

УДК 534.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

© Георгий Константинович Корендяsev<sup>1</sup>, Михаил Юрьевич Асатуров<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

[korenduba@gmail.com](mailto:korenduba@gmail.com)<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина» (ПАО «НПО «Алмаз»), Москва, Россия[dmd204@yandex.ru](mailto:dmd204@yandex.ru)

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования тепловых процессов в системах коммутации речевых сообщений для управления воздушным движением. Особенностью данных систем является сочетание значительного тепловыделения в терминалах связи и пассивного теплоотвода. Расчет тепловых процессов выполнен с использованием конечноэлементного моделирования на базе эмпирических коэффициентов. По результатам расчетов спрогнозированы конструктивные изменения, позволяющие существенно снизить температуру электронных компонентов, и, следовательно, продлить срок службы оборудования. Выполнен натурный эксперимент, который подтвердил адекватность полученных результатов и показал эффективность предложенных изменений.

**Ключевые слова:** системы коммутации речевых сообщений, теплопроводность, конвекция, модель теплонапряженного состояния, пассивный теплоотвод.

## STUDY OF THERMAL PROCESSES IN COMMUNICATION SYSTEMS FOR AIR TRAFFIC CONTROL

© George Korendyasev<sup>1</sup>, Mikhail Asaturov<sup>2</sup><sup>1</sup>IMASH RAN, Moscow, Russian Federation[korenduba@gmail.com](mailto:korenduba@gmail.com)<sup>2</sup>PJSC "SPA "Almaz", Moscow, Russian Federation[dmd204@yandex.ru](mailto:dmd204@yandex.ru)

**Abstract.** The following research focuses on finding the way to increase the heat sink of voice communication control system. The key feature of these systems is the combination of high heat dissipation and passive heatsink of telecommunication terminals. The research was performed using finite element method. The construction was changed, these changes prevented decrease of temperature of the electronic components. That helped to extend the service life of the equipment. The full-scale experiment was carried out. This experiment confirmed the correctness of the results obtained.

**Keywords:** voice communication control system (VCCS), thermal conductivity, convection, heat stress, passive heatsink.

Одной из особенностей цифровых систем коммутации речевой связи (СКРС) [1], применяемых для управления воздушным движением является низкий уровень шума терминального оборудования. Нормы шума, установленные для рабочего места авиадиспетчера не должны превышать 50 дБ. Высокие требования к надежности СКРС определяют их архитектуру. Наиболее надежным является сочетание сетевой распределенной архитектуры и децентрализованной терминальной архитектуры. Подобная структура предполагает, что функции по установлению соединения телефонной и радиосвязи и управлением этим соединением (включая обработку речевой и сигнальной информации) выполняются индивидуальными процессорами терминала и интерфейсным оборудованием, участвующим в этом соединении. Значительный объем вычислительных операций, выполняемых терминальным оборудованием, обуславливает существенную загрузку процессора материнской платы терминала, что приводит к тепловыделениям равным примерно 100 Ватт на каждом терминале. При температуре более 60° С производительность процессора начинает резко снижаться и вероятность отказа оборудования увеличивается. Следовательно, для стабильной работы процессора требуется эффективное охлаждение. Ресурс терминального оборудования составляет не менее 10 лет. Это условие, в сочетании с требованиями низкого уровня шума, не позволяет использовать для охлаждения процессора терминала активные устройства (вентиляторы, элементы Пельтье и т.д. Водяное охлаждение является дорогостоящим и ненадежным. Таким образом, наилучшим решением для данного типа устройств является пассивное охлаждение. Пассивное охлаждение определяет специфические конструктивные особенности корпусов:

- применение алюминиевых или медных радиаторов с большой площадью теплоотвода;
- применение тепловых интерфейсов между деталями корпуса;
- применение тонкостенных конструкций, в ряде случаев выполненных из перфорированного металла, для создания конвективного теплообмена с внешней средой.

Конструктивно корпуса выполнены в виде моноблока (рис.1). Наружная часть корпуса изготовлена из пластика. Внутренние элементы корпуса выполнены из листового металла. В исходной конструкции использовался штатный радиатор материнской платы. Тепло с радиатора частично передавалось на металлические элементы корпуса, а частично рассеивалось во внутреннем объеме корпуса, а затем с помощью конвективного теплообмена отводилось через перфорированные стенки в атмосферу.

