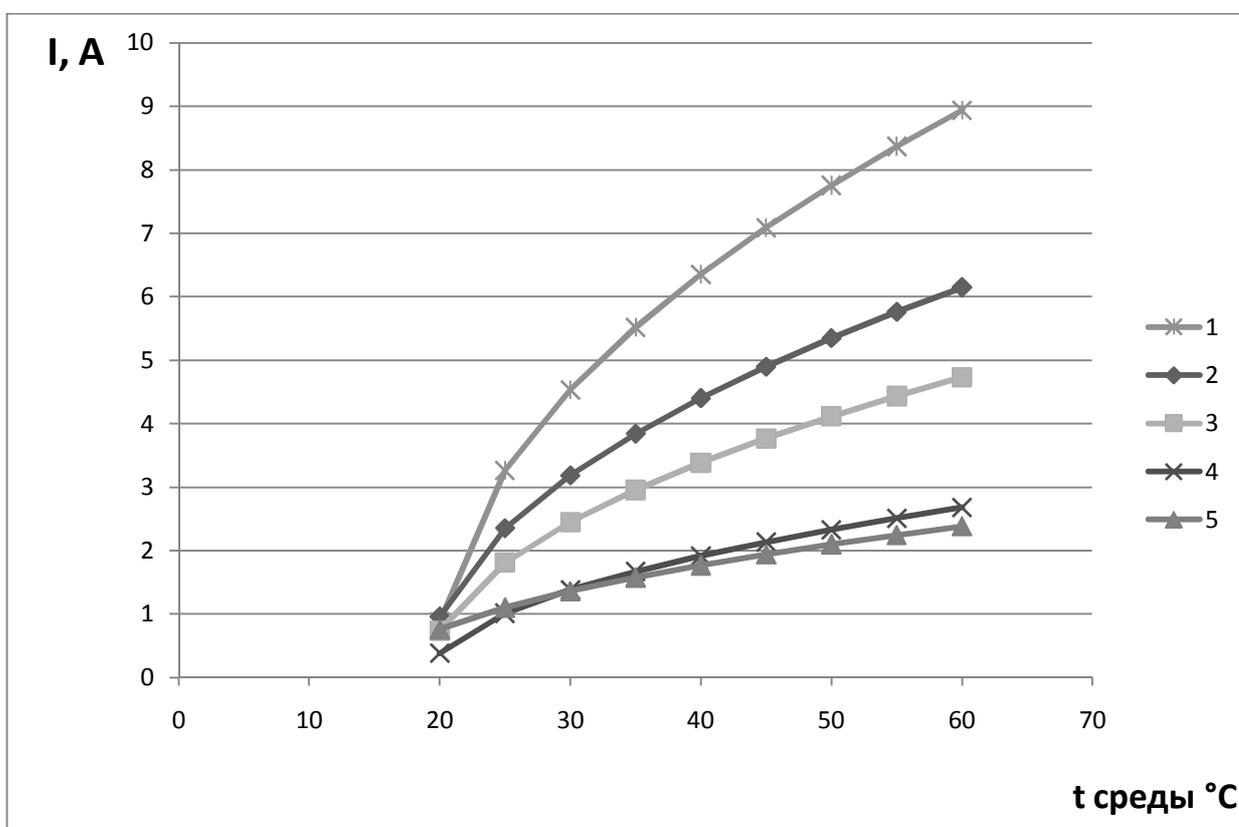


Рисунок 2. Зависимости тока питания модулей Пельтье от температуры окружающей среды при различных значениях отводимой тепловой мощности:

- кривая 1 – для модуля № 5 при тепловыделении в блоке 5 Вт,
- кривая 2 – для модуля № 4 при тепловыделении в блоке 4 Вт,
- кривая 3 - для модуля № 3 при тепловыделении в блоке 2 Вт,
- кривая 4 - для модуля № 2 при тепловыделении в блоке 1 Вт,
- кривая 5 - для модуля № 1 при тепловыделении в блоке 0,2 Вт.

Приведенные результаты подтверждают наличие высоких энергозатрат в процессе охлаждения модулем Пельтье электронных систем относительно

отводимой от них тепловой мощности. Соответственно, на стадии проектирования устройства необходимо принять решение о целесообразности использования именно такого способа термостабилизации. В случае, если решение будет положительным, то потребуются обеспечить весьма большие затраты энергии для полноценного функционирования системы и минимизации вероятности её выхода из строя. Исходя из вышеупомянутой проблемы, справедливо сделать вывод, что модули Пельтье наиболее целесообразны лишь в некоторых исключительных случаях [17].

