

## TECHNICAL SCIENCE

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДЕ *SOLIDWORKS FLOW SIMULATION*

**Пискун Г.А.,**

*Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск*

**Алексеев В.Ф.,**

*Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск*

**Романовский П.С.,**

*Магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск*

**Стануль А.А.**

*Начальник отдела разработки и производства аппаратных средств ООО «СКБ Радиотехпроект», г. Минск*

### OPTIMIZATION OF THE HEAT MODE OF THE RECEIVING AND TRANSMITTING DEVICE ON THE RESULTS OF THE MODELING OF THE HEAT PROCESSES IN *SOLIDWORKS FLOW SIMULATION ENVIRONMENT*

**Piskun G.,**

*PhD, Associate Professor of Information Systems Design Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk*

**Alexeev V.,**

*PhD, Associate Professor of Information Systems Design Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk*

**Romanovski P.,**

*Master student of the department of information and computer systems design of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk*

**Stanul A.**

*Head of development and production hardware «SKB Radiotechprojekt», Minsk*

#### Аннотация

Исследована особенность построения приемно-передающего устройства с учетом его теплового режима при различных условиях эксплуатации. Предложено несколько вариантов оптимизации способов отвода тепловой энергии от максимально теплонагруженных элементов. Построены трехмерные модели устройства с описанием тепловых процессов, протекающих в нем в процессе работы.

#### Abstract

The feature of construction of the receiving-transmitting device taking into account its thermal regime under different operating conditions is investigated. Several variants of optimization of ways of removal of thermal energy from the most heat-loaded elements are offered. Three-dimensional models of the device with a description of the thermal processes occurring in it during operation are constructed.

**Ключевые слова:** модель, моделирование, оптимизация, радиоэлектронное средство, тепловая мощность, теплопередача, электронный модуль.

**Keywords:** model, modeling, optimization, radio-electronic mean, heat power, heat transfer, electronic module.

**Введение.** В связи с постоянным повышением требований к качеству и надежности радиоэлектронных средств (РЭС), непрерывным увеличением степени интеграции, уменьшением размеров элементов, вопросы отвода тепла, моделирования и оптимизации тепловых процессов при разработке этих изделий приобретают особую актуальность.

Решению задач теплопереноса в РЭС посвящено большое число работ [1–17]. Соответствующие этим задачам области поля являются, как правило, неограниченными, при этом допускается такая формулировка граничных условий, которая обеспечивает строгую аналитическую разрешимость задач.

Экспериментальные методы исследования температурных полей в микроэлектронных структурах оказываются зачастую не применимыми в силу малых размеров структур, и, кроме этого, они не позволяют произвести оценку локальных значений максимальных температур.

Трудности расчета температурных полей в электронных системах увеличиваются вследствие непрерывного увеличения плотности упаковки, числа топологических слоев, уменьшения размеров элементов.

Современные радиоэлектронные средства, осуществляющие функции управления, регулирования, координации и связи. При этом круг задач, решаемых с их помощью, с каждым годом расширяется и усложняется. В частности, чрезвычайно возросли требования к приемо-передающим устройствам (ППУ), размещаемым на самолетах, спутниках, кораблях и другой технике, поскольку отказ в работе хотя бы одного из элементов устройств может привести к отказу всего объекта. Поэтому требования к надежности РЭС постоянно растут [1].

**Постановка задачи.** Надежность и стабильность работы аппаратуры значительно ухудшается при ненормальном тепловом режиме работы устройства. В частности, известно, что в блоках, собранных из крупных деталей, только 5–10 % потребляемой энергии преобразуется в энергию полезных сигналов, что свидетельствует о том, что проблема отвода тепла в устройствах является одной из наиболее существенных задач конструирования [1, 8, 17].

Электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и электрорадио материалы обладают ограниченной теплостойкостью. Они могут нормально работать лишь в заданном диапазоне температур поскольку в процессе эксплуатации подчиняются различным физическим

и химическим процессам, которые при повышении (понижении) температуры либо развиваются лавинообразно, либо приводят к усиленному старению материалов. Известно, что при увеличении температуры воздуха внутри блоков на 10 К интенсивность отказов ЭРЭ в среднем увеличивается на 25 % [8, 17].

