

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1214-1222

УДК 004.942, 519.8, 658.51

Алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности передающего комплекса радиолокационной станции на основе тепловой модели

Роман Сергеевич Шафир¹, Марина Александровна Давыдова², Максим Олегович Корпусов³, Анатолий Юрьевич Перлов⁴, Александр Васильевич Тимошенко⁵✉

^{1,3} Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, 117198, Российская Федерация

^{2,3} Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, 124498, Российская Федерация

⁵ АО «Радиотехнический институт имени А.Л. Минца», Москва, 127083, Российская Федерация

¹ romanshafir@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0877-7533>

² m.davydova@physics.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9255-7353>

³ korpusov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5336-4559>

⁴ laperlov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>

⁵ u567ku78@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

Аннотация

Введение. Тенденции развития современной радиоэлектронной аппаратуры, входящей в состав радиолокационных станций, заключаются в постоянном увеличении выходной излучаемой мощности. Это приводит к значительному повышению тепловыделения блоков усиления мощности как наиболее теплонагруженных. Для уменьшения отказов данных блоков, связанных с перегревом, предложен оригинальный алгоритм оперативного поддержания температурного режима. В основе алгоритма лежит тепловая модель, позволяющая, в отличие от известных моделей, производить расчет распределения температуры в блоке в режиме реального времени с учетом телеметрии с датчиков температуры, установленных внутри блока. Новизна предлагаемого алгоритма заключается в управлении системой охлаждения в реальном масштабе времени на основе прогноза температуры блоков, полученного с помощью тепловой модели. **Метод.** Тепловая модель базируется на математической формализации тепловых процессов с использованием метода анизотропного тела, который позволяет минимизировать вычислительные затраты на расчеты за счет представления блока усиления мощности в виде квазиоднородного тела. **Основные результаты.** Моделирование процесса распределения температуры в блоке усиления мощности выполнено в среде COMSOL. Для оценки эффективности алгоритма и возможности работы в режиме реального времени на этапе эксплуатации радиолокационной станции выполнен вычислительный эксперимент с использованием модельных данных. Результаты моделирования подтвердили возможность проведения вычислений распределения температуры в блоке в реальном масштабе времени. **Обсуждение.** В отличие от существующих алгоритмов поддержания температурного режима блока, основанных на показаниях температурных датчиков, определяющих температуру в текущий момент времени, разработанный алгоритм реализует прогноз температуры. Это позволяет принимать меры по охлаждению блока до наступления критических аварийных ситуаций.

Ключевые слова

тепловая модель, радиоэлектронный комплекс, блок усиления мощности, воздушное охлаждение

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-11-00056).

Ссылка для цитирования: Шафир Р.С., Давыдова М.А., Корпусов М.О., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В. Алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности передающего комплекса радиолокационной станции на основе тепловой модели // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1214–1222. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1214-1222

© Шафир Р.С., Давыдова М.А., Корпусов М.О., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В., 2023

Algorithm for promptly maintaining the temperature regime of power amplification units of the radar transmitting complex based on a thermal model

Roman S. Shafir¹, Marina A. Davydova², Maxim O. Korpusov³, Anatoly Yu. Perlov⁴, Alexander V. Timoshenko⁵✉

^{1,3} Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, 117198, Russian Federation

^{2,3} Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

⁴ National Research University MIET, Moscow, 124498, Russian Federation

⁵ JSC "Academician A.L.Mints Radiotechnical Institute", Moscow, 127083, Russian Federation

¹ romanshafir@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0877-7533>

² m.davydova@physics.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9255-7353>

³ korpusov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5336-4559>

⁴ laperlov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>

⁵ u567ku78@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

Abstract

The development trends of modern electronic equipment included in radar stations consist of a constant increase in the output radiated power. This leads to a significant increase in heat generation of power amplification units as the most heat-loaded ones. To reduce failures of these units associated with overheating, this work proposes an original algorithm for quickly maintaining the temperature regime. The algorithm is based on a thermal model, which allows, unlike the known ones, to calculate the temperature distribution in the block in real time, taking into account telemetry from temperature sensors installed inside the block. The novelty of the proposed algorithm lies in the real-time control of the cooling system based on the block temperature forecast obtained using a thermal model. The thermal model is based on the mathematical formalization of thermal processes using the anisotropic body method, which allows minimizing the computational costs of calculations by representing the power amplification unit as a quasi-homogeneous body. Simulation of the temperature distribution process in the power amplification unit was performed in the COMSOL. To evaluate the efficiency of the algorithm and the ability to operate in real time at the operational stage of the radar station, a computational experiment was performed using model data. The simulation results confirmed the possibility of calculating the temperature distribution in the block in real time. Unlike existing algorithms for maintaining the temperature regime of a block, based on the readings of temperature sensors that determine the temperature at the current moment in time, the developed algorithm implements a temperature forecast. This allows you to take measures to cool the unit before the onset of critical emergency situations.

Keywords

Thermal model, radio-electronic complex, power amplification unit, air cooling

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-11-00056).

