

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.08

УДК 536.24

А.В. КазаковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА

Долговечность и степень надежности современных электротехнических устройств в нынешних условиях экономики зачастую отдаляются на второй план, уступая первое место низкой себестоимости и затратам на производство. Поэтому довольно часто устройства выпускаются без долгосрочных испытаний, что дает существенный пробел в знаниях о перегрузочных способностях подобных устройств. Информация о способностях устройства работать в предельных режимах может оказаться востребованной как при нестандартных условиях эксплуатации, так и при модернизации существующего устройства, изменении его характеристик без существенного перестроения структуры самого устройства. Объектом данного исследования является полупроводниковое корпусное устройство с системой охлаждения. Так как полупроводниковые приборы в процессе своего функционирования выделяют достаточно много тепла, а массогабаритные параметры самих полупроводников достаточно малы, становится понятной актуальность решения задачи эффективного охлаждения элементов таких устройств. **Цель исследования:** определение и систематизация условий работы системы охлаждения устройства и выявление допустимых нагрузочных режимов работы. **Результаты:** были рассмотрены существующие системы охлаждения, применяемые в корпусных устройствах подобного класса, примерно оценена их эффективность и определены возможные пути увеличения производительности существующей системы охлаждения. Для привязки исследования к конкретному набору электромеханических компонентов были проведены натурные эксперименты, направленные на определение реальных параметров охлаждающих устройств, работающих в различных режимах. Затем для уменьшения ресурсоемкости испытательной программы была создана математическая модель [1] корпусного устройства, которая учитывает все значимые нюансы исследуемого устройства. После формулировки математической модели были осуществлены ее численная реализация [2, 3, 4] (был выбран метод конечных объемов и математический пакет Ansys Fluent), обработка и формализация результатов в виде удобного к применению математического выражения.

Ключевые слова: охлаждение, моделирование, тепломассоперенос, Ansys.

A. V. Kazakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF COOLING SYSTEMS ELECTRONIC DEVICES

Durability and reliability of modern electrical devices in modern conditions. This is a fairly frequent device test, which makes it possible to obtain information about the overload capabilities of devices. Devices can operate in extreme modes, both under non-standard operating conditions, and when upgrading an existing device. The object of this study is a semiconductor device with a cooling

system. Semiconductor devices have a fairly large amount of heat, and the massive parameters of the semiconductor devices themselves are small enough, which makes clear the relevance of solving the problems of efficient use of elements of such devices. **Purpose:** definition and systematization of the working conditions of the system. **The results** of the study were considered taking into account existing cooling systems, which can be used as an analog. To conduct specific experiments on electromechanical components, field experiments were conducted. For this, mathematical models have been developed [1]. After interpretation, the mathematical model was implemented by its numerical implementation [2, 3, 4] (the finite measurement method and the Ansys Fluent mathematical package were chosen), processing and formalizing the results in a convenient form for applying mathematical expressions.

Keywords: cooling, modeling, heat and mass transfer, Ansys.

Введение. В процессе разработки новых и совершенствования уже существующих радиоэлектронных устройств зачастую возникает вопрос об их нагрузочной способности. В частности, весьма актуальным является проблема отвода мощности от полупроводниковых приборов [5]. Эту энергию, выделяемую в кристаллах полупроводников вследствие их ненулевого сопротивления, необходимо достаточно быстро рассеивать в окружающую среду, что обусловливается относительно малыми размерами кристалла и его небольшой теплоемкостью. Современные полупроводниковые приборы оперируют большими токами, и выделяющегося тепла вполне достаточно, чтобы расплавить кристалл кремния или германия, выведя тем самым устройство из работоспособного состояния. Ввиду малых габаритов современных полупроводниковых приборов на расчетных токах их эксплуатируют с дополнительными металлическими радиаторами, которые призваны рассеивать тепло в окружающую среду более эффективно. Однако с поверхности радиатора тоже необходимо отводить энергию, иначе не может быть обеспечена работа устройства в стационарном режиме [6]. На сегодняшний день наибольшее распространение получили 2 способа охлаждения радиаторов: естественная и принудительная конвекции. Первый способ не предусматривает наличия в системе охлаждения активных устройств типа вентиляторов или элементов Пельтье [7], здесь радиатор отдает тепло за счет излучения и естественного обдува воздухом. Такой способ не является эффективным с точки зрения компактности корпуса устройства и расположения в нем элементов и блоков конструкции, зачастую вентиляционных каналов оказывается недостаточно, а излучение греет корпус устройства и соседние элементы, которые впоследствии сами становятся вторичными источниками нагрева.

Гораздо лучших технико-экономических показателей прибора позволяет достичь применение активных систем охлаждения, наиболее простыми из которых являются вентиляторы [8], создающие направленные потоки воздуха внутри корпуса радиоэлектронного устройства. В этом случае основным способом отъема тепла с радиатора является конвекция.

