

Труды МАИ. 2024. № 137
Trudy MAI, 2024, no. 137

Научная статья
УДК 621.396/004.032.26
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181879>

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Андрей Сергеевич Кузнецов^{1✉}, Андрей Александрович Кручинин²,
Михаил Николаевич Ушкар³**

^{1,2,3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

¹kuznetsovas@mai.ru✉

²andru10092000@gmail.com

³ushkarmn@mai.ru

Аннотация. Исследуется влияние параметров различных вариантов систем охлаждения, применяемых в конструкциях бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Обсуждаются способы снижения температуры составных частей бортовой РЭА с помощью систем принудительного воздушного охлаждения, основанных на использовании радиатора, установленного на корпусе усилителя мощности СВЧ или удаленного радиатора в качестве которого используется основание БРЛС. В данном случае для отвода тепла используются контурные тепловые трубы. Рассматриваются алгоритмы расчетов параметров различных вариантов систем принудительного воздушного охлаждения теплонагруженных модулей. Полученные результаты подтверждаются 3D моделированием конструкции бортовой РЭА. Доказывается, что наиболее эффективной системой охлаждения теплонагруженных модулей РЭА, является вариант с удаленным радиатором с отводом тепла с помощью контурных тепловых труб. Отмечается, что разработанная расчетно-экспериментальная методика позволяет на ранних этапах проектирования оценить параметры надёжности и эффективности конструкторских проектных решений с учётом реальных значений температур составных частей бортовой радиоаппаратуры.

Ключевые слова: системы охлаждения, надёжность бортовой радиоаппаратуры, контурные тепловые трубки, удаленный радиатор, 3D тепловая модель

Для цитирования: Кузнецов А.С., Кручинин А.А., Ушкар М.Н. Методика повышения надёжности и эффективности конструкций бортовой радиоаппаратуры на ранних этапах проектирования // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181879>

Original article

METHODOLOGY FOR INCREASING THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF ON-BOARD RADIO EQUIPMENTSTRUCTURE AT THE EARLY STAGES OF DESIGN

Andrey S. Kuznetsov¹, **Andrey A. Kruchinin²**, **Mikhail N. Ushkar³**

^{1,2,3}Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹kuznetsovas@mai.ru

²andru10092000@gmail.com

³ushkarmn@mai.ru

Abstract. The design of the construct of on-board radio equipment is characterized by the requirements of increasing reliability, minimizing weight and size characteristics, limiting power consumption, as well as reducing development time and cost. In this case, the parameters of the using cooling systems, have a significant impact on the design. The most common way reducing of the temperature of the components of the on-board radio equipment is the using of the forced air cooling systems. In this regard, there is a need to optimize cooling systems and predict their parameters at the early stages of design. The computational and experimental methodology of the parametric synthesis of forced air cooling systems of on-board electronic equipment structures is consider in this article. This methodics makes possible to increase the efficiency of the cooling system and the reliability of the design of on-board radio equipment as a whole. The algorithms of the calculating of the parameters of various variants of the forced air cooling systems for heat-loaded modules are describes in this article. The obtained results are confirmed by 3D modeling which use

a computer-aided design system of the development of the design of the onboard electronic equipment. This methodology allow synthesize a preferable, version of the forced air cooling system for a heat-loaded module, that makes it possible to increase reliability, minimize weight and size characteristics and power consumption of the on-board electronic equipment and also reduce the development time and cost of the design.

Keywords: Cooling systems, Reliability of on-board radio equipment, Loop heat pipes, Remote heatsink, 3D thermal model

For citation : Kuznetsov A.S., Kruchinin A.A., Ushkar M.N. Methodology for increasing the reliability and efficiency of on-board radio equipmentstructure at the early stages of design. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181879>

Введение

Ранние этапы проектирования характеризуются наличием структуры бортовой радиоаппаратуры (БРА), перечнем составных частей (СЧ) и их параметрами, местом размещения на ЛА. На основе этих данных проводится предварительный расчёт надёжности, по известной зависимости [1]:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \lambda_{\mathcal{E}_j}$$

где λ_{Σ} - общая эксплуатационная интенсивность отказов БРА; $\lambda_{\mathcal{E}_j}$ - эксплуатационная интенсивность отказов j -ой СЧ.

$$\lambda_{\mathcal{E}_i} \approx \lambda_{0i} \prod_{k=1}^l K_k$$

где, λ_0 – базовая интенсивность отказов j -ой СЧ, определённая для конкретных (начальных) эксплуатационных факторов.

Коэффициенты K_k учитывают изменения интенсивности отказов в зависимости от различных эксплуатационных факторов. $k = \overline{1, l}$; l - количество факторов.