For citation: Shafir R.S., Davydova M.A., Korpusov M.O., Perlov A.Yu., Timoshenko A.V. Algorithm for promptly maintaining the temperature regime of power amplification units of the radar transmitting complex based on a thermal model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1214–1222 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1214-1222

Введение

Современные высокопотенциальные радиолокационные станции мониторинга космического пространства (РЛС МКП) представляют собой многоэлементные цифровые системы с большим количеством радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей на высоком уровне мощности с низкой скважностью и большой длительностью радиоимпульса. Для таких энергонапряженных режимов крайне важно обеспечить необходимый температурный режим в передающем радиоэлектронном комплексе, при котором выполняются исключительно высокие требования по надежности.

В настоящее время при проектировании систем охлаждения РЛС МКП широко применяются тепловые модели [1], реализованные в различных системах автоматизированного проектирования (САПР) [2–9]. Тепловые модели, рассмотренные в работах [1–9], позволяют достаточно точно рассчитать потенциально возможные температуры элементов радиоэлектронной аппаратуры на стадии проектирования. Отметим, что применение данных моделей в режиме реального вре-

мени и с учетом реальных условий функционирования РЛС невозможно в силу длительного времени расчета и больших вычислительных затрат.

Тепловая модель, предложенная в работе [10], позволяет производить оперативное вычисление температур блоков усиления мощности в предположении, что температура распределена по блоку равномерно, что, как правило, не соответствует реальным условиям функционирования РЛС.

В работе [11] рассмотрена тепловая модель нагрева контактирующих элементов (их аналоги в нашем случае — блоки усиления мощности), которая учитывает неравномерное распределение температуры по элементам. Однако данная модель не может лечь в основу управления системой теплоотвода в силу работы с постоянными параметрами, не отражающими текущую тепловую динамику внутри радиоэлектронного комплекса, поскольку основной параметр данной модели — температура окружающей среды (воздуха) — принимается постоянной величиной.

В настоящей работе для решения задачи оперативного поддержания температурного режима блоков

усиления мощности (при котором минимизируются затраты энергии на работу системы охлаждения и одновременно не допускается перегрев радиоэлектронной аппаратуры) предложен следующий подход: параметры, которые изменяются в процессе работы радиоэлектронной аппаратуры в узком диапазоне или совсем не изменяются, принимаются как постоянные, а для определения параметров, которые меняются в широком диапазоне, могут использоваться показания датчиков.

Вследствие того, что количество блоков усиления мощности в составе только одного радиоэлектронного комплекса достигает нескольких сотен, расчет параметров тепловой модели в режиме реального времени фактически не реализуем. Одним из возможных вариантов решения данной задачи является применение технологии параллельных (многопроцессорных) вычислений [12, 13]. Данный метод предполагает, что каждый процессор будет рассчитывать в режиме реального времени температурное распределение только своего блока, либо группы блоков, что исключает необходимость последовательного проведения расчетов для всех блоков (либо группы самых теплонапряженных блоков) на одном процессоре.

Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка тепловой модели, которая должна отвечать жестким требованиям оперативности проведения вычислений. Данная модель должна лечь в основу алгоритма поддержания температурного режима блоков в режиме реального времени.

Алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности с помощью тепловой модели

Алгоритм поддержания температурного режима блоков должен быть основан на тепловой модели. Порядок разработки тепловой модели представлен на рис. 1.

В качестве основных физических процессов рассмотрим процессы теплопроводности и конвекции,



Рис. 1. Порядок разработки тепловой модели

Fig. 1. Procedure for developing a thermal model

при этом величину излучения, полученную с поверхности блока усиления мощности, учитывать не будем. Примем, что поверхность блока охлаждается за счет конвективного теплообмена с воздухом.

Рассмотрим более подробно этап «Разработка математической модели» (рис. 1). Для построения тепловой модели блока за основу возьмем уравнение теплопроводности, описывающее нестационарные процессы теплообмена:

$$c(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})\frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla(k(\mathbf{r})\nabla T(\mathbf{r}, t)) + F_{\text{ист}}(\mathbf{r}, t), \mathbf{r} \in \Omega, \quad 0 < t \leq T, \quad (1)$$

где $\mathbf{r} = (x, y, z)$ — радиус-вектор, проведенный из начала отсчета в точку наблюдения; $T(\mathbf{r}, t)$ — температурное поле в точке с радиус-вектором \mathbf{r} в момент времени t ; $\rho(\mathbf{r})$ — плотность среды в точке с радиус-вектором \mathbf{r} ; $c(\mathbf{r})$ — удельная теплоемкость блока в точке с радиус-вектором \mathbf{r} ; $k(\mathbf{r})$ — коэффициент теплопроводности; $F_{\text{ист}}(\mathbf{r}, t)$ — плотность тепловых источников в точке с радиус-вектором \mathbf{r} в момент времени t ; Ω — расчетная область.

Уравнение (1) учитывает: неоднородное распределение температуры внутри блока; зависимости удельной теплоемкости, плотности материала, коэффициента теплопроводности от координат x, y, z ; зависимость плотности внутренних источников тепла от координат и времени.

Решение уравнения (1) с заданной точностью в случае сложной геометрии потребует значительных вычислительных затрат, что не позволит применять такую тепловую модель на этапе эксплуатации РЛС. Отметим, что дополнительная сложность данного уравнения — нестационарность, обуславливающая зависимость температуры не только от координат, но и от времени.

