

Моделирование тепловых процессов в высокопотенциальных радиолокационных станциях с плотной компоновкой радиоэлектронной аппаратуры с учетом неравномерного распределения температуры внутри блоков

Р. С. ШАФИР^{1,2,*}, А. Ю. ПЕРЛОВ³, А. В. ТИМОШЕНКО⁴, М. О. КОРПУСОВ²

¹АО «Радиотехнический институт им. акад. А.Л. Минца», 127083, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

³Московский институт электронной техники, 124498, Москва, Зеленоград, Россия

⁴Московский авиационный институт, 125993, Москва, Россия

*Контактный автор: Шафир Роман Сергеевич, e-mail: romanshafir@mail.ru

Поступила 20 февраля 2023 г., доработана 07 марта 2023 г., принята в печать 12 апреля 2023 г.

Представлены результаты исследования тепловых процессов в радиолокационной станции (РЛС) с плотной компоновкой радиоэлектронной аппаратуры, которая приводит к неравномерному распределению температуры внутри блоков, нелинейным динамическим взаимодействиям между элементами аппаратуры, а также к анизотропности среды относительно процессов теплообмена. Показано, что модель позволит реализовать режим проактивного управления функциональными характеристиками станции. По итогам моделирования тепловых процессов приведены оценки потенциальных возможностей РЛС при работе в теплонапряженных режимах. Приведены основные положения алгоритма, позволяющего с высокой точностью на заданном горизонте прогнозировать значения температуры блоков усиления мощности и отказы блоков по перегреву.

Ключевые слова: радиолокационная станция, блок усиления мощности, тепловая модель, воздушное охлаждение, проактивное управление.

Цитирование: Шафир Р.С., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В., Корпусов М.О. Моделирование тепловых процессов в высокопотенциальных радиолокационных станциях с плотной компоновкой радиоэлектронной аппаратуры с учетом неравномерного распределения температуры внутри блоков. Вычислительные технологии. 2023; 28(5):33–44. DOI:10.25743/ICT.2023.28.5.004.

Введение

При создании современных высокопотенциальных радиолокационных станций (РЛС), решающих задачи мониторинга космического пространства, разработчик вынужден решать многокритериальную задачу. С одной стороны, необходимо обеспечить заданный температурно-влажностный режим внутри ограниченного размером контейнера радиоэлектронного комплекса (РЭК) (рис. 1) с учетом высокой плотности компоновки передающей аппаратуры. С другой стороны, необходимость повышения энергетического

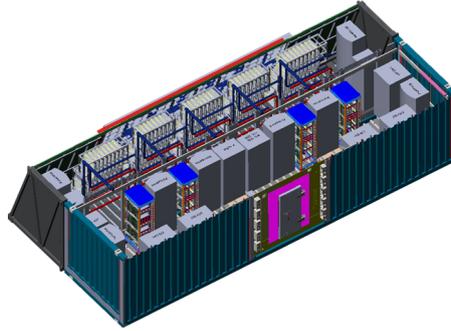


Рис. 1. Общий вид передающего радиоэлектронного комплекса в виде 3D-модели
Fig. 1. General view of the transmitting REC in the form of a 3D model

потенциала РЛС, в том числе при излучении квазинепрерывных зондирующих сигналов, требует существенного увеличения излучаемой мощности в приемопередающих модулях и блоках усиления мощности (БУМ) в зависимости от конфигурации активной фазированной антенной решетки.

Увеличение излучаемой мощности приводит к повышению тепловыделения РЭА внутри радиоэлектронного комплекса, а высокая плотность компоновки обуславливает возникновение нелинейного динамического непрямого взаимного влияния блоков друг на друга, что в свою очередь приводит к неравномерному распределению температуры внутри элементов РЭК. Возникновение нелинейных эффектов при теплообмене между блоками усиления мощности обусловлено формированием излучаемой мощности в апертуре активной фазированной антенной решетки на раскрытие антенного полотна, что приводит к изменению тепловыделения БУМ за счет отраженной мощности излучаемого сигнала [1]. При этом возникновение одновременного отказа определенного количества блоков усиления мощности в связи с перегревом аппаратуры усиления сигналов может привести к критическому отказу станции.

