

УДК 621.396.6

В.В.Сухов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНИКАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТВОДА ТЕПЛА

Сухов Владимир Васильевич, кандидат технических наук, окончил машиностроительный факультет МГТУ им. Н.Э. Баумана. ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», г. Москва. Имеет статьи и патенты в области испытаний и расчетов динамики и прочности аппаратуры, систем виброизоляции, вибро-акустических и шумовых характеристик, тепловых режимов. [e-mail:vsuhov51@yandex.ru].

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные вопросы проектирования приборов радиоэлектронной аппаратуры, связанные с исследованием различных схем систем охлаждения. Проводятся экспериментальный анализ и аналитический обзор возможности использования шкафа «Багет-ВМФ», построенного по принципам «Евромеханика», для отвода мощности тепловыделения от 120 до 500 Вт с использованием естественной, жидкостной, воздушной систем охлаждения. Проводится анализ возможности использования термоэлектрической системы охлаждения, рассматриваются преимущества и недостатки каждой из перечисленных систем охлаждения.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, система охлаждения, тепловые режимы, термоэлектрический охладитель, мощность тепловыделения.

Sukhov Vladimir Vasilyevich, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Machine-Building of Bauman Moscow State Technical University; leading staff scientist at Joint Stock-Company Concern 'Morinformsystem-Agat' (Moscow); author of articles, holds patents in the field of trials and calculations of dynamics and strength of radio equipment, systems of vibration isolation, vibroacoustic and noise characteristics, thermal conditions. e-mail: vsuhov51@yandex.ru.

Abstract

The article deals with actual issues concerning design of radioelectronic equipment, connected to researches in different schemes of cooling systems, and gives experimental and analytic analysis of the use of the cabinet 'Baget-VMF' based on the principles of 'Evromekhanika' for removal of heat-generation power of from 120 W to 500 W, using natural, liquid, air systems of cooling. The article also gives an analysis of the use of thermoelectric cooling systems, considers advantages and disadvantages of each listed cooling systems.

Keywords: radioelectronic equipment, cooling system, thermal conditions, thermoelectric cooler, power of heat generation.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы разработка предприятия - шкафа «Багет-ВМФ» используется довольно широко, во всех основных заказах. При разработке данного шкафа было сделано следующее:

- мощность тепловыделения распределяется по объему шкафа равномерно;
- обеспечена универсальность конструкции - возможность применения нескольких систем охлаждения: кондуктивно-жидкостной, воздушной и естественной конвекции.

Разработанный в конце 90-х - начале 2000-х годов (отдельные компоненты были разработаны и испытаны еще в конце 80-х годов) шкаф стал универсальной конструкцией, которая позволяет успешно решать предприятию задачи оборонного назначения любой сложности. Шкаф «Багет-ВМФ» используется в различных приборах: питания, бесперебойного питания, памяти, электронно-вычислительной машины (ЭВМ), накопителя электронной

памяти и т.д. Электрорадиоэлементы (ЭРЭ), используемые в приборах, надежно работают в довольно узком температурном диапазоне, который для корпусов ЭРЭ различного назначения равен 40 - 100 °С.

Для поддержания температур корпусов ЭРЭ на требуемом уровне ЭВМ, построенные на основе шкафа «Багет-ВМФ», должны быть снабжены системами охлаждения, которые тепло, выделяемое ЭРЭ и модулями, передают в окружающую среду помещения, в котором установлен данный прибор. Мощность тепловыделения, рассеиваемая корпусом прибора, равна

$$P = \sum_{i=1}^n P_i$$

где P_i - мощность, необходимая для работы i -го модуля;

η - коэффициент полезного действия устройств преобразования параметров питания i -го модуля от бортовой электросети;

$i=1...n$ - количество модулей в приборе.

Системы охлаждения, отводящие мощность от ЭРЭ на модулях, являются сложным инженерным элементом прибора. В состав систем охлаждения могут входить: холодильные машины, насосы, вентиляторы, теплообменники, элементы автоматики. Весь этот перечень инженерного оборудования относится к воздушным и водяным системам охлаждения, которые еще носят название активные системы охлаждения. Их создание требует больших финансовых вложений, они занимают большое место на судне, и разработка таких систем охлаждения для одного прибора нецелесообразна. Особенно это касается кондуктивно-жидкостных систем охлаждения (КЖСО).