Рассмотрим конкретный пример радиоэлектронного устройства, где основными источниками тепловых потерь являются полевой транзистор и диодная сборка в стандартных корпусах типа ТО-220-1 [9]. Отвод тепла с такого элемента происходит через 4-й массивный металлический электрод, закрепленный на алюминиевом радиаторе. Оба радиатора находятся внутри корпуса устройства и обдуваются потоками воздуха, создаваемого стандартным 40 мм вентилятором.

Наибольший интерес представляет процесс определения максимальных энергий, способных рассеиваться на радиаторах заданной конструкции, и размера при заданных внешних условиях и допустимых температурах на полупроводниковых приборах.

1. Определение расхода. В рассматриваемом изделии используются стандартные вентиляторы типоразмера 40×40 мм и толщиной 10 мм. Физически они представляют собой бесколлекторные электромоторы постоянного тока со встроенной электронной схемой коммутации обмоток статора, оборудованные пластиковой крыльчаткой. В данном устройстве вентилятор питается от стабилизированного источника напряжения 12 В.

Для оценки возможности применения в конструкции вентиляторов различных производителей были закуплены следующие модели: F4010S-3 бренда 5 Vites, принадлежащего компании Index [10] и D40SM-12A-25 производства компании Gembird [11]. Оба вентилятора обладают схожими характеристиками. Для проверки достоверности сведений, предоставленных производителями вентиляторов, был запланирован эксперимент, заключающийся в определении скорости воздушного потока каждого образца. Для измерения скорости воздушного потока был задействован анемометр цифровой переносной АП-1М-1 с крыльчатым датчиком. Для создания замкнутого контура был изготовлен адаптер-переходник, соединяющий исследуемый вентилятор и анемометр (рис. 1).

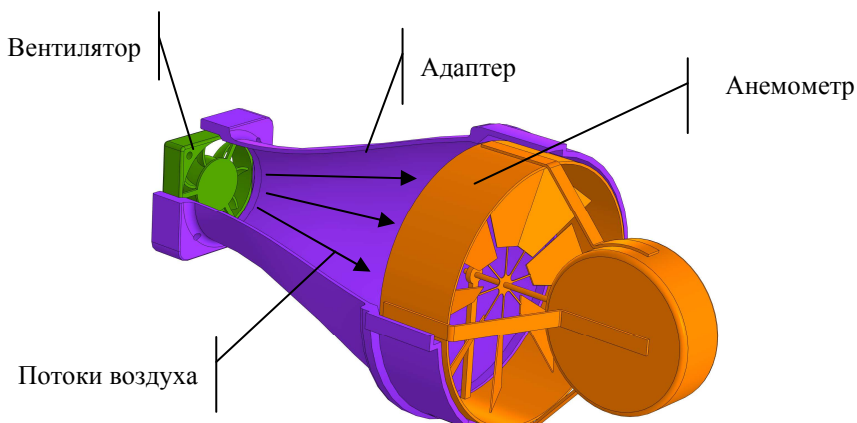


Рис. 1. Схема установки для измерения скорости воздушного потока

Однако в процессе проведения эксперимента было обнаружено, что воздушного потока, создаваемого одним вентилятором, не достаточно для нормальной работы анемометра. При увеличении потока воздуха за счёт дополнительных вентиляторов крыльчатка анемометра начинала вращаться, однако индицируемые прибором скорости находились на нижнем пределе его чувствительности, что не позволило достаточно точно оценить поток. Для преодоления данного затруднения был избран иной способ исследования, а именно измерение времени заполнения ёмкости известного объема. В качестве ёмкости применялся легкий нерастяжимый пакет объемом 200 л. Каждый новый вентилятор предварительно включался и работал 10 мин, в течение которых происходило растекание смазки во втулках скольжения и, как следствие, стабилизация рабочих параметров. Опыт по наполнению тестового объёма повторялся 5 раз, после чего высчитывалось среднее время наполнения. Данный метод не является самым точным, однако при достаточно большом измерительном объёме и большой кратности повторения позволяет весьма оперативно оценить рабочие характеристики вентиляторов. Так же был измерен ток, потребляемый каждым вентилятором при работе без нагрузки.

Для удобства заявленные и измеренные характеристики исследуемых вентиляторов были сведены в табл. 1.

Таблица 1

Заявленные и измеренные параметры вентиляторов

Модель	Заявленный ток, А	Измеренный ток, А	Заявленный расход, м ³ /с	Измеренный расход, м ³ /с
F4010S-3	–	0,066	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$
D40SM-12A-25	0,12	0,070	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$

Сравнение заявленных и измеренных характеристик показывает их существенное расхождение, причём как в сторону завышения, так и занижения показателей расхода. Вероятно, дело в различиях методик измерения, девиациях параметров отдельных вентиляторов, также не исключено сознательное искажение данных недобросовестными производителями.

Из табл. 1 видно, что в реальной конструкции целесообразнее использовать вентилятор модели F4010S-3, который при меньшем токе обеспечивает больший воздушный поток.

