

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Муслимов Э.М., Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИБОРОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПИТАНИЯ В СОСТАВЕ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ БЛОКОВ. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;42 (3):64-72. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-64-72

For citation: Ismailov T. A., Muslimov E. M., Rashidkhanov A. T., Yusufov Sh. A. ENSURING THERMAL REGIME FOR THE SUPPLY DISTRIBUTED DEVICES IN THE COMPOSITION OF THE SHIP'S SECONDARY POWER SUPPLY SYSTEMS ON THE BASE OF THE STANDARDIZED UNITS. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42 (3):64-72. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-64-72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-64-72

Исмаилов Т.А.¹, Муслимов Э.М.², Рашидханов А.Т.⁴, Юсуфов Ш.А.³
^{1,3,4}Дагестанский государственный технический университет,
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,

¹e-mail: dstu@dstu.ru,

³e-mail: yshirali@yandex.ru,

⁴e-mail: karlson_boy@mail.ru,

²Каспийский завод точной механики, г. Каспийск ул. Хизроева, 24,
e-mail: emin51@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИБОРОВ
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПИТАНИЯ В СОСТАВЕ КОРАБЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА БАЗЕ
УНИФИЦИРОВАННЫХ БЛОКОВ

Аннотация. Цель. В статье рассматривается построение приборов электропитания в составе корабельных систем вторичного электропитания на базе унифицированных блоков и обеспечение их теплового режима. **Методы.** Определено, что с появлением современных многофункциональных компонентов силовой электроники у разработчиков систем вторичного электропитания появились возможности улучшения качества вторичного электропитания и модернизации существующих систем. **Результат.** Выявлены достоинства унифицированных блоков электропитания, обладающих функцией параллельной работы. Проведен анализ процессов теплообмена в вертикальном канале со свободной конвекцией и расчет минимальной ширины канала, при которой обеспечивается эффективный отвод теплоты. **Вывод.** Предложена модель для определения минимального расстояния между блоками без ухудшения теплообмена в канале, образованном стенками соседних блоков.

Ключевые слова: тепловой режим, унифицированный блок электропитания, свободная конвекция, герметичный блок

Tagir A.¹ Ismailov, Emin M.² Muslimov, Arip T.⁴ Rashidkhanov, Shirali A.³ Yusufov

^{1,3,4}Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave, Makhachkala, 367015,

¹e-mail: dstu@dstu.ru,

³e-mail: yshirali@yandex.ru,

⁴e-mail: karlson_boy@mail.ru,

Caspian float plant of precision mechanics, 24 Khizroeva, street, Kaspiysk,
²e-mail: emin51@mail.ru

ENSURING THERMAL REGIME FOR THE SUPPLY DISTRIBUTED DEVICES IN THE COMPOSITION OF THE SHIP'S SECONDARY POWER SUPPLY SYSTEMS ON THE BASE OF THE STANDARDIZED UNITS

Abstract. Aim. The article deals with the problem of constructing the power supply devices in the composition of the ship's secondary power systems based on standardized blocks and securing their thermal regime. **Methods.** It is stated that with the advent of modern power electronics multifunctional components the secondary power supply developers got possibilities to improve the quality of secondary power supply and to upgrade the existing systems. **Results.** The advantages of unified power units, having a function of parallel operation are revealed. Heat transfer processes in a vertical channel with free convection, and the calculation of the minimum width of the channel, which provides efficient heat removal have been analyzed. **Conclusion.** A model is proposed for determining the minimum distance between the blocks without deterioration of heat transfer in the channel formed by the walls of adjacent blocks.

Key words: Thermal regime, unified power supply unit, free convection, sealed unit

Введение. К современным судовым системам автоматики и вычислительным комплексам предъявляется ряд требований, важнейшие из которых определяются статическими, динамическими и массогабаритными показателями, от которых зависит их энергопотребление. Радиоэлектронная аппаратура на большинстве судов и кораблей получает питание не от основной электростанции, а от специальных преобразователей электроэнергии [1]. Основные причины такого технического решения две:

- первая заключается в том, что параметры электроэнергии для питания радиоэлектронных систем отличаются от стандартных параметров силовой электрической сети корабля;
- вторая причина состоит в том, что РЭА является нелинейным потребителем и потому искажает форму кривой напряжения.