В работе представлен анализ тепловых процессов, протекающих в разработанном на предприятии ООО «СКБ Радиотехпроект» устройстве, которое является широкополосным многоканальным приёмником с частотой в диапазоне 3–3000 МГц (с двойным преобразованием частоты). Проведено моделирование распределения тепла без учета дополнительных мер по оптимизации конструкции устройства и с учетом дополнительных мер по улучшению передачи тепловой энергии в системах «радиатор–окружающая среда» и «печатная плата–корпус».

В качестве прикладного программного обеспечения используется система *SolidWorks* и ее модуль *SolidWorks Flow Simulation*, который позволяет моделировать течение жидкостей и газов, а так же позволяет проводить комплексный тепловой расчет.

**Исходные данные для моделирования.** Приемо-передающее устройство (ППУ) предназначено для эксплуатации в макроклиматическом районе с умеренным и холодным климатами в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом. Учитывая специфику эксплуатации ППУ устойчивость к климатическим воздействиям реализовано в соответствии с ГОСТ 15150-69 УХЛ 4.2.

Нормальные значения температуры внешней среды при эксплуатации изделия принимают равными значениям, указанным в таблице 1. Эти значения относятся к эксплуатации изделий на высотах до 1000 м [18].

Таблица 1

Значения температуры окружающего воздуха

Исполнение изделия	Категория изделия	Значение температуры воздуха при эксплуатации, °С			
		Рабочее		Предельное рабочее	
		Верхнее	Нижнее	Верхнее	Нижнее
УХЛ	4.2	+35	+10	+40	+1

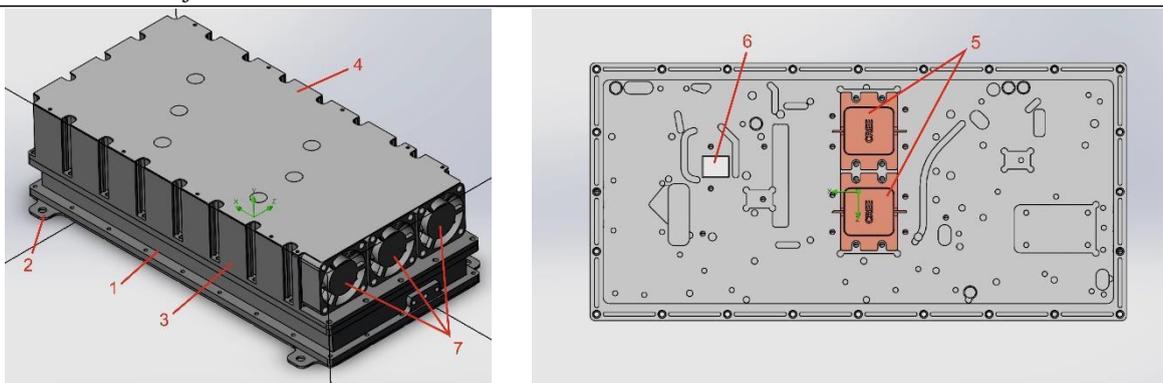
Первый запуск опытного образца ППУ производился в лаборатории при температуре  $T=23$  °С, поэтому было принято решение вначале провести анализ при данной температуре, а далее исследовать устройство при максимальной для данного климатического исполнения температуре.

#### Моделирование базовой модели в условиях температуры окружающей среды.

Чтобы не усложнять трехмерную модель изделия, при проведении анализа теплового режима устройства был принят ряд некоторых упрощений: в моделировании не участвовали печатные платы и

из большого количества электрорадиоэлементов (ЭРЭ) были оставлены для расчета наиболее чувствительные к перегреву элементы (транзисторы *SGC8598-50A-R* и *EMM5068VU*). Интересующие транзисторы имеют сложное строение, которое так же усложняет трехмерную модель, поэтому в анализе они отображаются упрощенно и задаются одним материалом – медь.