Анализ работы данного вентилятора в готовом устройстве показал, что напряжение питания существенно отличается от номинального и составляет 10–17 В (верхний предел напряжения соответствует работе с максимальным теплорассеянием на полупроводниках). Поэтому для вентилятора F4010S-3 были дополнительно рассчитаны режимы работы в указанном диапазоне напряжения. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры работы вентилятора F4010S-3 в диапазоне 10–17 В

Напряжение питания, В	Потребляемый ток, А	Измеренный расход, м ³ /с
10	0,057	0,0015
11	0,062	0,0018
12	0,066	0,0021
13	0,071	0,0025
14	0,075	0,0028
15	0,079	0,0030
16	0,083	0,0032
17	0,087	0,0035

2. Моделирование процесса тепломассопереноса. При рассмотрении конструкции устройства было решено исключить все элементы печатной платы, кроме двух радиаторов и трансформатора, который геометрически был заменен габаритным параллелепипедом. Са-

ми полупроводниковые приборы также были исключены, а нагрев имитировался заданием предельно допустимой температуры на площадках контакта «транзистор–радиатор». Корпус прибора имел прямоугольную конструкцию с отверстием для нагнетающего вентилятора и продольными жалюзи для отвода горячего воздуха наружу. Схематично получившееся устройство прибора показано на рис. 2.

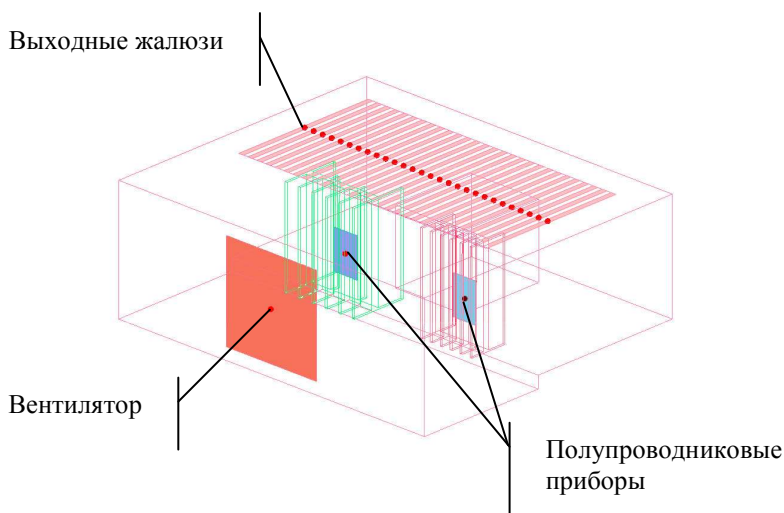


Рис. 2. Геометрия исследуемой области

При моделировании были сделаны следующие упрощающие допущения: задача стационарная, тепло от радиаторов отводится только за счёт конвекции и излучения, не учитывается естественная конвекция, теплофизические свойства материала радиаторов и воздуха постоянны.

Математическая модель процесса тепломассопереноса представляет собой совокупность уравнений состояния, записанных для воздуха и радиаторов (нижний индекс «р» в уравнении (5)):

$$\begin{cases} \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right),$$

$$Cp \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \Delta T, \quad (4)$$

$$C_p \rho_p = \lambda_p \Delta T, \quad (5)$$

где x , y и z – декартовы координаты; v_x , v_y и v_z – компоненты вектора скорости; P – давление; T – температура; ρ – плотность; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; μ – вязкость воздуха (с индексом «р» – плотность, теплоёмкость и теплопроводность радиатора); τ_{ij} – компоненты тензора напряжения.

В области, соответствующей расположению нагнетательного вентилятора, задавались температура окружающей среды и эпюра скорости, формирующая ранее измеренный расход воздуха. На поверхности, соответствующей выходу, – нулевой тепловой поток и искусственное сопротивление движению воздуха, учитывающему наличие ламелей вентиляционной решетки [12]. На остальных стенках, образующих корпус, задавались нулевые компоненты скорости и условия конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{воздух}} = \alpha (T - T_{\text{ср}}) \Big|_{\text{среда}} \quad (\text{где } \alpha \text{ – коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса в окружающую среду, } T_{\text{ср}} \text{ – температура окружающей среды}).$$

На обдуваемых поверхностях радиаторов – нулевые компоненты скорости, равенство температур радиатор-воздух, а также

$$\text{граничное условие 4-го рода: } \lambda_p \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{радиатор}} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{воздух}}. \text{ Следует заметить, что иногда радиаторы покрываются черной краской или слоем оксида. В этих случаях необходимо учитывать тепловое сопротивление дополнительного промежуточного слоя.}$$

3. Численная реализация модели. Численное решение [13] системы уравнений (1)–(5), дополненной граничными условиями и свойствами материалов радиаторов и воздуха, происходило в среде инженерного конечно-элементного анализа Ansys Fluent [14]. Большое ко-

личество конечных элементов модели (порядка 4,5 млн элементов) было обусловлено достаточно тонкими рёбрами радиаторов: предельный размер элемента для них был подобран экспериментально и составил порядка 0,8 мм. Для воздуха минимальный размер элемента соответствовал размерам элементов радиаторов и отводящих жалюзи, максимальный размер был порядка 6–7 мм. Таким образом, для воздуха была построена неравномерная сетка, что, однако, не дало негативных последствий, но позволило сократить суммарное количество элементов модели и время счёта. На рис. 3 представлены поверхностные элементы сетки исследуемой области. На радиаторах отчетливо видны пятна прилегания охлаждаемых полупроводниковых приборов.