Значимыми эксплуатационными факторами являются следующие коэффициенты: электрического режима, температуры, эксплуатации, уровня приёмки и др. Значения этих коэффициентов приводятся в источниках, например, [1], но они относятся к комплектующим элементам. Для СЧ БРА (УМ СВЧ, БЦВМ, синтезаторы частот и т.п.) значения надёжности фиксируются в ТУ и отражают эксплуатационные факторы, определяемые группой аппаратуры в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.304-98 или другими нормативными документами [9]. Большинство этих коэффициентов учитывается при разработке ТУ на СЧ БРА. Значения некоторых коэффициентов зависят от конкретной конструкции БРА: компоновки СЧ, наличия охлаждающего воздуха (ОВ) и его параметров и т.д. Поэтому реальные значения температурного коэффициента можно определить только после разработки конструкции. С другой стороны, на показатели надёжности существенно влияет температура. На Рис. 1 показана зависимость эксплуатационной интенсивности отказов УМ СВЧ бортовой РЛС от температуры [2].

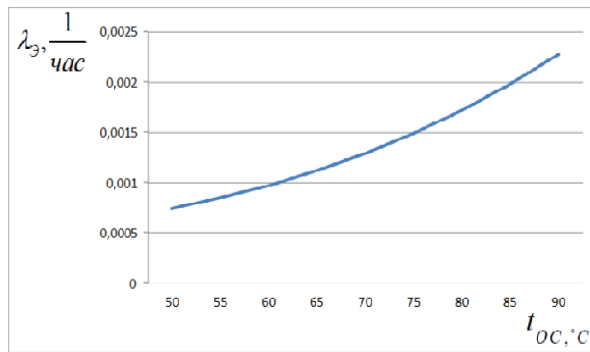


Рис. 1. Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов от температуры $^{\circ}\text{C}$.

Как видно из рисунка, при повышении температуры УМ на 20°C . эксплуатационная интенсивность отказов, примерно, удваивается. Такая зависимость надёжности от температуры обуславливает необходимость определения возможности снижения температур СЧ конструкции БРА на ранних этапах проектирования.

Самым распространённым способом снижения температуры СЧ является применение систем принудительного воздушного охлаждения (ПВО). Поэтому достигнуть поставленной цели можно путём оценки параметров и повышения эффективности систем ПВО.

Подобным исследованиям посвящены работы многих авторов. Например, работы [2-5] характеризуются тем, что авторы решали задачу повышения эффективности ПВО путём совершенствования отдельных частей: радиаторов, оребрённых каналов, плоских каналов и т.п. Такой подход не позволяет решить задачу повышения эффективности ПВО бортовых РЛС, поскольку они представляют собой систему взаимосвязанных каналов. В работе [6] авторы учли этот недостаток,

но не рассматривали возможность повышения эффективности систем ПВО путём использования удалённых радиаторов.

При выборе системы ПВО необходимо учитывать отличительные особенности современной БРА, к которым относятся:

- латентность конструкции их СЧ, которые обычно разрабатываются смежными организациями и разработчику БРА неизвестна их конструкция. Поэтому, при решении задач моделирования тепловых режимов, границей раздела ответственности разработчика СЧ и разработчика БРА является температура поверхности корпусов, которая определяется по результатам либо теплового моделирования разработчиком СЧ, либо испытаний. Поэтому можно считать, что значения допустимой температуры каждой СЧ для стационарного теплового режима $t_i^{доп}$, известны.
- существенная неравномерность распределения температурного поля конструкции БРА, что обуславливает возможность применения удалённых радиаторов.

В работе предлагается расчётно-экспериментальная методика параметрического синтеза систем ПВО конструкций БРА, отличающаяся от известных системным подходом к анализируемой конструкции, что позволяет на ранних этапах проектирования повысить точность оценки параметров надёжности и эффективность конструкции БРА в целом.

Постановка и решение задачи

Задача ставится следующим образом: для заданной компоновки конструкции БРА синтезировать систему охлаждения, обеспечивающую максимальную эффективность проектного решения конструкции БРА. Под эффективностью проектного решения понимается отношение вероятности безотказной работы (ВБР) конструкции БРА к затратам:

$$\mathcal{E}(u_i) = \frac{P(u_i)}{Z(u_i)} \mid \forall u_i \in U$$

где $P(u_i)$ - ВБР проектного решения u_i ; $u_i \in U$; $Z(u_i)$ - затраты на реализацию проектного решения;

$$P(u_i) = e^{-\lambda_i^{\Sigma} t}$$

Тогда

$$v_{ij}^{ОПТ} \rightarrow \max \mathcal{E}_i \mid v_{ij}^{ОПТ} \in V^{ДОП} \quad (1)$$