Кроме того, необходимо разработать конструкцию теплоотвода, эффективно отводящего тепло от модуля Пельтье в окружающую среду. Интересно рассмотреть возможность использования в этих целях газорегулируемой тепловой трубы, которая имеет возможность выполнять функцию теплового диода, что важно при необходимости инверсного включения ТЭМ для подогрева блока преобразователей в условиях низких температур окружающей среды [18, 19].

На следующем этапе выполнения магистерской работы стояла задача разработать методику оценки возможностей применения промышленного термоэлектрического модуля для охлаждения конкретного электронного устройства, а также, автоматизация методики (разработка компьютерной программы)

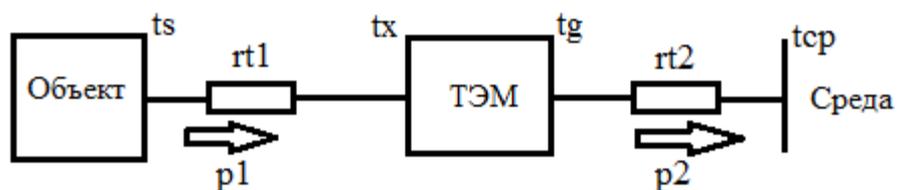


Рисунок 3. Тепловая схема работы термостабилизирующего устройства на основе термоэлектрического модуля Пельтье.

Все используемые в вышеприведенной блок-схеме характеристики раскрыты в таблице 1.

Таблица 1. Переменные и единицы их измерения.

Переменная	Характеристика	Размерность
ts	температура стабилизации объекта	°С
tx	температура холодной грани ТЭМ	°С
tcp	температура среды	°С
$p1$	отводимая от объекта тепловая мощность	Вт
$rt1$	тепловое сопротивление ТЭМ-объект	К / Вт
$rt2$	тепловое сопротивление теплоотвода	К / Вт
yim	характеристический ток	А
rom	омическое эквивалентное сопротивление	Ом
qx	характеристическая холодопроизводительность	Вт
dtm	максимальный температурный перепад по ТЭМ	°С

Были определены рабочие формулы для оценки возможности использования ТЭМ с паспортными характеристиками в конкретной системе с требуемой температурой стабилизации и известной мощностью тепловых потерь:

$$\begin{aligned}
 ts - tx &= p1 \cdot rt1 \rightarrow tx = ts - p1 \cdot rt1 \\
 p2 &= p1 + I \cdot I \cdot rom \rightarrow tg = tcp + p2 \cdot rt2 \\
 tg - tx &= f(p1) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p1 = 0 \rightarrow tg - tx = dtm \\ tg = tx \rightarrow p1 = qx \end{array} \right\} \rightarrow \\
 \rightarrow tg - tx &= dtm \cdot (1 - p1 / qx) \Rightarrow \\
 \Rightarrow rt2 &= \frac{dtm + ts - tcp - p1 \cdot rt1 - dtm \cdot p1 / qx}{p2} \\
 rt2 > 0 &\Rightarrow p1 < pkr = \frac{dtm + ts - tcp}{rt1 + dtm / qx}
 \end{aligned} \tag{1}$$

На этой основе была разработана простая компьютерная программа, позволяющая рассчитать требуемое тепловое сопротивление внешнего

теплоотвода при заданных параметрах тепловой стабилизации и выбранных параметрах промышленного термоэлектрического холодильника.

```
введите  $y_{im}$ , А
2,1
введите  $r_{om}$ , Ом
5,3
 $q_x$ , Вт
16,9
введите  $d_{tm}$ 
130
введите  $p_1$ , Вт
0,5
введите  $t_s$ 
20
введите  $rt_1$ , К/Вт
1
введите температуру среды  $t_{cp}$ 
30
 $rt_2$  не должно быть больше 0.1224E+02 К/Вт
новый вариант - введите 1, закончить - введите 0
```

Рисунок 4. Пример работы компьютерной программы оценки предельного теплового сопротивления теплоотвода и предельной мощности рассеяния

Примечания:

1. Результирующим действием расчета является соотношение отводимой от объекта тепловой мощности с критическим значением мощности, на основании которого можно сделать вывод о целесообразности применения такого метода термостабилизации.
2. Если отводимая от объекта тепловая мощность не превосходит критического значения, то программа рассчитывает максимально возможное тепловое сопротивление теплоотвода, обеспечивающего работоспособность системы.

