

Для цитирования: Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г. Термоэлектрическая система для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4): 53-64. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

For citation: Sh.A. Yusufov, A.M. Ibragimova, S.A. Peredkov, T.E. Sarkarov, R.G. Mitarov. Thermoelectric system for providing a heat regime for modular electronic equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4): 53-64. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 637.

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МОДУЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г.

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

Резюме. Цель. В статье рассматривается термоэлектрическая охлаждающая система (ТЭОС) для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования (МЭО), размещенного в шкафу. Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их охлаждении воздушным потоком от параметров ТЭОС. **Метод.** Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения электронных плат в блоках кассетной конструкции с использованием термоэлектрической охлаждающей системы был разработан стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в лаборатории опытный образец. **Результат.** Представлены направления конструктивных решений использования ТЭОС устройства, приведено описание экспериментального стенда и методики проведения эксперимента, приведены зависимости температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭОС мощности, температур горячих и холодных спаев, скорости воздушного потока и расстояния между электронными платами. **Вывод.** Экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения МЭО; указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным и достигать температур, необходимых по техническим условиям эксплуатации; при выборе вентилятора для обеспечения принудительного циркулирования воздушного потока в системе необходимо учитывать скорость воздушного потока в канале; необходимо резервировать мощность источника электропитания для функционирования ТЭОС пропорционально мощности источников тепловыделений. Кроме того, важным моментом для функционирования ТЭОУ является обеспечение эффективного отвода теплоты с горячих спаев используемых ТЭМ, и при отсутствии условий для его реализации делает невозможным применение предложенной системы.

Ключевые слова: термоэлектрическая охлаждающая система, тепловой режим, электронное оборудование, экспериментальные исследования, электронная плата

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC SYSTEM FOR PROVIDING A HEAT REGIME FOR MODULAR ELECTRONIC EQUIPMENT

Sh.A. Yusufov, A.M. Ibragimova, S.A. Peredkov, T.E. Sarkarov, R.G. Mitarov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

Abstract Objectives. *The article discusses a thermoelectric cooling system (TECS) for ensuring the thermal regime of modular electronic equipment (MEE) located in a cabinet. The main task of the experimental studies is to determine the temperature dependencies of the air-cooled heat-generating elements of a printed circuit board simulator according to TECS parameters. **Method.** In order to conduct experimental studies of a thermoelectric cooling system for printed circuit boards in cassette units using a thermoelectric cooling system, a prototype designed and manufactured in the laboratory was studied on a testing stand. **Result.** The directions of constructive solutions for using a TECS device are presented along with a description of the testing stand and procedure. The dependencies of the temperature of the printed circuit board simulator on the heat power taken away by the TECS are considered along with the temperatures of hot and cold junctions, the air flow velocity and the distance between the electronic boards. **Conclusion.** The operability of the developed MEE cooling system is confirmed by the experimental studies; the specified cooling method has advantages over conventional forced or natural method and can achieve the temperatures required by the technical operating conditions; when choosing a fan to provide forced circulation of the air flow in the system, it is necessary to take into account the speed of the air flow in the channel; it is necessary to reserve the power of the power supply for the TECS operation in proportion to the power of the heat sources. An important additional point for the functioning of the thermoelectric cooling device is the necessity of ensuring the effective removal of heat from the hot junctions of the thermoelectric module without which it is impossible to use the proposed system.*

Keywords: *thermoelectric cooling system, thermal regime, electronic equipment, experimental studies, printed circuit board*

Введение. Статистические исследования показали, что в 55% случаев выхода приборов и устройств причиной отказа является именно нарушение температурного режима, и следовательно от теплового режима элементов и функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры существенно зависит надежность всего устройства в целом [1].

Использование специальных методов охлаждения и терморегулирования, основанных на конвективном переносе тепла от МЭО в окружающую среду позволяет добиться необходимого температурного режима работы элементов и МЭО в целом [2, 10-21]. Создание для МЭО постоянных температурных условий, обеспечивающих при помощи термоэлектрических охладителей нормальную работу аппаратуры в широком температурном интервале (от +60 до -60° С), в принципе на сегодняшний день может быть осуществлено различными конструктивными решениями [2]. Среди них наиболее целесообразными представляются три конструктивных направления [4]:

1. Термоэлектрический охладитель (ТЭО), входящий в систему обеспечения теплового режима, как источник тепла и холода представляет собой самостоятельный узел, а охлаждение аппаратуры осуществляется посредством транспортировки теплоносителя (жидкости, газа) к местам расположения аппаратуры.
2. Охлаждение аппаратуры осуществляется посредством компоновки ее тепловыделяющих элементов группами в отдельных стандартизированных теплоизолированных объемах, охлаждаемых ТЭО.

3. Изготовление отдельного (микромодульного) элемента совместно с ТЭО. При этом могут быть варианты разборного и неразборного сочленения термоохладителя с объектом охлаждения.

Охлаждение МЭО во всем ее объеме при помощи обработанного в ТЭОС воздуха или жидкости имеет ряд особенностей, ограничивающих область ее использования, однако оно целесообразно в тех случаях, когда имеется множество малогабаритных тепловыделяющих элементов с высокими удельными тепловыми потоками, и смонтированные в так называемые "кассетные конструкции", ориентированные относительно шасси РЭС вертикально или горизонтально.

Постановка задачи. Известны шкафы для РЭС [6-9], содержащие корпуса, воздухопроводы, теплообменники и блоки управления. Например, известен шкаф для размещения МЭО, в котором теплообменник выполнен в виде игольчатого радиатора, снабженного закрывающим его со всех сторон кожухом, в боковых стенках которого выполнены отверстия и основание с окном. Вентиляторы вмонтированы в сквозные каналы, установленные между зигзагообразными участками трубопровода теплообменника и сообщаемые с ним через окно его основания, а теплоотводящие каналы сообщаются с теплообменником через боковые отверстия его кожуха.