В последнее время в связи с постоянным уменьшением габаритов и массы ЭРЭ, ростом мощности тепловыделения конструкция шкафа «Багет-ВМФ» на пределе возможного

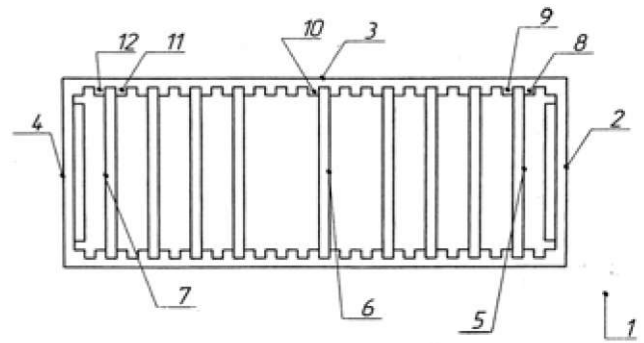


Рис. 1. Схема установки термомпар при испытаниях шкафа «Багет-ВМФ»

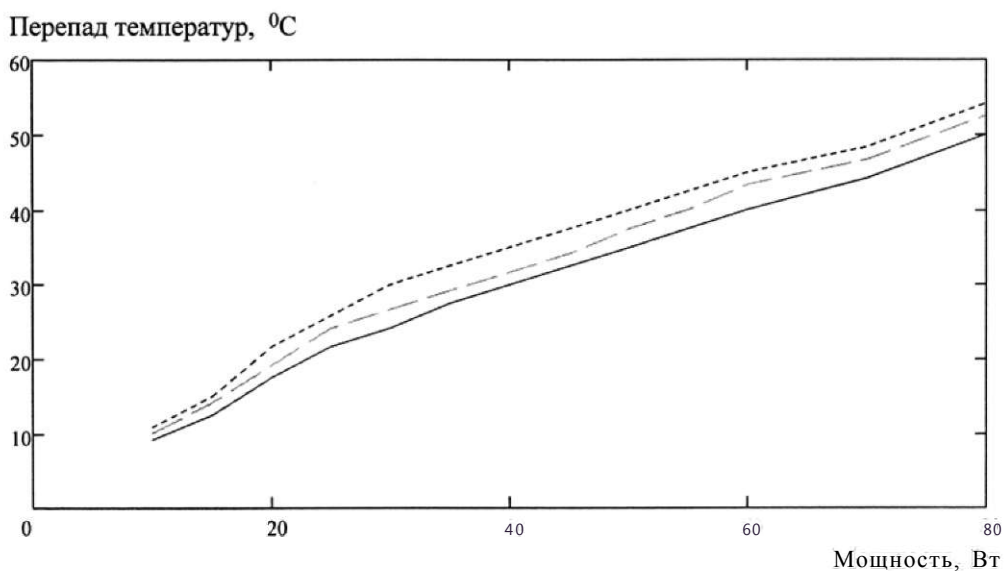


Рис. 2. Экспериментальные зависимости перепада температур от мощности тепловыделения на наружных поверхностях корпуса (термомпары 2, 3 и 4) прибора при естественном охлаждении