Внешний вид базовой модели приведен на рисунке 1. Состав устройства начальной комплектации отображен в таблице 2.



а) б)  
Рисунок 1 – Общий вид модели устройства «Приемник ППМ-100 Вт»: вид сверху (а) и вид снизу (крышка поз.2 условно не показана) (б)

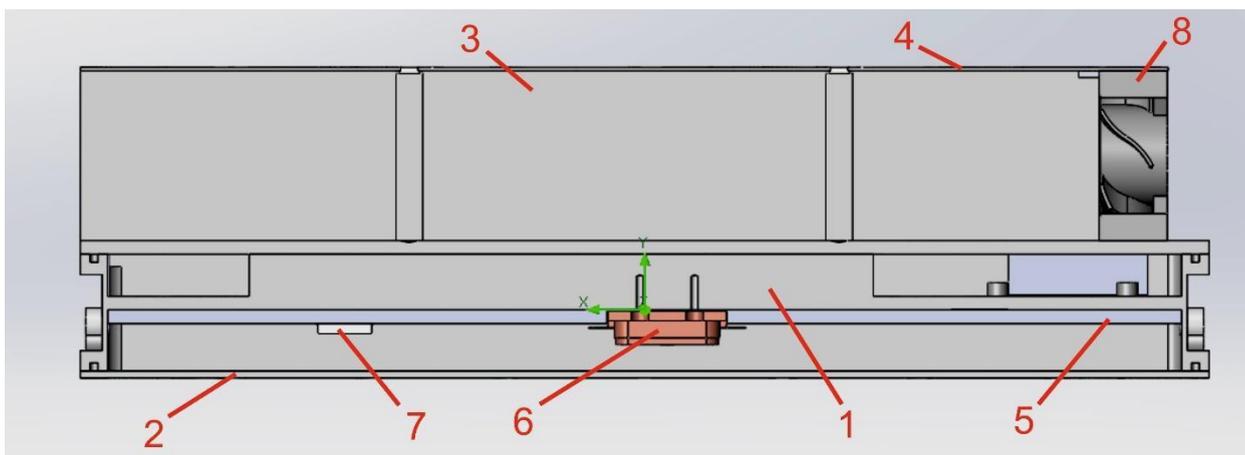


Рисунок 2 – Внешний вид трехмерной модели устройства с медной пластиной на всю площадь печатной платы в разрезе

Таблица 2

Состав изделия «Приемник ППМ-100 Вт» начальной комплектации

Поз.	Наименование	Кол-во	Материал
1	Корпус	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
2	Крышка нижняя	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
3	Радиатор	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
4	Крышка радиатора	1	Алюминий АМг3 ГОСТ 4784-97
5	Транзистор <i>SGC8598-50A-R</i>	2	Медь
6	Транзистор <i>EMM5068VU</i>	1	Медь
7	Вентилятор <i>MF25101V1-1000U-A99</i>	3	<i>Polybutylene Terephthalate (PBT)</i>

Начальные условия для анализа:

- температура окружающей среды в лаборатории  $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- давление  $P=101325\text{ Па}$ ;
- рассеиваемая мощность на каждом из транзисторов *SGC8598-50A-R*  $P_{\text{расс.1}}=30\text{ Вт}$ ;
- рассеиваемая мощность на транзисторе *EMM5068VU*  $P_{\text{расс.2}}=20\text{ Вт}$ .

Так как в ППУ присутствуют два одинаковых транзистора, то условно будем классифицировать их как верхний и нижний (см. рисунок 1, б).