В результате перечисленных причин примем следующие допущения:

- функциональные ячейки блока, имеющие сложную структуру, заменим на квазиоднородное анизотропное тело с эффективными значениями теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$, по осям x, y, z [12];
- вместо нестационарного уравнения (1) рассмотрим его стационарный аналог;
- в качестве расчетной области рассмотрим прямоугольный параллелепипед: $\Omega = (0, L_x) \times (0, L_y) \times (0, L_z)$, L_x, L_y, L_z — размеры расчетной области;
- мощности тепловыделения будем считать равномерными по функциональным ячейкам блока.

С учетом данных допущений получим уравнение вида:

$$\lambda_x(x, y, z)\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \lambda_y(x, y, z)\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \lambda_z(x, y, z)\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + F_{\text{ист}}(x, y, z) = 0, \quad (2)$$

$$(x, y, z) \in \Omega$$

Рассмотрим для уравнения (2) краевую задачу:

$$\left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_x(x, y, z) \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \lambda_y(x, y, z) \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \\
 &+ \lambda_z(x, y, z) \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + F_{\text{ист}}(x, y, z) = 0, (x, y, z) \in \Omega, \\
 &\lambda_x(0, y, z) \frac{\partial T(0, y, z)}{\partial x} = \alpha(T(0, y, z) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, \\
 &-\lambda_x(L_x, y, z) \frac{\partial T(L_x, y, z)}{\partial x} = \alpha(T(L_x, y, z) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \\
 &\lambda_y(x, 0, z) \frac{\partial T(x, 0, z)}{\partial y} = \alpha(T(x, 0, z) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 \leq x \leq L_x, 0 < z < L_z, \\
 &-\lambda_y(x, L_y, z) \frac{\partial T(x, L_y, z)}{\partial y} = \alpha(T(x, L_y, z) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 \leq x \leq L_x, 0 < z < L_z, \\
 &\lambda_z(x, y, 0) \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} = \alpha(T(x, y, 0) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 < x < L_x, 0 < y < L_y, \\
 &-\lambda_z(x, y, L_z) \frac{\partial T(x, y, L_z)}{\partial z} = \alpha(T(x, y, L_z) - T_{\text{окр}}), \\
 &0 < x < L_x, 0 < y < L_y,
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где α — коэффициент теплообмена блока с воздухом; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Второе–седьмое уравнения системы (3) представляют собой граничные условия третьего рода. Они описывают процесс теплообмена между блоком и окружающей средой (воздухом). Управляющими параметрами в данной системе являются параметры α и $T_{\text{окр}}$. Коэффициент α зависит от многих факторов, в частности, от скорости потоков воздуха.

Отметим, что известная методика расчета коэффициентов $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ [12] является полуэмпирической. Для более точного определения данных коэффициентов потребуется решение обратной задачи, которая заключается в том, чтобы на основе телеметрических данных с макета блока по известным значениям температур его элементов определить неизвестные параметры $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$. Данная процедура в настоящей работе не проводилась и относится к дальнейшим исследованиям.

На рис. 2 показан алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности на основе тепловой модели.

При изменении телеметрии по полученным значениям температур блоков (в случае повышения температуры на датчиках, расположенных на основных тепловыделяющих элементах блока) решается краевая задача (3) в режиме реального времени на основе уточненных параметров. В качестве параметров, которые необходимо уточнить в режиме реального времени, выбраны параметры $T_{\text{окр}}$ и α . Параметр $T_{\text{окр}}$ может быть определен с помощью датчика, расположенного на корпусе

блока и измеряющего температуру воздуха. Параметр α рассчитывается по эмпирическим формулам. Для уточнения данного параметра можно использовать датчик, измеряющий скорость воздуха вблизи поверхности блока, которая оказывает существенное влияние на данный коэффициент. По результатам решения краевой задачи (3) вычисляется распределение температуры внутри блока усиления мощности (при выходе на стационарный режим). В случае прогноза перегрева блока ($T \geq T_{\text{кр}}$, где $T_{\text{кр}}$ — критическое значение температуры блока усиления мощности) необходимо увеличить скорость потока охлаждающего воздуха или снизить температуру воздуха. Если данные меры не обеспечивают достаточного охлаждения блока, то через некоторое время при приближении температуры блока к критической его требуется принудительно отключить до момента остывания (в противном случае блок может выйти из строя). В случае снятия перегрева блока выполняется контроль его температуры в штатном режиме.

Для оценки эффективности (и возможности) реализации данного алгоритма на практике проведем вычислительный эксперимент.

Вычислительный эксперимент

Для проведения расчетов с целью оценки эффективности разработанной тепловой модели, а также проверки возможности проведения вычислений в режиме реального времени использованы данные типового блока усиления мощности с упорядоченным расположением узлов и элементов [14]. Расчеты выполним с использованием пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics с помощью метода конечных элементов.

В качестве исходных данных для первого вычислительного эксперимента выберем следующий набор входных параметров: $L_x = 156$ мм, $L_y = 49$ мм и $L_z = 75$ мм — размеры блока по осям x, y и z , $\lambda_x = 0,11$ Вт/(м·К); $\lambda_y = 0,21$ Вт/(м·К); $\lambda_z = 0,11$ Вт/(м·К); $T_{\text{кр}} = 85$ °С; суммарное тепловыделение 10 Вт.

Введем обозначение:

$$T_{\text{max}} = \max\{T_i | i = \overline{1, N}\},$$

где T_i — расчетное значение температуры в i -ом узле сетки; N — количество узлов сетки.