Поскольку в состав РЛС дальнего обнаружения нового поколения входит более тысячи блоков усиления мощности без резервирования, в них реализована защита от неисправностей на программном уровне. В результате функционирования станции в теплонапряженном режиме возникают риски периодических автоматических отключений этих блоков, нагретых до верхней граничной температуры (обратное включение блоков в работу осуществляется после их остывания). Смена состояний БУМ вызывает перемежающиеся отказы аппаратуры — многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера.

Как показывает опыт эксплуатации РЛС дальнего обнаружения, перемежающиеся отказы могут возникать не только из-за собственного нагрева БУМ вследствие их работы на высокой токовой нагрузке, но и за счет их взаимного теплового влияния друг на друга и местоположения в контейнере. При этом аппаратура станции переходит в частично работоспособное состояние с некоторым снижением эффективности функционирования. Это проявляется прежде всего в том, что перемежающиеся отказы блоков усиления мощности передающего комплекса приводят к снижению энергетического потенциала станции и, как следствие, к невозможности выполнения требований задач по назначению.

Один из вариантов предотвращения перегрева в РЛС нового поколения — применение так называемого режима проактивного управления аппаратурой, целью которого является гарантированное поддержание тактико-технических характеристик на основе прогнозирования отказов в реальном масштабе времени [2].

Однако требуемая эффективность режима проактивного управления определяется применением валидированной и верифицированной [3] тепловой модели по реальным данным о функционировании РЛС. Физически и математически корректная тепловая модель позволяет, во-первых, синтезировать оптимальную систему охлаждения [4], а во-вторых, прогнозировать значения температуры на определенный промежуток времени вперед, что позволит существенно снизить вероятность отказа БУМ, а также уменьшить риск возникновения пожароопасных ситуаций.

Таким образом, целью данной работы является исследование тепловых процессов в высокопотенциальных радиолокационных станциях с плотной компоновкой радиоэлектронной аппаратуры.

1. Анализ тепловых моделей

Существующие тепловые модели не в полной мере позволяют реализовать эффективный режим проактивного управления. Так, в работе [5] тепловая модель основана на применении линейного уравнения теплопроводности, а также на гипотезе о постоянстве интенсивности источников тепла во времени, из-за чего данная модель позволяет корректно формализовать штатную работу высоковольтной РЭА, но не позволяет описать сверхинтенсивные режимы ее работы и учесть нелинейные эффекты, связанные с тепловым взаимодействием элементов. Кроме того, модель не учитывает отведение тепла с РЭА путем вентиляции и конвекции. Основным достоинством модели следует отметить учет свойств анизотропности среды при процессах обмена теплом, что является важным физическим фактором для синтеза тепловой модели станции.

Один из вариантов решения нестационарной задачи теплопроводности в случае плотной компоновки высоковольтной РЭА и нестационарных внешних воздействий описан в работе [6], где численно и аналитически исследованы возможности улучшения условий теплообмена с помощью явления генерации акустических волн. Однако применение такого подхода в режиме реального времени не представляется возможным.

Оригинальный подход к описанию тепловых процессов предложен в работе [7], в которой проведено исследование процесса нагрева трехзонной пористой среды, насыщенной жидкостью, с помощью акустического поля. Данный подход целесообразно применять лишь к одномерной задаче.

В работе [8] рассматривается математическая модель теплового взаимодействия блоков усиления мощности из состава РЛС дальнего обнаружения, основанная на учете параметров скважности и длительности зондирующих сигналов, подаваемых на блоки. Авторами предложено перейти от уравнения теплопроводности к системе полуэмпирических линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая описывает температурную динамику взаимодействующих блоков. Предложенная тепловая модель достаточно проста для ее численной реализации, однако имеет и существенные недостатки, в том числе невозможность учета нагрева окружающей среды (воздуха) при работе в сверхинтенсивных режимах. Кроме того, указанная модель не позволяет учесть неоднородное пространственное распределение температуры по блоку, что связано с допущением об однородности и изотропности блоков. Такое допущение позволяет рассматривать модели лишь с усредненной по блоку температурой, что далеко не всегда оправданно, поскольку, например, при неправильном отведении тепла от блоков одна часть блока может быть нагрета значительно, а другая уже быть охлаждена. Поэтому для обоснования параметров системы охлаждения, которая будет обеспечи-

вать охлаждение целого блока, а не отдельных его частей, необходимо учитывать, что температура внутри блока распределена неравномерно.