Результаты моделирования теплового режима модели устройства базовой комплектации представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты моделирование теплового режима модели устройства «Приемник ППМ-100 Вт» в базовой комплектации

$T1_{\text{max}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T2_{\text{max}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T3_{\text{max}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T4_{\text{max}},\text{ }^{\circ}\text{C}$
91,5	85	84,8	80,4
Примечание: $T1_{\text{max}}$ – максимальная температура транзистора <i>EMM5068VU</i> ; $T2_{\text{max}}$ – максимальная температур верхнего транзистора <i>SGC8598-50A-R</i> ; $T3_{\text{max}}$ – максимальная температура нижнего транзистора <i>SGC8598-50A-R</i> ; $T4_{\text{max}}$ – максимальная температура воздушного потока на выходе радиатора			

Анализируя полученные результаты и техническую документацию на ЭРЭ [19, 20], можно утверждать, что потенциальные температуры работы ЭРЭ находятся в верхних границах предельно допустимых значений температур, и данный тепловой режим является предельным для работы устройства.

Исходя из результатов моделирования (см. таблицу 1), предлагаются два варианта оптимизации конструкции ППУ:

- изменение конструктива корпуса: исследование влияния пластины, выполненной из металла с большим коэффициентом теплопроводности, чем у дюралюминия, между ЭРЭ и корпусом;
- изменение конструктива базового радиатора с изменением расположения вентиляторов.

**Моделирование модели устройства с металлической пластиной между ЭРЭ и корпусом в условиях температуры окружающей среды.**

Дюралюминий имеет достаточно высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с многими металлами (сплавами), но ниже, чем у меди – металл, который достаточно широко распространен в радиоэлектронике. Исходя из этого было принято решение сделать пластину из меди.

В процессе моделирования исследовалась зависимость температурного режима устройства от формы и толщины медной пластины.

Первый вариант исполнения – медная пластина с площадью основной поверхности равной площади печатной платы. Толщина пластины изменялась в пределах от 2 мм до 3 мм. Внешний вид трехмерной модели в разрезе представлен на рисунке 2 (обозначение в соответствии с таблицей 4). Состав трехмерной модели устройства с медной пластиной представлен в таблице 4.

Таблица 4

Состав модели устройства «Приемник ППМ-100 Вт» с медной пластиной между теплонагруженными ЭРЭ и корпусом

Поз.	Наименование	Кол-во	Материал
1	Корпус	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
2	Крышка нижняя	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
3	Радиатор	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
4	Крышка радиатора	1	Алюминий АМг3 ГОСТ 4784-97
5	Медная пластина	1	Медь
6	Транзистор <i>SGC8598-50A-R</i>	2	Медь
7	Транзистор <i>EMM5068VU</i>	1	Медь
8	Вентилятор <i>MF25101V1-1000U-A99</i>	3	<i>Polybutylene Terephthalate (PBT)</i>

Второй вариант исполнения – медная пластина размещается локально под греющиеся элементы. Толщина пластины изменялась в пределах от 2 мм до 10,2 мм. Внешний вид трехмерной модели в разрезе представлен на рисунке 3.

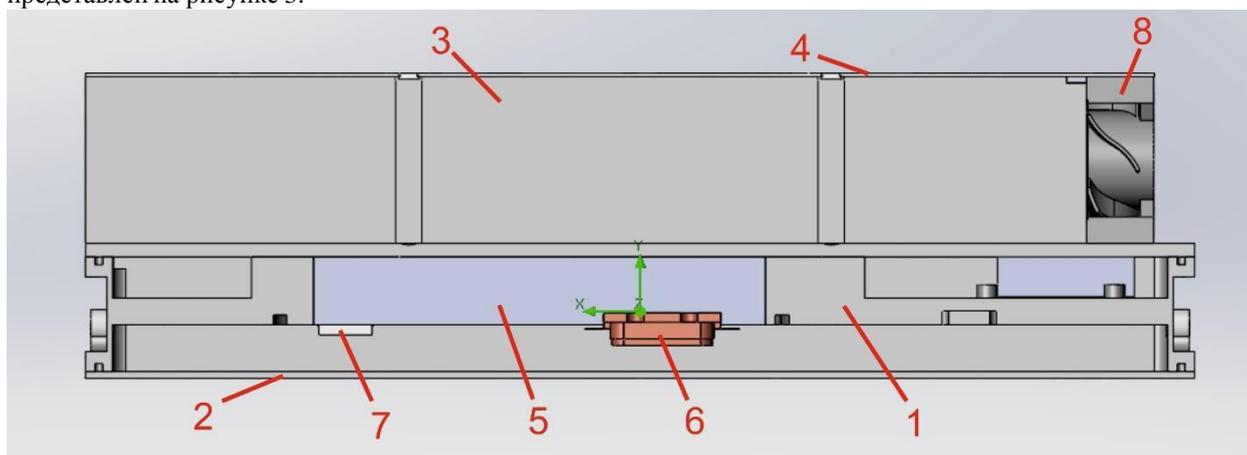


Рисунок 3 – Внешний вид трехмерной модели устройства с медной пластиной под теплонагруженными элементами