При расчетах необходимо добиться выполнения условия:

$$T_{\text{max}} < T_{\text{кр}}. \quad (4)$$

Для первого вычислительного эксперимента выберем температуру окружающего воздуха $T_{\text{окр}} = 40$ °С, что соответствует температуре воздуха в радиоэлектронном комплексе при теплонапряженном режиме работы. Результаты расчета представлены на рис. 3, а–с. При этом атмосферное давление при расчетах считалось нормальным.

Максимальные (T_{max}) и минимальные (T_{min}) значения температур показаны сверху и снизу вертикальной температурной шкалы.

На рис. 3, а показано распределение температуры в случае, когда скорость потоков воздуха равна нулю. В результате первого эксперимента видно, что условие

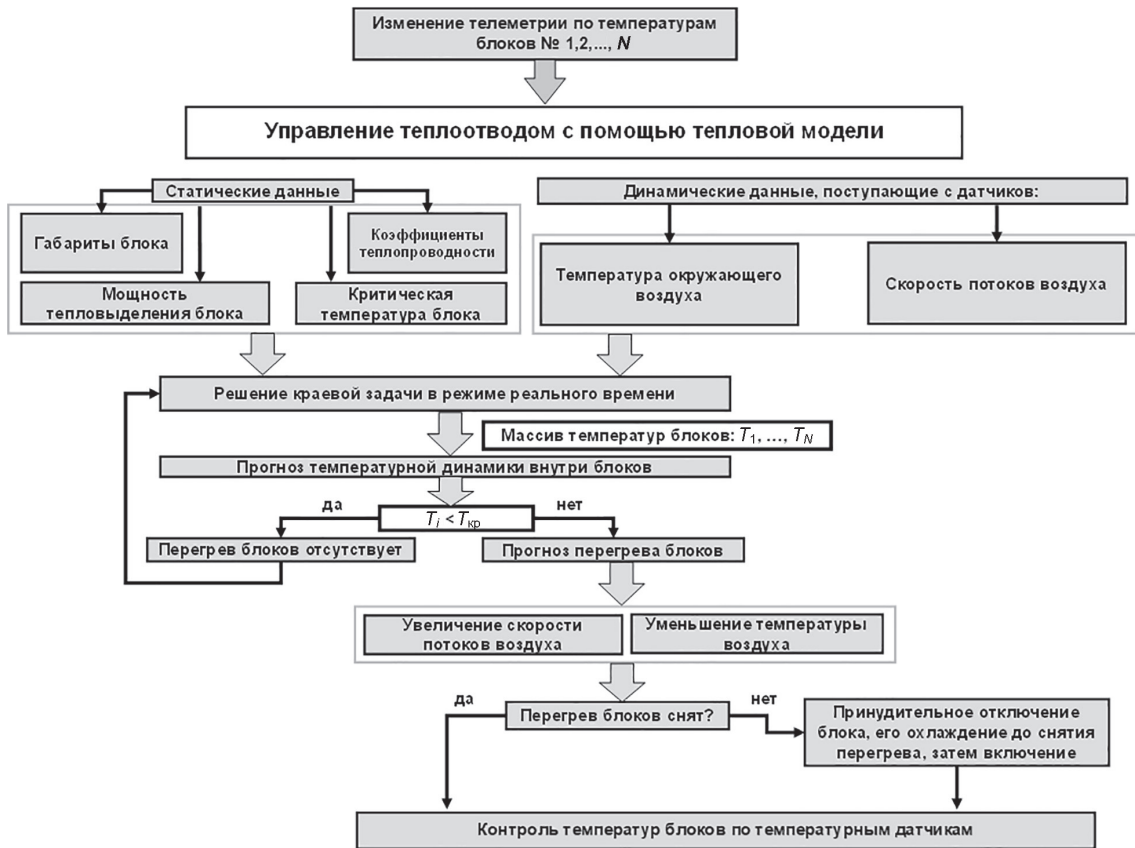


Рис. 2. Алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности на основе тепловой модели
Fig. 2. Algorithm for quickly maintaining the temperature regime of power amplification units based on a thermal model