при условии, что:

$$v_{ij}^{ОПТ} \rightarrow \{t_{ij}\} \leq \{t_{ij}^{ДОП}\} \mid v_{ij}^{ОПТ} \in V^{ДОП}$$

$$w_{ij} \leq W^{ДОП}, m_{ij} \leq m^{ДОП}, c_{ij} \leq C^{ДОП}$$

где: $j = \overline{1, k}$; k - количество СЧ, входящих в состав проектного решения u_i ; $v_{ij}^{ОПТ}$ -- оптимальный вариант системы ПВО; $t_{ij}^{ДОП}$, t_{ij} -- допустимое и реальное значение температуры корпуса; $V^{ДОП}$ - подмножество допустимых вариантов системы ПВО;

w_{ij} - мощность потребления ПВО; m_{ij} - масса ПВО; c_{ij} - стоимость ПВО; $W^{доп}$, $m^{доп}$, $C^{доп}$ - допустимая мощность потребления, допустимая масса, допустимая стоимость вариантов системы ПВО соответственно.

Задача решается методом направленного перебора вариантов построения систем охлаждения. Исходными данными являются: 3D модель варианта компоновки БРА, потребляемая мощность, допустимые и реальные значения температурного поля поверхностей СЧ БРА, температура охлаждающего воздуха.

Алгоритм решения задачи можно представить в виде последовательности этапов проектных решений.

Этап.1. Формирования тепловой макромодели конструкции БРА.

Для решения задачи анализа теплообмена в конструкциях РЭС используются различные тепловые макромодели [3-5]. В данном случае рассматривается система ПВО, где теплообмен, осуществляется между внешними поверхностями корпусов СЧ БРА и ОВ. Поэтому, адаптированную к расчёту теплового режима, конструкцию БРА можно представить в виде системы воздушных каналов, образованных внешними поверхностями корпусов СЧ БРА.

Температура поверхности СЧ БРА равна алгебраической сумме температуры окружающей среды и перегревов, обусловленных источниками и стоками тепловой энергии, рассеиваемой в конструкции СЧ, и наведенными от других источников тепла конструкции БРА.

Считаем, что стационарный тепловой режим конструкций БРА определяется теплообменом системы изотермических поверхностей(ИП) составных СЧ БРА.

Макромодель теплового режима конструкции БРА можно представить либо в виде тепловой схемы, либо в виде матрицы термических проводимостей между ИП СЧ БРА и ОВ.

Таким образом, для формирования тепловой макромодели необходимо сформировать систему ИП СЧ конструкции БРА, образующих каналы переноса тепловой энергии.

Как уже отмечалось выше, распределение значений температуры поверхности СЧ имеет существенный разброс. Поэтому поверхности СЧ БРА необходимо выделить ИП.

Для каждой поверхности j -ой СЧ БРА с использованием матрицы температуры, $\{t_{ij}\}$ формируются ИП $\{П_{ij}\}$. Из матрицы температур выбирается максимальное значение $t_{\max j}$. При этом одна ИП объединяет все значения температур, которые меньше максимального на $f\%$ (значение выбирается в соответствии с требуемой точностью формирования макромодели). Затем выбирается следующая максимальная температура $t_{\max j+1}$, которая меньше $t_{\max j}$ более чем на $f\%$. Таким образом, процедура повторяется до того момента пока вся поверхность СЧ не будет разбита на ИП. Рассмотрим формирования тепловой макромодели на примере радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС.

Таблица 1 – Потребляемая тепловая мощность составными частями РЧМ

№ п/п	Наименование СЧ	P_B , Вт	$t_{i\text{доп}}$, °С
1	Усилитель мощности СВЧ	20 0	$t_{1\text{доп}}$
2	Синтезатор частот (СЧ)	75	$t_{2\text{доп}}$
3	Задающий генератор (ЗГ)	10	$t_{3\text{доп}}$
4	БЦВМ	60	$t_{4\text{доп}}$

Тепловая макромодель радиочастотного модуля (РЧМ) БРЛС представлена на рис.2: 1- усилитель мощности (УМ) СВЧ, 2- синтезатор частот и синхросигналов (СЧС), 3- задающий генератор (ЗГ), 4- БЦВМ, 5 – несущее основание.