В качестве теста с помощью разработанной программы был произведен расчет пригодности четырёхтиповых ТЭМ с различными характеристиками. Была получена зависимость значения теплового сопротивления теплоотвода (rt_2) от температуры окружающей среды (t_{cp}) при ее изменении от +30°C до

+60°C с шагом 10°C при постоянном значении температуры стабилизации объекта (t_s), равным +20°C (комнатная температура). Было рассмотрено 2 значения теплового сопротивления ТЭМ-объект ($rt1$): 1 и 2 К/Вт соответственно.

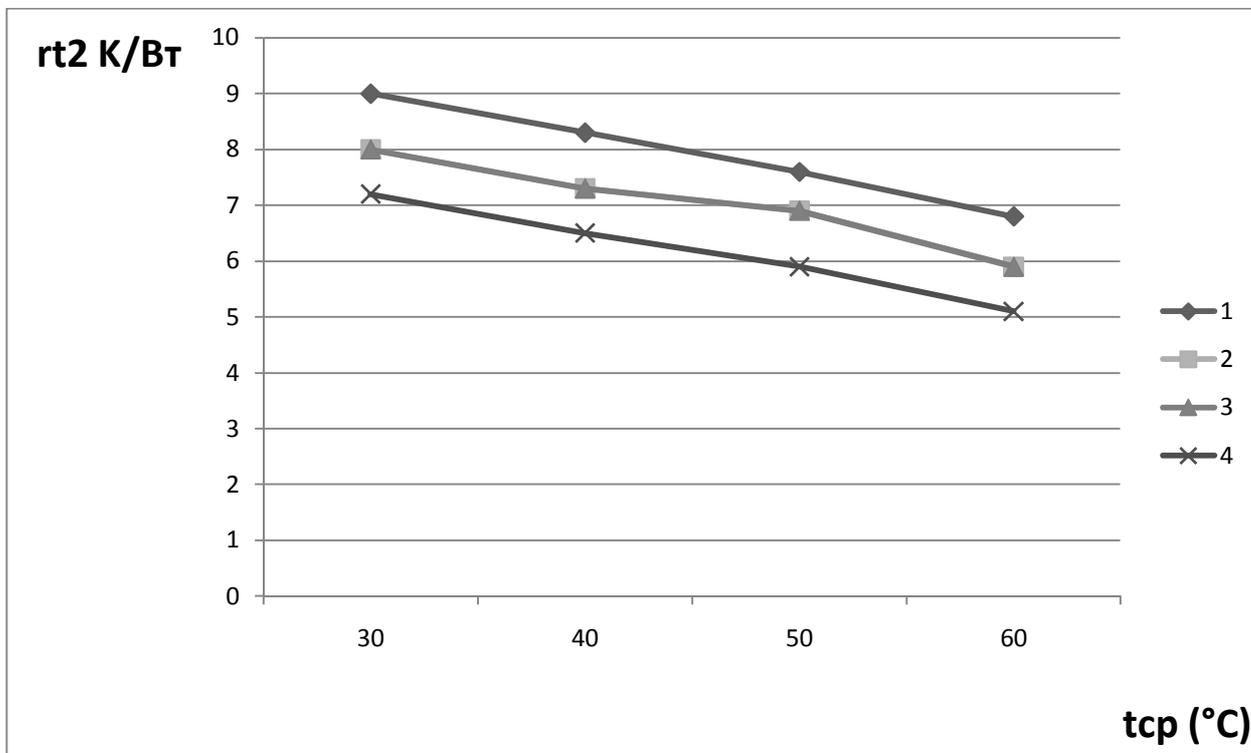


Рисунок 5. Зависимость предельного теплового сопротивления теплоотвода от температуры среды на примере модуля ТВ-127-1.0-1.3.

