

Методика однокритериального выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия

Н. В. Горячев¹, И. М. Рыбаков², Н. К. Юрков³

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

¹ra4foc@yandex.ru, ²rybakov_im@mail.ru, ³yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. Разработана методика выбора унифицированного теплоотвода на основе одного критерия, характеризующего способность физического тела препятствовать распространению теплового движения молекул. В качестве критерия выбрано тепловое сопротивление теплоотвода, достаточное для обеспечения нормального температурного режима дискретного, теплонагруженного электрорадиоизделия. Доказано, что тепловое сопротивление в качестве основного критерия выбора позволяет, в ходе моделирования сложных систем в условиях неопределенности внешних воздействующих факторов, получить приближенное решение для такой трудноформализуемой задачи как обеспечение теплового режима теплонагруженного электрорадиоизделия.

Ключевые слова: теплоотвод; тепловое сопротивление; радиокомпонент; расчет; система охлаждения; радиоэлектронная аппаратура; печатная плата

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях возрастающих требований к надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) крайне остро ощущается необходимость единой научно обоснованной методологии применения интеллектуальных методов выбора конструкторских решений на ранних стадиях проектирования, формируемой на основе теплофизического моделирования РЭА, в том числе ответственного применения. Суть проблемы заключается в необходимости системного подхода к созданию высоконадежной аппаратуры в современных системах сквозного проектирования высокотехнологичной аппаратуры на протяжении всего жизненного цикла и, прежде всего, на ранних его стадиях в процессе проведения теплофизического конструирования.

Актуальность данного направления исследования обусловлена непрерывным увеличением степени интеграции РЭА, которое происходит за счет совершенствования ее элементной базы, постоянного снижения массо-габаритных параметров, повышения технологических возможностей производства. Следствием этого является все возрастающая проблема обеспечения тепловых режимов аппаратуры. Расширение номенклатуры корпусов дискретных элементов приводит к существенному росту типономиналов унифицированных теплоотводов и систем охлаждения, что существенно

увеличивает трудоемкость процесса выбора оптимального решения для обеспечения нормального теплового режима, решить которую простым перебором не удастся.

Одновременно с вышесказанным актуальной является проблема интеллектуализации рутинных, но крайне важных этапов теплофизического конструирования, связанных с подбором элементов РЭА, систем и способов охлаждения, определяющих ее тепловой режим.

Современные исследования в области теплофизического моделирования являются ведущим направлением развития методов конструкторско-технологического проектирования РЭА, научные основы которого заложены в работах Л.Л. Роткопа [1], Г.Н. Дульнева [2], В.А. Шахнова, А.М. Тартаковского [3], Ю.Н. Кофанова, Ю.Л. Муромцева и др.

Основы многокритериального выбора альтернативных решений и оптимизации, которые находят применение в конструкторской деятельности, заложены в работах И.Г. Черноруцкого [4], В.Н. Козлова [5]. Примеры по практической реализации методов многокритериального выбора известны по работам Ю.В. Кандырина [6–8].

За рубежом, проблема интеллектуализации этапов теплофизического конструирования, также не остается без внимания. Так эвристические основы выбора теплоотводов и средств охлаждения рассмотрены в работе М.А. МакГвайера, Я. Хуана и Х. Лиена. Вопросы многокритериального выбора с применением группы методов ELECTRE подробно исследованы в работах Б. Роя, Х. Фигуера и В. Массая.

Между тем исследователями в области многокритериального выбора отмечается [4] о ряде сложностей его применения, в частности правильного определения веса критерия. Вследствие этого, авторами предпринята попытка, используя единственный критерий выбора обеспечить приближенное решение при выборе теплоотвода для дискретного электрорадиоизделия.

II. ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАК КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ТЕПЛОТВОДА

В качестве критерия выбора теплоотвода выбран такой параметр теплоотводов и систем охлаждения как тепловое

сопротивление. При теплофизическом конструировании, наиболее часто тепловое сопротивление материалов используется в случае проведения теплового расчета методом электротепловой аналогии.