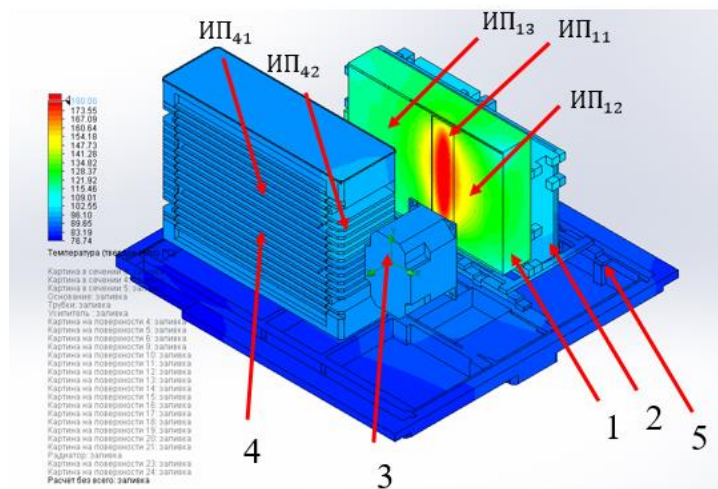


Рис. 2. Температурное поле поверхностей СЧ радиочастотного модуля БРЛС при естественном воздушном охлаждении.

Тепловая схема РЧМ представлена на рисунке рис. 3.

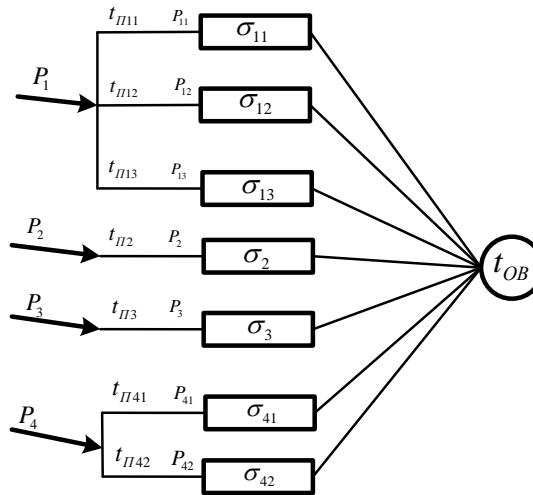


Рис. 3. - тепловая схема РЧМ БРЛС

Экспериментально определяем значения тепловых проводимостей σ_{ij} и далее находим значения тепловых потоков - P_{ij} . Самым теплонагруженным блоком является УМ СВЧ. Рассмотрим методику синтеза эффективной системы ПВО на его примере.

Синтез системы ПВО с радиатором

Существуют различные методики оценки теплоотдачи радиаторов [6,7,18]. Применим методику, изложенную в [6].

Исходными данными для решения задачи синтеза, взятыми из модели РЧМ и результатов расчёта теплового режима, являются значения площадей и теплоотдачи изотермических поверхностей с максимальной температурой

ИП11, ИП12, размеры канала между основанием УМ СВЧ и БЦВМ - (b, l) .

Представим процесс синтеза в виде алгоритма:

1. По исходным данным выбираем площадь основания радиатора, которая
2. Задаёмся формой штыря и шагом его установки. Определяем число штырей n_u и формируем модель штыревого радиатора.

3. Определяем необходимую теплоотдачу штыревого радиатора [21] P_{pad} :

$$P_{pad} > (P_{11} + P_{12})$$

4. Определяем необходимую теплоотдачу одного штыря радиатора:

$$P_{ш} = \frac{P_{pad}}{n_u}$$

5. Определяем коэффициент теплоотдачи штыря:

$$\alpha = \frac{P_u^2}{(1,14\Theta th(Xh))^2 \times US \lambda_p} \left(\frac{Вт}{м^2 \times ^\circ C} \right)$$

где λ_p - коэффициент теплопроводности материала радиатора,

Θ - температурный напор между основанием штыря и окружающей средой:

$$\Theta = t_{ос} - \frac{t_{ос} - 10}{2}$$

U - периметр поперечного сечения штыря;

S - площадь поперечного сечения штыря;

$X = 3,7$ - поправочный коэффициент;

h – высота штыря - ($h \leq b$)

6. Определяем скорость ОВ, обеспечивающую требуемую теплоотдачу штыря:

$$V = \left(\frac{\alpha \times d_{\text{э}}^{0,42}}{K} \right)^{1,72}$$

Где $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр штыря радиатора,

K – коэффициент, учитывающий свойства окружающей среды:

$$K = \rho_0 \times t_m + 1,41 \left[\frac{Bm}{M^4 * C^4} \right]$$

$$\rho_0 = -1,8 \times 10^{-3} \left[\frac{1}{\text{°C}} \right]$$

t_m -средняя температура между радиатором и ОВ;

7. Определяем требуемый расход ОВ: $W = V \times D_{\text{э}}$;

Где $D_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала: $D_{\text{э}} = \frac{2(b \times l)}{b + l}$;

8. Корректируем 3D модель РЧМ с учётом установки на основание СВЧ усилителя радиатора.