В известных шкафах нерационально используются объемы, занимаемые блоками вентиляторов и теплообменником; усложнены конструкции; недостаточная эффективность теплообменника; отсутствует возможность автоматического регулирования теплового режима и тушения возможного возгорания МЭО.

В предлагаемой конструкции [5] для охлаждения электронной аппаратуры, содержащем корпус, расположенные в нем теплообменник и сквозные каналы с вентиляторами, выполненными в виде единого выдвижного блока, а также проложенные вдоль стенок корпуса теплоотводящие каналы для охлаждающей среды, выдвижной блок снабжен расположенным над ним радиатором, выполненным из высокотеплопроводного металла как одно целое со стенками сквозных каналов, и установлен в нижней части закрытого корпуса с образованием между ним и нижним основанием корпуса полости, через которую сообщаются теплоотводящие каналы и сквозные каналы с вентиляторами, а к стенкам сквозных каналов с их внешней стороны присоединены «холодные» спаи батареи термоэлектрических модулей, к «горячим» спаям которых примыкает змеевик с хладагентом, снабженный впускным и выпускным патрубками.

Данная конструкция для охлаждения МЭО обеспечивает возможность автоматического регулирования теплового режима и отличается от известных соединением вентиляторов и теплообменника для охлаждения воздуха в единый компактный выдвижной блок, позволяющий более эффективно использовать занимаемый ими объем шкафа. В нем использованы термоэлектрические модули, связанные с регулятором температуры и датчиком фактической температуры, что позволяет не просто более эффективно, по сравнению с существующими устройствами, охлаждать воздух, но и автоматически регулировать тепловой режим в шкафу в необходимых пределах.

На рис.1 показано устройство блока для охлаждения МЭО. Каждый вентилятор 1 в выдвижном блоке 2 заключен в выполненную из высокотеплопроводного металла прямоугольную ячейку 3, к стенкам которой с внешней стороны припаяны «холодные» спаи термоэлектрических модулей 4, подключенных последовательно к выходу блока автоматического регулятора температуры 5, вход последнего связан с датчиком температуры (не показан), расположенным внутри шкафа рядом с элементами МЭО.

Блок вентиляторов сверху накрыт ребристым радиатором 6, выполненным также из высокотеплопроводного металла и припаянным к стенкам ячеек 3. «Горячие» спаи термоэлектрических модулей 4 охлаждаются, например, фреоном, протекающим по змеевику 7, снабженному впускным и выпускным 9 патрубками и электромагнитными вентилями 10 и 11, связанными с датчиками возгорания (не показаны), расположенными внутри шкафа рядом с электронными элементами.

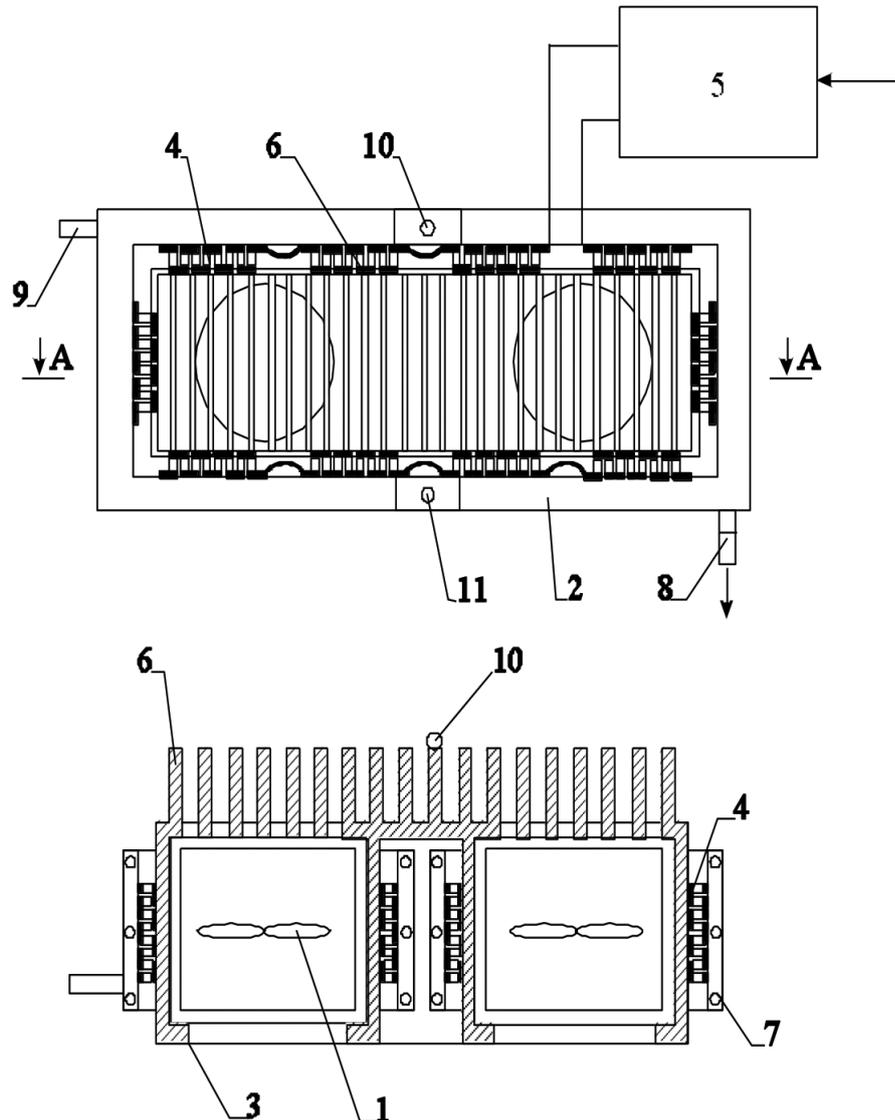


Рис. 1. Термоэлектрическая охлаждающая система для модульного электронного оборудования, размещаемого в шкафу

Fig. 1. Thermoelectric cooling system for modular electronic equipment housed in a cabinet

Принцип работ устройства следующий. На блоке автоматического регулятора температуры 5 устанавливают необходимую внутри шкафа температуру. В зависимости от этой заданной температуры и фактической температуры в шкафу, измеряемой расположенным в нем датчиком, на выход блока автоматического регулятора 5 устанавливается напряжение определенной полярности и величины.