Подобное решение имеет как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. Главным преимуществом является красивый дизайн изделия. Все элементы, участвующие в теплоотводе, находятся внутри пластикового корпуса и не влияют на внешний вид терминала. Другое преимущество состоит в том, что электронные компоненты корпуса крепятся только на металлические элементы корпуса. Это дает возможность легко модифицировать конструкцию внутренней части корпуса при смене электронных компонентов без изменения конструкции пластиковой оболочки, изготовление которой требует применения дорогостоящих прессформ. Недостаток данной конструкции состоит в том, что она не обеспечивает достаточного отвода тепла во внешнюю среду. Основным источником тепловыделения является процессор материнской платы. С процессора тепло переходит на радиатор, с которого в свою очередь частично переходит через тепловые интерфейсы на металлические детали корпуса, а частично посредством конвекции рассеивается во внутренний объем корпуса. Затем тепло через вентиляционные отверстия в пластиковом корпусе рассеивается во внешнюю среду. В верхней части корпуса находится матрица размерностью 12", которая затрудняет конвекционный теплообмен, не давая

горячему воздуху подниматься вверх. Тепло выходит из корпуса только через вентиляционные отверстия в задней и боковых частях корпуса.



**Рис.1.** Общий вид терминала связи.

При этом пространство в зоне процессора практически не вентилируется. Эффективность теплоотвода с радиатора через тепловые интерфейсы также невелика. Разница температур между радиатором и сопрягаемыми с ним деталями по результатам измерения составляет не менее 30 градусов Цельсия. Это обусловлено большим термическим сопротивлением между радиатором и сопрягаемыми деталями. Вследствие этих факторов, температура процессора при загрузке на 80% составляет приблизительно  $70^{\circ}\text{C}$  (рис.2), а ресурс материнской платы составляет 5 лет при заявленном сроке эксплуатации изделия 10 лет. Поэтому задача снижения температуры процессора является актуальной.



**Рис.2.** Распределение температур на поверхности материнской платы.

Целями настоящего исследования служат разработка методики расчета терминалов связи с пассивным охлаждением и решение задачи снижения температуры процессора для конкретного терминала с использованием разработанной методики. Тепловому расчету электронных устройств посвящено достаточно много работ [2,3,4,5], однако специфичная конструкция терминальных устройств с пассивным охлаждением требует отдельного исследования. Сложность геометрических и теплофизических характеристик терминала, значительное количество тепловых интерфейсов и деталей корпуса делает невозможным применение аналитических методов расчета. Для расчета теплопередачи в деталях корпуса и на стыках деталей использовался метод конечных элементов, а для расчета конвективного теплообмена внутри корпуса использовался метод конечных объемов. Ниже приведены основные соотношения, используемые при реализации численных алгоритмов.

Моноблочная конструкция предполагает участие в теплообмене всех деталей корпуса. Теплопередача внутри отдельных деталей терминала подчиняется закону Фурье. Принято считать, что теплообмен происходит между изотермическими поверхностями. Тепловой поток  $P$ , передаваемый между соседними изотермическими поверхностями равен

$$P = \frac{\lambda S}{l} (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала,  $S$  - площадь средней изотермической поверхности,  $t_1, t_2$  - температуры соседних изотермических поверхностей,  $l=x_2-x_1$  - расстояние между изотермическими поверхностями. В таблице 1 приведены коэффициенты теплопроводности материалов, применяемых в конструкции корпуса.

Таблица 1

материал	$\lambda$ , Вт/(м·К)
алюминий	170
медь	380
сталь	50
стеклотекстолит	0,3

Теплообмен деталей моноблока с окружающей средой описывается законом Ньютона. Полный тепловой поток, отдаваемый изотермической поверхностью  $S$  среде за счет конвекции равен

$$P_k = \alpha_k S (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент конвективного теплообмена.  $\alpha_k$  - зависит от множества параметров, характеризующих поверхность и среду. Для определения  $\alpha_k$  используются численные методы.

Наиболее сложной задачей является определение тепловой проводимости в области контакта деталей терминала. Тепловое сопротивление контакта

$$R_k = \frac{P}{\Delta t_k} = \frac{1}{\sigma_m + \sigma_c}, \quad (3)$$

где  $P$  - тепловой поток, протекающий через контакт;  $\Delta t_k$  - разность температур контактирующих поверхностей;  $\sigma_m$  - тепловая проводимость, определяемая фактическими контактами;  $\sigma_c$  - тепловая проводимость среды.