- кривая 1 – изменение теплового сопротивления теплоотвода при отводимой мощности 0,5 Вт ($p1$) и тепловом сопротивлении 1 К/Вт ($rt1$),
- кривая 2 – изменение теплового сопротивления теплоотвода при отводимой мощности 1 Вт ($p1$) и тепловом сопротивлении 2 К/Вт ($rt1$),
- кривая 3 – изменение теплового сопротивления теплоотвода при отводимой мощности 1,5 Вт ($p1$) и тепловом сопротивлении 1 К/Вт ($rt1$),
- кривая 4 – изменение теплового сопротивления теплоотвода при отводимой мощности 2 Вт ($p1$) и тепловом сопротивлении 2 К/Вт ($rt1$).

Полученные значения подтверждают следующую очевидную зависимость: с увеличением температуры окружающей среды необходимо снижать тепловое сопротивление теплоотвода.

Конструктивные детали сопряжения ТЭХ как со стабилизированным электронным элементом, так и окончательным теплоотводом могут иметь

разнообразную форму. Но к ним предъявляется одно основное требование (с теплофизической точки зрения): их тепловое сопротивление должно быть как можно меньше. В данной выпускной квалификационной магистерской работе представлены выражения для расчета тепловых сопротивлений элементов, наиболее характерных для устройств твердотельной электроники.

В разделе 5 ВКР проведен аналитический расчет тепловых сопротивлений некоторых типовых элементов сопряжения, используемых для совмещения термостатируемого объекта с модулем Пельтье. Графическое представление теплофизической модели показано на рисунке 6. Решения соответствующих линейных задач теплопроводности получены методом конечных интегральных преобразований.

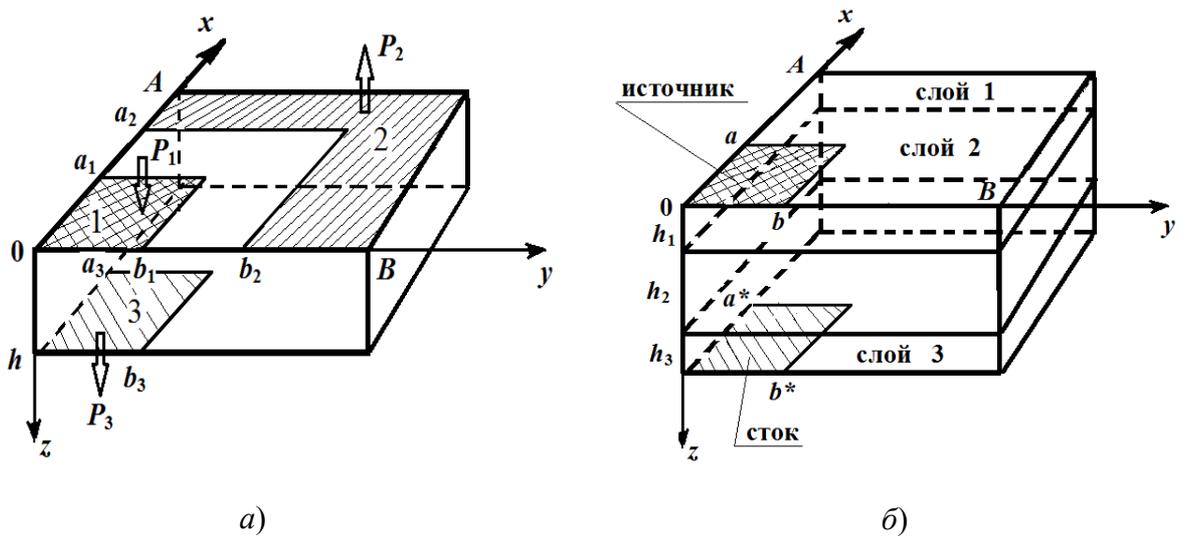


Рисунок 6. Представления теплофизических моделей элементов сопряжения для расчета тепловых сопротивлений
а – однослойная модель с тремя локализованными зонами теплового контакта (1 – источник, 2 и 3 – стоки);
б – трехслойная модель с двумя зонами теплового контакта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы получены следующие результаты.

Разработана простая методика оценки пригодности промышленного термоэлектрического модуля для системы охлаждения и термостабилизации термочувствительного электронного узла радиоэлектронного аппарата, в частности, для тепловой стабилизации термочувствительных элементов геомагнитного датчика. Методика включает анализ возможностей отвода заданного уровня тепловой мощности от стабилизированного объекта с помощью термоэлектрического модуля Пельтье при заданной температуре окружающей среды и выдает требуемое значение теплового сопротивления оконечного теплоотвода, сохраняющего работоспособность устройства.