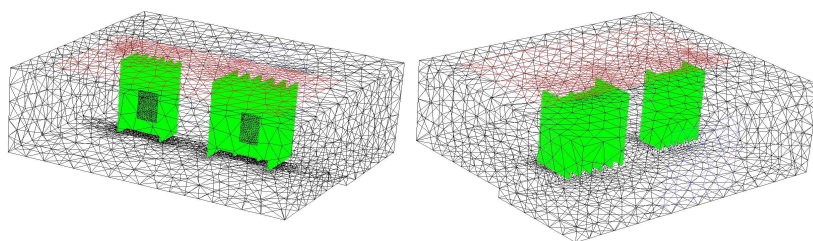


Рис. 3. Разбиение модели на сетку конечных элементов

Признаком окончания счёта [15] в данном случае была выбрана стабилизация тепловых потоков, отводимых из полупроводниковых приборов в радиаторы и далее снимаемых с радиаторов воздушным потоком (рис. 4). Здесь RHC-01 – радиатор большего размера.

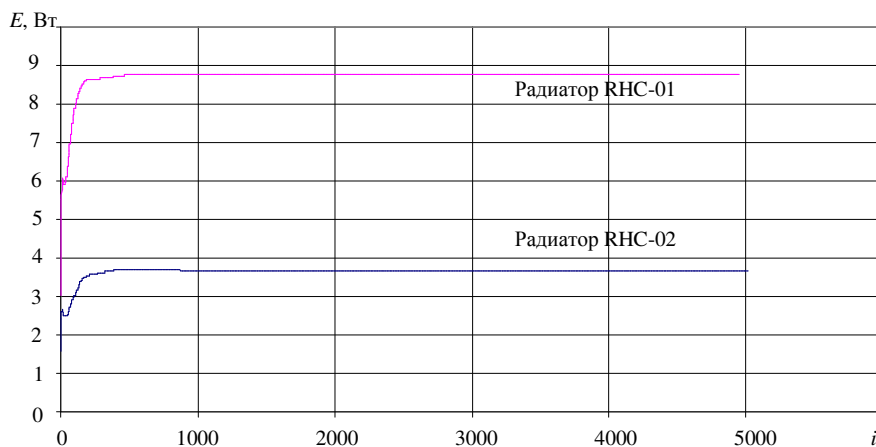


Рис. 4. Изменение тепловых потоков рассеяния радиоэлементов E от итераций i

Таким образом, для стабилизации тепловых потоков с полупроводниковых приборов оказалось достаточным порядка 1000 счѐтных итераций. Графики, приведенные на рис. 4, также позволяют вывести предельные уровни отводимых от полупроводниковых приборов энергий для заданных значений температур (для данного расчѐта были заданы предельные ограничения в 80 и 60 град. Цельсия). Для указанных температур тепловые потоки, отводимые от радиоэлементов через радиаторы, составили 8,77 и 3,67 Вт для РНС-01 и РНС-02 соответственно. При этом с поверхности самого элемента, обращенной от радиатора, энергии отводилось на порядок меньше (0,13 и 0,03 Вт), что позволяет этой составляющей теплоотвода пренебречь.

Для оценки количества тепла, отдаваемого радиаторами за счѐт излучения, была решена аналогичная задача, дополненная излучением с поверхности радиаторов. В этом случае с полупроводниковых приборов снимается 14,17 и 5,36 Вт мощности, что дает прирост в 62 и 46 % соответственно. Меньший прирост у радиатора РНС-02 объясняется его меньшей площадью. Таким образом, достоверно установлено, что в данной задаче необходимо учитывать энергию, отводимую за счѐт излучения.

Для оценки температур внутри корпуса было выведено поле температур, фрагмент которого представлен на рис. 5. Хорошо заметна деформация поля, образуемая в результате увлечения нагреваемых масс воздуха внутри корпуса набегающим потоком, создаваемым вентилятором.