В случае теплового расчёта полупроводникового электрорадиоизделия (ЭРИ), для обеспечения его нормального теплового режима необходимо чтобы температур кристалла (T_J) не превышала допустимую, а в лучшем случае была ниже на 25%. Для примера будем считать, что полупроводниковый ЭРИ изготовлен в стандартном корпусе с металлическим фланцем ТО-220. При отсутствии теплоотвода тепловая схема такого ЭРИ примет вид показанный на рис. 1.

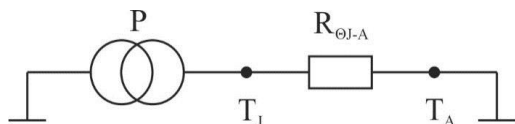


Рис. 1. Тепловая схема ЭРИ без теплоотвода: T_J – температура кристалла; P – мощность рассеиваемая кристаллом; $R_{\Theta J-A}$ – тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда; T_A – температура окружающей среды

Пусть рассеиваемая полупроводниковым кристаллом ЭРИ мощность составляет 5 Ватт, $R_{\Theta J-A} = 50$ °C/Ватт, а температура окружающей среды 25°C. Тогда, согласно (1) температура кристалла равна:

$$T_J = (P \cdot R_{\Theta J-A}) + T_A = (5 \cdot 50) + 25 = 275 \text{ °C} \quad (1)$$

Расчёт (1) показывает, что температура кристалла значительно превышает температуру допустимую для полупроводника. Изменить ситуацию поможет установка ЭРИ на теплоотвод (рис. 2).

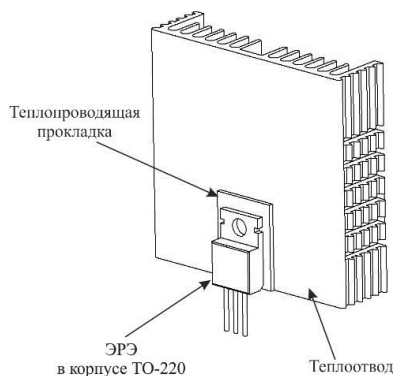


Рис. 2. Установка ЭРИ на теплоотвод

При установке ЭРИ на теплоотвод претерпит изменения тепловая схема. В неё необходимо добавить следующие тепловые сопротивления: $R_{\Theta J-C}$ – тепловое сопротивление кристалл – корпус. Параметр указывается в технических характеристиках ЭРИ; $R_{\Theta C-H}$ – тепловое сопротивление корпус-теплоотвод; $R_{\Theta H-A}$ – тепловое

сопротивление теплоотвод-окружающая среда. Параметр приводится в технической документации на теплоотвод.

Тепловая схема при установке ЭРИ на теплоотвод примет вид, показанный на рис. 4.

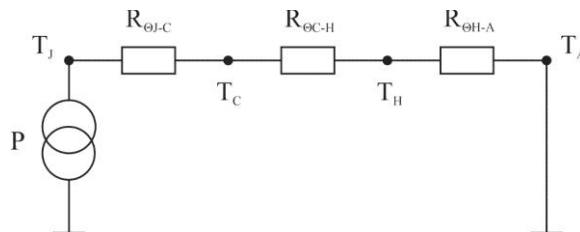


Рис. 3. Тепловая схема ЭРИ установленной на теплоотвод: T_H – температура теплоотвода