Получены формулы для расчета тепловых сопротивлений нескольких элементов сопряжения активных поверхностей термоэлектрического модуля с элементами конструкции электронного устройства.

Результаты работы будут использоваться при разработке навигационных систем в ОАО «Институт критических технологий» и на кафедре общей физики СГУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Игнатъев А.А., Ляшенко А.В. Гетеромагнитная микроэлектроника: микросистемы активного типа. – М.: Наука, 2007. – 612 с.
2. Гурзо В. В., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Сотов Л. С. и др. Векторный магнитометр малых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника: Сб. докл. и ст. науч.-техн. совещ. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 1. С. 50 – 52.
3. Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Норов Ю. В., Сотов Л. С, Тугушов Д. В. Экспериментальное исследование векторного магнитоэлектронного магнитометра // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. докл. и ст. II и III науч.-техн. совещ. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2. С. 97–109.
4. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
5. Анатычук Л.И. - Термоэлементы и термоэлектрические устройства, справочник, 1979.
6. Булат Л. П., Ведерников М. В., Вялов А. П. и др. «Термоэлектрическое охлаждение. Текст лекций» под общей ред. Л. П. Булата. СПб.: СПбГУНиПТ, 2002.
7. Бараненко А.В. и др. Холодильные машины: Учебник для студентов вузов / Под общ.ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
8. Дульнев Г.Н. «Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1984. – 247 с., ил.
9. Модели тепловых процессов систем охлаждения Кофанов Ю.Н., Манохин А.И., Сарафанов А. В. –"СИСТЕМОТЕХНИКА", № 4, 2006г, 4-7 с.

10. Игнатъев А. А., Ляшенко А. В. Гетеромагнитная микроэлектроника : микросистемы активного типа. М. : Наука, 2007. – 612 с.
11. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М. : Сов.радио, 1975. – 360 с.
12. С. В. Овчинников, А. С. Ретунский. Возможность использования термоэлектрических модулей для термостабилизации гетеромагнитного датчика магнитного поля в условиях повышенной температуры среды // Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. – Вып. 18. С. 4 – 11.
13. Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования / пер. с англ. В.Я. Лиознова. Под ред. И.Е. Вильница. – Л.: Энергия, 1971. – 248 с.
14. Интернет-ресурс «Чип и Дип. Электронные и приборные компоненты» [электронный ресурс] URL: <http://www.chipdip.ru/product/>
15. Интернет-ресурс НПФ «Модуль». [электронный ресурс] URL: <http://www.spf-modul.com/ru/>
16. Интернет ресурс «Симметрон»: [электронный ресурс] URL: <http://www.symmetron.ru/>
17. Гриднев Д.С., Овчинников С.В. ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ДАТЧИКОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ / Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2016: материалы Международного симпозиума и Международной молодежной научной школы SaratovFallMeeting 2016 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов :Изд - во «Новый ветер», 2016. – 207 с. С. 129 – 133.
18. А.А. Чернышев, В.И. Иванов, А.И. Аксенов, Д.Н. Глушкова. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники – М.: Энергия, 1980 – 216 с.
19. Овчинников С.В. Введение в теорию теплообмена: теплопроводность в твердых телах [Электронный ресурс] / С. В. Овчинников.– Саратов: [б. и.], 2015. - 104 с. Текст: <http://library.sgu.ru> . ID= 1486. .

20. Интернет ресурс компании «Криотерм» [Электронный ресурс] URL: <http://kryothermtec.com/>.
21. *С. В. Овчинников, А. В. Ляшенко*. Обобщенная модель для аналитического расчета температурных полей и тепловых сопротивлений элементов твердотельной радиоэлектроники // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – Вып. 12. С. 11 – 18.
22. *Овчинников С. В., Солопов А. А.* Формулы для аналитического расчета тепловых сопротивлений цилиндрических элементов твердотельной радиоэлектроники с локализованным тепловыделением // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. – Вып. 15. С. 32 – 37.
23. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: учеб.пособие. – М.: Высш. шк., 1995. – 480 с.
24. *Овчинников С.В.* Введение в вычислительную физику: Функции, уравнения, интегралы [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие по дисциплине "Вычислительная физика" для студентов физического факультета / С. В. Овчинников; Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. - Саратов: 2017. - 94 с. Текст <http://library.sgu.ru> . ID= 1801