В таблицу 5 представлены результаты исследования влияния медной пластины между ЭРЭ и корпусом на температурный режим работы изделия.

Таблица 5

Результаты исследования влияния медной пластины между ЭРЭ и корпусом на температурный режим устройства

Форма пластины	Толщина пластины, мм	T1 <sub>max</sub> , °C	T2 <sub>max</sub> , °C	T3 <sub>max</sub> , °C	T4 <sub>max</sub> , °C
Базовая модель	0	91,5	85	84,8	80,4
Под всю плату	2	88,5	85,4	85,1	83,3
Под всю плату	2,5	88,3	85,1	84,9	83,3
Под всю плату	3	88,4	85	84,7	83,3
Локально под элементы	2	89,5	85,9	85,8	83,9
Локально под элементы	3	89,5	85,6	85,4	83,9
Локально под элементы	4	89,3	85,4	85,2	83,8
Локально под элементы	5	89,1	85,3	85,1	83,7
Локально под элементы	6	88,9	85,2	85,1	83,7
Локально под элементы	7	88,9	85,1	85	83,6
Локально под элементы	8	88,8	85,1	85	83,6
Локально под элементы	9	88,8	85	84,9	83,5
Локально под элементы	10,2	88,7	85	84,9	83,6

Примечание: T1<sub>max</sub> – максимальная температура транзистора *EMM5068VU*; T2<sub>max</sub> – максимальная температур верхнего транзистора *SGC8598-50A-R*; T3<sub>max</sub> – максимальная температура нижнего транзистора *SGC8598-50A-R*; T4<sub>max</sub> – максимальная температура воздушного потока на выходе радиатора

Из результатов моделирования, приведенных в таблице 5, видно, что медная пластина между ЭРЭ и корпусом не оказывает особого влияния на температурный режим устройства. Добавление ее в изделие усложнит конструктив и увеличит себестоимость устройства, поэтому наличие медной пластины представляется нецелесообразным.

**Моделирование модели устройства с изменяемым радиатором в условиях температуры окружающей среды.**

В процессе моделирования исследовалась зависимость температурного режима от изменения конструктива начального радиатора. Изменению подвергалось лишь количество ребер охлаждения при фиксированных габаритах радиатора и толщине ребра.

В таблице 6 показан состав модели устройства с модифицированным радиатором.

Таблица 6

Состав модели устройства «Приемник ППМ-100 Вт» с модифицированным радиатором

Наименование	Кол-во	Материал
Корпус	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Крышка нижняя	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Радиатор изменяемый	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Крышка радиатора	1	Алюминий АМг3 ГОСТ 4784-97
Транзистор <i>SGC8598-50A-R</i>	2	Медь
Транзистор <i>EMM5068VU</i>	1	Медь
Вентилятор <i>MF25101V1-1000U-A99</i>	3	<i>Polybutylene Terephthalate (PBT)</i>

На первом этапе моделирования вентиляторы располагались стандартно, как в базовой модели (см. рисунок 1, а). Результаты моделирования представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты моделирования модели устройства с изменяющимся базовым радиатором и стандартным расположением вентиляторов

Кол-во ребер, шт.	Толщина ребра, мм	T1 <sub>max</sub> , °C	T2 <sub>max</sub> , °C	T3 <sub>max</sub> , °C	T4 <sub>max</sub> , °C
40	1	91,5	85	84,8	80,4
35	1	78,5	71,8	71,6	69,7
30	1	69,1	62,7	62,5	60
25	1	67,1	61,2	61	53,1
20	1	64,4	59,4	59,1	47,7
18	1	64,8	60,1	59,9	49
15	1	67,5	63,1	62,9	43,9
9	1	67,7	63,7	63,5	43,9