В работе [9] тепловая модель построена на решении линейного дифференциального уравнения с начальным условием на температуру. Она позволяет описать процессы нагрева и охлаждения с выходом на стационарный режим. В силу линейности задачи получаемые решения имеют экспоненциальный характер. Применение данной модели для исследования процессов теплообмена в изучаемой нами системе будет некорректным, поскольку при работе РЭА в теплонапряженных режимах температурная динамика БУМ будет представлять собой нестационарный ряд за счет изменения скважности зондирующих сигналов радиолокационной станции.

Моделированию процессов теплообмена, а также гидро- и газодинамики в РЭА посвящено большое число работ [10–12]. Особенностью этих работ является использование специализированных САПР. Из основных ограничений САПР можно выделить, во-первых, их работу с классическими тепловыми моделями, которые не всегда способны учесть теплонапряженные режимы работы и процессы функционирования современных радиоэлектронных комплексов, а, во-вторых, во многих САПР выбор метода решения задачи и ее вычислительная реализация скрыты от пользователя и, как правило, носят упрощенный характер.

Таким образом, описанные выше ограничения классических тепловых моделей РЭА обуславливают необходимость разработки тепловой модели, оптимальной с точки зрения вычислительных затрат и времени проведения вычислений. Такая модель позволит реализовать возможности проактивного управления функциональными характеристиками РЛС, чтобы прогнозировать отказы с требуемой точностью в режиме реального времени.

2. Формализация процессов теплообмена во внутреннем объеме РЭК

Полагаем, что радиоэлектронный комплекс высокопотенциальной РЛС выполнен в форме прямоугольного параллелепипеда, внутри которого плотно расположены блоки усиления мощности, являющиеся источниками тепла, пространство между ними заполнено воздухом.

Для решения задачи расчета температурной динамики во внутреннем объеме РЭК требуется учитывать основные режимы функционирования станции, а также физические свойства воздуха и материалов БУМ. Чрезвычайно важно, чтобы задача была поставлена математически корректно, а именно, её решение должно существовать, быть единственным, а также устойчивым.

С учетом специфики задачи процессы теплообмена в РЭК необходимо описать с помощью дифференциального уравнения конвективного теплообмена (уравнения Фурье–Кирхгофа):

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla T) \right) = \operatorname{div}(\mathbf{k}, \nabla T) + \mu \Phi - p \operatorname{div}(\mathbf{v}) + F(\mathbf{r}, T, t), \quad (1)$$

где ρ — плотность вещества внутри РЭК (плотность воздуха и материала блоков); c — удельная теплоемкость вещества внутри РЭК; T — скалярное поле температуры (воздух и БУМ); \mathbf{v} — векторное поле скорости потоков воздуха внутри комплекса; \mathbf{k} — вектор из коэффициентов теплопроводности среды; μ — динамический коэффициент

вязкости жидкости в системе охлаждения; Φ — диссипативная функция; p — скалярное поле давления воздуха внутри РЭС; $F(\mathbf{r}, T, t)$ — удельная мощность источников тепла (БУМ); ∇ — векторный дифференциальный оператор набла; div — дифференциальный оператор дивергенции.

Векторное поле скорости (скалярное поле давления), а также плотность могут меняться с течением времени, поэтому для их нахождения в каждый момент времени в каждой точке пространства можно использовать уравнения Навье–Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla \mathbf{v}) = \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} + \nu \Delta \mathbf{v}, \\ p = p(\rho, T), \end{cases} \quad (2)$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости, Δ — оператор Лапласа.