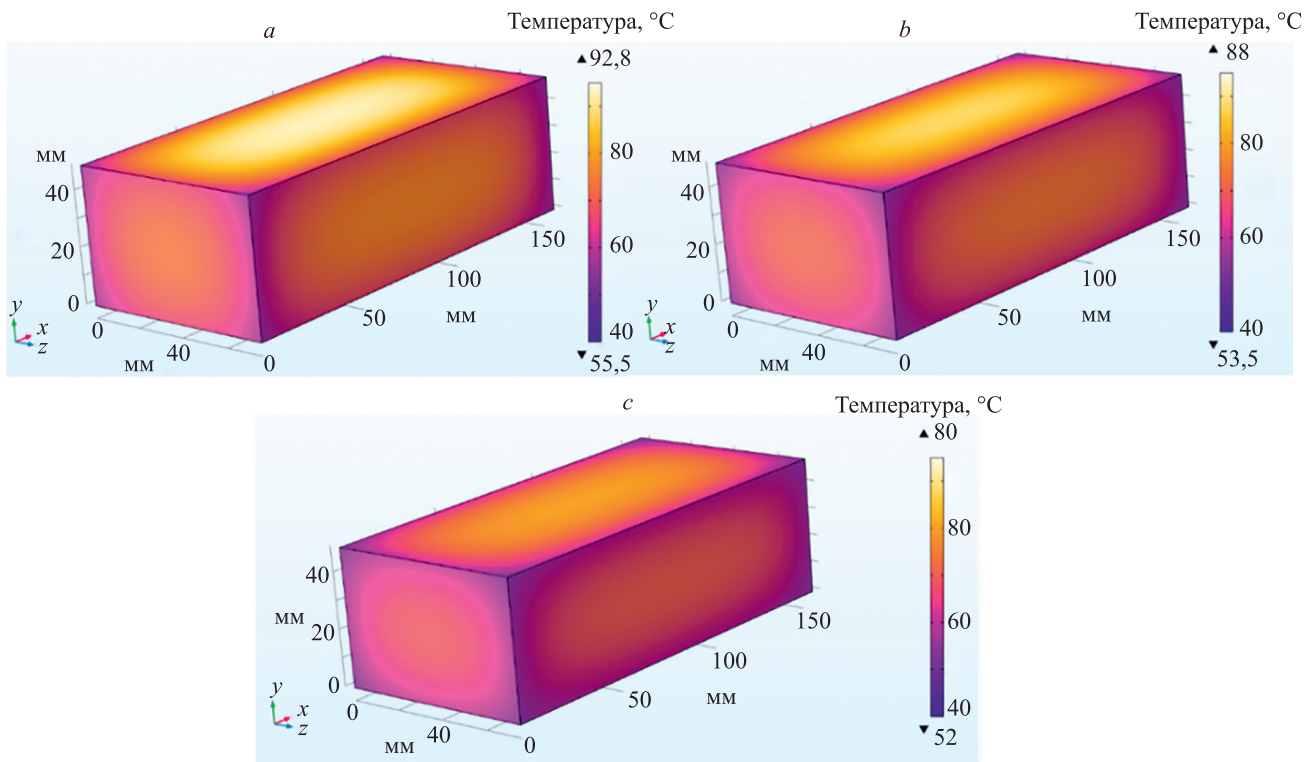


Рис. 3. Распределение температуры по блоку при $T_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$ при различных режимах конвекции: при естественной конвекции (a), при скорости воздуха 0,5 м/с (b), при скорости воздуха 0,8 м/с (c)
Fig. 3. Temperature distribution throughout the block at $T_{\text{air}} = 40^\circ\text{C}$ under various convection modes: with natural convection (a), at an air speed of 0.5 m/s (b), at an air speed of 0.8 m/s (c)

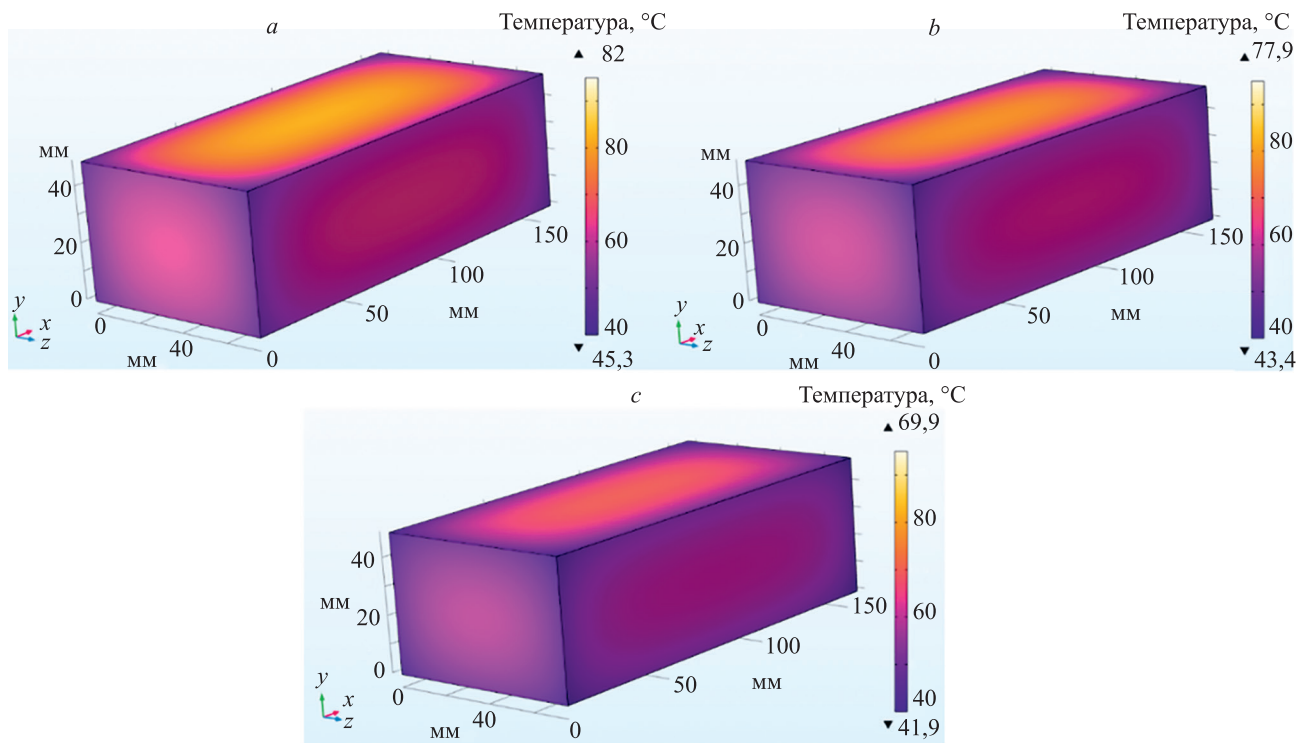


Рис. 4. Распределение температуры по блоку при $T_{\text{окр}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различных режимах конвекции: при естественной конвекции (a), при скорости воздуха 0,5 м/с (b), при скорости воздуха 0,8 м/с (c)

