Для цитирования: О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов, К.А. Магомедова, Э.А. Джабраилова. Математическая модель термоэлектрической полупроводниковой системы для визуализации температурных полей объектов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 28-36. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

For citation: O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov, K.A. Magomedova, E.A. Dzhabrailova. Mathematical model of a thermoelectric semiconductor system for visualizing the temperature fields of objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 28-36. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ

¹О.В. Евдулов, ²Р.А.-М. Магомадов, ¹К.А. Магомедова, ¹Э.А. Джабраилова

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия,

²Грозненский государственный нефтяной технический университет

им. академика М. Д. Миллионщикова,

²364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, д. 100, Россия

Резюме. Цель. Целью научной работы является разработка математической модели термоэлектрической полупроводниковой системы (ТЭС) для визуализации температурных полей объектов и исследование протекающих в ней теплофизических процессов. **Метод.** Разработана ТЭС для визуализации температурных полей плоских объектов с использованием жидкокристаллической пленки. Ее особенностью является повышение точности измерений за счет более точного сопряжения объекта и прибора. Проведено математическое моделирование системы, выполненное на основе решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности с локальными источниками и стоками теплоты по площади жидкокристаллической пленки. **Результат.** Получены графики зависимости: двумерное распределение температуры по поверхности жидкокристаллической пленки при наличии источников и стоков теплоты, изменение холодопроизводительности, холодильного коэффициента, напряжения питания термоэлектрического модуля (ТЭМ) от перепада температур между спаями для различных значений тока питания. **Вывод.** В результате расчетов установлено, что цветовая гамма жидкокристаллической пленки существенно меняется при наличии источников и стоков теплоты по ее поверхности. При предварительной калибровке система позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке. В соответствии с расчетными данными определено, что для обеспечения полноценной работы ТЭС могут быть использованы стандартные ТЭМ марки ICE-71 со следующими рабочими характеристиками: диапазон мощностей - от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К, ток питания - 2÷8 А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт, холодильный коэффициент - от 0,38 до 0,43.

Ключевые слова: температурное поле, визуализация, термоэлектрическая система, математическое моделирование, теплофизические процессы, численный эксперимент

MATHEMATICAL MODEL OF A THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR SYSTEM FOR VISUALIZING THE TEMPERATURE FIELDS OF OBJECTS

¹O.V. Evdulov, ²R. A.-M. Magomadov, ¹K.A. Magomedova, ¹E A. Dzhabrailova

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

²100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 2364051, Russia

Abstract. Objective. The research objective is to develop a mathematical model of a thermoelectric semiconductor system to visualize the temperature fields of objects and study the thermophysical internal processes. **Methods.** A thermoelectric semiconductor system was developed for visualizing the temperature fields of flat objects using a liquid crystal film. Its feature is to increase the accuracy of measurements due to a more accurate coupling of the object and the device. A mathematical simulation of the system was performed based on the solution of a dynamic two-dimensional heat conduction problem with local heat sources and sinks over the area of a liquid crystal film. **Results.** Dependency graphs were obtained for the dependency of two-dimensional temperature distribution over the surface of the liquid crystal film in the presence of heat sources and sinks, the change in the cooling capacity, the cooling ratio, the supply voltage of the thermoelectric module on the temperature difference between the junctions for different values of the supply current. **Conclusion.** As a result of calculations, it was found that the color gamut of a liquid crystal film changed significantly in the presence of heat sources and sinks on its surface. During pre-calibration, the system allows visualization of the object temperature field and determines the value of its temperature at each point. Following the calculated data, it is determined that to ensure the entire operation of the thermoelectric semiconductor system, a standard thermoelectric module ICE-71 can be used with the following specifications: power range – 16 to 35 W with an average temperature difference between the junctions – 55 K, the supply current – $2 \div 8$ A with a power consumption of 40 to 90 W, the cooling ratio is from 0.38 to 0.43.

Keywords: temperature field, visualization, thermoelectric system, mathematical simulation, thermophysical processes, numerical experiment

Введение. В настоящее время важными задачами измерительной техники являются определение и визуализация температурных полей различного рода плоских поверхностей [1,2]. Измерения подобного рода находят применение в машиностроении, энергетике, теплофизическом приборостроении, медицине и т.п.