Система уравнений (1), (2) позволяет учесть анизотропность среды относительно процессов теплообмена за счет рассмотрения векторного коэффициента \mathbf{k} , а не скалярного, неравномерное распределение тепла внутри БУМ, охлаждение блоков с помощью потоков воздуха за счет наличия конвективного слагаемого в уравнении (1), нелинейность процессов обмена теплом между БУМ путем задания нелинейной функции $F(T, M, t)$, которая учитывает взаимное влияние топологии блоков, а также режимы работы станции. Пример конкретной нелинейности, которая возникает в задаче нагрева полупроводника за счет электрического поля, рассмотрен в работе [13].

Принудительное перемещение воздушных потоков можно учесть за счет слагаемого \mathbf{f} , входящего в систему (2), которое является векторным полем массовых сил.

Для корректной постановки задачи разработки тепловой модели РЭС система дифференциальных уравнений, записанная выше, должна быть дополнена начальными и граничными условиями, которые обеспечат единственность решения системы. Таким образом, основой тепловой модели является решение начально-краевой задачи с дифференциальными уравнениями (1), (2).

Для высокоточной оценки надежности РЭС особенно важен учет нелинейностей в дифференциальном уравнении, поскольку добавление нелинейностей в уравнение чрезвычайно сильно изменяет характер решения, а иногда может приводить даже к разрушению решений, [14] что в нашем случае по физическому смыслу задачи будет соответствовать сверхинтенсивному росту температуры БУМ и риску возникновения пожароопасной ситуации. Данное обстоятельство обуславливает необходимость исследования и учета условий в РЭС, которые приводят к разрушению решений дифференциальных уравнений, а также определению мер, которые необходимо предпринять, чтобы данное явление не возникало в исследуемой нами системе.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма учета тепловых процессов в интересах организации режима проактивного управления РЭС. Ключевыми операциями алгоритма являются:

- математическая формализация процессов теплообмена между блоками внутри РЭС;
- прогноз значений температуры внутри РЭС на требуемый горизонт.

Предложенный алгоритм основан на решении системы дифференциальных уравнений (1), (2), позволяющей рассчитывать в реальном времени температурную динамику внутри РЭС с плотной компоновкой блоков с учетом их нелинейных взаимодействий,



Рис. 2. Блок-схема алгоритма учета тепловых процессов в интересах проактивного управления радиолокационной станцией

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for taking into account thermal processes in the interests of proactive management for radar control

анизотропности среды, потоков воздуха, а также неравномерного распределения температуры внутри блоков.

Для оценки эффективности алгоритма в качестве первого шага рассмотрим упрощенную систему.

3. Практическая часть

Процессы теплообмена и газодинамики внутри РЭК можно описать с помощью системы (1), (2). Однако для проведения демонстрационного вычислительного эксперимента примем следующие допущения: будем предполагать, что в РЭК отсутствуют направленные потоки воздуха, среда изотропна, а также отсутствует нелинейный теплообмен между БУМ. С учетом этих допущений система (1), (2) сводится к рассмотрению следующей начально-краевой задачи:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\mathbf{k}, \nabla T) + \sum_{j=1}^N F_j, \\ T|_{t=0} = T_0, \\ T|_{\Gamma} = T_1, \end{cases} \quad (3)$$

Отметим, что ρ , c , \mathbf{k} не являются константами, это функции, зависящие от координат, причем на границе воздух – БУМ они претерпевают резкий скачок. Функции F_j описывают тепловое воздействие источников нагрева. Первое уравнение системы представляет собой упрощенное уравнение (1). Второе уравнение — это начальное условие на температуру. Третье уравнение — граничное условие, задающее температуру на стенках РЭК. Еще одним упрощением в рамках первого моделирования будет рассмотрение двухмерной, а не трехмерной задачи.