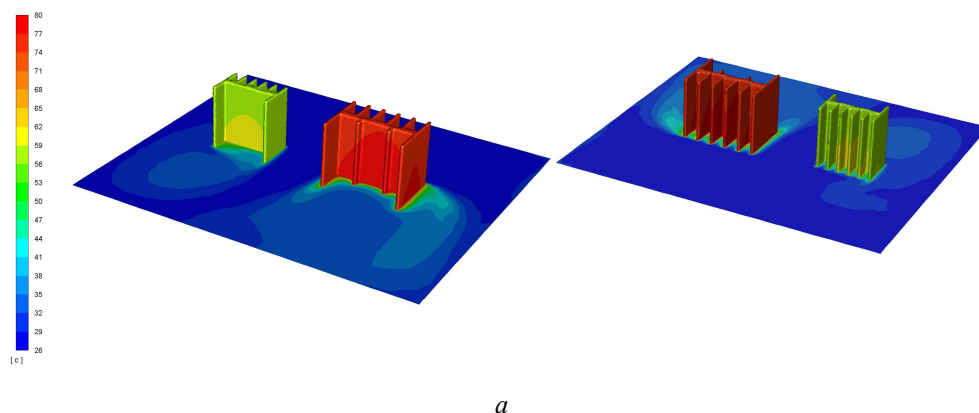


Рис. 5. Распределения тепловых потоков по площади: *а* – поле температур внутри корпуса, *б* – тепловые потоки, отводимые от полупроводниковых приборов, *в* – для радиатора РНС-01, *г* – для радиатора РНС-02

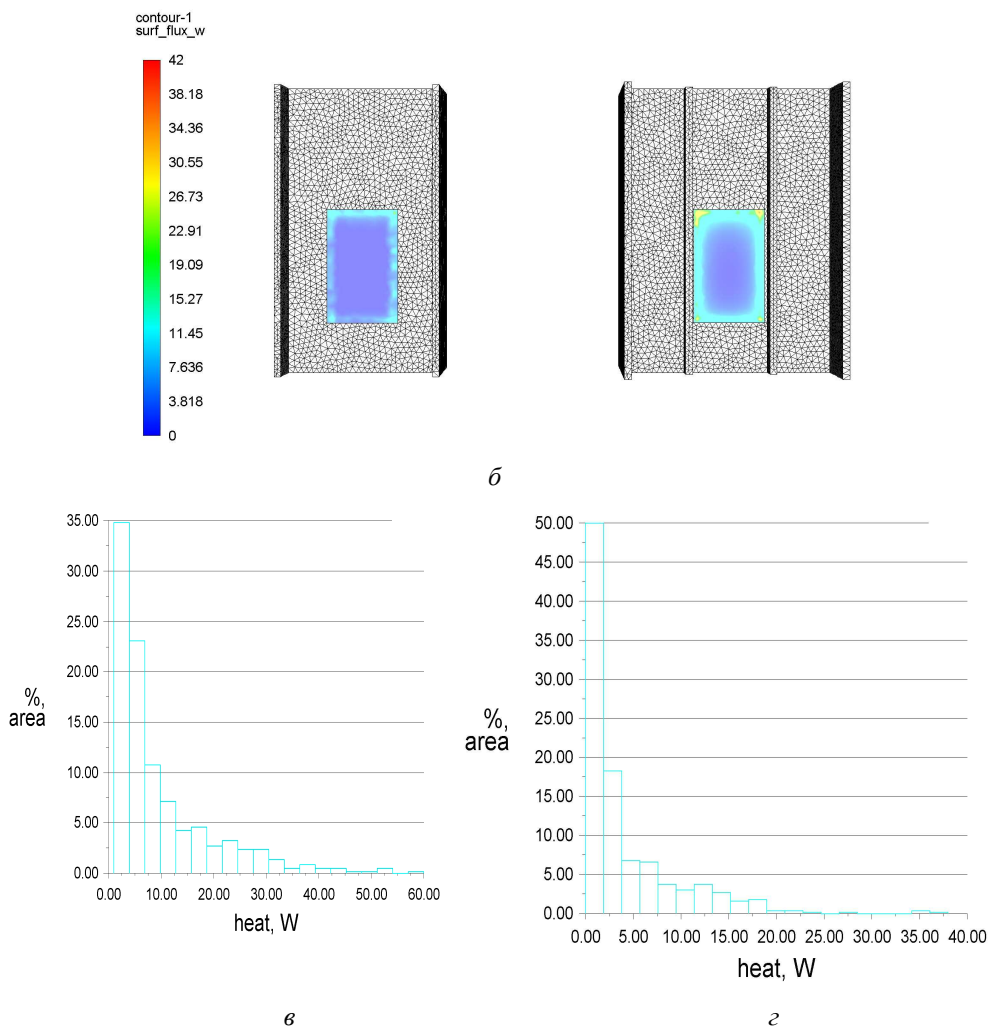


Рис. 5. Окончание

На рис. 5, б, в, г представлены визуализированные потоки тепла, передаваемые через пятна контакта полупроводниковых приборов и радиатора. Хорошо видна неравномерность картины энергоотдачи, что объясняется лучшими условиями охлаждения по краям пятна контакта. Гистограммы представляют собой разложение рассеиваемых мощностей по площади пятен контактов, вертикально – процент от площади, с которой происходит теплоотдача. Гистограммы подтверждают неравномерность передачи тепла по площади, что должно быть учтено в выборе термоинтерфейса системы «полупроводник-радиатор» [17].

Для оценки правомочности выбора ламинарного режима течения были рассчитаны и выведены поля безразмерного числа Рейнольдса [17, 18], фрагмент которых приведен на рис. 6. Максимальное значение для всего исследуемого объема не превышает 56, поэтому режим течения воздушных потоков можно считать ламинарным [19].