Удельное (отнесенное к площади) сопротивление фактического контакта

$$R_{м.уд} = \frac{\varphi}{2.12\lambda_M\eta} 10^{-4} \text{ м}^2\text{К/Вт} \quad (4)$$

где  $\varphi$  - коэффициент стягивания теплового потока к пятнам фактического контакта,  $\lambda_M$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности фактического контакта;  $\eta$  - относительная площадь фактического контакта.  $\eta$ ,  $\varphi$  определяются с помощью эмпирических данных.

$$\frac{\eta}{\varphi} = \left(\frac{pB}{E}\right)^{0,8}, \quad (5)$$

где  $p$  - удельное давление в контакте;  $B$  - коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей;  $E$  - модуль упругости материала

Тепловая проводимость прослойки межконтактной среды  $\sigma_{с.уд} = \lambda_c / \delta_{эКВ}$ , где  $\lambda_c$  - коэффициент теплопроводности среды,  $\delta_{эКВ}$  - эквивалентное расстояние между контактирующими поверхностями.

Тепловая проводимость контакта

$$\sigma_k = \left(\frac{1}{R_{м.уд}} + \sigma_{с.уд}\right) S_k, \quad (6)$$

где  $S_k$  - площадь контакта.

Таким образом, величина тепловой проводимости контакта зависит от коэффициента теплопроводности материалов контактирующих поверхностей, теплофизических свойств межконтактной среды, качества обработки контактирующих поверхностей, удельного давления и площади контакта.

Для металлических поверхностей удельная тепловая проводимость контакта определяется физико-механическими свойствами материалов, чистотой обработки контактирующих поверхностей и удельным давлением.

В таблице 2 приведены данные по удельной тепловой проводимости для контактирующих пар, которые присутствуют в конструкции терминала.

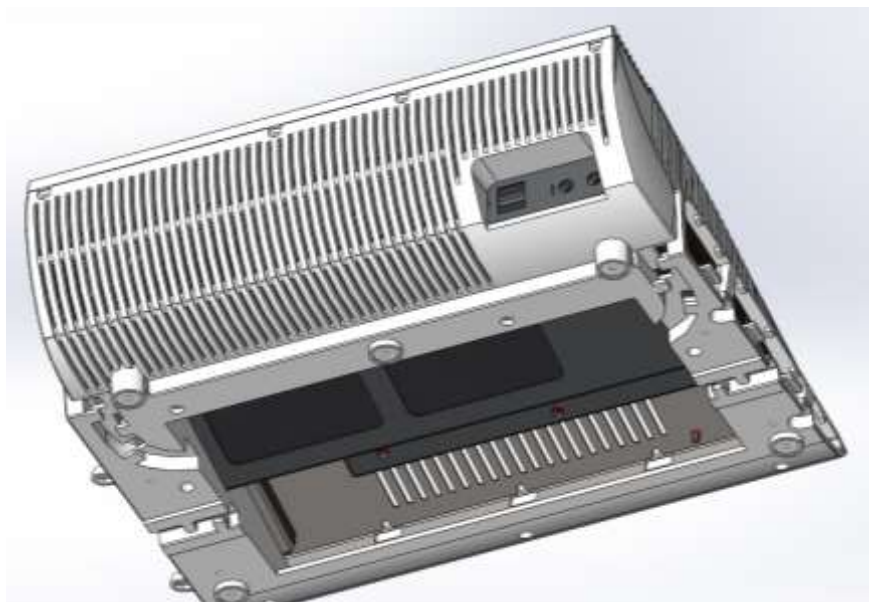
Таблица 2

материал контактирующих пар	$\sigma_{уд} \cdot 10^4, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
медь-алюминий	12,5
алюминий-алюминий	4,0
сталь-алюминий	0,83
металл-краска-металл	0,05
сталь-сталь	1,5

Для вычисления тепловой проводимости контакта необходимо значение удельной тепловой проводимости умножить на площадь контакта  $S_k$ .