Примечание: T1<sub>max</sub> – максимальная температура транзистора *EMM5068VU*; T2<sub>max</sub> – максимальная температур верхнего транзистора *SGC8598-50A-R*; T3<sub>max</sub> – максимальная температура нижнего транзистора *SGC8598-50A-R*; T4<sub>max</sub> – максимальная температура воздушного потока на выходе радиатора

Результаты моделирования показывают, что целесообразно выбрать радиатор с двадцатью ребрами (расстояние между ребрами составляет 3,1 мм), так как это исполнение детали дает минимальные значения температур ЭРЭ и уменьшает массу устройства на 200 гр.

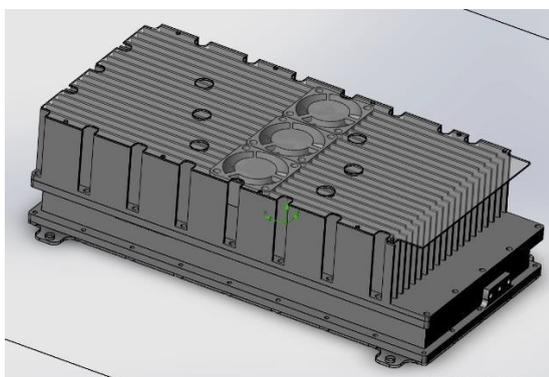
Авторами было предложено в модели ППУ (при выбранным радиаторе) изменить расположение вентиляторов (рисунок 4). Результаты моделирования представлены в таблице 8.

Таблица 8

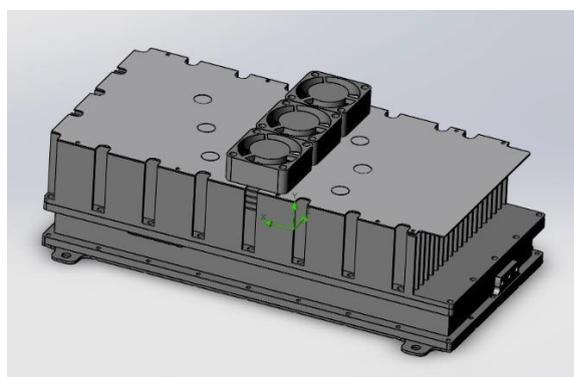
Результаты моделирования теплового режима модели устройства с модифицированным радиатором и новым расположением вентиляторов

Расположение вентиляторов	$T1_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T2_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T3_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T4_{\max}, ^\circ\text{C}$
Стандартное расположение (рис. 1, а)	64,4	59,4	59,1	47,7
По центру радиатора под крышкой радиатора (рис. 4, а)	63,5	60,3	60	43,6
По центру радиатора над крышкой радиатора (рис. 4, б)	62,3	58,9	58,6	46,1

Примечание:  $T1_{\max}$  – максимальная температура транзистора *EMM5068VU*;  $T2_{\max}$  – максимальная температур верхнего транзистора *SGC8598-50A-R*;  $T3_{\max}$  – максимальная температура нижнего транзистора *SGC8598-50A-R*;  $T4_{\max}$  – максимальная температура воздушного потока на выходе радиатора



а)



б)

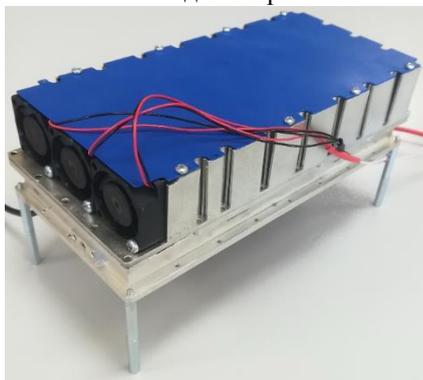
Рисунок 4 – Общий вид трехмерной модели устройства с разным расположением вентиляторов: вентиляторы по центру радиатора под крышкой радиатора (а), вентиляторы по центру радиатора над крышкой радиатора (б)

Анализ результатов, представленных в таблице 8, позволяет сделать вывод о том, что в данной конструкции расположение вентиляторов не оказывает значительного влияния на тепловой режим устройства с выбранным радиатором, поэтому изменять положение вентиляторов и тем самым усложнять конструкцию ППУ не эффективно.