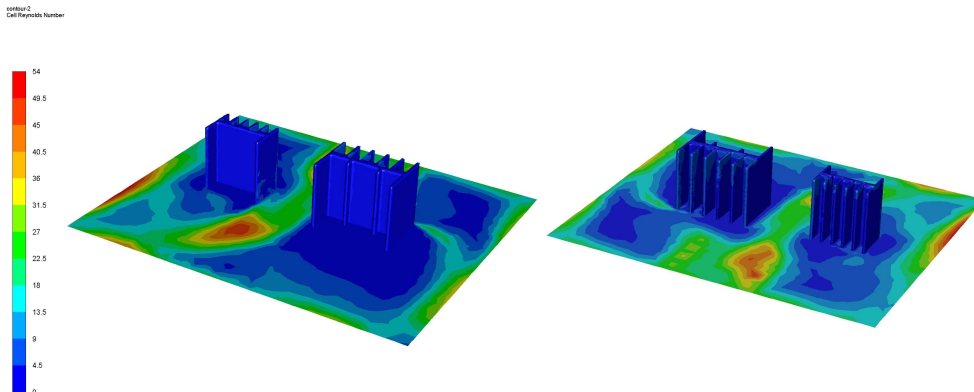


Рис. 6. Характерное число Рейнольдса

Анализ применимости полученных результатов и выработка рекомендаций. Для расширения сферы применимости предложенной модели были проведены дополнительные расчёты для различных сочетаний питающих напряжений вентилятора и допустимых температур на рассматриваемых радиаторах (11–17 В и 40–100 °С соответственно). Результаты были систематизированы в табл. 3 и представлены в виде поверхностных диаграмм на рис. 7.

Таблица 3

Рассеиваемая энергия – температуры – напряжения

Мощность, отводимая радиатором RHC-01, Вт					Мощность, отводимая радиатором RHC-02, Вт				
U, В	T ₁ , °С				U, В	T ₂ , °С			
	40	60	80	100		40	60	80	100
11	2,21	5,38	8,62	11,87	11	1,22	3,09	4,95	6,81
12	2,40	6,09	9,75	13,41	12	1,41	3,62	5,81	8,00
13	2,63	6,66	10,67	14,69	13	1,61	4,13	6,63	9,13
14	2,82	7,10	11,39	15,68	14	1,78	4,55	7,31	10,07
15	2,94	7,44	11,93	16,42	15	1,93	4,89	7,84	10,80
16	3,07	7,76	12,44	17,11	16	2,11	5,37	8,61	11,86
17	3,23	8,18	13,11	18,04	17	2,23	5,68	9,11	12,55

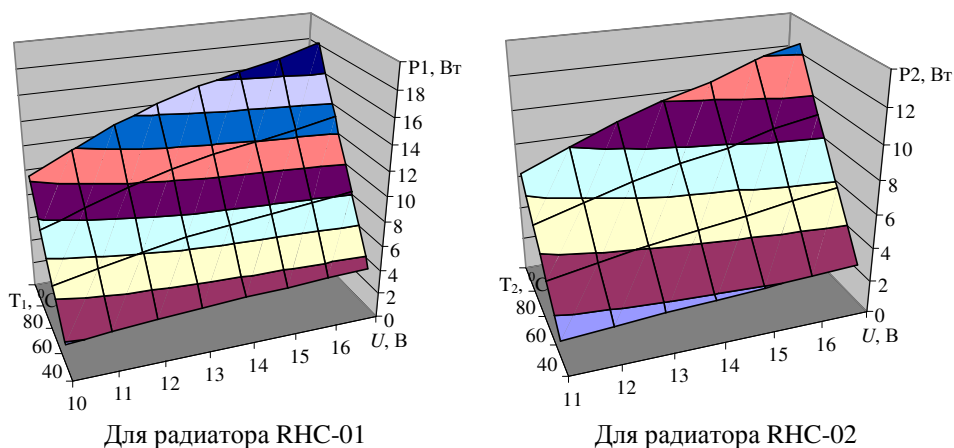


Рис. 7. Зависимости отводимых радиаторами энергий

Анализ уровней отводимых радиаторами энергий показал, что практически отсутствует зависимость изменения отводимой мощности от допустимой температуры соседнего радиатора, что обуславливается характером съёма тепла с радиатора, набегающим потоком воздуха. Этот же поток и изолирует радиаторы друг от друга. Данное обстоятельство позволило существенно упростить расчеты.