9. Определяем аэродинамическое сопротивление РЧМ $G \approx 250$ Па.(рис.3.1).

- 10.Выбираем вентилятор, статическое давление которого превышает аэродинамическое сопротивление РЧМ, а расход ОВ не менее расхода, определённого в п.7; например вентилятор ИОЛЛА0,8ЭВ-2,8-50-4620(280 кг/ч, 500 Па).

- 11.Фиксируем параметры выбранного вентилятора: потребляемую мощность, массу, стоимость.

12. Если подходящего вентилятора нет или его параметры превышают значения, ограниченные (1), необходимо изменить исходные данные, например, увеличить площадь радиатора. При этом необходимо учесть снижение теплоотдачи периферийных штырей, которое может составлять (40-50)%.

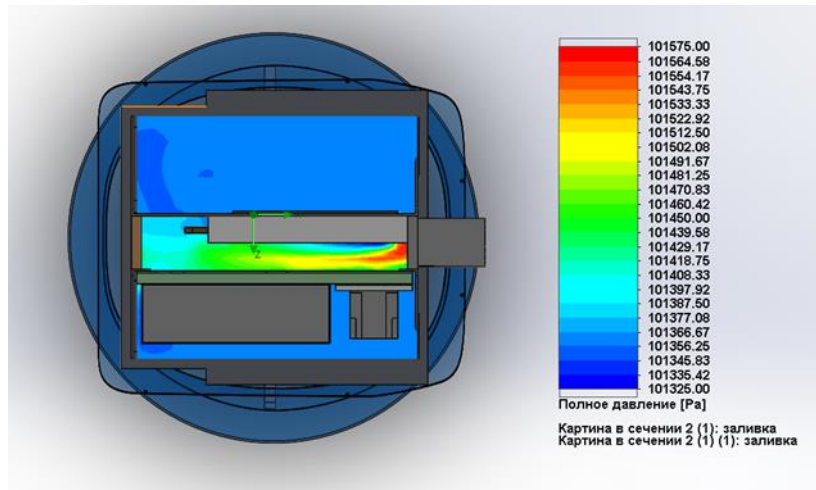


Рис. 3.1. Аэродинамическое сопротивление РЧМ БРА

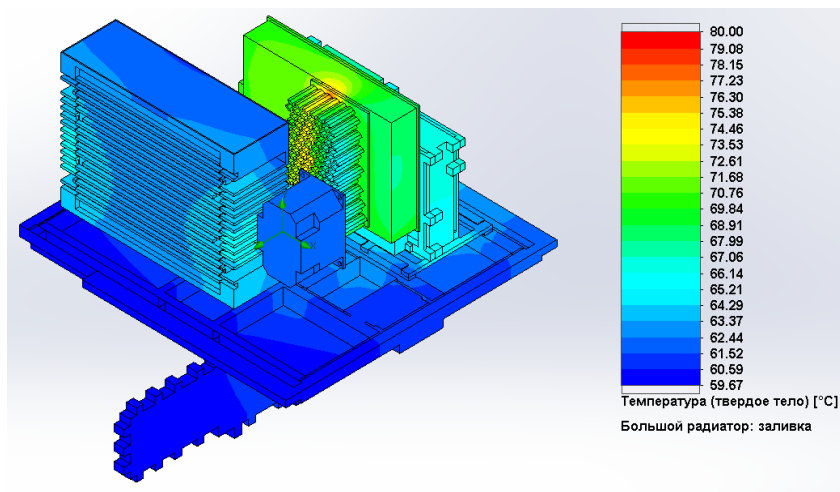


Рис. 4. Температурное поле РЧМ БРА.

Таблица 2. Значения максимальных температур СЧ РЧМ, полученных на основе тепловой модели, показанной на рис.4.

СЧ БРА	УМ СВЧ	СЧС	БЦВМ	ЗГ
t, °C	70-79	64-66	61-67	60-61

13. Исходя из реального значения максимальной температуры каждой СЧ, приведенных в таблице 2 и зависимости, представленной на рис.1 определяется значение эксплуатационной интенсивности отказов.

14. С учётом затрат на СО проверяем выполнения условие (1). Если это условие выполнено, оцениваем эффективность проектного решения.