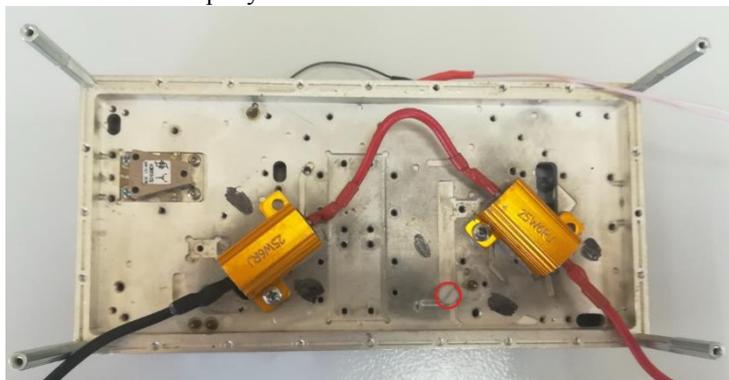
#### Проверка адекватности компьютерной модели в условиях температуры окружающей среды.

Чтобы удостовериться в адекватности построенной модели, был проведен эксперимент, где тепловые источники были заменены на два резистора *SQP-25W6RJ* (25 Вт, 6 Ом) [21].

Внешний вид экспериментального макета показан на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Общий вид экспериментального макета: вид сверху (а) и вид снизу (б)

На рисунке 6 показана экспериментальная трехмерная модель.

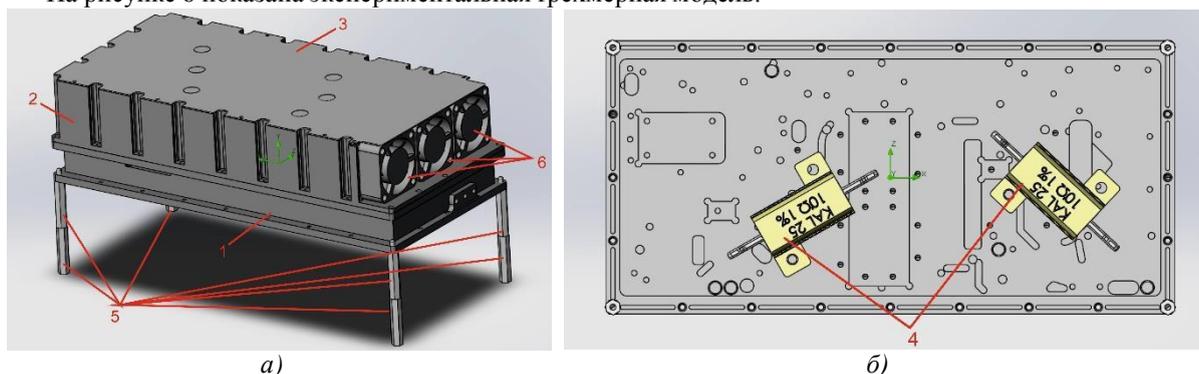


Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной трехмерной модели: вид сверху (а) и вид снизу (б)  
Экспериментальная модель имеет следующий состав (таблица 9).

Таблица 9

Состав экспериментальной модели

Поз.	Наименование	Кол-во	Материал
1	Корпус	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
2	Радиатор	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
3	Крышка радиатора	1	Алюминий АМг3 ГОСТ 4784-97
4	Резистор SQP-25W6RJ	2	Алюминий
5	Стойка M2x20/DR221	8	Алюминий
6	Вентилятор MF25101V1-1000U-A99	3	Polybutylene Terephthalate (PBT)

По условиям эксперимента каждый резистор рассеивает 39,8 Вт мощности (30,9 В; 2,57 А), температура окружающей среды 23 °С, давление 101325 Па.