$$\sigma_k = \sigma_{уд} \cdot S_k \quad (7)$$

На 1 этапе было произведено моделирование конвективного теплообмена внутри корпуса моноблока для выявления застойных зон и расчета коэффициента конвективной теплоотдачи. Результаты расчета показали достаточность площади вентиляционных отверстий в пластиковом корпусе для охлаждения терминала, однако их расположение относительно источников тепловыделения не позволяет эффективно отводить тепло за пределы корпуса. Вентиляционные отверстия находятся в основном в задней части корпуса (рис.3), а источники тепловыделения в средней части под матрицей. Большое количество соединений деталей не позволяет отводить тепло от процессора в заднюю часть корпуса, поэтому в зоне процессора образуется застойная зона высокой температуры. Необходимо отметить, что при выборе параметров вентиляционных решеток следует руководствоваться кроме соображений эффективности охлаждения также соображениями виброустойчивости [6]



**Рис.3.** Расположение вентиляционных решеток в задней части корпуса.

На 2 этапе с использованием результатов расчета коэффициентов конвективной теплоотдачи, было произведено моделирование теплопроводности деталей, участвующих в системе охлаждения терминала. Результаты моделирования подтвердили значения температур, полученных с помощью измерения тепловизором. На рисунке 4 представлена эпюра распределения температур наиболее теплонапряженных деталей конструкции (остальные детали для наглядности скрыты).

Из рисунка видно, что температура алюминиевого кронштейна, сопрягаемого с радиатором не превышает  $60^{\circ}\text{C}$ , а зона высокой температуры ( $65-70^{\circ}\text{C}$ ) сосредоточена в непосредственной близости от процессора в области, которая практически не участвует в конвективном теплообмене. Это происходит вследствие большой величины теплового сопротивления между кронштейном и радиатором.

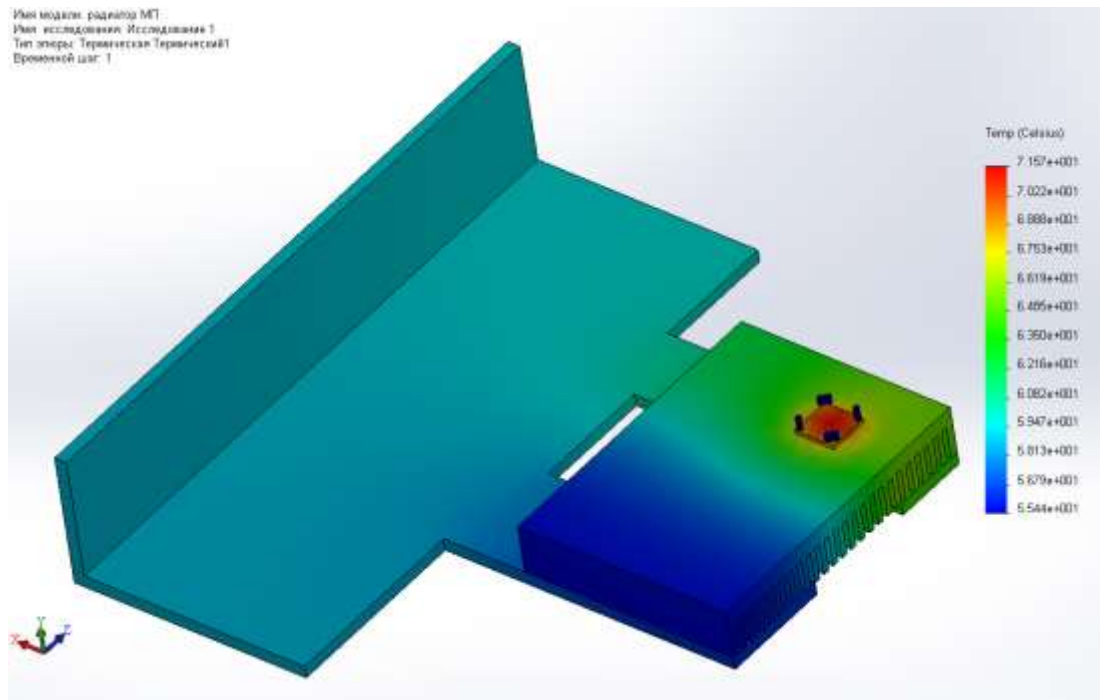


Рис. 4. Эпюра распределения температуры исходной конструкции теплоотвода.