Ток, пропорциональный этому напряжению, проходит через последовательно включенные термоэлектрические модули 4, при этом они начинают охлаждать стенки каналов 3 и радиатор 6 и нагревать змеевик 7 и, наоборот, в зависимости от полярности на выходе блока автоматического регулятора 5. Воздух, нагнетаемый вентиляторами 1, проходя через каналы 3 и щели (жалюзи) радиатора 6, охлаждается, и, в свою очередь, охлаждает элементы МЭО, проходя через секции шкафа.

Из верхней части шкафа воздух через теплоотводящие каналы, прилегающие к стенкам шкафа, проходит вниз в полость для забора воздуха, расположенную под блоком с вентиляторами, затем цикл повторяется.

Методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения электронных плат в блоках кассетной конструкции с использованием ТЭОС был разработан стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в лаборатории опытный образец. Структурная схема стенда приведена на рис. 2

Экспериментальные исследования проводились в теплоизолированной климатической камере, обеспечивающей поддержание температуры в пределах от 283 до 343 К с точностью $0,2^{\circ}$ С и относительной влажности от 30% до 98%.

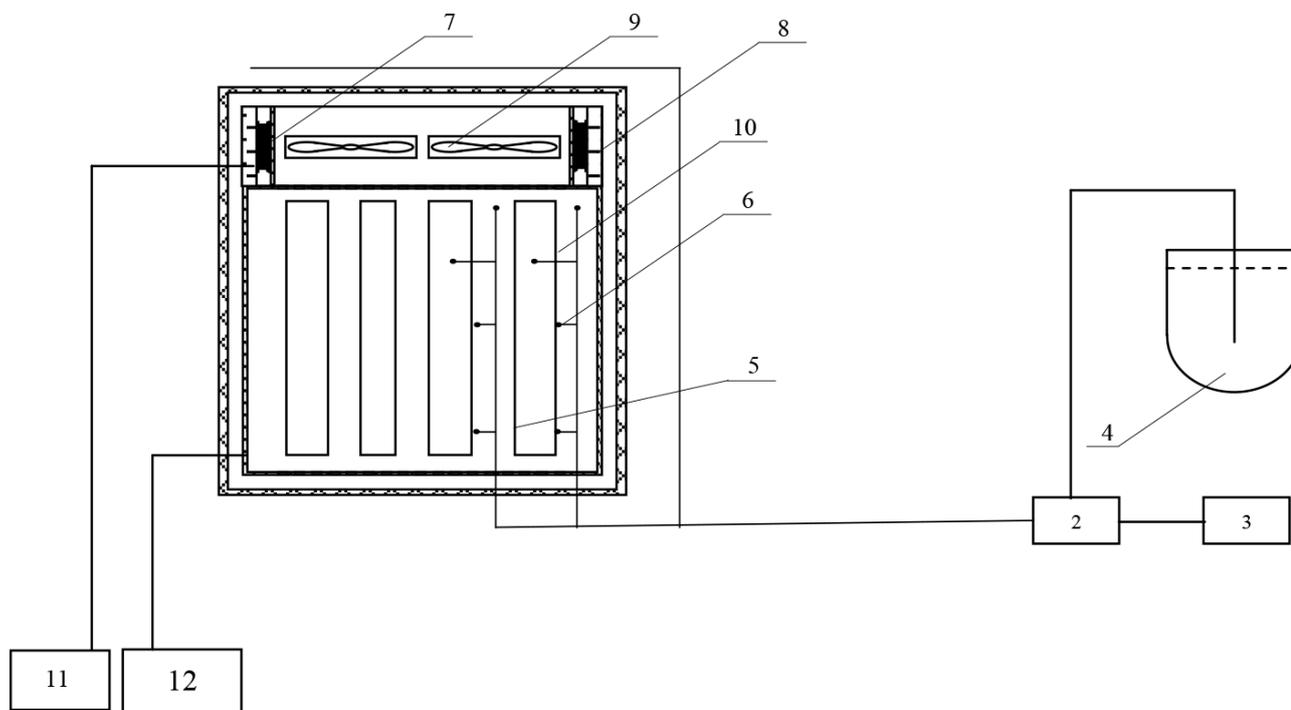


Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда
Fig. 2. The structural diagram of the experimental stand

Заданная температура и относительная влажность в камере регулируются встроенным блоком управления, связанным с датчиком температуры и влажности, показания которого регистрируются цифровым табло.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой ТООУ 7, выполненную из стандартных унифицированных термоэлектрических модулей типа ICE-71. ТООУ устанавливалась на водяной радиатор 8, применяемый для съема тепла с горячих спаев ТООУ. Для принудительного воздушного охлаждения радиатора на холодных спаях термобатареи использовались осевые вентиляторы 9, подводящие и отводящий потоки воздуха. Направленный воздушный поток проходит сквозь радиатор на холодных спаях и охладившись поступал в блок 10 с электронными платами 5. На имитаторе электронной платы 5, в качестве тепловыделяющих элементов применялись плоские нихромовые электронагреватели.