В качестве исходных данных для проведения вычислительного эксперимента были приняты:

- 1) размеры РЭК: длина $L_x = 3$ м, ширина $L_y = 1$ м;
- 2) состав РЭК: $N = 14$ БУМ, две охлаждающие установки;
- 3) мощности и режимы работы блоков;
- 4) пороговые значения температуры БУМ: $T_{н} = 20$ °С, $T_{в} = 60$ °С;
- 5) параметры дифференциальных уравнений: $\rho_{в} = 1.2041$ кг/м³ — плотность воздуха, $\rho_{б} = 2700$ кг/м³ — плотность материала БУМ, $c_{в} = 1007$ Дж/(кг·°С) — удельная теплоемкость воздуха, $c_{б} = 900$ Дж/(кг·°С) — удельная теплоемкость материала БУМ, $k_{в} = 0.022$ Вт/(м·К) — коэффициент теплопроводности воздуха, $k_{б} = 236$ Вт/(м·К) — коэффициент теплопроводности материала блока;
- 6) время безотказной работы РЭС в теплонапряженном режиме 20 мин;
- 7) число разбиений сетки: $N_x = 50$ — по оси X , $N_y = 50$ — по оси Y , $J = 1200$ — по времени.

На рис. 3 представлена блок-схема работы программы. В программу поступают динамические и статические данные, на основе которых производится расчет значений температуры внутри РЭК в дискретном наборе точек в дискретные моменты времени. Программа обеспечивает хранение данных, а также визуализацию. В результате работы программы определяются максимальные времена работы БУМ, а также наименее надежные блоки.

Численное решение упрощенной системы дифференциальных уравнений проведено в системе MATLAB с помощью разностных методов на основе написания оригинального кода. Выбор системы MATLAB обусловлен его универсальностью, а также удобством проведения расчетов и графической визуализации информации. Применение разностных методов возможно реализовать на языке программирования Python или на другом. Дополнительные ограничения, связанные с выбором именно системы MATLAB, отсутствуют.

На рис. 4 приведены графики распределения температуры внутри РЭК в два момента времени. В момент времени 300 с все блоки еще работают в теплонапряженном режиме и нагреваются. В момент времени 700 с часть блоков уже достигла критичес-



Рис. 3. Блок-схема работы программы

Fig. 3. Block diagram of the program

ких температур и отключилась во избежание перегрева, а часть блоков продолжает работать в теплонапряженном режиме.

На рис. 5 приведены графики зависимости средней температуры нескольких блоков от времени: слева — результаты модели, в которой учитывается равномерное распределение температуры по блокам, справа — результаты модели, в которой температура распределена по каждому блоку неравномерно.

Вычислительный эксперимент показывает, что в модели с равномерным распределением температуры по блокам она не достигнет своего критического значения при заданных мощностях в течение 20 мин. Однако результаты модели, учитывающей неравномерное распределение температуры по блокам, показывают, что в блоках при тех же мощностях будут достигнуты критические температуры. Это обстоятельство определяет критическую важность учета неравномерности температуры по блокам с целью построения адекватной тепловой модели РЭС в интересах высокоточной оценки параметров надежности.

Таким образом, обоснована необходимость учета неравномерного распределения температуры по БУМ, а также оптимизации расположения блоков и системы охлаждения.

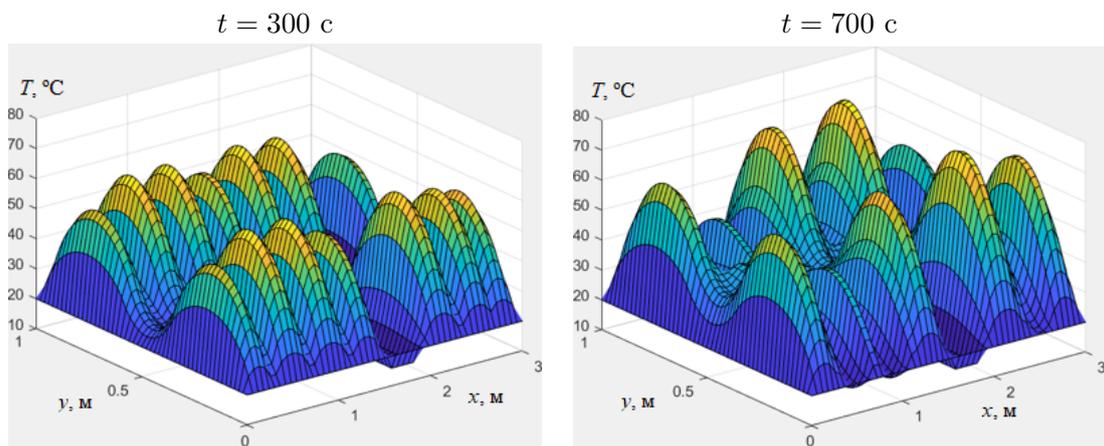


Рис. 4. Распределение температуры внутри РЭК в два момента времени
Fig. 4. Temperature distribution inside the REC at two moments of time