Синтез СОУМ СВЧ с удалённым радиатором

Анализ температурного поля РЧМ (Рис.4) показывает, что несущее основание конструкции может быть использовано в качестве удалённого радиатора, поскольку его температура существенно ниже температуры УМ СВЧ. В этом случае перенос теплового потока с основания УМ СВЧ на несущее основание обеспечивается контурными тепловыми трубами (КТТ), которые имеют низкое значение термического сопротивления [8,9,10]. Тепловая схема СО с удалённым радиатором представлена на рис.5.

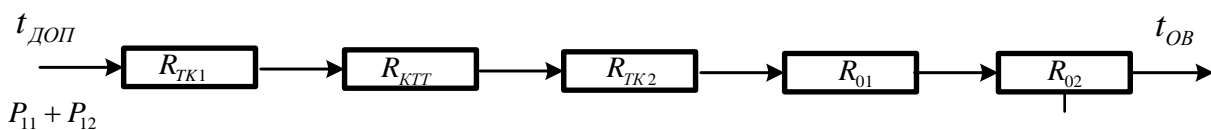


Рис. 5. - Тепловая схема СО.

где R_{TK1} - термическое сопротивление теплового контакта УМ СВЧ и термоинтерфейса испарителя; $R_{КТТ}$ - термическое сопротивление КТТ, R_{TK2} - термическое сопротивление теплового контакта термоинтерфейса конденсатора КТТ и удаленного основания РЧМ; R_{01} - термическое сопротивление удаленного основания РЧМ, R_{02} - термическое сопротивление теплоотдачи основания РЧМ.

Исходные данные для расчета СОс удалённым радиатором: площади $ИП_{11}, ИП_{12}(S_{11}, S_{12})$, значения тепловых потоков - P_{11}, P_{12} ; значения допустимой температуры УМ СВЧ - $t^{ДОП}$ и охлаждающего воздуха - $t^{ОВ}$; 3D модель конструкции РЧМ.

Процесс синтеза представим в виде алгоритма:

1. Определение по исходным данным требуемого значения термического сопротивления системы ПВО с удалённым радиатором (основанием РЧМ), обеспечивающего нормальный тепловой режим:

$$R_{TP} < \frac{t^{ДОП} - t^{ОВ}}{P_{11} + P_{12}}$$

2. Исходя из значений S_{11}, S_{12} и свободной площади основания, определяем количество КТТ, которое можно разместить в конструкции - $n_{КТТ}$.

. По данным [8] определяем тепловую проводимость КТТ.

4. Выбираем термопасту и определяем значения термического сопротивления контактов интерфейсов КТТ с УМ СВЧ и несущим основанием R_{TK1}, R_{TK2} ,

Корректируем 3D модель РЧМ с учётом размещения КТТ [13,19,20]. Пример такого размещения показан на рис.6.

6. Определяем термическое сопротивление удалённого радиатора при естественном ВО - R_{O1} .

7.Находим термическое сопротивление СО (R_{CO}), которое определяется КТТ и удалённым радиатором. Например, при размере несущего основания 400х400ммпри естественном

$$\text{ВО } R_{O1} \approx 0,01 \text{Вт} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}, R_{O2} \approx 0,33 \text{Вт} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}, R_{TK} \approx (10^{-2} - 10^{-3}) \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}},$$

$$R_{КТТ} \approx 0,15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \text{ (для одной КТТ)}; R_{CO} \approx R_{O2} + \frac{R_{КТТ}}{n_{КТТ}}.$$

8. Проверяем выполнение условия $R_{CO} < R_{TP}$. Если условие не выполняется необходимо снизить значение R_O путём его обдува ОВ.

9. Определяем минимальное значение тепловой проводимости удалённого

$$\text{радиатора: } R_{O2\text{мин}} < R_{TP} - \frac{R_{КТТ}}{n_{КТТ}}.$$

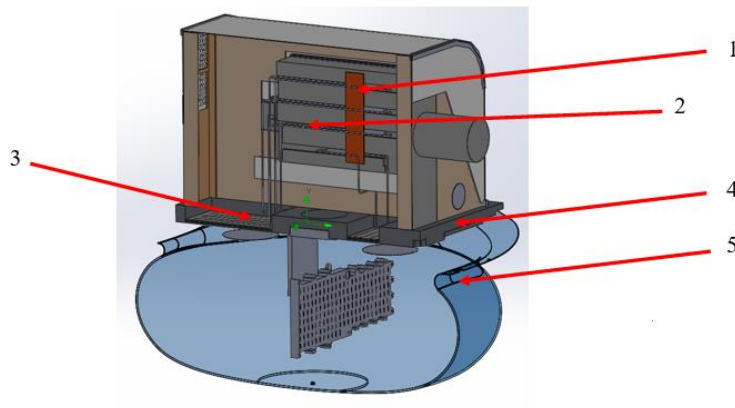


Рис.6. - СО БРА с удалённым радиатором.