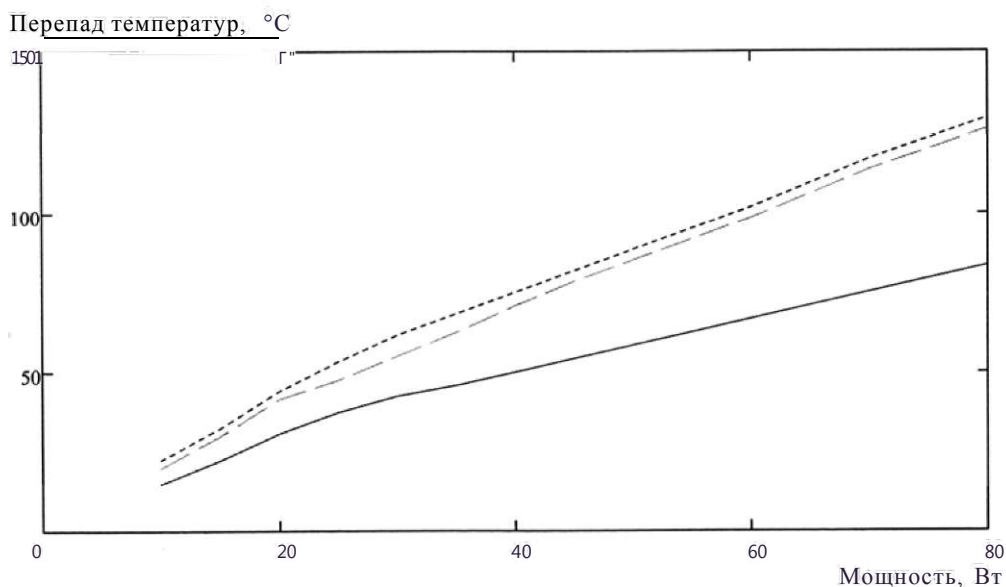


Рис. 3. Экспериментальные зависимости перепада температур от мощности тепловыделения на металлических теплоплоках модулей (термомпары 5, 6 и 7) прибора при естественном охлаждении

обеспечивает отвод тепла при использовании только естественного охлаждения. Применение обдува вентиляторами внутри или снаружи приводит к снижению температуры на внутренних и внешних поверхностях корпуса прибора в пределах 10 - 15 °С (т. е. снижение температурного диапазона до 30 - 80 °С), что не может быть удовлетворительным при мощности тепловыделения на одном модуле 50 - 60 Вт (500 - 600 Вт на прибор). Приведенные температурные режимы получены при нормальных климатических условиях, т. е. при температуре окружающей среды 20 - 25 °С. Приборы должны надежно функционировать и при температуре окружающей среды +45 °С, понятно, что при таких температурных режимах обдув вентиляторами не приведет к нужному результату. При подобных мощностях тепловыделения встает вопрос о локальном

ВМФ»: шкаф был загружен имитаторами электронных модулей в количестве не менее 10 шт., подобранными таким образом, что при включении каждого имитатора его мощность составляла 60 Вт (общая мощность прибора должна быть не менее 600 Вт). Исследования проводились в несколько этапов: диапазон мощности был разбит на 10 Вт (в каждом модуле), и с шагом 10 Вт проводился разогрев прибора от включения режима до выхода в стационар. После этого происходило повышение мощности на каждом модуле на следующие 10 Вт. Так продолжалось до достижения общей мощности тепловыделения 600 Вт на прибор. Схема установки термодатчиков на конструкциях прибора приведена на рисунке 1. Исследования проведены с использованием естественного охлаждения.

В результате проведенного исследования были по-

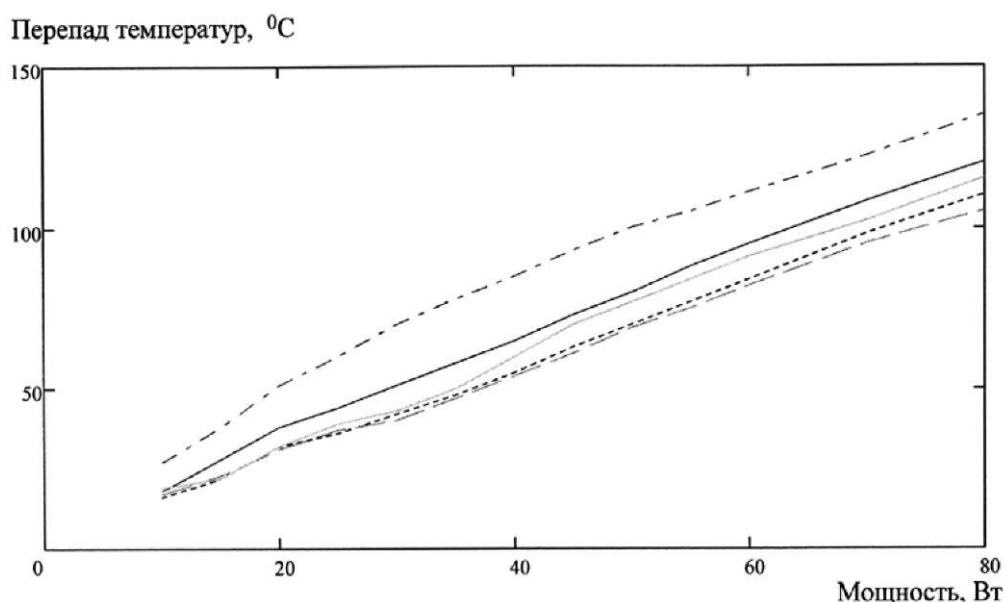


Рис. 4. Экспериментальные зависимости перепада температур от мощности тепловыделения на верхних выступах внутри корпуса (термопары 8, 9, 10, 11, 12) прибора при естественном охлаждении