С использованием визуализации температурного поля объекта может производиться оценка качества изделий и приборов на предмет наличия в их структуре пор, трещин и нежелательных вкраплений, оперативная диагностика состояния пациента на предмет выявления различных заболеваний, оценка качества тепловой изоляции электроэнергетических объектов и т.д. [3-8].

Среди существующих способов визуализации температурных полей на сегодняшний день можно выделить контактную термометрию (определение температурного поля путем непосредственного контакта с объектом), дистанционную инфракрасную термографию (применение инфракрасного термографа), телетермографию (основана на преобразовании инфракрасного излучения тела человека в электрический сигнал, который визуализируется на экране тепловизора), контактную холестерическую термографию (используются оптические свойства холестерических жидких кристаллов) [1,9-11].

Характеризуя каждый из перечисленных методов необходимо отметить их определенные недостатки, такие как: сложность реализации и технического исполнения (контактная термометрия), относительно невысокая точность определения температурного поля и высокая стоимость (телетермография, инфракрасная термография), сложность обеспечения начальной цветовой гаммы жидкокристаллической матрицы (холестерическая термография).

Постановка задачи. В этих условиях актуальным является разработка и исследование новых методов и технических средств, позволяющих с высокой степенью точности и эффективности производить визуализацию температурных полей объектов. В качестве таких технических средств перспективным является совместное использование свойств холестерических жидких кристаллов (далее жидкокристаллических пленок) и термоэлектрических преобразователей энергии, позволяющих с высокой степенью равномерности путем охлаждения, либо нагрева, устанавливать первоначальную цветовую гамму жидкокристаллической матрицы [12].

Целью работы является разработка математической модели ТЭС для визуализации температурных полей объектов и исследование протекающих в ней теплофизических процессов.

Методы исследования. Конструкция ТЭС для визуализации температурных полей объектов изображена на рис.1. Прибор состоит из основания, выполненного из высокотеплопроводного материала (например, меди) в виде рамки 1, на внутренней торцевой поверхности которой закреплена жидкокристаллическая пленка 2. Жидкокристаллическая пленка 2 закреплена на рамке 1 с помощью крепежных приспособлений 3, имеющих возможность перемещаться в вертикальном направлении при оказании на них механического давления (например, за счет шарнирного механизма), таким образом, чтобы она выступала за верх рамки в направлении к поверхности, температурное поле которой подлежит определению и визуализации. На внешней торцевой поверхности рамки 1 по ее периметру с хорошим тепловым контактом рабочей поверхностью установлены ТЭМ 4, опорной поверхностью сопряженные с радиаторами, питаемые электрической энергией от источника постоянного тока (на рис.1 не показан).

Рис.1. Конструкция ТЭС для визуализации температурных полей объектов
Fig. 1. TPP design for visualization of temperature fields of objects

Радиаторы образуют единую радиаторную систему 5, представляющую собой замкнутую поверхность из высокотеплопроводного материала, повторяющую контур рамки 1, со стороны, противоположной размещению ТЭМ 4, имеющую ребрение.

Система работает следующим образом. С помощью ТЭМ 4, находящихся в контакте с рамкой 1 температура жидкокристаллической пленки 2 стабилизируется на определенной температуре так, чтобы вся ее поверхность имела одинаковый цвет. Затем жидкокристаллическая пленка 2 приводится в тепловой контакт с поверхностью, температура которой подлежит визуализации. За счет неравномерности температуры поверхности жидкокристаллическая пленка 2 изменит цвет, причем цветовая картина будет соответствовать температурному полю поверхности. Наличие крепежного приспособления 3, имеющего возможность перемещения в вертикальном направлении, сопровождаемого перемещением в том же направлении жидкокристаллической пленки 2, позволяет визуализировать температурные поля как ровных, так и вогнутых

и выпуклых поверхностей. Радиаторная система 5 предназначена для отвода теплоты и стабилизации температуры опорной поверхности ТЭМ 4.

Для исследования теплофизических процессов, происходящих в ТЭС разработана ее математическая модель. Математическая модель реализована на основе решения задачи определения температурного поля плоской пластины с размещенными по ее поверхности дискретными истоками и стоками теплоты произвольной формы при условии фиксированного теплового потока по ее периметру.