Fig. 4. Temperature distribution throughout the block at $T_{\text{air}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ under various convection modes: with natural convection (a), at an air speed of 0.5 m/s (b), at an air speed of 0.8 m/s (c)

(4) выполняется только в случае рис. 3, c и с небольшим запасом, что на практике может не гарантировать отсутствие перегрева для блока в силу невысокой точности модели.

Рассмотрим случай функционирования блока при более низкой температуре окружающего воздуха $T_{\text{окр}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты расчета приведены на рис. 4. Скорость потоков воздуха совпадает со случаями на рис. 3, a–c. Максимальные (T_{max}) и минимальные (T_{min}) значения температур показаны сверху и снизу вертикальной температурной шкалы.

В случае использования более низкой температуры условие (4) выполняется на рис. 4, b, c, но на рис. 4, b

с небольшим запасом. Исходя из этого, более надежным для обеспечения выполнения условия (4) является набор параметров случая, изображенным на рис. 4, c).

Результаты расчета при различных входных параметрах представлены в таблице.

Отметим, что для применения предложенной модели в режиме реального времени при расчетах должны быть использованы показания с датчиков по температуре окружающего воздуха и скорости потоков воздуха. В настоящей работе при расчетах эти значения задавались вручную.

Для проверки возможности работы модели в режиме реального времени оценим время, затрачиваемое на проведение расчетов. Оно значительно меньше одной секунды.

При проведении первого вычислительного эксперимента коэффициенты теплопроводности по координатам x, y, z считались постоянными по всему блоку.

Для проведения второго вычислительного эксперимента рассмотрим блок усиления мощности более сложной структуры (рис. 5, a).

Габариты блока усиления мощности аналогичны параметрам, используемым при первом моделировании. Цифрами 1–4 на рис. 5, a обозначены области, в которых коэффициенты теплопроводности считаются постоянными. При этом цифрами 1–3 отмечены области с функциональными ячейками, а цифрой 4 обозначен алюминиевый радиатор.

Для проведения расчета выбраны следующие значения коэффициентов теплопроводности: $\lambda_{1,x} = 0,11\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$,

Таблица. Результаты расчета максимальной температуры внутри блока усиления мощности при различных входных параметрах

Table. Results of calculating the maximum temperature inside the block for various input parameters

$T_{\text{окр}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Скорость потоков воздуха (v), м/с	$T_{\text{max}},\text{ }^{\circ}\text{C}$
40	0	92,8
40	0,5	88,0
40	0,8	80,0
30	0	82,0
30	0,5	77,9
30	0,8	69,9

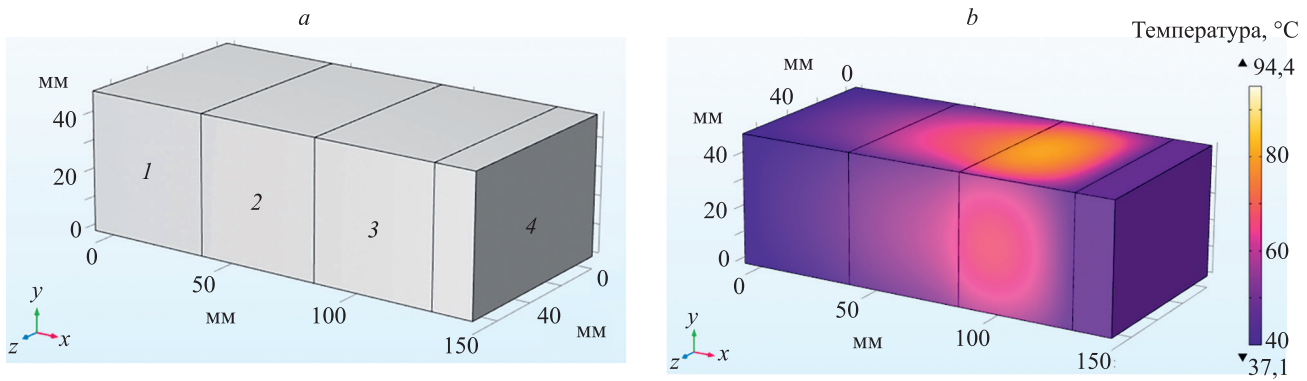


Рис. 5. Модель блока (а) и распределение температуры (b) внутри блока при втором вычислительном эксперименте
 Fig. 5. Block model (a) and temperature distribution (b) inside the block during the second computational experiment

$\lambda_{1,y} = 0,21 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{1,z} = 0,11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{2,x} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{2,y} = 0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{2,z} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{3,x} = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{3,y} = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_{3,z} = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

При расчетах на всех поверхностях блока было задано граничное условие естественной конвекции. На радиаторе определено условие вынужденной конвекции при скорости воздуха 0,5 м/с (обдув идет снизу вверх), $T_{\text{окр}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферное давление считалось нормальным. Мощности тепловыделения для трех областей: $P1 = 1 \text{ Вт}$, $P2 = 1 \text{ Вт}$, $P3 = 4 \text{ Вт}$.