разогреве на маленькой площади платы. Поэтому вентиляторы неэффективны и их желательно не использовать, так как их применение приводит к возникновению еще одной из самых серьезных проблем, связанных с выполнением требований по виброакустическим и виброшумовым характеристикам (ВАХ и ВШХ), и резко ограничивает ресурс прибора. Возможно использование кондуктивно-жидкостной системы охлаждения. В этом случае температурный уровень значительно снижается до 4 - 35 °С. Для этого достаточно отводить тепло с корпуса прибора, не заводя элементы системы охлаждения внутрь прибора. Однако в последнее время проектанты судов не позволяют использовать КЖСО, так как перечисленное выше оборудование является дорогим и опять возникают большие проблемы с ВАХ и ВШХ. К тому же появляется необходимость создания системы контроля за работой КЖСО.

Для определения возможности разработки системы охлаждения, автономной для прибора и не связанной с другими приборами изделия, были проведены экспериментальные исследования 22-шагового шкафа «Багет-

строены зависимости температурных перепадов от мощности тепловыделения на одном модуле, приведенные на рисунках 2 - 4. Приведенные на рисунках 2 - 4 температурные режимы прибора на основе шкафа «Багет-ВМФ» показывают, что, начиная уже с мощности 20 Вт на модуль, шкаф с трудом позволяет отводить тепло и уже при такой мощности тепловыделения необходимо использовать систему активного охлаждения. При мощности тепловыделения 50 - 60 Вт на модуль тепло с трудом переходит в окружающую среду. Это ведет к росту температур на модулях и температур на наружных поверхностях корпуса прибора. При мощности тепловыделения 60 Вт на модуль, как следует из рисунка 4, температура на корпусе составляет от 48 до 55 °С.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОХЛАЖДЕНИЯ

Термоэлектрические методы охлаждения используются в различных отраслях современной техники, в том числе и судостроении [1, 2]. Они используются для охлаждения воздуха, воды, создания холодильных камер.

Физической основой для создания термоэлектрических охлаждающих устройств служат закономерности протекания термоэлектрических явлений в полупроводниковых материалах [3].

Если в электрической цепи, собранной из полупроводников с разным типом проводимости, пропускать постоянный ток, то можно создать условия, при которых температура в определенном месте цепи будет ниже температуры окружающей среды. Конструктивно оформленная такая схема называется термоэлектрическим охладителем (ТЭО) [1, 2]. Каждый ТЭО имеет часть конструкции, которая отводит тепло от источника тепла. Эта часть носит название «холодный спай». Другая (как правило противоположная сторона конструкции) носит название «горячий спай», с него тепло передается в окружающую среду.

Термоэлектрическая система охлаждения (ТЭСО) состоит из:

- источника тепла;
- устройства крепления «холодного спае» ТЭО;
- устройства отвода тепла от «горячего спае» ТЭО.

ТЭСО для работы ТЭО требует затрат энергии, которая подводится постоянным электрическим током. Энергетически соотношения в такой системе охлаждения описываются системой уравнений:

$$Q_0 = g \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

$$Q_0 + W = a_c(T - T_0),$$

где Q_0 - энергия, отводимая «холодным спаем» ТЭО от охлаждаемого источника (часто называется хладопроизводительностью);

W - энергия, необходимая для работы ТЭО;

σ^* , σ_c - тепловые проводимости между источником тепла и ТЭО, а также между ТЭО и стоком энергии, отводящим тепло от ТЭО;

T_* , T , T_0 , T_c - абсолютные температуры источника тепла, «горячего спае» ТЭО, «холодного спае» ТЭО и стока энергии соответственно.