1 - Испаритель КТТ, 2 - КТТ, 3 - конденсатор КТТ, 4- несущее основание (радиатор), 5 - радиопрозрачный обтекатель(РПО).

10. Определяем минимальное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_{O_{мин}} = \frac{1}{R_{O2_{мин}} \times S_O}$$

11. Определяем минимальное значение критерия Нуссельта ОВ:

$$Nu_{мин} = \frac{\alpha_{O_{мин}} \times l}{\lambda}$$

Где λ - коэффициент теплопроводности ОВ ($\frac{Вт}{м \times K^\circ}$); l – определяющий размер

удалённого радиатора.

12. Определяем минимальное значение критерия Рейнольдса для случая турбулентного движения ОВ [11,12]:

$$Re_{мин} \approx \left(\frac{Nu_{мин}}{0,032} \right)^{1,25}$$

13. Определяем минимальное значение скорости ОВ, обеспечивающее $Re_{мин}$:

$$v_{мин} = \frac{Re_{мин} \times \alpha}{l}$$

Где α - коэффициент температуропроводности ОВ ($м^2/с$).

Определяем требуемый расход ОВ, обеспечивающий $v_{мин}$

15. Выбираем вентилятор и фиксируем его параметры.

16. Определяем значение термического сопротивления теплоотдачи основания РЧМ при расходе воздуха выбранного вентилятора.

17. Определяем температуру основания УМ СВЧ. Пример расчёта температурного поля РЧМ для случая охлаждения основания РЧМ двумя вентиляторами ИОЛЛА 0,9ЭВ-1,4-8-4425(140 кг/ч, 80 Па) показан на рисунке 7.

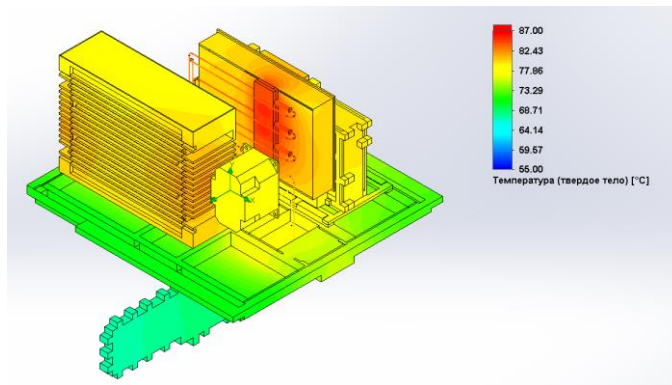


Рис. 7. Температурное поле РЧМ с СО УМ СВЧ с удалённым радиатором.

Таблица 3. Значения максимальных температур СЧ РЧМ, полученных на основе тепловой модели, показанной на рис.7.

СЧ БРА	УМ СВЧ	СЧС	БЦВМ	ЗГ
t,°C	72-85	74-76	74-79	75-76

18. Исходя из реального значения температуры, приведенных в таблице 3 и зависимости, представленной на рис.1 определяется значение эксплуатационных интенсивностей отказов СЧ БРА [14,15].

19. Проверяем выполнение ограничения (1) и если это ограничение выполняется, то оцениваем затраты на СО и определяем эффективность проектных решений [16,17].

Выводы

Рассмотренная выше расчётно-экспериментальная методика позволяет на ранних этапах проектирования решить следующие задачи:

- оценить параметры надёжности БРА с учётом реальных значений температур СЧ БРА,
- оценить эффективность проектных решений конструкций БРА.

Список источников

- 1.Чеканов А.Н. Расчёты и обеспечение надёжности электронной аппаратуры. – М.: КноРус, 2014. – 438 с.
- 2.Старенченко А.В. Разработка методики конструирования теплонагруженных БРЛС малоразмерных ЛА: Дисс. канд. техн. наук. Москва, 2018. - 118 с.
- 3.Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. - СПб: НИУ ИТМО, 2012. - 195 с.
- 4.Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1976. - 232 с.
- 5.Улитенко А.И., Гуров В.С., Пушкин В.А. Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств. - М.: Горячая линия - Телеком, 2012. – 286 с.