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях замерялись следующие величины: напряжение и ток на ТООУ; температуры на ее спаях; температуры, напряжение и ток на нагревателях, температуры воздуха на входе в блок, и вдоль электронной платы. Температуры на горячей и холодной сторонах ТООУ, а также электронагревателей измерялись медь-константановыми термопарами 6, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 4. Выходные сигналы с термопар через многоканальный переключатель 2 поступали на измерительный комплекс 3. Питание ТООУ осуществлялось от регулируемо-

го источника постоянного тока 11. Ток, проходящий через ТОУ, и напряжение на ней контролировались встроенными в блок питания приборами. Для питания имитаторов тепловой нагрузки (электронагревателей) использовался аналогичный источник постоянного тока 12.

Для исследования опытного образца системы охлаждения проводились измерения температуры в нескольких точках, а именно, на тепловыделяющих элементах, на спаях ТОУ и на радиаторе. Предварительно определялась величина тока и напряжения, соответствующая рассеиваемой мощности электронных элементов в пределах от 10 до 30 Вт.

Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их охлаждении воздушным потоком от параметров ТЭОС. Важным являлось сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими с целью проверки адекватности разработанной ранее математической модели практике. В опыте в качестве имитатора электронной платы использовались электронные модули длиной 30 см, шириной 20 см и толщиной 3 см, содержащая тепловыделяющие элементы с суммарной мощностью тепловыделений 50 Вт, 100 Вт, 150 Вт.

Для регулирования скорости воздушного потока регулировалось напряжение на осевых вентиляторах, установленных на ребрах радиатора холодных спаев термобатареи. На рис. 3-8 представлены результаты экспериментально исследования ТЭО для системы обеспечения теплового режима блока МЭО.

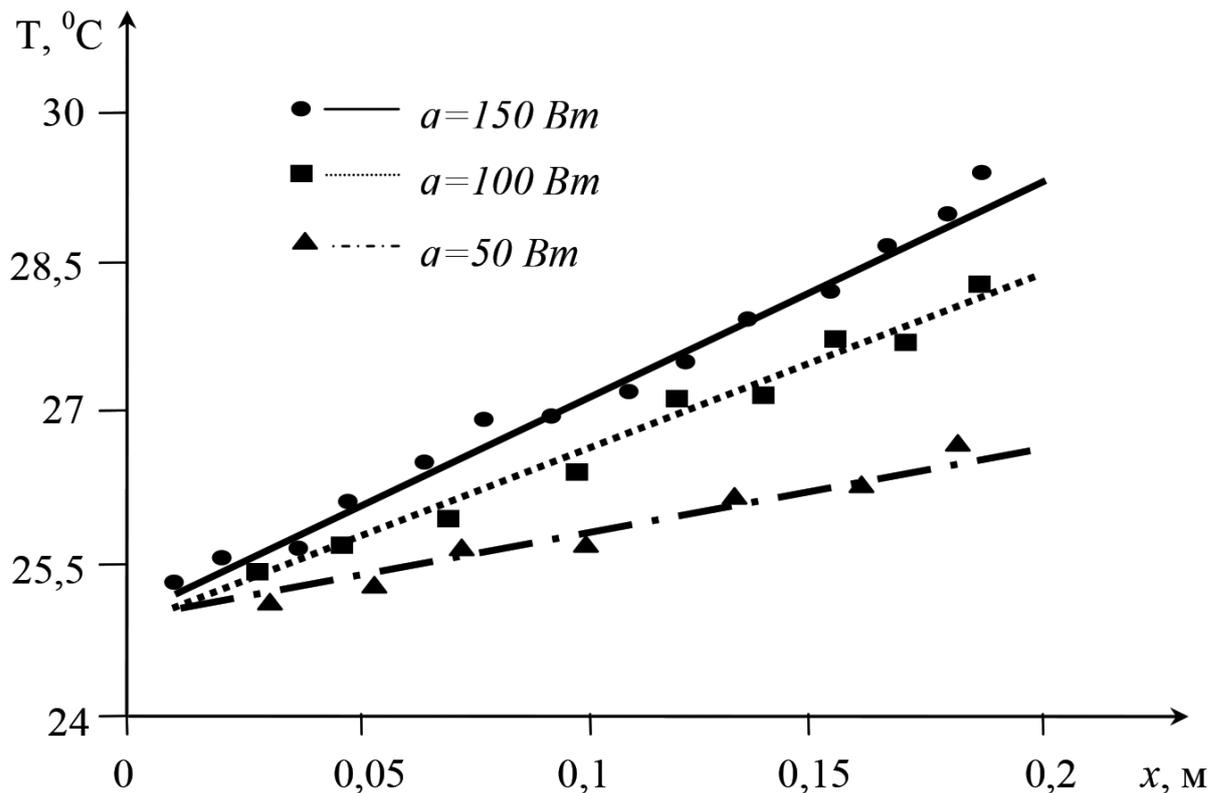


Рис. 3. Распределение температуры вдоль потока воздуха при различных суммарных мощностях источников тепловыделений модуля

▲ ■ ● - экспериментальные данные - experimental data

Fig. 3. Temperature distribution along the air flow at various total capacities of the module heat sources