Исходя из (1) температура кристалла для схемы, показанной на рис. 3, определяется как:

$$T_J = (P \cdot R_{\Theta J-C} + R_{\Theta C-H} + R_{\Theta H-A}) + T_A.$$

Таким образом, найдём T_J и T_H при тех же исходных данных, что и в (1), дополнительно приняв $R_{\Theta J-C} = 3$ °C/Ватт, $R_{\Theta H-A} = 4$ °C/Ватт, $R_{\Theta C-H} = 0,4$ °C/Ватт:

$$T_J = (5 \cdot 3 + 0,4 + 4) + 25 = 62 \text{ °C} \quad (2)$$

Из расчёта (3) видно, что температура кристалла ЭРИ, установленного на теплоотвод, значительно ниже, чем без него и составляет 62°C. Такое значение температуры позволяет считать, что полупроводниковый ЭРИ работает в нормальном температурном режиме. Таким образом, можно сказать что при инженерном расчёте температуры ЭРЭ определяющим является условие:

$$T_J < T_{J_{\max}} - 25\%$$

где $T_{J_{\max}}$ – максимально допустимая температура кристалла ЭРИ указанная в ТУ.

Используя тепловую схему, показанную на рисунке 4 несложно рассчитать и температуру перегрева теплоотвода, которая составит:

$$T_H = P \cdot R_{\Theta H-A} + T_A = 5 \cdot 4 + 25 = 45 \text{ °C} \quad (3)$$

Значение температуры перегрева теплоотвода необходимо для последующего расчёта теплового режима элементов, установленных в непосредственной близости от теплоотвода.

Таким образом, требуемое тепловое сопротивление, при котором температура электрорадиоизделия сохранится на допустимом уровне, определяется по формуле:

$$R_{\Theta_{\text{Треб}}} = \frac{T_{J_{\max}} - T_{A_{\max}}}{P}, \quad (4)$$

где $T_{J_{\max}}$ – максимально допустимая температура кристалла ЭРИ; $T_{A_{\max}}$ – максимальная температура окружающей среды.

III. МЕТОДИКА ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

В основу методики положен алгоритм с помощью которого происходит выбор конечного решения, т.е. унифицированной конструкции теплоотвода. Алгоритм представлен на рис. 4. и подробно описан в работе [9].

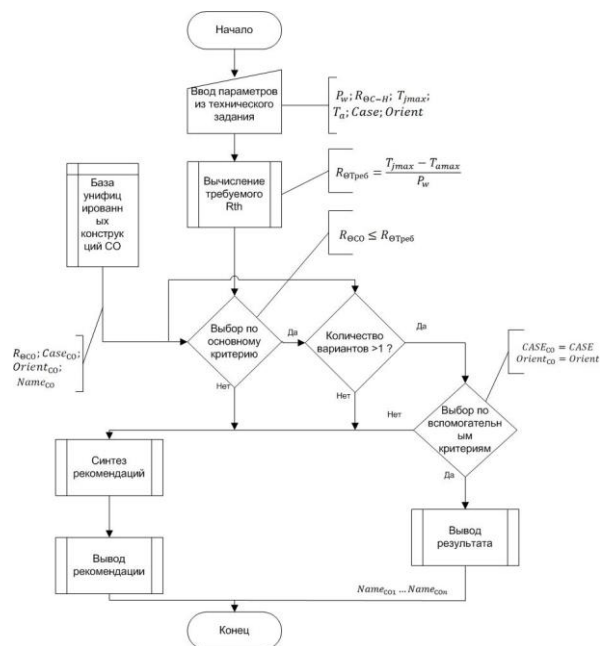


Рис. 4. Алгоритм выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия

Расшифровка параметров, применяемых на разных этапах алгоритма, представлена в таблице.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АЛГОРИТМЕ ВЫБОРА ТЕПЛОТВОДА ДИСКРЕТНОГО ТЕПЛОНАГРУЖЕННОГО ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЯ

Параметр	Расшифровка	Единица измерения
P_w	Мощность, рассеиваемая ЭРИ	Вт
T_a	Температура окружающей среды	°C
T_{jmax}	Максимально допустимая температура кристалла ЭРИ	°C
$R_{\theta Треб}$	Максимально возможное тепловое сопротивление, при котором обеспечивается нормальный тепловой режим ЭРИ	°C/Вт
$R_{\theta CO}$	Тепловое сопротивление унифицированной СО	°C/Вт
Case;	Тип корпуса теплонагруженного ЭРИ	-
Orient	Ориентация теплонагруженного ЭРИ на поверхности ПУ или РЭС	-
Case _{CO}	Тип корпуса, для которого предназначена унифицированная СО	-
Orient _{CO}	Пространственная ориентация при которой должна эксплуатироваться	-

Параметр	Расшифровка	Единица измерения
	унифицированная СО	
Name _{CO}	Типономинал унифицированной СО	-

Для нескольких критериев алгоритм работает следующим образом:

Шаг 1. Ввод исходных данных, взятых из технического задания.

Шаг 2. Вычисляется требуемое тепловое сопротивление.

Шаг 3. Осуществляется выбор СО из базы данных, где хранятся параметры унифицированных конструкций. На этом шаге используется только основной критерий выбора:

$$R_{\theta Треб.} \geq R_{\theta CO}, \quad (5)$$

где $R_{\theta Треб.}$ – максимально допустимое (требуемое) тепловое сопротивление СО, при не превышении которого обеспечивается нормальный тепловой режим элементов РЭС; $R_{\theta CO}$ – тепловое сопротивление унифицированной СО.

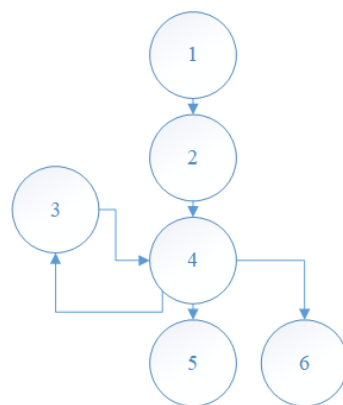


Рис. 5. Методика однокритериального выбора теплоотвода: 1 – техническое задание на проектирование; 2 – расчёт требуемого теплового сопротивления; 3 – база данных с параметрами теплового сопротивления; 4 – сравнение требуемого теплового сопротивления с параметрами теплоотводов; 5 – выход в случае найденного решения; 6 – выход в случае отсутствия решения

Шаг 4. Если количество вариантов найденных в базе данных и удовлетворяющих основному критерию более одного, то осуществляется следующий шаг выбора, при котором используются вспомогательные критерии.

Шаг 5. Полученный результат выводится на дисплей ЭВМ.

Шаг 6. Если на первом этапе выбор не возможен или найден всего один вариант подходящей СО, а также, если не по одному из вспомогательных критериев поиск ничего не дал, то конструктору выдаются рекомендации по возможному решению задачи.

Методика однокритериального выбора, разработанная на основе алгоритма (рис. 4), приведена на рис. 5.

Разработанный алгоритм и методика, используя в своем составе модуль теплового расчета доведены до программной реализации [10].

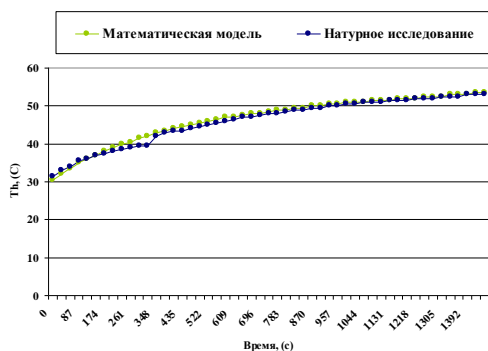


Рис. 6. Результат апробации методики: температуры перегрева, полученные в результате вычислительного и натурального экспериментов

Таким образом, создана система, в которой основным критерием выбора унифицированной СО является соотношение (5). Выбор СО происходит с учетом ее основного параметра – теплового сопротивления ($R_{\text{со}}$). Применение в ходе проектирования методики, основанной на учете только $R_{\text{со}}$, доказало корректность решения задачи выбора теплоотвода для элементов РЭС, испытывающих заданную тепловую нагрузку и имеющих стандартный корпус. Методика была опробована при выборе унифицированных теплоотводов для полупроводниковых транзисторов и диодов в стандартных корпусах SOT-93, TO-3, TO-60, TO-63, TO-66, TO-126, TO-218 TO-220 и др. [11].