Для возможности учета полученных результатов в реальных разработках табличные данные были проанализированы и сведены к полиномиальному виду. На рис. 7 хорошо заметна кривизна сечений поверхностей, поэтому было принято решение задействовать полином 2-го порядка [20] вида

$$P(\text{Вт}) = a + b/U(\text{В}) + c \cdot T(^{\circ}\text{С}) + d/U(\text{В})^2 + e \cdot T(^{\circ}\text{С})^2 + f \cdot y/U(\text{В}),$$

где a , b , c , d , e и f – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов. Для удобства полученные величины коэффициентов и величина коэффициента детерминации R^2 сведены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты полиномов

Наименование	a	b	c	d	e	f	R^2
Для радиатора RHC-01	-11,27	84,27	0,39	-89,29	$1,90 \cdot 10^{-6}$	-2,58	0,9998
Для радиатора RHC-02	-5,18	-24,99	0,32	608,75	$-7,14 \cdot 10^{-6}$	-2,44	0,9997

Выводы. В результате проведения данного исследования были определены предельные параметры нагрузки, с которыми без фатальных последствий способны справиться штатные средства охлаждения

исследуемого устройства. Предложенная математическая модель и методика её реализации дополнительно позволяют произвольно менять внешние условия эксплуатации, давая однозначное представление о поведении устройства при его работе, например, в иных температурных или климатических поясах. Такие данные являются необходимыми для понимания критических условий работоспособности радиоэлектронных устройств, оценки его надежности, а также для обоснования необходимости модернизации существующих систем охлаждения.

Библиографический список

1. Методика диагностического моделирования электронных средств с радиаторами охлаждения / А.Н. Семененко, Ю.Н. Кофанов, А.И. Максимкин [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 4(36). – С. 164–177.

2. Применение методов компьютерного моделирования для подбора радиаторов охлаждения полупроводниковых преобразователей энергии / В.Е. Вавилов, Д.Р. Фаррахов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сборник науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск, 2015. – С. 70–74.

3. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Мокроусова Е.А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 6. – С. 30–35.

4. Research on heat dissipation design method for motor controller radiator / Liu Huanlong, Xie Chixin, Chen Guanpeng, Cao Zeping // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Mechanical Engineering Science (Sage Publications, Ltd.). Part C. – Apr. 2020. – Vol. 234. – Iss. 8. – P. 1673–1685.

5. Обеспечение нормального теплового режима работы силового полупроводникового прибора / В.И. Воробьев, В.П. Тихомиров, Н.Н. Стрекалов, А.А. Пугачев // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. – Брянск, 2017. – С. 158–169.

6. Каплин В., Лакисов В., Молочников А. Охлаждение приборов силовой электроники в сложных условиях эксплуатации // Силовая электроника. – 2018. – Т. 1, № 70. – С. 40–46.

7. Макарова Н.В., Пупков П.С. Обзор применения элементов пельтье для охлаждения полупроводниковых приборов // XLV Огарёвские чтения: материалы науч. конф. – Саранск, 2017. – С. 344–348.

8. Виноградов В.И. Вентиляторы электрических машин. – Л.: Энергоиздат, 1981.

9. Clemente S., Maloyans S. Current capability of TO-220 package. International Rectifier. – 1993.

10. Index intelligent distribution [Электронный ресурс]. – URL: http://indexcomp.ru/catalog_accessories/dcfans/id_3/3 (дата обращения: 13.05.2020).

11. Gembird Europe B.V. [Электронный ресурс]. – URL: <https://gembird.com/item.aspx?id=1226> (дата обращения: 13.05.2020).

12. TURGUT Oguz, ARSLAN Kamil. Periodically fully developed laminar flow and heat transfer in a 2-d horizontal channel with staggered fins // Thermal Science. – 2017. – Vol. 21, Iss. 6. – P. 2443–2455.

13. Численное моделирование и экспериментальное исследование процессов теплопередачи в системах охлаждения электронных компонентов / С.Г. Ворончихин, В.А. Помыткин, М.А. Земцов, А.Л. Флакман // Сборник науч. трудов SWorld. – 2011. – Т. 10, № 4. – С. 85–92.

14. Экспериментальное исследование температурного поля радиатора кулера / Л.А. Булавин, О.Ю. Актан, Т.Ю. Николаенко, Ю.Е. Николаенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5. – С. 61–64.

15. Numerical and Experimental Investigation of Air Cooling for Photovoltaic Panels Using Aluminum Heat Sinks / Arifin Zainal, Tjahjana Dominicus Danardono Dwi Prija, Hadi Syamsul, Rendy Adhi Rachmanto, Gabriel Setyohandoko, Bayu Sutanto // International Journal of Photoenergy. – 1.10.2020. – P. 1–10.

16. Уменьшение теплового сопротивления между корпусом силового полупроводникового прибора и его радиатором / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, М.А. Измеров, Н.Н. Стрекалов, А.А. Пугачев // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 2(55). – С. 104–112.

17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1965. – 640 с.

18. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. – М.: Химия, 1995. – 400 с.

19. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1968. – 940 с.

20. Hörmander L. Linear Partial Differential Operators. Vol. 1. – Springer-Verlag, 1976.

References

1. Semenenko A.N., Kofanov Iu.N., Maksimkin A.I. et al. Metodika diagnosticheskogo modelirovaniia elektronnykh sredstv s radiatorami okhlazhdeniia [Methods of diagnostic modeling of electronic tools with cooling radiators]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2016, no. 4(36), pp. 164-177.