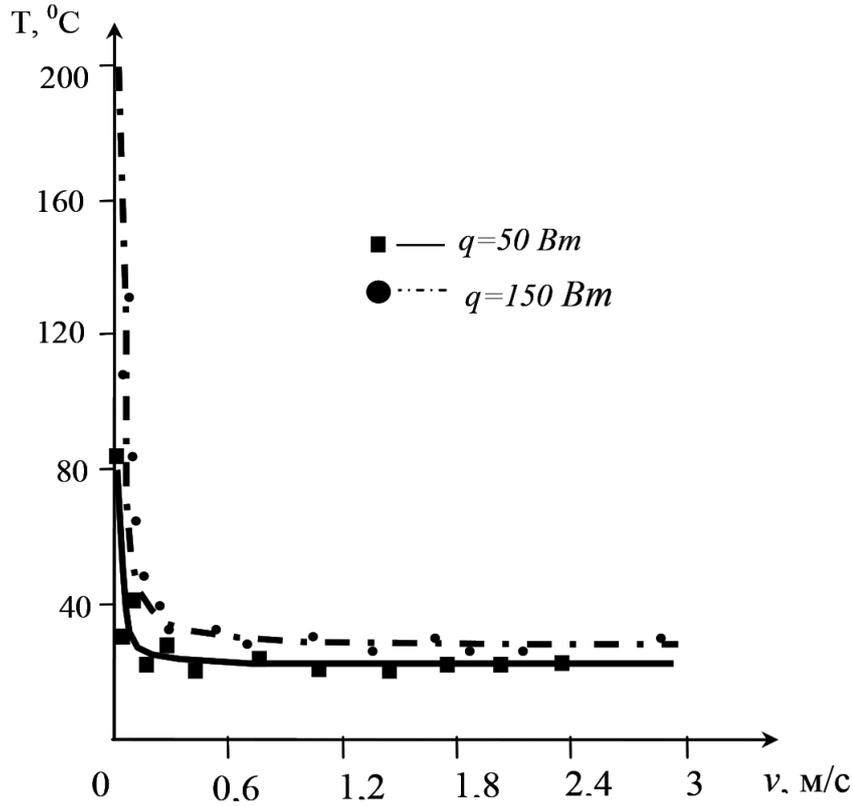


Рис. 4. Зависимости температуры модуля от скорости воздушного потока при различной суммарной мощности источников тепловыделений
■ ●, - экспериментальные данные - experimental data

Fig. 4. Dependences of the temperature of the module on the air flow rate at various total power of heat sources

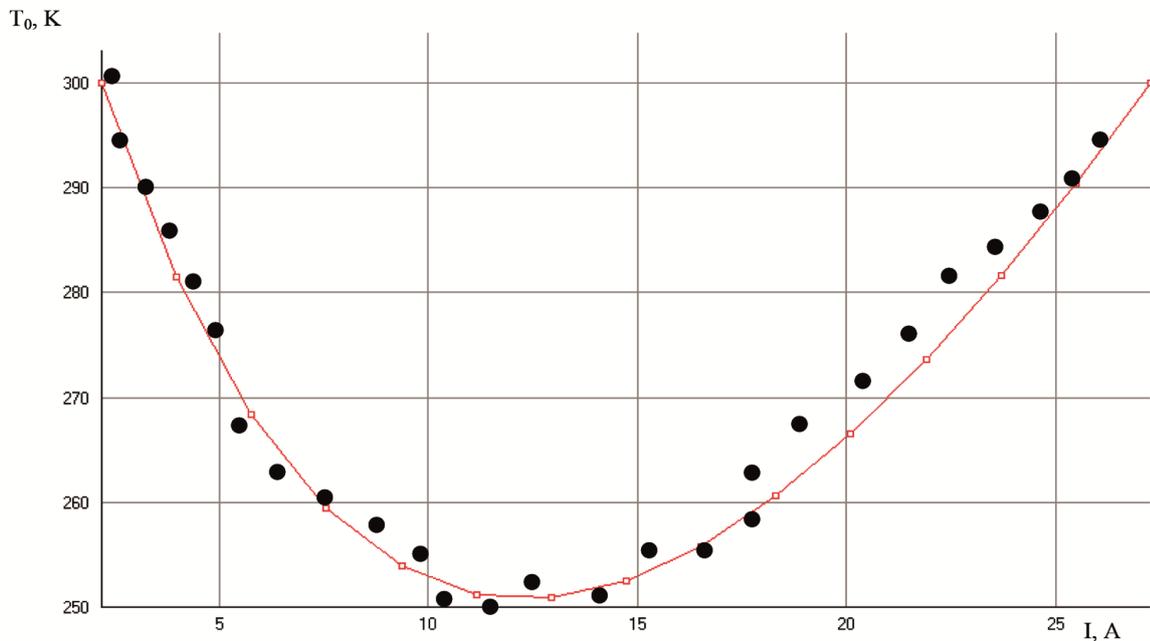


Рис. 5. Зависимость температуры холодного спая T_0 от тока питания при температуре горячего спая $T_g=300 \text{ K}$

● - экспериментальные данные experimental data

Fig. 5. The dependence of the temperature of the cold junction T_0 on the supply current at the temperature of the hot junction $T_g = 300 \text{ K}$