Логично предположить, что суть изменений, которые требуется внести в конструкцию, состоит в распределении зоны высокой температуры в область высокой конвекции, т.е. в заднюю часть корпуса. Перенос материнской платы в заднюю часть корпуса невозможен по конструктивным соображениям, так как в данной зоне расположены устройства звуковоспроизведения. Решетки в задней части терминала кроме охлаждения также выполняют функцию пропускания звука. По этим причинам для улучшения распределения тепла были предложены следующие конструкторские решения:

1. Штатный алюминиевый радиатор материнской платы был исключен из конструкции и заменен на медный теплопроводящий элемент, передающий тепло от процессора к деталям корпуса. Это позволило снизить количество тепловых интерфейсов между процессором и деталями, участвующими в теплоотводе.
2. Стальная монтажная пластина толщиной 1 мм, служащая для установки печатных плат была заменена на алюминиевую плиту толщиной 6 мм. Это позволило улучшить теплоотдачу в окружающую среду за счет увеличения площади теплоотвода. В данной конструкции плита играет главную роль в рассеивании тепла.
3. Прижим процессора к медному теплопроводящему элементу улучшен за счет установки дополнительных пружин.

На рисунке 5 представлена эпюра распределения температур наиболее теплонапряженных деталей модифицированной конструкции.

Эпюра показывает, что температура процессора снизилась до 60°C, а распределение температур стало более равномерным. Этот результат подтвердился при измерении температур тепловизором и с помощью мониторинга температуры процессора программными средствами.

Косвенным результатом конструктивных изменений стало более равномерное распределение температур на поверхности корпуса (рис.6)

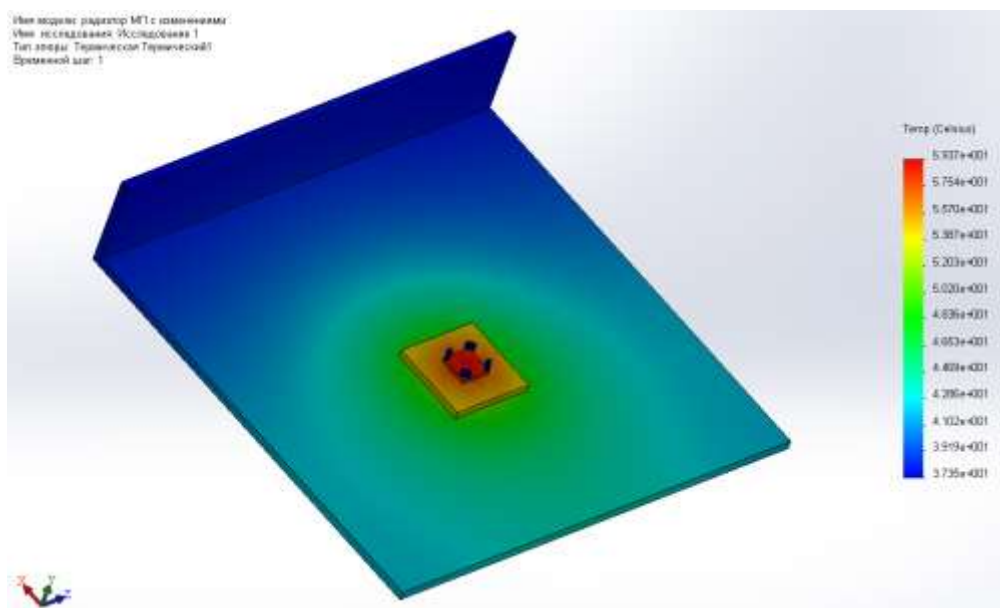


Рис. 5. Эпюра распределения температуры измененной конструкции теплоотвода.