Постановка задачи. В современных условиях, усложнение задач, решаемых усовершенствованными средствами военно-морского радиоэлектронного вооружения с помощью электронной и вычислительной техники, ставит перед разработчиками систем вторичного электропитания ряд проблем: повышения качества электрической энергии для потребителей; обеспечения требований: надежности; контроля входных и выходных параметров; диагностики; повышения стабильности выходного напряжения источников вторичного электропитания; снижения объема и веса устройств преобразования электрической энергии; обеспечения непрерывности питающей электроэнергии при аварийной ситуациях; защиты систем вторичного электропитания или приборов, входящих в нее, от импульсных коммутационных помех (ИКП), проникающих по питающим сетям, и т.д.

Существующие системы вторичного электропитания в той или иной степени решают эти задачи, однако, с появлением современных многофункциональных компонентов силовой электроники, у разработчиков систем вторичного электропитания появились новые возможности улучшения качества вторичного электропитания и модернизации существующих систем.

Как правило, корабельные системы вторичного электропитания (СВЭП) должны получать электроэнергию как минимум от двух источников (от двух бортовых сетей - основной и резервной) и отличаться более широким диапазоном входных напряжений, устойчивостью к воздействиям импульсных коммутационных перенапряжений с гораздо большей энергией и временем воздействия (амплитудой до 1 кВ и продолжительностью до 5 мсек), большой перегрузочной способностью и высокой точностью поддержания выходных параметров.

Приборы (модули, блоки), входящие в состав корабельных вторичных источников питания должны выдавать в систему управления верхнего уровня большее, в сравнении с общепромышленными вторичными источниками питания, количество сервисных сигналов [9,10,11,12,13].

В последние годы наметилась тенденция включения в функциональную схему таких приборов устройства (блоки, модули) контроля сопротивления изоляции выходных фидеров.

На российском рынке появились унифицированные блоки электропитания (УБЭП) как зарубежного, так и отечественного производства, которые позиционируются для применения в высоконадежных системах.

Методы исследования. Особый интерес в унифицированных УБЭП при построении приборов электропитания представляют функция параллельной работы. Достоинствами УБЭП, обладающих функцией параллельной работы являются:

- возможность построения отказоустойчивой системы по принципу N+M;
- возможность наращивания выходной мощности;
- возможность получения низкопрофильной конструкции в системах большой мощности;
- распределение мощности потерь блоков по большей поверхности радиатора, уменьшение локального перегрева;
- сокращение количества типоминиалов блоков электропитания, увеличение числа однотипных изделий и, как следствие, снижение их цены.

Однако в целом к приборам в составе корабельной системы вторичного электропитания предъявляются жёсткие требования к габаритным размерам, допустимому тепловыделению, способу охлаждения, механической прочности. Так в большинстве случаев для выполнения требований объекта по уровню шумов, надежности и санитарных норм, корабельные вторичные источники питания должны иметь естественное воздушное охлаждение. Зачастую корабельные вторичные источники питания выполняются в влагозащищённом исполнении (степень защиты IP24).

Разрабатываемые в нашей стране и за рубежом источники вторичного электропитания (ИБЭП) большей частью имеют кубическую форму. Примеры подобного конструирования достаточно наглядно отражены, например, в работах [2,3,4].