Из системы уравнений (1) имеем

$$Q_0 = \frac{(T_* - T_c) - \Delta T}{\frac{1}{\sigma_*} + \frac{1}{\sigma_c}}, \quad (2)$$

где $\epsilon = \frac{Q_0}{W}$ - холодильный коэффициент;

$\Delta T = (T_* - T_0)$ - перепад температур между «горячим и холодным спаеми» ТЭО.

Величины ϵ и ΔT взаимосвязаны и зависят от характеристик полупроводниковых материалов, использованных в ТЭО, температур T_* , T , а также от линейных размеров ТЭО [1, 2].

По данным литературных источников [1, 2] в реальных ТЭО корабельного применения $0,14 < \epsilon < 1,0$ [2]. Это значит, что затраты энергии на каждый ватт отводимой мощности в ТЭО составляют

$$W_0^t = \frac{W}{Q_0} = \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{0,14 - 1,0} = 1 - \epsilon^{-1}. \quad (3)$$

Тепловая проводимость σ^* зависит от конструкции и материалов узла, связывающего охлаждаемый источник тепла и «холодный спай» ТЭО. Тепловая проводимость σ_c зависит от конструкции и материалов узла, обеспечивающего передачу тепла в количестве $(Q_0 + W)$ от «горячего спае» ТЭО к стоку тепла. В зависимости от способов передачи тепла (конвекция, излучение, теплопроводность), используемых в узлах связи источника с ТЭО и ТЭО со стоком, σ^* может зависеть от T^* , T , $(T - T_0)$, а σ_c от T , T_c и $(T - T_c)$.

В том случае, когда источник энергии расположен прямо на «холодном спае», $\sigma^* = \sigma_c$, выражение (2) примет вид

$$Q_0 = \frac{\sigma_c(T - T_c)}{1 + \frac{1}{\epsilon}} = \frac{\sigma_c \Delta T}{1 + \epsilon}. \quad (4)$$

Таким образом, разработка ТЭСО распадается на разработку ТЭО, узла связи источника энергии с ТЭО и узла, обеспечивающего передачу тепла от ТЭО к стоку энергии.

Материалы, приведенные в работах [1, 2, 4, 5], позволяют выполнить расчеты для ТЭО, а стыковка характеристик узла связи источника энергии с ТЭО и узла отвода тепла позволяет оценить возможность создания ТЭСО различных устройств в конкретных условиях эксплуатации. Возможность создания ТЭСО с нужными характеристиками во многом определяется интенсивностью теплообмена между «горячим спаем» и стоком энергии, а также между источником тепла и «холодным спаем».

Если подача тепла от источника к «холодному спаю» идет через площадь S^* , а передача тепла от «горячего спае» к среде через площадь S_c , то соответствующие удельные тепловые нагрузки будут иметь значения:

- на узле отвода тепла на «холодном спае» по формуле (5):

$$q_0 = \frac{Q_0}{S_c} = \frac{Q_0}{K \cdot K_X Q_0} = \frac{1}{K \cdot L \cdot X}, \quad (5)$$

где $S_{1,30}$ - площадь под «холодным спаем» ТЭО;

S_c - полная площадь охлаждения;

S_0 - необходимая площадь поперечного сечения охлаждения;

S^* - площадь, через которую идет передача тепла к «холодному спаю».

$$fr_{*s} = \frac{S^*_{ТЭО}}{S_c}, \quad (6)$$

$$K_s = \frac{S^*_{ТЭО}}{S_c}. \quad (7)$$

- на узле отдачи тепла на «горячем спае» по формуле (8):

$$q_s = \frac{\left(1 + \frac{1}{\epsilon}\right) \cdot Q_0}{S_c} = \frac{Q_0(i + Wq)}{S_c} = \frac{i + w \cdot j}{K \cdot L \cdot X}. \quad (8)$$

Введем коэффициенты теплоотдачи на «холодном и горячем спае» a^* , a_c и получим их из выражений (1), (5) и (8):

$$a_c = \frac{1}{k_c \chi(m_c - m_o)} \quad (9)$$

$$a^* = \frac{1 + K_c^1}{k_c^* \chi(m_c^* - m_o^*)} \quad (10)$$

Условия (9) и (10) являются условиями возможности создания узла связи источника тепла с «холодным спаем», а также узла связи «горячего спае» со стоком энергии. Если подвод и отвод тепла выполняются на поверхности с площадью S_{TEO} , то $K_c = 1$.