2. Vavilov V.E., Farrakhov D.R., Mednov A.A., Miniiarov A.Kh. Primenenie metodov komp'iuternogo modelirovaniia dlia podbora radiatorov okhlazhdeniia poluprovodnikovyykh preobrazovatelei energii [Application of computer simulation methods for the selection of cooling radiators for semiconductor energy converters]. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy. Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov*. Eds. S.I. Luk'ianov, N.V. Shvidchenko. Magnitogorsk, 2015, pp. 70-74.

3. Trofimov V.E., Pavlov A.L., Mokrousova E.A. CFD-modelirovanie radiatora dlia vozdushnogo okhlazhdeniia mikroprotsessorov v ogranichenom prostranstve [CFD modeling of a radiator for air cooling of microprocessors in a limited space]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2016, no. 6, pp. 30-35.

4. Huanlong Liu, Chixin Xie, Guanpeng Chen, Zeping Cao. Research on heat dissipation design method for motor controller radiator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Mechanical Engineering Science (Sage Publications, Ltd.)*. Part C. Apr. 2020, vol. 234, iss. 8, pp. 1673-1685.

5. Vorob'ev V.I., Tikhomirov V.P., Strekalov N.N., Pugachev A.A. Obespechenie normal'nogo teplovogo rezhima raboty silovogo poluprovodnikovogo pribora [Ensuring normal thermal operation of a power semiconductor device]. *Sovershenstvovanie transportnykh mashin. Sbornik nauchnykh trudov*. Briansk, 2017, pp. 158-169.

6. Kaplin V., Lakisov V., Molochnikov A. Okhlazhdenie priborov silovoi elektroniki v slozhnykh usloviyakh ekspluatatsii [Cooling of power electronics devices in difficult operating conditions]. *Silovaya elektronika*, 2018, vol. 1, no. 70, pp. 40-46.

7. Makarova N.V., Pupkov P.S. Obzor primeneniia elementov pel't'e dlia okhlazhdeniia poluprovodnikovyykh priborov [Overview of the use of Peltier elements for cooling semiconductor devices]. *XLV Ogarevskie chteniia. Materialy nauchnoi konferentsii*. Saransk, 2017, pp. 344-348.

8. Vinogradov V.I. Ventilatory elektricheskikh mashin [Fans of electric machines]. Leningrad: Energoizdat, 1981.

9. Clemente S., Maloyans S. Current capability of TO-220 package. International Rectifier, 1993.

10. Index intelligent distribution, available at: http://indexcomp.ru/catalog_accessories/dcfans/id_3/3 (accessed 13 May 2020).

11. Gembird Europe B.V., available at: <https://gembird.com/item.aspx?id=1226> (accessed 13 May 2020).

12. TURGUT Oguz, ARSLAN Kamil. Periodically fully developed laminar flow and heat transfer in a 2-d horizontal channel with staggered fins. *Thermal Science*, 2017, vol. 21, iss. 6, pp. 2443-2455.

13. Voronchikhin S.G., Pomytkin V.A., Zemtsov M.A., Flaksman A.L. Chislennoe modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie protsessov teploperedachi v sistemakh okhlazhdeniia elektronnykh komponentov [Numerical modeling and experimental study of heat transfer processes in cooling systems of electronic components]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2011, vol. 10, no. 4, pp. 85-92.

14. Bulavin L.A., Aktan O.Iu., Nikolaenko T.Iu., Nikolaenko Iu.E. Eksperimental'noe issledovanie temperaturnogo polia radiatora kulera [Experimental study of the temperature field of the cooler radiator]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2006, no. 5, pp. 61-64.

15. Zainal Arifin, Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjana, Syamsul Hadi, Rendy Adhi Rachmanto, Gabriel Setyohandoko, Bayu Sutanto, Numerical and Experimental Investigation of Air Cooling for Photovoltaic Panels Using Aluminum Heat Sinks. *International Journal of Photoenergy*, 1.10.2020, pp. 1-10.

16. Tikhomirov V.P., Vorob'ev V.I., Izmerov M.A., Strekalov N.N., Pugachev A.A. Umen'shenie teplovogo soprotivleniia mezhdru korpusom silovogo poluprovodnikovogo pribora i ego radiatorom [Reduction of thermal resistance between the case of a power semiconductor device and its radiator]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2(55), pp. 104-112.

17. Monin A.S., Iaglom A.M. Statisticheskaiia gidromekhanika [Statistical hydromechanics]. Moscow: Nauka: Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1965. 640 p.

18. Dytnerskii Iu.I. Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy protsessov khimicheskoi tekhnologii [Processes and apparatuses of chemical technology. Part 1. Theoretical foundations of chemical technology processes]. Moscow: Khimiia, 1995, 400 p.

19. Iavorskii B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike [Handbook of Physics]. Moscow: Nauka: Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1968, 940 p.

20. Hörmander L. Linear Partial Differential Operators. Vol. 1. Springer-Verlag, 1976.

Сведения об авторе

Казаков Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the author

Kazakov Alexey Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 06.04.2020