При создании конструкции приборов электропитания и приборов преобразования напряжения на основе УБЭП необходимо учесть следующие факторы:

- многоканальность, модульность и резервирование блоков УБЭП для обеспечения требования высокой надежности и безотказности работы прибора;
- обслуживание прибора с лицевой стороны и легкий доступ к блокам УБЭП для замены в случае выхода одного из блоков в аварийный режим;
- расположение средств отображения информации на лицевой панели или обеспечение их обзора через переднюю панель;
- эффективная работа выбранной системы обеспечения теплового режима прибора, в данном случае, естественное воздушное охлаждение;
- обеспечение тепловой безопасности обслуживающего персонала в процессе технического обслуживания;
- пожаробезопасность прибора, обеспечиваемая защитой электрических цепей от перегрузки и коротких замыканий, выбором безопасных расстояний между токоведущими частями и применением негорючих и малогорючих материалов, веществ и покрытий в соответствии с ООП5 Р.9025-93;
- обеспечение безопасности при проведении техобслуживания, регламентных работ, чистки корпусов, замене предохранителей;
- максимальное использование стандартизированных и унифицированных элементов, узлов и устройств отечественного производства.

Конструктивные и массогабаритные характеристики приборов электропитания зависят от аналогичных параметров примененных блоков УБЭП, коммутирующих изделий, а также от примененной системы охлаждения [14,15,16,17].

Количество блоков УБКИ в каждом из приборов зависит от числа одновременно отслеживаемых шин на целостность изоляции блоком УБКИ и числа выходных шин прибора. При необходимости, в блоке коммутации прибора ПРЗ можно применить как механические переключатели, так и дистанционно управляемые пускатели.

С учетом большого числа устанавливаемых в приборы блоков УБЭП, следовательно, достаточно жестких требований по отводу тепла, наиболее оптимальным конструктивным вари-

антом исполнения приборов является реализация на базе унифицированных несущих конструкций 2-го уровня БНК2. На нижней панели размещаются силовые и информационные электрические разъемы.

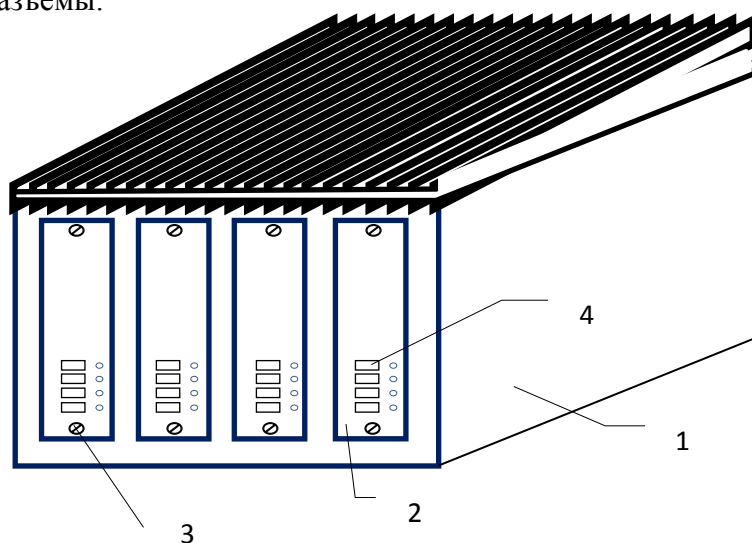


Рисунок 1- Вариант конструктивного исполнения прибора электропитания

1- корпус прибора, 2- унифицированный блок электропитания, 3- элементы крепления унифицированного блока, 4- элементы управления и индикации

Схематично прибор представлен на рисунке 1. Прибор разделен алюминиевыми перегородками на отсеки, количество которых определяется количеством каналов, и количеством блоков, устанавливаемых в прибор.

В частности, при двух каналах и резервировании по схеме «1+1» прибор будет разделен на 4 отсека, плюс отсек для блока УБКИ. Верхняя крышка прибора будет выполнять роль радиатора для сброса теплоты, выделяемой полупроводниковыми приборами в процессе работы, в окружающее пространство и выполняется из алюминия.

С лицевой стороны прибора унифицированные блоки УБЭП 2 по направляющим вставляются в отсеки прибора 1.

Корпус прибора выполнен в виде кубической формы, соотношение сторон которого будет определяться массогабаритными характеристиками УБЭП и количеством выходных каналов. В данном варианте ориентация блоков УБЭП в корпусе будет вертикальной, блоки располагаются параллельно друг другу по стороне большей площади. Предполагается, что электрические информационные и силовые разъемы УБЭП располагаются на тыльной стороне блока, следовательно, ответные части соединителей будут располагаться на задней панели прибора.