Введенные в (9) и (10) коэффициенты теплоотдачи a^* и a_c отнесены к основной поверхности теплообмена, т.е. если поверхности имеют оребрение, то в расчет вводится основание этой поверхности, коэффициенты a^* и a_c учитывают и эффективность оребрения.

СХЕМЫ ТЭСО, ВЫБРАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЭО

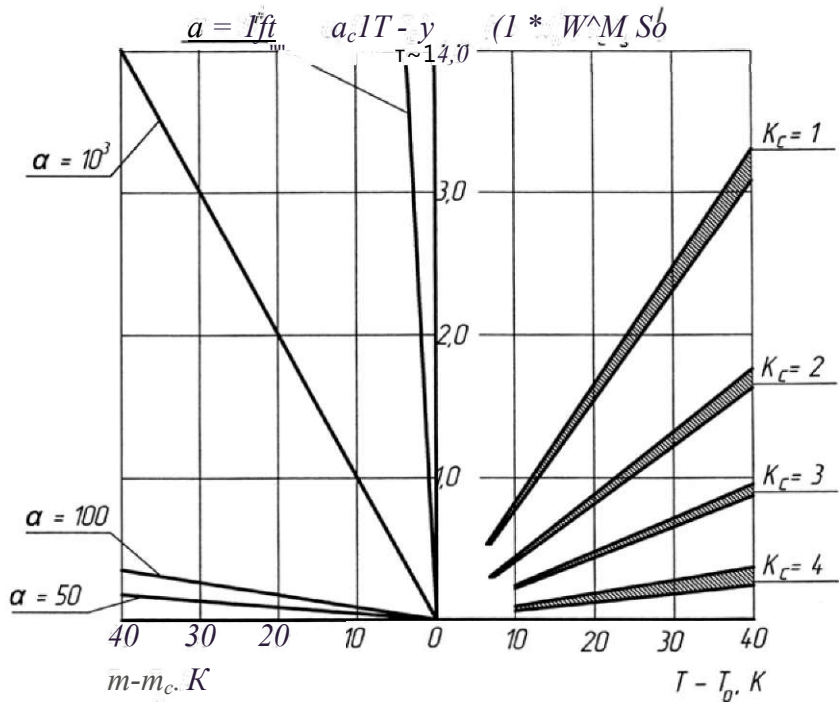
Применительно к задаче отвода тепла с поверхности шкафа «Багет-ВМФ» возможны следующие варианты использования ТЭО:

- охлаждается непосредственно источник тепла - микропроцессор;
- охлаждается теплоноситель (вода), который подается в теплообменники шкафа.

Первый вариант прост, и для его исполнения или проверки необходимо установить ТЭО на микропроцессор на одном или нескольких модулях или их имитаторах. При реализации этого варианта необходимо определить потребность сдува вентиляторами с «горячего спае» выделяемого ТЭО тепла.

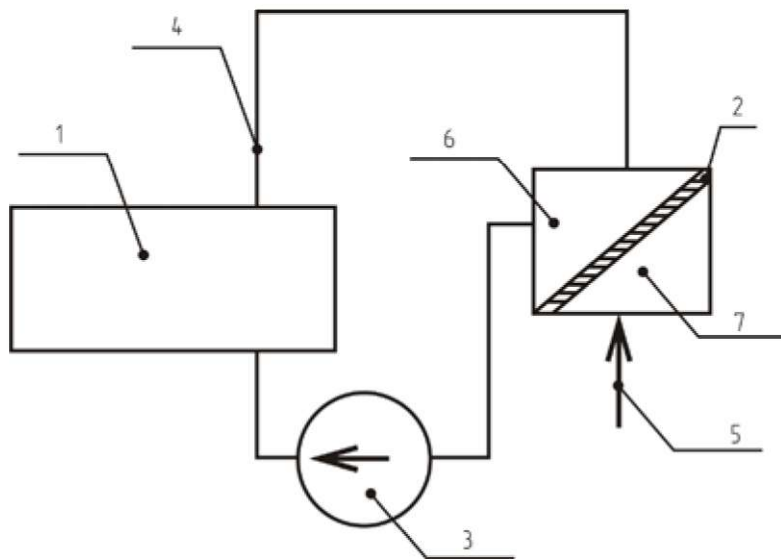
Второй вариант усложняется изготовлением самой системы охлаждения, выбором насоса, который обладает низкими ВАХ и ВШХ.