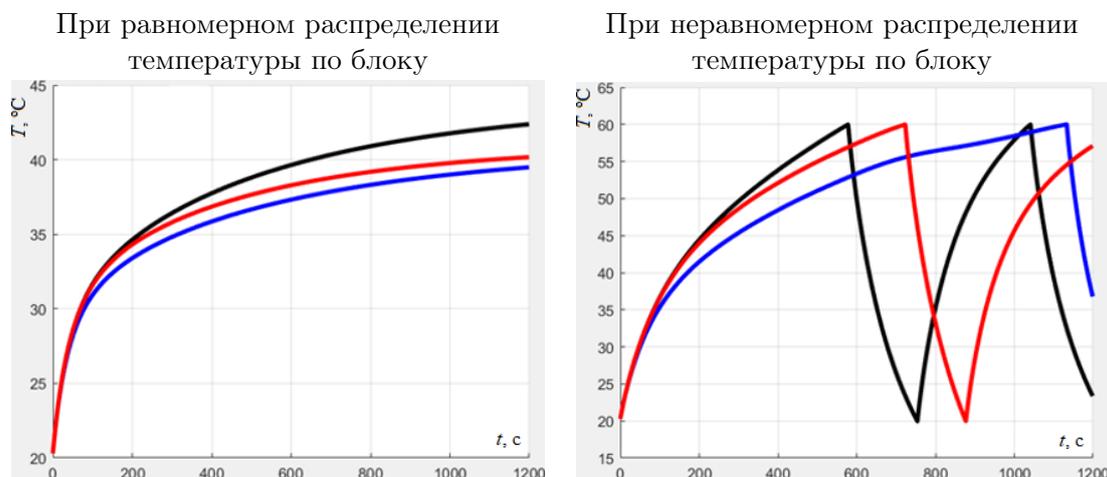


Рис. 5. Графики зависимости средней температуры нескольких блоков от времени
Fig. 5. Graphs of the average temperature of several blocks versus time

Поскольку на данном этапе рассматривалась не реальная, а модельная компоновка РЭК, результаты носят качественный характер.

В результате работы программы определено максимальное время работы БУМ в теплонеприжатых режимах. Например, время работы блока 3 составляет 576 с, блока 4 — 1132 с, блока 6 — 723 с. Различное время работы блоков обусловлено их различным расположением относительно холодильных установок и различными габаритами. Определены наиболее уязвимые относительно перегревов блоки. Обоснована необходимость учета неравномерного распределения температуры по БУМ, а также оптимизации расположения блоков и системы охлаждения.

Выводы:

1. Разработанная модель тепловых процессов РЛС с плотной компоновкой БУМ позволяет выявить недостатки системы охлаждения при моделировании работы блоков за счет учета неравномерности распределения по ним температуры.
2. Полученные результаты моделирования позволяют оптимизировать компоновку РЭК в части числа и расположения блоков и воздухоохладителей.
3. Разработан алгоритм работы тепловой модели РЛС для реализации режима проактивного управления.
4. Полученные результаты моделирования позволяют оперативно вычислять время работы блоков в интересах прогнозирования отказов в режиме реального времени.

Направления по дальнейшему развитию модели:

- учет нелинейности, анизотропности, а также комбинированной системы охлаждения для повышения степени адекватности тепловой модели перспективной радиолокационной станции дальнего обнаружения;
- масштабирование тепловой модели на большее число БУМ;
- построение трехмерной модели;
- учет шумов аппаратуры;
- вычисление параметров надежности на основе полученного массива температур;
- прогноз вероятностей отказов БУМ.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481.0