В случае наличия на передних панелях блоков УБЭП информативных индикаторов будет обеспечен их обзор через переднюю панель (крышку). С учетом того, что возможно использование только естественного воздушного охлаждения, для обеспечения теплового режима прибора необходимо создание каналов между плоскостями УБЭП для снятия избыточной теплоты и передачи ее в окружающую среду посредством рассеивающего радиатора. При этом, для корабельных систем вторичного электропитания необходимо выполнение условий брызго- и влагозащищенности, что требует применения герметичной конструкции прибора.

Таким образом, важен анализ процессов теплообмена в вертикальном канале со свободной конвекцией, так как именно эти процессы будут определять тепловой режим прибора в целом и с целью минимизации габаритных показателей необходим расчет минимальной ширины канала, при которой обеспечивается эффективный отвод теплоты [5,6,7,8].

Обсуждение результатов. Исследованию процессов теплообмена в герметичных блоках, и в частности, в вертикальных каналах, при свободной конвекции посвящено множество работ, однако актуальны и на сегодняшнем этапе развития техники, о чем свидетельствует обзор современных публикаций [4-17]. Однако в указанных работах не учитывается изменение

температуры воздуха вдоль канала, что вносит погрешность в расчет теплового режима на этапе проектирования.

Рассмотрим плоский вертикальный канал, состоящий из двух вертикально расположенных плоскостей (стенки канала). На стенках канала реализуется граничное условие второго рода ($q_w = \text{const}$). При малой ширине стенки канала оказывают друг на друга взаимное влияние, что связано с формированием термодинамических пограничных слоев (рис.2). Указанный недостаток можно устранить, заменив определяющий размер и оценивая влияние стенок канала через высоту стенок L и критерий Релея Ra [18]. В зависимости от ширины канала возможны следующие случаи: рис.2а - теплоотдача как в свободном пространстве, так как пограничные слои не смыкаются; рис.2б - конвекция в канале в случае смыкания пограничных слоев в верхней части канала; рис.2в - конвекция в узком вертикальном канале, когда пограничные слои смыкаются в средней части канала.

В [18] имеются теоретические значения толщин температурного пограничного слоя, рассчитанные по классической теории пограничных слоев [19], при движении воздуха в плоском вертикальном канале. При этом δ - толщина пограничного слоя, рассчитывались либо до смыкания пограничных слоев в канале, либо для верхнего края пластин. Отсюда видно как влияют пластины друг на друга. Так, при расстоянии между пластинами $\delta = 10$ мм - однозначное взаимное влияние, а при δ более 40 мм - его полное отсутствие. Выражение (1) позволяет рассчитать коэффициент теплообмена, в плоском канале, однако не позволяет дать рекомендации по выбору минимального значения δ , на котором теплообмен будет также эффективен, как и при неограниченной пластине.

$$Nu_{\delta} = \frac{1}{24} \frac{\delta}{L} Ra_{\delta} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{32,7L}{\delta Ra_{\delta}} \right)^{\frac{3}{4}} \right) \right], \quad (1)$$