Интенсивность теплообмена при естественной конвекции и теплообмена «лучистой» энергией при тех температурных режимах, для которых подбирается ТЭО, намного ниже, чем при вынужденной конвекции воды. Поэтому для отвода тепла от «горячего спае» нужно использовать наиболее эффективные поверхности теплообмена. По данным работы [6], наибольшую эффективность теплообмена при естественной конвекции имеют игольчато-штыревые радиаторы, коэффициент теплоотдачи которых, отнесен-



$\Gamma = 283 - 343 \text{ K}$,
 $z = 2,25 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ - термоэлектрический эффект материала ТЭО,
 $r_k = 10^{-5} \text{ Ом см}^2$,
 $\delta = \delta_{max}$ - холодильный эффект.

Рис. 5. Семейство зависимостей коэффициентов теплоотдачи (левая сторона) и передачи тепла в окружающую среду (правая сторона) от перепада температур



- 1 - охлаждаемый прибор;
- 2 - ТЭО;
- 3 - насос;
- 4 - трубопроводы воды, охлаждаемой на «холодных спае» ТЭО;
- 5 - трубопроводы воды, охлаждающей «горячие спае» ТЭО;
- 6 - теплообменное устройство «холодного спае» ТЭО;
- 7 - теплообменное устройство «горячего спае» ТЭО.

Рис. 6. Схема автономной термоэлектрической системы охлаждения

ный к основанию радиатора, может достигать 10^2 Вт/м²К. Плотная установка штырей на поверхности основания радиатора приводит к тому, что в излучении участвуют только торцы штырей, площадь которых мала по сравнению с площадью конвективного теплообмена. поэтому, оценивая перенос тепла от "горячего спая", можно учитывать только конвективную составляющую. Из выражений (7) и (9) можно записать уравнение:

$$\frac{Q_o + W}{\Lambda} = \frac{Q_o(1 + W_o^I)}{K L X} = a_c (T - T_c) \quad (11)$$

дающее связь между удельной тепловой нагрузкой, возникающей при работе тЭо на поверхности S_o , и интенсивностью отвода тепла. левая часть является функцией перегрева $(T - T_c)$ и T_o , а коэффициент теплоотдачи a_c - функция геометрических характеристик ребрения и перегрева $(T - T_c)$. С помощью данных, приведенных в работах [2, 5], по формуле (11) построена зависимость, представленная на рисунке 5.

Схема автономной термоэлектрической системы охлаждения прибора приведена на рисунке 6.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТЭО

В последние годы существенное внимание стало уделяться проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС) электронной аппаратуры. Магнитное поле может существенно влиять и на ТЭО, в частности на полупроводниковый материал, который используется в ТЭО. Рассмотрим детально качественную картину явления.

В магнитном поле на движущиеся заряженные частицы действуют так называемые силы Лоренца, пропорциональные напряженности магнитного поля и скорости движения частиц. Если в полупроводниковом материале есть направленное движение частиц, будь то под действием электрической силы (ток) или градиента температур (перенос тепла), сила Лоренца отклоняет частицы в сторону от основного направления.

Относительно слабые магнитные поля не изменяют распределения частиц по энергиям и механизма их рассеяния. Поэтому, несмотря на отклонение частиц в магнитном поле, время и длина свободного пробега между двумя столкновениями остаются прежними. Поскольку частицы движутся под углом к направлению поля или градиента температуры, эффективная длина свободного пробега в этом направлении уменьшается. Фактически происходит уменьшение подвижности заряженных частиц, участвующих в создании электрического теплового потока. Этот эффект приводит к снижению электрической проводимости и электронной составляющей тепловых проводимостей σ . Еще большее влияние магнитное поле оказывает на коэффициент Пельтье (в литературе имеет обозначение Π). Коэффициент Пельтье определяется средней энергией частиц, участвующих в протекании тока, и удельной теплопроизводительностью $\Pi = \frac{\dot{Q}}{q}$. Рассмотрим как меняется эта энергия под влиянием магнитного поля.