Математическая формулировка этой задачи имеет вид [13]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_{ТЭБ}(x, y) + q_{ср} = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^J q_j(x, y), \quad (2)$$

$$q_j(x, y) = \begin{cases} \frac{Q_j}{S_j} & \text{в области источника энергии} \\ 0 & \text{вне области источника энергии} \end{cases}, \quad (3)$$

$$S_j = \iint_{S_j} S_j(x, y) dx dy, \quad (4)$$

$$q_{ср} = k_{ср}(T - T_{ср}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_{ТЭМ} \text{ по периметру } L, \quad (6)$$

$$T = T_{ср} \text{ при } \tau = 0, \quad (7)$$

где Q_j – мощность j -го истока (стока) теплоты; $q_{ср}$ – поверхностная плотность теплового потока, поступающего из окружающей среды, на объект;

L – кривая, ограничивающая площадь зоны определения температурного поля;

n – нормаль к кривой L , $n = (xh + yg)$;

h, g – единичные вектора,

λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность объекта,

$T_{ср}$ – температура окружающей среды,

$q_{ТЭМ}$ – плотность теплового потока ТЭМ.

Решение системы уравнений (1)-(7) методом конечных элементов позволяет определить температурное поле объекта, а также отследить его изменение во времени.

Связь между значением $q_{ТЭБ}$ и геометрическими, электро- и теплофизическими параметрами ТЭМ, а также питающим током, напряжением и мощностью может быть определена по известным соотношениям, описанным, например в работах Л.И. Анатычука, Т.А. Исмаилова и др. [14-18]

Другим методом определения параметров ТЭМ является применение специальных пакетов прикладных программ фирм – производителей стандартных типов ТЭБ. Нами при расчетах использован пакет прикладных программ Thermoelectric system calculation [19].

Обсуждение результатов. На рис.2 представлены результаты численного эксперимента в виде температурных полей жидкокристаллической пленки индикатора ТЖК608 квадратной формы с ребром 80 мм [20].

В качестве ТЭМ предполагалось использование 4 стандартных модулей типа ICE-71, располагаемых по периметру. В соответствии с расчетами для обеспечения требуемых режимов рабочий диапазон мощностей ТЭМ 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. На рис.2, б имеет место источник теплоты, рис.2, г - сток теплоты и на рис.2, в - источник и сток теплоты одновременно.

Согласно представленным картинам цветовая гамма жидкокристаллической пленки в данных случаях существенно меняется и при предварительной калибровке позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке.

Рис. 2. Картины температурных полей жидкокристаллической пленки
 Fig. 2. Pictures of temperature fields of liquid crystal film

На рис. 3 – 5 представлены зависимости, отражающие основные параметры используемых ТЭМ.

Рис.3. Зависимость холодопроизводительности ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 3. Dependence of the refrigerating capacity of the TEM on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

Рис. 4. Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 4. Dependence of the coefficient of performance of the TEM on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

Рис.5. Зависимость напряжения питания ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 5. Dependence of the TEM supply voltage on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

Представлены графики зависимости: изменение холодопроизводительности, холодильного коэффициента, напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания.

Графики получены при температуре горячего спая ТЭМ 310 К, максимальных значениях $I_{TEMmax}=8,1 A$, $Q_{TEMmax}=82 W$, $U_{TEMmax}=16,4 V$, $\Delta T_{TEMmax}=73 K$, геометрических размерах модуля: длина - 40 мм, ширина - 40 мм, высота - 3,4 мм.

Вывод. В настоящее время в таких областях жизнедеятельности человека, как машиностроение, приборостроение, энергетика, медицина одной из актуальных задач является задача визуализации температурных полей различных объектов.

Решение данной задачи дает возможность повысить эффективность анализа надежности работы разрабатываемой аппаратуры, а в области медицины осуществлять экспресс-диагностику различных заболеваний по аномально высокой или низкой температуре человека. Авторами разработана ТЭС для визуализации температурных полей плоских объектов с использованием жидкокристаллической пленки.

Ее особенностью является повышение точности измерений за счет более точного сопряжения объекта и прибора. Проведено математическое моделирование системы, выполненное на основе решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности с локальными источниками и стоками теплоты по площади жидкокристаллической пленки.

В результате расчетов установлено, что цветовая гамма жидкокристаллической пленки существенно меняется при наличии источников и стоков теплоты по ее поверхности. При предварительной калибровке система позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке. В соответствии с расчетными данными определено, что для обеспечения полноценной работы ТЭС могут быть использованы стандартные ТЭМ марки ICE-71 со следующими рабочими характеристиками: диапазон мощностей - от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К, ток питания - 2÷8 А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт, холодильный коэффициент - от 0,38 до 0,43.