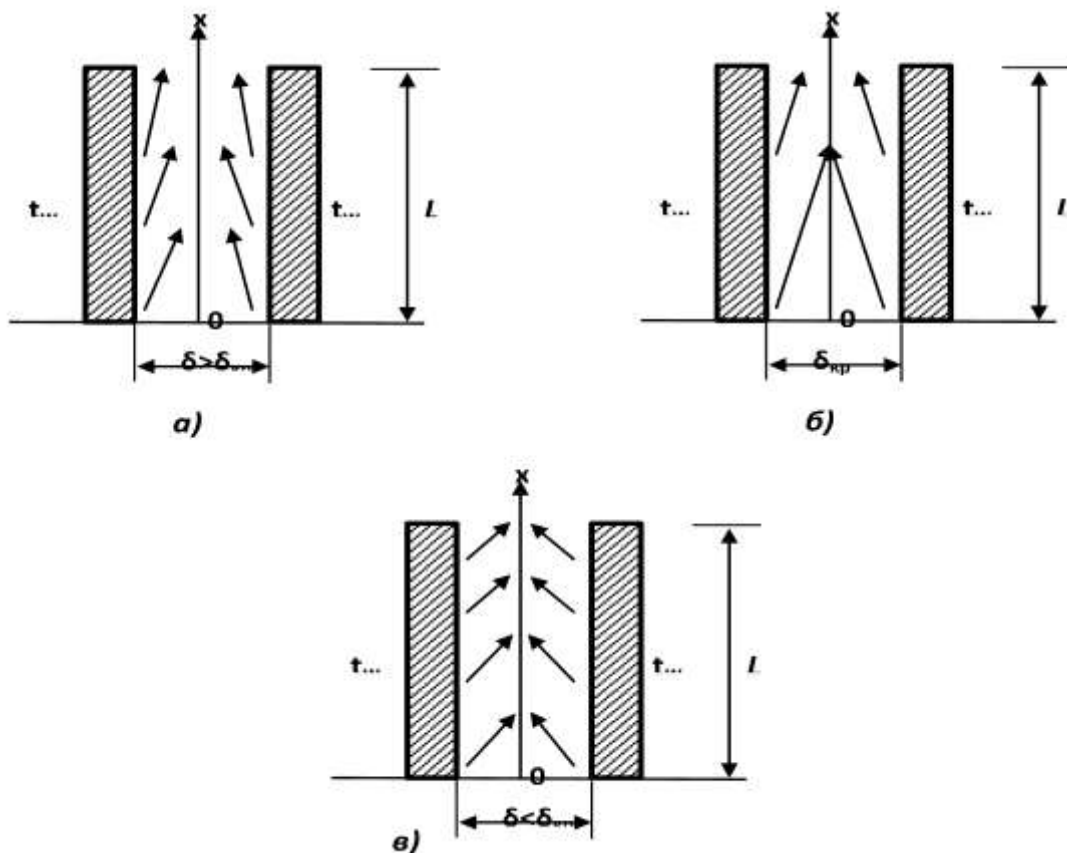


Рисунок 2 - Модели теплообмена в плоском вертикальном канале

В выражении (1) определяющий размер δ заменяется определяющим размером L , и, вследствие:

$$Nu_L = Nu_\delta \frac{L}{\delta}, \quad (2)$$

$$Ra_L = Ra_\delta \frac{L^3}{\delta^3}, \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) выражение (1) запишется в виде:

$$Nu_\delta = \frac{1}{24} Ra_L \frac{\delta^3}{L^3} \left[1 - \exp \left(- \frac{13,67 L^3}{Ra_L^{\frac{3}{4}} \delta^3} \right) \right] \quad (4)$$

Выполнив предельный переход $\delta \rightarrow \infty$, получим:

$$Nu_L = 0,57 Ra_L^{0,25} \quad (5)$$

Выражение (5) соответствует формуле для теплообмена пластины в свободном пространстве, приведенного в [20], что подтверждает ее применимость для пластин при различных δ , включая случай, когда взаимное влияние не играет определяющую роль.

Графическая зависимость Nu_L от Ra_L при различных отношениях δ/L приведена на рисунке 3, где кривые 1,2,3,4,5 – значения критерия Nu при различных мощностях тепловыделений на стенках канала, кривая 6 – граница зоны отсутствия взаимного влияния, выше которой теплообмен стенки со средой в канале происходит как в неограниченной пластине. Кривая 6 получена исходя из формулы:

$$\frac{\delta}{L} = 4,5 Ra_L^{-0,25} \quad (6)$$

С учетом требований к тепловому режиму УБЭП и их размерам можно сформулировать рекомендации по выбору расстояния между блоками δ :