Результаты расчета приведены на рис. 5, b. Время проведения данного расчета также намного меньше секунды, что позволило выполнить расчеты в режиме реального времени.

Отметим, что традиционные методы расчета, учитывающие сложную геометрию блока, дадут более точное, но не оперативное решение. Время проведения расчетов может занять как несколько минут, так и несколько часов в зависимости от подробности выбранной сетки. При этом, чем более сложная геометрия рассматривается, тем более подробная сетка будет нужна.

В настоящей работе при выборе сетки было учтено условие, что при дальнейшем ее сгущении температурное распределение существенно не изменяется.

Перспективным направлением для дальнейшего исследования представляется использование квазирегулярных сеток [15, 16], которые содержат большее число узлов в наиболее теплонапряженных областях блока усиления мощности. Данный подход позволит оптимизировать вычисления, поскольку в областях, где температура распределена по блоку практически равномерно не требуется брать большое количество узлов. Напротив, в наиболее теплонапряженных областях температура распределена по блоку неравномерно (присутствуют значительные температурные перепады), следовательно сетка должна быть там более подробной.

Заключение

Проведенный анализ известных тепловых моделей радиоэлектронной аппаратуры показал, что они обладают достаточной точностью за счет применения метода конечных элементов для теплового расчета сложной 3D-модели радиоэлектронной аппаратуры. Однако тепловые расчеты по таким моделям не будут оперативными, что не позволяет применять их на этапе эксплуатации радиолокационной станции для получения прогноза температур радиоэлектронной аппаратуры в режиме реального времени.

В работе рассмотрены подходы по получению оперативного температурного расчета. В качестве основного недостатка изученных научных работ отмечены грубые допущения (например, однородное распределение температуры по всему блоку), что не отражает реальную картину функционирования радиоэлектронной аппаратуры.

Разработанный алгоритм оперативного поддержания температурного режима блоков усиления мощности передающего комплекса радиолокационной станции на основе тепловой модели позволяет получать температурный прогноз для блоков в режиме реального времени, учитывая, при этом, специфику функционирования радиоэлектронной аппаратуры. Проведенный вычислительный эксперимент показал работоспособность и эффективность разработанного алгоритма.

Перспективным представляется использование технологии параллельных вычислений, то есть проведение вычислений прогнозных значений температур одновременно для всей совокупности блоков из состава передающего комплекса радиолокационной станции на нескольких процессорах. В этом случае при работе программы каждый процессор будет производить расчеты только своего блока (или группы блоков), что позволит значительно ускорить расчеты.

Реализация технологии параллельных вычислений для расчета температурных полей группы блоков и проверка возможности проведения данных вычислений в режиме реального времени требуют дальнейших исследований.

Литература

1. Гойденко В.К. Комплексная тепловая модель программно-аппаратного комплекса связи // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 141–157. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10108>
2. Михайлов М.В., Продан Н.В., Ренев М.Е. Численное моделирование газодинамики при работе широкодиапазонного ракетного сопла с пористой вставкой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 4. С. 836–842. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-836-842>
3. Тукмакова А.С., Демченко П.С., Тхоржевский И.Л., Новотельнова А.В., Ходзицкий М.К. Моделирование процесса стационарного термоотражения для измерения теплопроводности материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1216–1225. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1216-1225>
4. Скибина Н.П. Численное исследование нестационарного течения газа в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с учетом процесса теплообмена // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 6. С. 50–61. <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.6.003>
5. Дегтярев А.А., Молчанов А.В. Верификация расчета нагрева фюзеляжа беспилотного летательного аппарата реактивной струей турбореактивного двигателя // Вестник Концерна ВКО «Алмаз — Антей». 2020. № 3. С. 69–76. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-69-76>
6. Викулов А.Г. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах // Вестник Концерна ВКО «Алмаз — Антей». 2017. № 2. С. 61–78. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-2-61-78>
7. Сухоруков М.П. Исследование и нахождение оптимальных тепловых моделей электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. Р. 102.
8. Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-ЭО: моделирование произвольных конструкций электроники на механические и тепловые воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 291–300.
9. Шалумов А.С., Чабриков С.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-Т: анализ и обеспечение тепловых характеристик конструкций аппаратуры // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 291–301.
10. Тимошенко А.В., Перлов А.Ю., Гончаренко В.И., Ермаков А.В. Моделирование тепловых процессов в передающих комплексах радиолокационных станций мониторинга // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 180–187.
11. Аронов П.С., Галанин М.П., Родин А.С. Математическое моделирование контактного взаимодействия элементов твэла с учетом ползучести на основе mortar-метода // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 110. С. 1–24. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-110>
12. Ежова Н.А., Соколинский Л.Б. Обзор моделей параллельных вычислений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2019. Т. 8. № 3. С. 58–91. <https://doi.org/10.14529/cmse190304>
13. Спёвак Л.Ф., Нефедова О.А. Численное решение двумерного нелинейного уравнения теплопроводности с использованием радиальных базисных функций // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14. № 1. С. 9–22. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-1-9-22>
14. Дутьнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
15. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
16. Альшин А.Б., Альшина Е.А., Болтнев А.А., Качер О.А., Корякин П.В. Численное решение начально-краевых задач для уравнений соболевского типа методом квазиравномерных сеток // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. № 3. С. 493–513.