Библиографический список:

1. Атрошенко, Ю.К. Теплотехнические измерения и приборы / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова. Томск: ТПУ, 2014. 151 с.

2. Александров, А.А., Теплотехника / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 880 с.
3. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. 195 с.
4. Корнеев, А.В. Первая медицинская помощь / А.В. Корнеев. Донецк: БАО, 2013. 240 с.
5. 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.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015. 441 p.
7. Яромич, И.В. Скорая и неотложная медицинская помощь / И.В. Яромич. Минск: Вышэйшая школа. 2010. 289 с.
8. Исмаилов, Т.А. Экспериментальный стенд для измерения рабочих характеристик термоэлектрического устройства для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова // Ползуновский вестник. 2010. №2. С. 166-169.
9. Жаркова, Г.М. Оптические методы формирования высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов / Г.М. Жаркова, О.Ю. Подъячева, С.А. Стрельцов // Жидкие кристаллы и их практическое применение. 2015. № 3. С. 91-102.
10. Жаркова, Г. М., Петров А. П., Стрельцов С. А., Хачатурян В. М. Влияние температуры на свойства поляризационных голографических решёток, сформированных в жидкокристаллических композитах / Г.М. Жаркова, А.П. Петров, С.А. Стрельцов, В.М. Хачатурян // Автометрия. 2012. № 4. С. 55-59.
11. Михайлин, Ю.А. Жидкокристаллические полимеры / Ю.А. Михайлин // Полимерные материалы. 2006. №2. С. 24-30.
12. Евдулов, О.В., Магомедова К.А., Миспахов И.Ш. Устройство для определения и визуализации температурных полей плоских объектов / О.В. Евдулов, К.А. Магомедова, И.Ш. Миспахов // Материалы Всероссийской молодежной НПК "Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем". Барнаул: АГТУ. 2018. С.115-117.
13. Анатычук, Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.
14. Исмаилов, Т.А. Охлаждающие системы на базе высокоэффективных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомедов. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
15. Nagase, K. Development of durability testing for thermoelectric power generation module / K. Nagase, A. Yamamoto // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. №3. pp.1347-1364.
16. Rowe, D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization / D.M. Rowe. BocaRaton: CRC Press. 2012. 567 p.
17. Goldsmid, H.J. Introduction to thermoelectricity / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2010. 121 p.
18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2013. 240 p.
19. <http://www.kryotherm.spb.ru> (дата доступа 18.01.2021 г.).
20. <https://www.yalosindicator.com> (дата доступа 18.01.2021 г.).

References:

1. Atroshenko, YU.K. Teplotekhnicheskiye izmereniya i pribory / YU.K. Atroshenko, Ye.V. Ivanova. Tomsk: TPU, 2014. 151 s. [Atroshenko, Yu.K. Heat engineering measurements and devices / Yu.K. Atroshenko, E.V. Ivanova. Tomsk: TPU, 2014.151 p. (In Russ)]
2. Aleksandrov, A.A., Teplotekhnika / A.A. Aleksandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [i dr.]. M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 880 s [Aleksandrov, A.A., Heat engineering / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [and others]. M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017.880 p. (In Russ)]
3. Dul'nev, G.N. Teoriya teplo- i massoobmena / G.N. Dul'nev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 s. [Dulnev, G.N. Theory of heat and mass transfer / G.N. Dulnev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012.195 p. (In Russ)]
4. Korneev, A.V. First aid / A.V. Korneev. Donetsk: BAO, 2013.240 p.
5. 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.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015.441 p.
7. Yaromich, I.V. Ambulance and emergency medical care / I.V. Yaromich. Minsk: High school. 2010.289 s.
8. Ismailov, T.A. Eksperimental'nyy stend dlya izmereniya rabochikh kharakteristik termoelektricheskogo ustroystva dlya lokal'nogo zamorazhivaniya tkaney gortani / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova // Polzunovskiy vestnik. 2010. №2. S. 166-169. [Ismailov, T.A. Experimental stand for measuring the performance characteristics of a thermoelectric device for local freezing of laryngeal tissues / T.A. Ismailov, O. V. Evdulov, T.A. Ragimova // Polzunovsky Bulletin. 2010. No. 2. pp. 166-169. (In Russ)]
9. Zharkova, G.M. Opticheskiye metody formirovaniya vysokostrukturirovannykh polimerno-zhidkokristallicheskiy kompozitov / G.M. Zharkova, O.YU. Pod'yacheva, S.A. Strel'tsov // Zhidkiye kristally i ikh prakticheskoye primeneniye. 2015. № 3. S. 91-102. 1 [Zharkova, G.M. Optical methods for the formation of highly structured polymer-liquid crystal composites / G.M. Zharkova, O. Yu. Podyacheva, S.A. Strel'tsov // Liquid crystals and their practical application. 2015. No. 3. pp. 91-102. (In Russ)]