$$\delta \geq 0,04 L \quad (7)$$

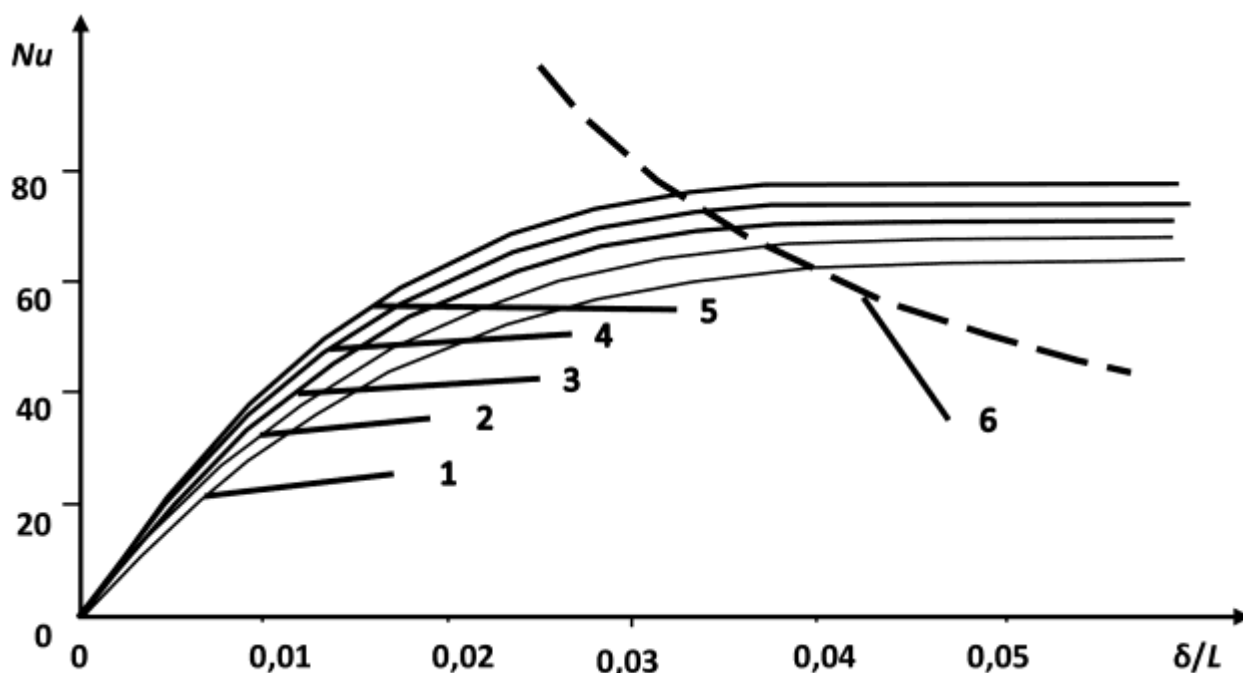


Рисунок 3 - Зависимость Nu_L от Ra_L при различных отношениях δ/L

Кривые 1-5 получены по формуле (4) при однозначных условиях среды и геометрических размеров.

Вывод. Из полученных зависимостей видно, что при малых отношениях δ/L стенки канала оказывают существенное влияние друг на друга, что может привести при различных режимах работы блоков к их взаимному влиянию на тепловые режимы соседних блоков. С уве-

личением отношения δ/L взаимное влияние уменьшается, и теплоотдача от стенок канала увеличивается.

Стабилизация критерия Нуссельта показывает снижение влияния стенок канала. Исходя из данных зависимостей возможно определение минимального значения δ при заданной высоте блока.