References

1. Goydenko V.K. Complex thermal model of communication hardware and software system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 141–157. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10108>
2. Mikhailov M.V., Prodan N.V., Renev M.E. Numerical simulation of gas dynamics during operation of a wide-range rocket nozzle with a porous insert. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 836–842. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-836-842>
3. Tukmakova A.S., Demchenko P.S., Tkhorzhevskiy I.L., Novotel'nova A.V., Khodzitsky M.K. Simulating the process of steady-state thermoreflectance for measuring the thermal conductivity of materials. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1216–1225. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1216-1225>
4. Skibina N.P. Computational study of unsteady gas flow in the combustion chamber of a ramjet engine with heat transfer. *Computational Technologies*, 2020, vol. 5, no. 6, pp. 50–61. (in Russian). <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.6.003>
5. Degtyarev A.A., Molchanov A.V. Verification of calculations for heating the fuselage of an unmanned aerial vehicle with a jet stream of a turbojet engine. *Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation*, 2020, no. 3, pp. 69–76. (in Russian). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-69-76>
6. Vikulov A.G. Mathematical simulation of heat transfer in spacecraft. *Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation*, 2017, no. 2, pp. 61–78. (in Russian). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-2-61-78>
7. Sukhorukov M.P. Research and finding the optimal thermal models of electronic radio products of radio electronic equipment. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 102. (in Russian)
8. Shalumov A.S., Pershin E.O., Shalumov M.A. ASONIKA-M-3D: simulation of arbitrary electronic structures on mechanical and thermal effects. *Automation. Modern technologies*, 2019, vol. 73, no. 7, pp. 291–300. (in Russian)
9. Shalumov A.S., Chabrikov S.V., Shalumov M.A. ASONIKA-T: analysis and ensuring of the apparatus thermal characteristics. *Automation. Modern technologies*, 2018, vol. 72, no. 7, pp. 291–301. (in Russian)
10. Timoshenko A.V., Perlov A.Y., Goncharenko V.I., Ermakov A.V. Modeling of thermal processes in transmitting complexes of radar monitoring stations. *Russian Aeronautics*, 2021, vol. 64, no. 4, pp. 783–791. <https://doi.org/10.3103/s1068799821040255>
11. Aronov P.S., Galanin M.P., Rodin A.S. Mathematical modeling of the contact interaction of the fuel element with creep using the mortar-method. *Keldysh Institute Preprints*, 2020, no. 110, pp. 1–24. (in Russian). <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-110>
12. Ezhova N.A., Sokolinsky L.B. Survey of parallel computation models. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 58–91. (in Russian). <https://doi.org/10.14529/cmse190304>
13. Spevak L.F., Nefedova O.A. Numerical solution to a two-dimensional nonlinear heat equation using radial basis functions. *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–22. (in Russian). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-1-9-22>
14. Dul'nev G.N. *Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1984, 247 p. (in Russian)
15. Kalitkin H.H. *Numerical Methods*. Moscow, Nauka Publ., 1978, 512 p. (in Russian)
16. Al'shin A.B., Al'shina E.A., Boltnev A.A., Kacher O.A., Koryakin P.V. Numerical solution of initial-boundary value problems for Sobolev-type equations on quasi-uniform grids. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2004, vol. 44, no. 3, pp. 465–484.

Авторы

Шафир Роман Сергеевич — лаборант-исследователь, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, 117198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-0877-7533>, romanshafir@mail.ru

Давыдова Марина Александровна — кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 7006472962](https://orcid.org/0000-0002-9255-7353), <https://orcid.org/0000-0002-9255-7353>, m.davydova@physics.msu.ru

Корпусов Максим Олегович — доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, 117198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5336-4559>, korpusov@gmail.com

Перлов Анатолий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, 124498, Российская Федерация, [sc 57215321304](https://orcid.org/0000-0001-8480-3772), <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>, laperlov@yandex.ru

Тимошенко Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, начальник комплексного отдела, АО «Радиотехнический институт имени А.Л. Минца», Москва, 127083, Российская Федерация, [sc 57217674240](https://orcid.org/0000-0002-9791-142X), <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.07.2023

Одобрена после рецензирования 28.10.2023

Принята к печати 17.11.2023

Authors

Roman S. Shafir — Research laboratory assistant, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, 117198, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-0877-7533>, romanshafir@mail.ru

Marina A. Davydova — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 7006472962](https://orcid.org/0000-0002-9255-7353), <https://orcid.org/0000-0002-9255-7353>, m.davydova@physics.msu.ru

Maxim O. Korpusov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, 117198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5336-4559>, korpusov@gmail.com

Anatoly Yu. Perlov — PhD, Associate Professor, NIU MIET, Moscow, 124498, Russian Federation, [sc 57215321304](https://orcid.org/0000-0001-8480-3772), <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>, laperlov@yandex.ru

Alexander V. Timoshenko — D.Sc, Professor, Head of Department, JSC "Academician A.L.Mints Radiotechnical Institute", Moscow, 127083, Russian Federation, [sc 57217674240](https://orcid.org/0000-0002-9791-142X), <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Received 12.07.2023

Approved after reviewing 28.10.2023

Accepted 17.11.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»