Список литературы

- [1] Ступин Д.Д., Перлов А.Ю., Маврин А.В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС. Известия ЮФУ. Технические науки. 2018; (2):143–155. DOI:10.23683/2311-3103-2018-3-143-155.
- [2] Осипов А.В., Тимошенко А.В., Перлов А.Ю., Львов К.В. Интеллектуальная система поддержки функциональных характеристик РЛК мониторинга на основе прогнозирования отказов. Вычислительные технологии. 2020; 25(6):95–103. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.006.
- [3] Железнякова А.Л. Технологии верификации и валидации в численном газодинамическом моделировании. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018; 19(2). DOI:10.33257/PhChGD.19.2.687. Адрес доступа: <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/687>.
- [4] Каляев И.А., Дордопуло А.И., Левин И.И., Федоров А.М. Развитие отечественных многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем: от воздушного к жидкостному охлаждению. Труды СПИИРАН. 2017; (50):5–31. DOI:10.15622/sp.50.1.

- [5] Гришко А.К., Горячев Н.В., Кочегаров И.И. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016; (1):82–88.
- [6] Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Stozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. Energy. 2020; 190. DOI:10.1016/j.energy.2019.116303.
- [7] Хусаинова Г.Я. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду. Вычислительные технологии. 2019; 24(3):117–124. DOI:10.25743/ICT.2019.24.3.009.
- [8] 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):180–187. DOI:10.3103/S1068799821040255.
- [9] Викулов А.Г. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах. Вестник Концерна ВКО “Алмаз — Антей”. 2017; (2):61–78. DOI:10.38013/2542-0542-2017-2-61-78.
- [10] Юша В.Л. Моделирование процессов нагрева органического теплоносителя в системе рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки на базе тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора. Динамика систем, механизмов и машин. 2016; (4):362–370.
- [11] Скибина Н.П. Численное исследование нестационарного течения газа в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с учетом процесса теплообмена. Вычислительные технологии. 2020; 25(6):50–61. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.003.
- [12] Дегтярев А.А., Молчанов А.В. Верификация расчета нагрева фюзеляжа беспилотного летательного аппарата реактивной струей турбореактивного двигателя. Вестник Концерна ВКО “Алмаз — Антей”. 2020; (3):69–76. DOI:10.38013/2542-0542-2020-3-69-76.
- [13] Корпусов М.О. О разрушении решения уравнения, родственного уравнению Гамильтона–Якоби. Математические заметки. 2013; 93(1):81–95. DOI:10.4213/mzm8955.
- [14] Корпусов М.О., Свешников А.Г., Юшков Е.В. Методы теории разрушения решений нелинейных уравнений математической физики. М.: МГУ; 2014: 364.

Modelling of thermal processes in high-potential radars with a dense layout of electronic equipment, taking into account the uneven temperature distribution inside the blocks

R. S. SHAFIR^{1,2,*}, A. YU. PERLOV³, A. V. TIMOSHENKO⁴, M. O. KORPUSOV²

¹Joint-stock company “Academician A.L. Mintz Radiotechnical Institute”, 127083, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

³National Research University of Electronic Technology, 124498, Moscow, Zelenograd, Russia

⁴Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Russia

*Corresponding author: Roman S. Shafir, e-mail: romanshafir@mail.ru

Received February 20, 2023, revised March 07, 2023, accepted April 12, 2023.

Abstract

The paper presents an original model for the study of research on thermal processes in a radar station with a dense layout of electronic equipment, which leads to an uneven temperature distribution inside the blocks, nonlinear dynamic interactions between the elements, as well as along with the anisotropy of the medium with respect to heat transfer processes.

The aim of the work is to build a thermal model for studying the temperature dynamics inside the REC.

The basis of the constructed thermal model is relies on a system of differential equations that describes the processes of heat transfer inside the REC and takes into account both the thermal interaction of power amplification units with air, as well as air and uneven temperature distribution inside the blocks.

The solution to the problem of calculating the temperature values inside the REC for a over certain period of time was made on the basis of a system of differential equations using finite difference methods.

The results of the program, written on the basis of the constructed thermal model, are the calculated array of temperature values in the internal region of the REC, as well as certain times of operation of all RCMs before failure, which makes it possible to identify allows identifying critical elements.