10. Zharkova, G. M., Petrov A. P., Strel'tsov S. A., Khachatryan V. M. Vliyaniye temperatury na svoystva polyarizatsionnykh golograficheskikh reshotok, sformirovannykh v zhidkokristallicheskiy kompozitakh / G.M. Zharkova, A.P. Petrov, S.A. Strel'tsov, V.M. Khachatryan // Avtometriya. 2012. № 4. S. 55-59. [Zharkova, GM, Petrov AP, Strel'tsov SA, Khachatryan VM Influence of temperature on the properties of polarization holographic gratings formed in liquid crystal composites. Zharkov, A.P. Petrov, S.A. Strel'tsov, V.M. Khachaturian // Autometry. 2012. No. 4. pp. 55-59. (In Russ)]
11. Mikhaylin, YU.A. Zhidkokristallicheskiye polimery / YU.A. Mikhaylin // Polimernyye materialy. 2006. №2. S. 24-30. [Mikhailin, Yu.A. Liquid crystal polymers / Yu.A. Mikhailin // Polymer materials. 2006. No. 2. pp. 24-30. (In Russ)]
12. Yevdulov, O.V., Magomedova K.A., Mispakhov I.SH. Ustroystvo dlya opredeleniya i vizualizatsii temperaturnykh poley ploskikh ob"yektov / O.V. Yevdulov, K.A. Magomedova, I.SH. Mispakhov // Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy NPK "Programmno-tekhnicheskoye obespecheniye avtomatizirovannykh sistem". Barnaul: AGTU. 2018. S.115-117. [Yevdulov, O.V., Magomedova K.A., Mispakhov I.Sh. Device for determination and visualization of temperature fields of flat objects / O.V. Yevdulov, K.A. Magomedova, I. Sh. Mispakhov // Materials of the All-Russian Youth Research and Production Complex "Software and hardware support of automated systems". Barnaul: AGTU. 2018. pp.115-117. (In Russ)]
13. Anatyshchuk, L.I. Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters / L.I. Anatyshchuk. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003.376 p.
14. Ismailov, T.A. Okhlazhdayushchiye sistemy na baze sil'notochnykh termoelektricheskikh poluprovodnikovyykh preobrazovateley / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, R.A.-M. Magomadov. SPb.: Politehnika, 2020. 285 s. [Ismailov, T.A. Cooling systems based on high-current thermoelectric semiconductor converters / T.A. Ismailov, O. V. Yevdulov, R.A.-M. Magomadov. Saint Petersburg: Polytechnic, 2020.285 p. (In Russ)]
15. Nagase, K. Development of durability testing for thermoelectric power generation module / K. Nagase, A. Yamamoto // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. No. 3. pp. 1347-1364.
16. Rowe, D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization / D.M. Rowe. BocaRaton: CRC Press. 2012.567 p.
17. Goldsmid, H.J. Introduction to thermoelectricity / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2010.121 p.
18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2013.240 p.
- 19.<http://www.kryotherm.spb.ru> (accessed 01/18/2021).
- 20.<https://www.yalosindicator.com> (accessed 01/18/2021).

Сведения об авторах:

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

Магоматов Рустам Абу-Муслимович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электропривода, e-mail: rustmag_80@mail.ru

Магомедова Кумсият Ахмедулбадавиевна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: nice.kumsiyat@mail.ru.

Джабраилова Эльмира Асадулаевна. аспирант кафедры теоретической и общей электротехник, e-mail: abdura-shidova-e@mail.ru.

Information about the authors:

Oleg V.Evdulov, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru.

Rustam A. Magomadov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Electrical Engineering and Electric Drive, e-mail: rustmag_80@mail.ru

Kumsiyat A.Magomedova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: nice.kumsiyat@mail.ru.

Elmira A.Dzhabrailova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: abdurashidova-e@mail.ru.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.12.2020.

Принята в печать 12.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.12.2020.

Accepted for publication 12.01.2021.