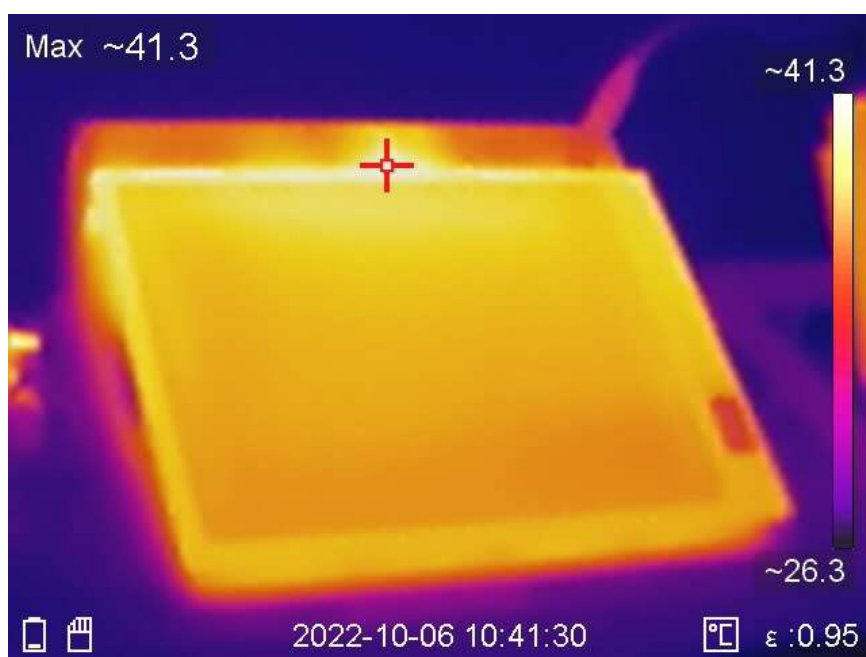


Рис.6. Распределение температуры по поверхности корпуса терминала.

Снижение температуры процессора обеспечило увеличение ресурса материнской платы до 10 лет и повышение производительности процессора на 15 процентов.

Предложенная методика позволяет производить тепловой расчет всех типов устройств, охлаждаемых с помощью естественной конвекции с учетом процессов теплопроводности и конвективного теплообмена. Методика дает инструменты для прогнозирования влияния



конструктивных изменений на температурный режим работы устройств с пассивным охлаждением.

**Список литературы.**

1. Levin E, Zaynal S. Voice communication system for air traffic control. Development and evaluation of a prototype. Master of Science Thesis in Software Engineering and Technology. Chalmers University of Technology University of Gothenburg Department of Computer Science and Engineering. - Göteborg, Sweden, October 2011. - 100p.
2. L.L. Vasil'ev Jr., L.P. Grakovich, L.A. Dragun, A.S. Zhuravlev, V.A. Olekhovich, M.I. Rabetskii. System for cooling of electronic components// Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – January 2017 . - Vol. 90, No. 1.
3. Scott WA. Cooling of Electronic Equipment. - New York: John Wiley and Sons, 1974.
4. S. M. Sohel Murshed. Electronics Cooling. - IN TECH, 2016. - 184 p.
5. Janis Galins, Aigars Laizans, Ainars Galins. Review of cooling solutions for compact electronic devices. RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT. – 2019. - VOLUME 1. - P 201-208.
6. G. Korendyasev, M. Asaturov. Research on the oscillation of cooling grills used for terminal devices for voice communication control systems used by air traffic controllers. VIBROENGINEERING PROCEDIA. - DECEMBER 2021. - VOLUME 39. – P. 11-16.

**References**

1. Levin E, Zaynal S. Voice communication system for air traffic control. Development and evaluation of a prototype. Master of Science Thesis in Software Engineering and Technology. Chalmers University of Technology University of Gothenburg Department of Computer Science and Engineering. - Göteborg, Sweden, October 2011. - 100p.
2. L.L. Vasil'ev Jr., L.P. Grakovich, L.A. Dragun, A.S. Zhuravlev, V.A. Olekhovich, M.I. Rabetskii. System for cooling of electronic components// Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - January, 2017. - Vol. 90, No. 1.
3. Scott WA. Cooling of Electronic Equipment. - New York: John Wiley and Sons, 1974.
4. S. M. Sohel Murshed. Electronics Cooling. - IN TECH, 2016. - 184 p.
5. Janis Galins, Aigars Laizans, Ainars Galins. Review of cooling solutions for compact electronic devices. RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT. – 2019. - VOLUME 1. – P. 201-208.
6. G. Korendyasev, M. Asaturov. Research on the oscillation of cooling grills used for terminal devices for voice communication control systems used by air traffic controllers. VIBROENGINEERING PROCEDIA. - DECEMBER 2021. - VOLUME 39. – P. 11-16.

*Дата поступления: 1 декабря 2022 г.*