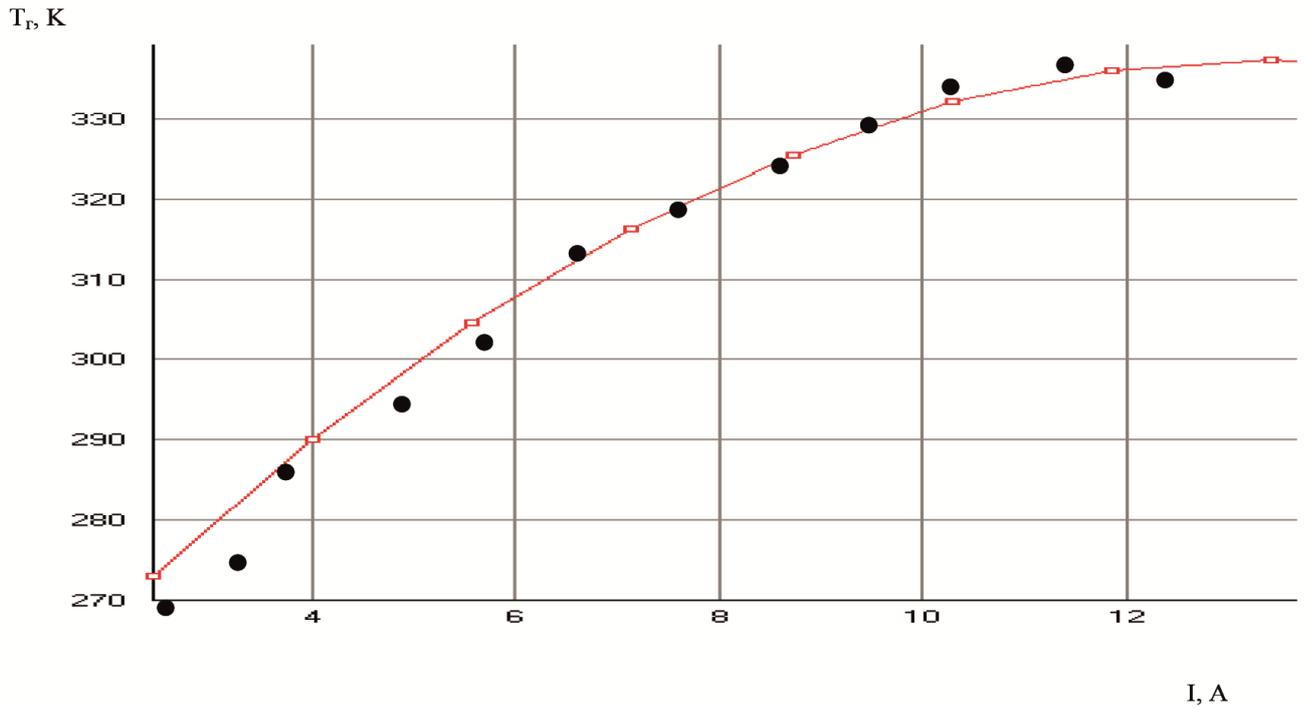


Рис. 6. Зависимость температуры горячего спая T_g от тока питания при тепловой нагрузке 100 Вт
 Fig. 6. The dependence of the temperature of the hot junction T_g from the supply current at a thermal load of 100 W
 ● -экспериментальные данные experimental data

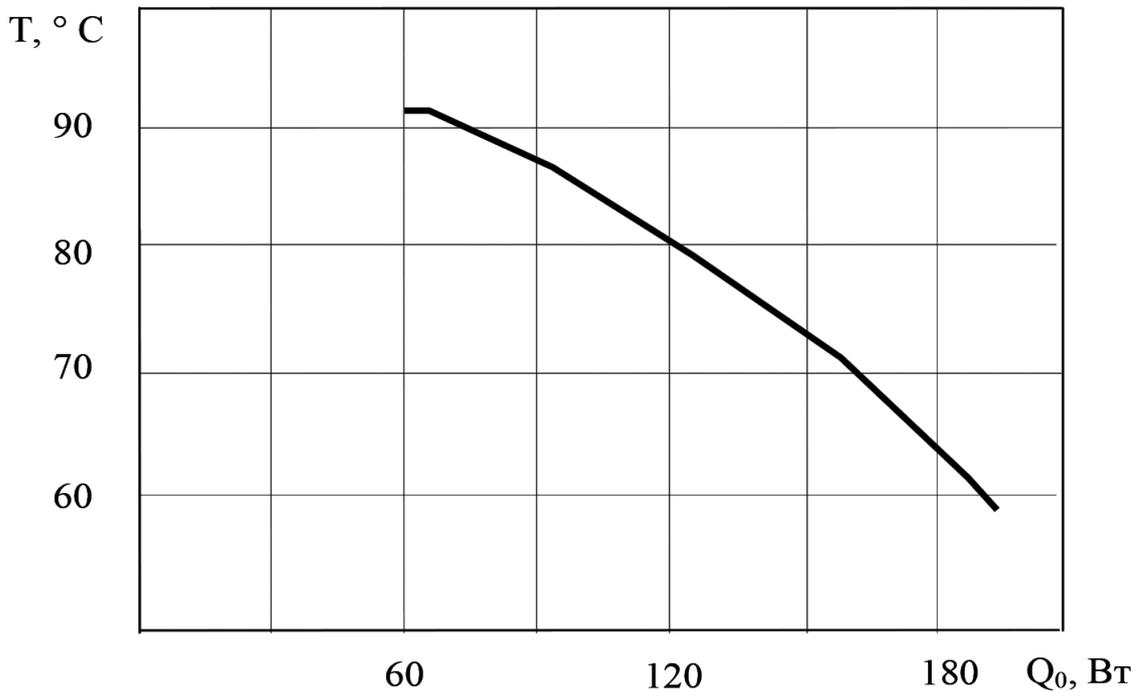


Рис.7. Зависимость температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭО мощности, при мощности тепловых нагрузок 80 Вт
 Fig. 7. The dependence of the temperature on the simulator of the electronic board from the power taken out by the TEO, with a thermal load of 80 W