Значение средней энергии зависит от механизма рассеяния, который служит своеобразным фильтром, пропускающим частицы с одной энергией и задерживающим частицы с другой энергией. Те частицы, которые рассеиваются слабо и имеют большую длину свободного пробега, сильнее отклоняются на длине пробега при действии магнитного поля. В магнитном поле возрастает сопротивление направленному движению всех носителей тока. Для слабо рассеивающихся частиц это сопротивление растет быстрее, чем для сильно рассеивающихся. При неизменном токе это приводит к росту вклада в ток сильно рассеивающихся частиц и уменьшению вклада слабо рассеивающихся частиц, и к изменению средней энергии частиц, участвующих в протекании тока. В магнитном поле вклад быстрых носителей в общий ток увеличивается, растет средняя энергия, и коэффициент Пельтье также растет. Теплопроводность же наоборот уменьшается. Однако при больших полях рост магнитосопротивления приводит к уменьшению термоэлектрической эффективности z , в результате чего зависимость от напряженности магнитного поля приобретает максимальное значение, вследствие чего начинают сказываться квантовые эффекты. Аналогичное влияние ТЭО может оказать и на микропроцессор, который должен охлаждать. Поэтому после изготовления модулей или их имитаторов необходимо провести проверку ЭМС модулей и всего прибора на взаимное влияние.

Учитывая, что ТЭО в приборе будет установлено не менее 10 шт, то их суммарное влияние может оказать пагубное воздействие на работу прибора. Использование ТЭО ведет также и к росту общей мощности, потребляемой прибором.

Выводы

В результате проведенного исследования необходимо отметить следующее:

- температурные режимы, полученные в приборе на основе шкафа «Багет-ВМФ» при увеличении мощности тепловыделения с 10 до 60 Вт на один модуль, показали, что такую мощность конструкция шкафа за счет естественной конвекции отвести не в состоянии;

- термоэлектрические холодильники способны выполнить эффективный отвод тепла в приборах с модулями мощностью тепловыделения в пределах 60 Вт в каждом модуле; однако при этом растет общая мощность потребляемая прибором;

- учитывая проблемы с разработкой воздушной и жидкостной систем охлаждения необходимо серьезно заняться разработкой ТЭСО. Для начала возможно изготовление прибора, наполненного имитаторами модулей с использованием на каждом имитаторе микропроцессора ТЭО типа ТМ-127-1,4-6,0 (хладопроизводительность 72 Вт, напряжение питания 15,5 В, ток питания 8,5 А, размеры холодильника 40X40X3,4 мм) или ТВ-199-1,4-0,6 (DRIFT-0,6)-исполнение 1 (хладопроизводительность 229 Вт, напряжение питания 24,6 В, ток питания 15,1 А, размеры холодильника 40X40X3,2 мм). На выбранных ТЭО установка радиаторов не требуется. Необходимо предусмотреть установку в приборе внутренних маломощных вентиля-

торов или двух ТЭО для сдува тепла с «горячих спаев» и обеспечения равномерности переноса тепла на корпус и в окружающую среду;

- разработку жидкостных систем охлаждения с термоэлектрическим эффектом Пельтье необходимо вести по пути приобретения уже готовых холодильных машин, которые освоены отечественной промышленностью и их можно применить в приборах нашего предприятия; указанные разработки поставляются в комплекте с системой автоматики, насосом и др. изделиями, необходимыми для организации отвода тепла;

- после изготовления прибора необходимо провести проверку ЭМС на соответствие требованиям ГОСТ В 25803-91.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термоэлектрические охладители/Под редакцией А.Л. Вайнера. - М.: Радио и связь, 1983. - 176 с.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические материалы. - Киев: Наукова думка, 1979. - 126 с.
3. Иоффе А.Ф. Избранные труды, т.2. - Л.: Наука, 1975. - 200 с.
4. Ромащенко М.А. Моделирование и оптимизация термоэлектрических охлаждающих устройств: автореф. дис. кан. техн. наук: специальность 05.13.12. - Москва, 2008. - 20 с.
5. Аракелов Г.А., Магнушевский В.Р., Сивенков В.Н., Троицкий И.М., Казанцев Г.А. Конструкция многоплощадного фотоприемника с термоэлектрическим охладителем//Прикладная физика - 2002. - № 4. - С. 70 - 76.
6. Дульнев Г.Н. Тепло и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Высшая школа, 1984. - 250 с.