Результат апробации методики при выборе теплоотвода типа FK303, которая имеет слаборазвитую поверхность, представлен на рис. 6. Значения температур перегрева при исследовании расчетной тепловой модели теплоотвода и натурального образца FK303, имеют расхождения не более 1%, что доказывает адекватность предложенной методики.

IV. ВЫВОДЫ

Основываясь на корректно выбранном едином критерии, возможно осуществит приближенное решение задачи обеспечения теплового режима теплонагруженного электрорадиоизделия. Следовательно, для получения приближенного решения возможно не прибегать к решению многокритериальной задачи, что позволяет устранить недостатки, сопутствующие решению подобных задач. Для унифицированных теплоотводов и систем охлаждения в качестве единого критерия выбора целесообразно выбрать один из параметров теплоотводов – тепловое сопротивление. Применение в ходе теплофизического конструирования методики, основанной

на учете только теплового сопротивления, доказало возможность корректного решения задачи выбора теплоотвода для теплонагруженных элементов РЭА, испытывающих заданную тепловую нагрузку и имеющих стандартный корпус. Работа с таким обобщающим критерием как тепловое сопротивление крайне важна на ранних стадиях надежность-ориентированного проектирования [11]. Предложенная методика пригодна для решения задачи обеспечения теплового режима теплонагруженных электрорадиоизделий устанавливаемых на печатные платы [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Сов. Радио, 1976. 232с.
- [2] Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по специальности "Конструирование и производство радиоаппаратуры" / Г.Н. Дульнев. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
- [3] Тартаковский А.М. Краевые задачи в конструировании радиоэлектронной аппаратуры / А.М. Тартаковский. Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1984. 132 с.
- [4] Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления: Учебное пособие / И.Г. Черноруцкий. СПб.: Питер, 2004. 256 с.
- [5] Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений : учебное пособие / В.Н. Козлов. М.: Проспект, 2010. 176 с.
- [6] Кандырин Ю.В. Автоматизированный многокритериальный выбор системы охлаждения процессоров / Ю.В. Кандырин, С.А. Хватынец // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 77-82.
- [7] Кандырин Ю.В. Многовариантное проектирование радиаторов для микропроцессоров / Ю.В. Кандырин, С.И. Карачаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 6 (185). С. 51-58.
- [8] Кандырин Ю.В. Автоматизированное проектирование радиаторов для теплонагруженных электронных компонентов / Ю.В. Кандырин, С.И. Карачаров // В сборнике: Фундаментальные и прикладные научные исследования сборник статей Международной научно-практической конференции. 2016. С. 25-30.
- [9] Горячев Н.В. Алгоритмическое и программное обеспечение системы поддержки принятия решения при выборе системы охлаждения электрорадиоизделия / Н.В. Горячев, А.К. Гришко, Н.К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 287-289.
- [10] Горячев Н.В. Программа расчета температуры в узлах тепловой схемы / Горячев Н.В., и др. / Saint-Louis, Missouri, USA, 2017. С. 68-69. DOI: 10.12731/ofemio.2014.20570
- [11] Fischerelektronik: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fischerelektronik.de/>
- [12] Фролов С.И. О некоторых проблемах надежность-ориентированного проектирования бортовых РЭС / Фролов С.И., Горячев Н.В., и др. // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2 (18). С. 3-8. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-1
- [13] I.M. Rybakov, N.V. Goryachev, I.I. Kochegarov, A.K. Grishko, S.A. Brostilov and N.K. Yurkov. Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board. Journal of Physics: Conference Series, Volume 803, Number 1. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012130.