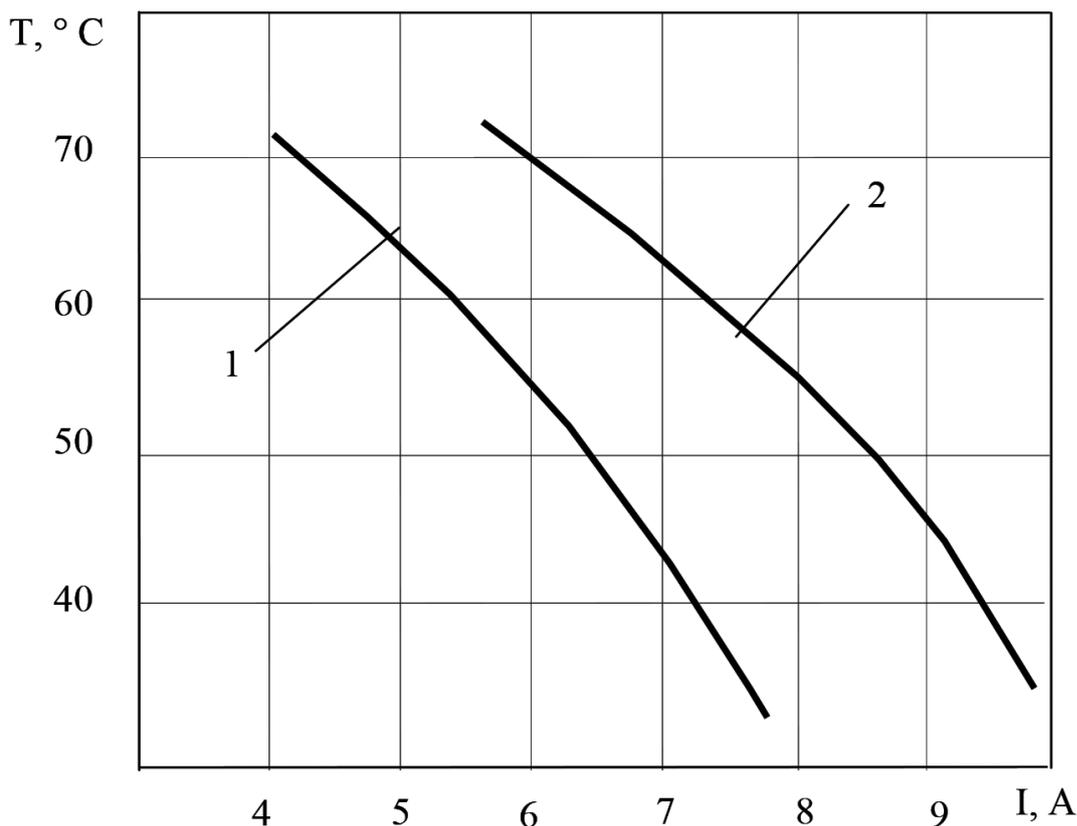


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры на имитаторе от тока, питающего ТЭО: 1 – мощность тепловых источников на плате 50 Вт; 2 – мощность тепловых источников на плате 80 Вт
Fig. 8. The dependence of the maximum temperature on the simulator on the current supplying the feasibility study: 1 - power of heat sources on a board of 50 W; 2 - power of heat sources on the board 80 W

Обсуждение результатов. В процессе проведения исследований также анализировался характер изменения температуры воздушного потока вдоль МЭО. Данный фактор интересен с точки зрения того, что температура воздушного потока неоднородна вдоль обтекаемой плоскости, и на выходе имеет большую температуру. При работе в номинальном режиме электронных элементов данный фактор несущественно влияет на тепловой режим. По результатам полученных графиков, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что изменение температуры потока воздуха вдоль электронного модуля не столь значительно (≈ 3 градуса), однако при работе электронных элементов большой мощности в экстремальных режимах может быть причиной перегрева и соответственно, выхода элемента из строя.

Как показали экспериментальные исследования, увеличение скорости воздушного потока вдоль платы имеет смысл до определенного значения. Как видно из рис. 4 увеличение скорости свыше 0,6 м/с не приводит к дальнейшему существенному снижению температуры поверхности модуля, причем зависимость от суммарной мощности элементов на плате незначительна. Следовательно, отпадает необходимость в использовании высокоскоростных вентиляторов, что понижает их энергопотребление и уровень шума.

Оптимальным током для питания ТЭО (для конкретного типа стандартных термоэлектрических модулей, использованных в системе) для достижения максимального охлаждения, согласно рис.5, является значение в пределах 11-12 А, однако температура горячего спае термоэлектрических модулей при данных токах (рис.6) превышает значение 330 К, что говорит о необходимости обеспечения эффективного теплоотвода с них избыточной теплоты. Кроме того, без стабилизации температуры на горячем спае невозможно обеспечение необходимой холодопроизводительности ТЭО, для снижения температуры на электронной плате.

Согласно рис.7-8 минимальная холодопроизводительность для обеспечения приемлемой для электронных компонентов температуры (60°C) при мощности тепловых нагрузок в 80 Вт составляет более 180 Вт. Однако, требуемая для надежного функционирования электронных элементов температура, обеспечиваемая за счет ТОУ существенно зависит от мощности источника тепловыделений (электронного элемента). Так, экспериментальные исследования (рис.8) показали, приемлемой температуры электронного элемента на плате при более низких мощностях тепловыделения можно обеспечить при токах питания 7-9 А.

Вывод. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения МЭО;
- указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным и достигать температур, необходимых по техническим условиям эксплуатации;
- при выборе вентилятора для обеспечения принудительного циркулирования воздушного потока в системе необходимо учитывать скорость воздушного потока в канале;
- необходимо резервировать мощность источника электропитания для функционирования ТЭОС пропорционально мощности источников тепловыделений.