Conclusions:

1. The developed model makes it possible helps to identify the shortcomings of the cooling system when while simulating the operation of the units by taking into account when the uneven distribution of temperature over the blocks is accounted.
2. The obtained simulation results make it possible to optimize allows optimizing the layout of the REC in terms of the number and location of both blocks and air coolers.
3. An algorithm for the operation of the thermal model of the radar has been developed to implement the mode of proactive control of functional characteristics.
4. The obtained simulation results make it possible to quickly calculate allows calculating the operating time of the blocks in the interests of while predicting their failures in real time.

Keywords: radar station, power amplification unit, thermal model, air cooling, proactive control.

Citation: Shafir R.S., Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Korpusov M.O. Modelling of thermal processes in high-potential radars with a dense layout of electronic equipment, taking into account the uneven temperature distribution inside the blocks. *Computational Technologies*. 2023; 28(5):33–44. DOI:10.25743/ICT.2023.28.5.004. (In Russ.)

Acknowledgements. This work is supported by the Russian Science Foundation, grant No. 21-19-00481.

References

1. **Stupin D.D., Perlov A.Yu., Mavrin A.V.** Research and testing of AESA transmission complexes to ensure the tactical and technical characteristics of the radar. *Izvestiya JUFU. Tehnicheskie Nauki*. 2018; (2):143–155. DOI:10.23683/2311-3103-2018-3-143-155. (In Russ.)
2. **Osipov A.V., Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Lvov K.V.** Intelligent system for supporting functional characteristics of radar monitoring based on failure prediction. *Computational Technologies*. 2020; 25(6):95–103. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.006. (In Russ.)
3. **Zheleznyakova A.** Verification and validation technologies for gas dynamic simulations. *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*. 2018; 19(2). DOI:10.33257/PhChGD.19.2.687. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/687>. (In Russ.)
4. **Kalyaev I., Dordopulo A., Levin I., Fedorov A.** Evolution domestic of multichip reconfigurable computer systems: from air to liquid cooling. *SPIIRAS Proceedings*. 2017; 1(50):5–31. DOI:10.15622/sp.50.1. (In Russ.)

5. **Grishko A.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I.** Anisotropic model of a system for measuring and analyzing temperature fields of radio-electronic modules. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Control.* 2016; (1):82–88. (In Russ.)
6. **Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K.** Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. *Energy.* 2020; 190. DOI:10.1016/j.energy.2019.116303.
7. **Khusainova G.Ya.** Thermal processes during acoustic impact on a liquidsaturated porous. *Computational Technologies.* 2019; 24(3):117–124. DOI:10.25743/ICT.2019.24.3.009. (In Russ.)
8. **Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Goncharenko V.I., Ermakov A.V.** Modeling of thermal processes in transmitting complexes of radar monitoring stations. *Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika.* 2021; (4):180–187. DOI:10.3103/S1068799821040255. (In Russ.)
9. **Vikulov A.G.** Mathematical simulation of heat transfer in spacecraft. *Journal of “Almaz — Antey” Air and Space Defence Corporation.* 2017; (2):61–78. DOI:10.38013/2542-0542-2017-2-61-78. (In Russ.)
10. **Yusha V.L.** Modelling of organic heating processes for a heat carrier in the heat loss recovery system of a mobile compressor unit based on a low-speed single-stage reciprocating compressor. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics).* 2016; (4):362–370. (In Russ.)
11. **Skibina N.P.** Computational study of unsteady gas flow in the combustion chamber of a ramjet engine with heat transfer. *Computational Technologies.* 2020; 25(6):50–61. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.003. (In Russ.)
12. **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; (3):69–76. DOI:10.38013/2542-0542-2020-3-69-76. (In Russ.)
13. **Korpusov M.O.** On the blow-up of the solution of an equation related to the Hamilton–Jacobi equation. *Mat. Zametki.* 2013; 93(1):81–95. DOI:10.4213/mzm8955. (In Russ.)
14. **Korpusov M.O., Sveshnikov A.G., Yushkov E.V.** *Metody teorii razrusheniya resheniy nelineynykh uravneniy matematicheskoy fiziki [Methods of the destruction theory for solutions of nonlinear equations of mathematical physics].* Moscow: MGU; 2014: 364. (In Russ.)