Библиографический список:

1. Саркис Э., Иосиф М. Проблемы разработки и выбора унифицированных узлов и блоков вторичного электропитания для РЭА морского флота // Силовая электроника, 2012, №3-С.15-25, №4 - С.40-46.
2. Чанов Л. Источники питания из готовых компонентов и модулей // Электронные компоненты. 2006. - № 2- С. 39-44.
3. Цейтин А. Отечественные источники питания нового поколения // Электронные компоненты. 2008. - № 8 - С. 132-133.
4. Shalumov A.S., Kulikov O.E. Analysis and maintenance methodology efficiency of shielding of designs of electronic equipment on the basis of numerical modelling of electromagnetic processes. *European journal of natural history*. 2013, no 5, pp.23- 24.
5. Shalumov E., Pershin A., Korkin V., Accelerated Simulation of Thermal and Mechanical Reliability of Electronic Devices and Circuits. Example of an integrated circuit simulation in ASONIKA-M-3D. *Dinamika slozhnykh sistem*. 2013, no.5, pp.59-67.
6. Shalumov, E. Pershin. Accelerated Simulation of Thermal and Mechanical Reliability of Electronic Devices and Circuits. *Moscow: Printing by PrintLETO.ru*, 2013, 128 p.
7. Drofenik U. Analysis of Theoretical Limits of Forced-Air Cooling Using Advanced Composite Materials With High Thermal Conductivities U. Drofenik, A. Stupar, J.W. Kolar. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*. 2011, vol.1, no.4, pp.528–535.
8. Гапоненко Н.П., Сиротюк О.В., Огренич Е.В., Лопатка Ю.А., Арешкин Е.К. Оптимизация объема герметичных блоков радиоэлектронной аппаратуры / // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. –Т. 11, № 3. – С. 155–158.
9. Fabbri M., Dhir V., Optimized heat transfer for high power electronic cooling using arrays of microjets. *J. of Heat Transfer*, vol. 127, pp. 760-769.
10. Pan P., Webb B. W. Heat transfer characteristics of arrays of free-surface liquid Jets. *J. of Heat Transfer*, vol. 117, pp.878-883.
11. Lin L. Ponnappan R. Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp.3737–3746.
12. Yonglu Liu. Experimental research on a honeycomb microchannel cooling system. Yonglu Liu, Xiaobing Luo, Wei Liu. *Transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2011, vol.1, no.9, pp.1378 –1986.
13. Fu Yifeng. A complete carbon-nanotube-based on-chip cooling solution with very high heat dissipation capacity. Yifeng Fu, Nabi Nabiollahi, Teng Wang, Shun Wang, Zhili Hu, Björn-Carlberg, Yan Zhang, Xiaojing Wang, Johan Liu. *Nanotechnology*. 2012, vol. 23, no.4.
14. Кораблев В.А., Павлова А.Д. Свободно-конвективное охлаждение радиоэлектронной аппаратуры, сконфигурованной в стандарте базовых несущих конструкций // Сборник докладов III научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. — СПб.: Аграф+, 2010. - 58-61

15. Гебхарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Самакия Б. Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен. Кн.1. М.: Мир, 1991- 678 с.
16. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. - М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
17. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. - СПб: СПбГУИТМО, 2003. - 560 с.
18. Павлова А.Д. Особенности процессов теплообмена в радиоэлектронных аппаратах в герметичном исполнении / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики», 2011 г. – 113 с.
19. Дульнев Г.Н. Механика жидкостей и газов: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001, 188 с.
20. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. - Мн.: Наука и техника, 1982. - 400 с.

References:

1. Sarkis E., Joseph M. Problems of development and selection of standard units and blocks of secondary power supply for electronics navy. *Power electronics*, 2012, no.3, pp.15-25, no.4, pp. 40-46.(In Russian)
2. Vats I. Sources of supply of ready-made components and modules. *Electronic components*. 2006, no. 2, pp. 39-44. (In Russian)
3. Zeitin A., Domestic sources of power-the new generation. *Electronic components*. 2008, no.8, pp.132-133. (In Russian)
4. Shalumov A.S., Kulikov O.E. Analysis and maintenance methodology efficiency of shielding of designs of electronic equipment on the basis of numerical modelling of electromagnetic processes. *European journal of natural history*. 2013, no 5, pp.23- 24.
5. Shalumov E., Pershin A., Korkin V., Accelerated Simulation of Thermal and Mechanical Reliability of Electronic Devices and Circuits. Example of an integrated circuit simulation in ASONIKA-M-3D. *Dinamika slozhnykh sistem*. 2013, no.5, pp.59-67.
6. Shalumov, E. Pershin. Accelerated Simulation of Thermal and Mechanical Reliability of Electronic Devices and Circuits. *Moscow: Printing by PrintLETO.ru*, 2013, 128 p.
7. Drofenik U. Analysis of Theoretical Limits of Forced-Air Cooling Using Advanced Composite Materials With High Thermal Conductivities U. Drofenik, A. Stupar, J.W. Kolar. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*. 2011, vol.1, no.4, pp.528–535.
8. Gaponenko N.P., Sirotiyuk O.V., Ogrenich E.V., Lopatka Yu. A., Areshkin E. K. Optimization of the volume of sealed electronics units. *Prikladnaya radioelektronika*. 2012, vol.11, no.3, pp. 55-158. (In Russian)
9. Fabbri M., Dhir V., Optimized heat transfer for high power electronic cooling using arrays of microjets. *J. of Heat Transfer*, vol. 127, pp. 760-769.
10. Pan P., Webb B. W. Heat transfer characteristics of arrays of free-surface liquid Jets. *J. of Heat Transfer*, vol. 117, pp.878-883.
11. Lin L. Ponnappan R. Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp.3737–3746.

12. Yonglu Liu. Experimental research on a honeycomb microchannel cooling system. Yonglu Liu, Xiaobing Luo, Wei Liu. Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2011, vol.1, no.9, pp.1378 –1986.
13. Yifeng Fu, Nabi Nabiollahi, Teng Wang, Shun Wang, Zhili Hu, Björn Carlberg, Yan Zhang, Xiaojing Wang, Johan Liu. A complete carbon-nanotube-based on-chip cooling solution with very high heat dissipation capacity. *Nanotechnology*. 2012, vol. 23, no.4.
14. Korablev V.A., Pavlov D.A. Free-convective cooling of electronic equipment arranged in the standard basic load-bearing structures. Collection of papers of the III scientific-technical conference of young specialists on electronics. *Saint Petersburg: AGRAF+*, 2010, pp. 58-61 (In Russian)
15. Gebhart B., Dzhaluriya I., Mahajan R., Sammak B. Free-convective heat and mass transfer. Book. Moscow: Mir, 1991, 678 p. (In Russian)
16. Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. Methods for calculating the thermal regime of devices. *Moscow: RADIO I SVYAZ'*, 1990, 312 p. (In Russian)
17. Kondratyev G.M., Dulnev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. Applied physics: Heat transfer in instrumentation. *St. Petersburg: SPbGITMO*, 2003, 560 p. (In Russian)
18. Pavlov A.D. Heat transfer processes in the radio-electronic devices in sealed design. Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences. *Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2011, 113 p. (In Russian)
19. Dulnev G.N. Fluid Mechanics: Textbook. *St. Petersburg: SPbGITMO (TU)*, 2001, 188 p. (In Russian)
20. Martynenko O.G., Sokovishin Yu. Free-convective heat transfer: A Handbook. Minsk: *Nauka i tekhnika*, 1982, 400 p. (In Russian)

Сведения об авторах.

Исмаилов Тагир Абдурашидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники. Ректор Дагестанского государственного технического университета, Заслуженный деятель науки РФ.

Муслимов Эмин Муталибович – главный конструктор, Каспийский завод точной механики.

Рашидханов Арип Таймасханович – аспирант.

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

Authors information.

Tagir A. Ismailov – doctor of technical Sciences, Professor, head of Department of theoretical and General electrical engineering. The rector Dagestan State Technical University", Honored worker of science of the Russian Federation.

Emin M. Muslimov – chief designer of JSC, area of scientific interests – Development of ship navigation systems and power supplies,

Arip T. Rashidkhanov – graduate student.

Shirali A. Yusufov – candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 23.05.2016.

Received 23.05.2016.

Принята в печать 20.06.2016.

Accepted for publication 20.06.2016.