Кроме того, важным моментом для функционирования ТОУ является обеспечение эффективного отвода теплоты с горячих спаев используемых ТЭМ, однако отсутствие условий для его реализации делает невозможным применение предложенной системы.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. С.-Пб.: Политехника, 2005.
2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств.- Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
4. Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
5. Патент РФ № 2203523 Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Цеханская Т.Э., Салманов Н.Р., Юсуфов Ш.А.
6. Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрын В.П.
7. Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
8. Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. /Абросимов А.И.
9. Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
10. Ханов Г. В. Альтернативный способ охлаждения процессоров в компьютере / Г. В. Ханов, Е. Б. Белкина // Экология и жизнь : сб. ст. XVIII междунар. науч.-практ. конф., апрель 2010 г. / Приволжский Дом знаний [и др.]. – Пенза, 2010. – С. 137–139.
11. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов //Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
12. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфилов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
14. Cleary, M. (2014). Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf .
15. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from *Energy Harvesting Journal*: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
16. Haddad, C., Périllon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to

Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125

17. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
18. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebajadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
19. Hadjstassou, C.; Kyriakides, E.; Georgiou, J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. *Energy Convers. Manag.* 2013, 66, pp.165–172.
20. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoq, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.

References:

1. Ismailov T.A. *Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivifikatory teploperedachi*. S-Pb.: Politekhnik, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. St. Petersburg: Polytechnic, 2005. (In Russ)]
2. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. *Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye*. - Makhachka-la: IPTS DGTU, 2012. – 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Cooling of electronic systems: a training manual. - Makhachka-la: CPI DGTU, 2012. 165 p. (In Russ)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. *Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv*. Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Nezhvedilov T.D. Thermostabilization of microelectronic equipment using semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: CPI DGTU, 2013. 149 p. (In Russ)]
4. Rashidkhanov A.T., Yusufov SH.A. *Sistema obespecheniya teplovogo rezhima shkafa telekommunikatsi-onnogo oborudovaniya* / *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekh-nicheskiye nauki*. 2017; 44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96 [Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. The system for ensuring the thermal regime of the telecommunication equipment cabinet. / *Herald of Daghestan State Technical University. Technical science*. 2017; 44 (2): 87-96. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2017-44-2-87-96 (In Russ)]
5. Patent RF № 2203523 *Shkaf dlya okhlazhdeniya radioelektronnoy apparatury* / Ismailov T.A., Tse-khanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov SH.A. [RF patent No. 2203523 Cabinet for cooling electronic equipment / Ismailov T.A., Tsekhanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov Sh.A. (In Russ)]
6. Patent RF №369860. *Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury* / Voronin G.I., Antonov YU.V., Fedorov V.N., Chizhikov YU.V., Dryn' V.P. [RF patent No. 369860. Equipment cooling device / Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Drin V.P. (In Russ)]
7. Patent RF №1755398 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury*. / Sidorin V.I. [RF patent №1755398 Device for cooling heat-generating equipment. / Sidorin V.I. (In Russ)]
8. Patent RF №1287699 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury*. / Abrosimov A.I. [RF patent No. 1287699 A device for cooling fuel equipment. / Abrosimov A.I. (In Russ)]
9. Patent RF №1595321 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury*. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ulyanov N.A. [RF patent No. 1595321 A device for cooling heat-generating equipment. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., [Maksimova M.A., Ulyanov N.A. (In Russ)]
10. Khanov G. V. *Alternativnyy sposob okhlazhdeniya protsessorov v komp'yutere* / G. V. Khanov, Ye. B. Belkina // *Ekologiya i zhizn'* : sb. st. XVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf., aprel' 2010 g. / Privolzh-skiy Dom znaniy [i dr.]. – Penza, 2010. – С. 137–139. [Khanov, G.V. An alternative method of cooling processors in a computer / G.V. Khanov, E. B. Belkina // *Ecology and life: collection of books. Art. XVIII international scientific-practical Conf., April 2010 / Volga House of Knowledge [et al.]. Penza, 2010 pp. 137–139. (In Russ)]*
11. *Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya* [Tekst]: monografiya / D.A. Kononov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VGTU, 2013. – 222 s. [Development and modeling of microchannel cooling systems [Text]: monograph / D.A. Kononov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VSTU, 2013 . 222 p. (In Russ)]
12. *Proyektirovaniye i ispytaniya okhladiteley silovykh poluprovodnikovyykh priborov* [Tekst] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, YU.A. Fomin, A.S. Savanin // *Pribory i sistemy. Upravleniye, kon-trol', diagnostika*, 2008. – № 3. – S. 41-43. [Design and testing of power semiconductor device coolers [Text] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, Yu.A. Fomin, A.S. Savanin // *Devices and Systems. Management, control, diagnostics*, 2008. No. 3. pp. 41-43. (In Russ)]
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7 (8), 5273-5290. doi: 10.3390 / en7085273
14. Cleary, M. (2014). Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC .: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf

15. Das R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
16. Haddad C., Périlhon C., Danlos A., François M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 50, 1056-1069. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.125
17. Jovovic V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
18. Chen G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebbarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
19. Hadjistassou C.; Kyriakides, E.; Georgiou, J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. *Energy Convers. Manag.* 2013, 66, 165-172.
20. Apertet Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoœur, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.

Сведения об авторах:

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: yshirali@yandex.ru

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

Передков Сергей Алексеевич, аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: peredkov@mail.ru

Саркаров Таджидин Экберович, доктор технических наук, профессор, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: sarkarovta@mail.ru

Митаров Ризван Гаджимирзаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра физики; e-mail: R4616@yandex.ru

Information about authors:

Shirali A. Yusufov, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: yshirali@yandex.ru

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

Sergey A. Peredkov, Post-graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering; e-mail: peredkov@mail.ru

Tadjedin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering; e-mail: sarkarovta@mail.ru

Rizvan G. Mitarov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Physics; e-mail: R4616@yandex.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.09.2019.

Принята в печать 22.10.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.09.2019.

Accepted for publication 22.10.2019.