- 6.Бородин С.М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 52 с.
- 7.Муратов А.В., Ципина Н.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС. - Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2007. - 96 с.
- 8.Майданик Ю.Ф. Контурные тепловые трубы -высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники // Электроника НТБ. 2017. № 6. С. 122-130.
- 9.Кузнецов А.С., Ушкар М.Н. Методика формирования конструктивного базиса бортовых РЛС БПЛА // Радиотехника. 2023. № 9. С. 51-62.
- 10.Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В. Разработка и исследование контурных тепловых труб // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 407-414.
11. Новгородцев Е.В., Колток Н.Г., Карпов Е.В. Расчётное исследование влияния числа Рейнольдса на характеристики пространственного нерегулируемого воздухозаборника с овальным входом // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177662>
12. Краев В.М., Янышев Д.С. Проблемы расчёта переходных процессов в при турбулентном течении в каналах электроустановок ЛА // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13411>
13. Пронина П.Ф. Аналитическое моделирование теплопереноса в элементах экранно-вакуумной теплоизоляции // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174599>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-04)

14. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
15. Добрянский В.Н., Рабинский Л.Н., Радченко В.П., Соляев Ю.О. Оценка ширины зоны контакта между плоскоовальными каналами охлаждения и корпусом приёмопередающего модуля активной фазированной антенной решётки // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98252>
16. Орлов А.И. Теория принятия решений. - М.: Экзамен, 2010. - 574 с.
17. Белов В.В., Лопатин А.К. Оригинальная свертка двух критериев для задачи выбора лучшего варианта // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 8. С. 14-19.
18. Овчинников С.В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи. – Саратов: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf
19. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 77 с.
20. Альмовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Понамарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
21. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1976. – 232 с.

References

1. Chekanov A.N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoi apparatury* (Calculations and ensuring the reliability of electronic equipment), Moscow, KnoRus, 2014, 438 p.
2. Starenchenko A.V. *Razrabotka metodiki konstruirovaniya teplonagruzhennykh BRLS malorazmernykh LA* (Development of a methodology for designing heat-loaded radars of small-sized aircraft), Doctor's thesis, Moscow, 2018, 118 p.
3. Dul'nev G.N. *Teoriya teplo- i massoobmena* (Theory of heat and mass transfer), Saint Petersburg, NIU ITMO, 2012, 195 p.
4. Rotkop L.L., Spokoinyi Yu.E. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoi apparatury* (Ensuring thermal conditions in the design of radio-electronic equipment), Moscow, Sovetskoe radio, 1976, 232 p.
5. Ulitenko A.I., Gurov V.S., Pushkin V.A. *Printsipy postroeniya individual'nykh sistem okhlazhdeniya elektronnykh priborov i ustroystv* (Pushkin Principles of constructing individual cooling systems for electronic devices and devices), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2012, 286 p.
6. Borodin S.M. *Obespechenie teplovykh rezhimov v konstruktsiyakh radioelektronnykh sredstv* (Providing thermal conditions in the designs of radio-electronic devices), Ul'yanovsk, UIGTU, 2008, 52 p.
7. Muratov A.V., Tsipina N.V. *Sposoby obespecheniya teplovykh rezhimov REC* (Methods for ensuring thermal conditions RES), Voronezh, Voronezhskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 96 p.

8. Maidanik Yu.F. *Elektronika NTB*, 2017, no. 6, pp. 122-130.
9. Kuznetsov A.S., Ushkar M.N. *Radiotekhnika*, 2023, no. 9, pp. 51-62.
10. Maidanik Yu.F., Vershinin S.V. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2022, vol. 60, no. 3, pp. 407-414.
11. Novogorodtsev E.V., Koltok N.G., Karpov E.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177662>
12. Kraev V.M., Yanyshchev D.S. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13411>
13. Pronina P.F. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174599>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-04](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-04)
14. Kopeika E.A., Verbin A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
15. Dobryanskii V.N., Rabinskii L.N., Radchenko V.P., Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98252>
16. Orlov A.I. *Teoriya prinyatiya reshenii* (Decision theory), Moscow, Ekzamen, 2010, 574 p.
17. Belov V.V., Lopatin A.K. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, no. 8, pp. 14-19.
18. Ovchinnikov S.V. *Konvektivnyi teploobmen* (Convective heat transfer), Saratov, SGU imeni N.G. Chernyshevskogo, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf
19. Egorov V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* (Application of computers for solving heat conduction problems), Saint Petersburg, GU ITMO, 2006, 77 p.

20. Al'movskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponamarev N.B. SolidWorks. *Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike*. (Application of computers for solving heat conduction problems), Saint Petersburg, BKhV- Peterburg, 2005, 800 p.
21. Rotkop L.L., Spokoinyi Yu.E. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoi apparatury* (Providing thermal modes when designing radio-electronic equipment), Moscow, Sovetskoe radio, 1976, 232 p.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024

Одобрена после рецензирования 02.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 01.07.2024; approved after reviewing on 02.07.2024; accepted for publication on 28.08.2024