В ходе эксперимента с помощью штатной термопары от цифрового мультиметра UT107 измерялась температура нагрева твердого тела в точке, отмеченной красным кругом на рисунке 5, б, и температура нагрева текучей среды на выходе радиатора. Результаты эксперимента и моделирования представлены в таблице 10.

Таблица 10

Результаты проверки адекватности модели

	Эксперимент	Моделирование
Температура твердого тела в точке	72 °С	73 °С
Температура текучей среды на выходе радиатора	73 °С	75 °С

Из данных, приведенных в таблице 10, видно, что результаты моделирования схожи с экспериментальными данными (погрешность составляет менее 3 %), поэтому можно сделать вывод, что модель является адекватной.

**Выбор оптимальной конструкции ППУ и сравнение ее с базовой моделью.**

По результатам рассмотрения итогов моделирования теплового режима можно предложить следующий оптимальный состав устройства (таблица 11).

Таблица 11

Оптимальный состав модели устройства «Приемник ППМ-100 Вт»

Наименование	Кол-во	Материал
Корпус	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Крышка нижняя	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Радиатор (20 ребер)	1	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Крышка радиатора	1	Алюминий АМг3 ГОСТ 4784-97
Транзистор SGC8598-50A-R	2	Медь
Транзистор EMM5068VU	1	Медь
Вентилятор MF25101V1-1000U-A99	3	Polybutylene Terephthalate (PBT)

Внешний вид устройства, с учетом предложенных изменений конструкции ППУ, представлен на рисунке 7.

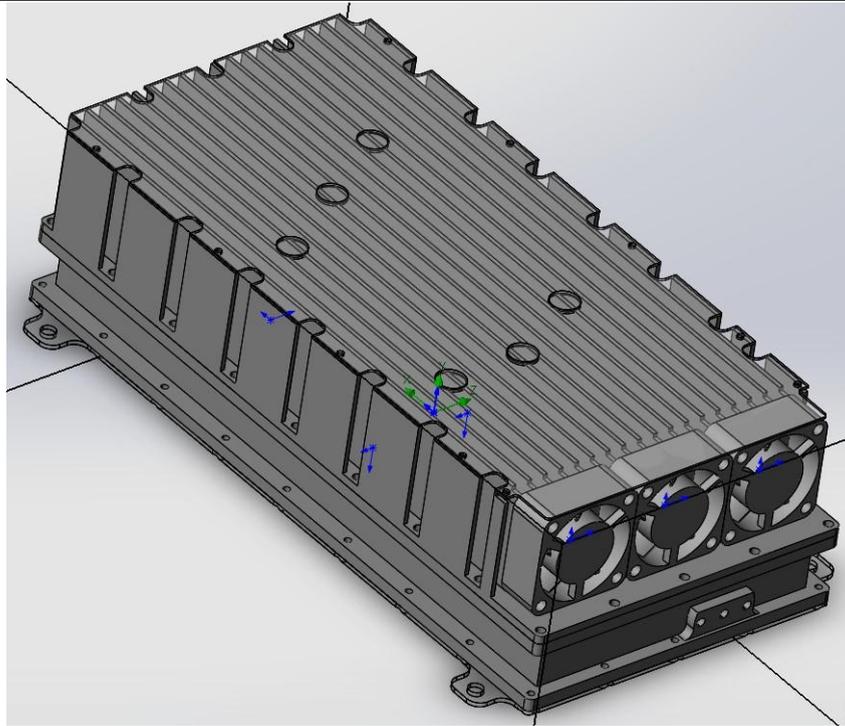


Рисунок 7 – Внешний вид модернизированного ППУ

Эпюры распределения температур базового устройства «Приемник ППМ-100 Вт» (таблица 1) и модернизированного (таблица 10) показаны на рисунках 8–13 и рисунках 14–19 соответственно.



Рисунок 8 – Эпюра распределения температуры на поверхности корпуса устройства базового состава

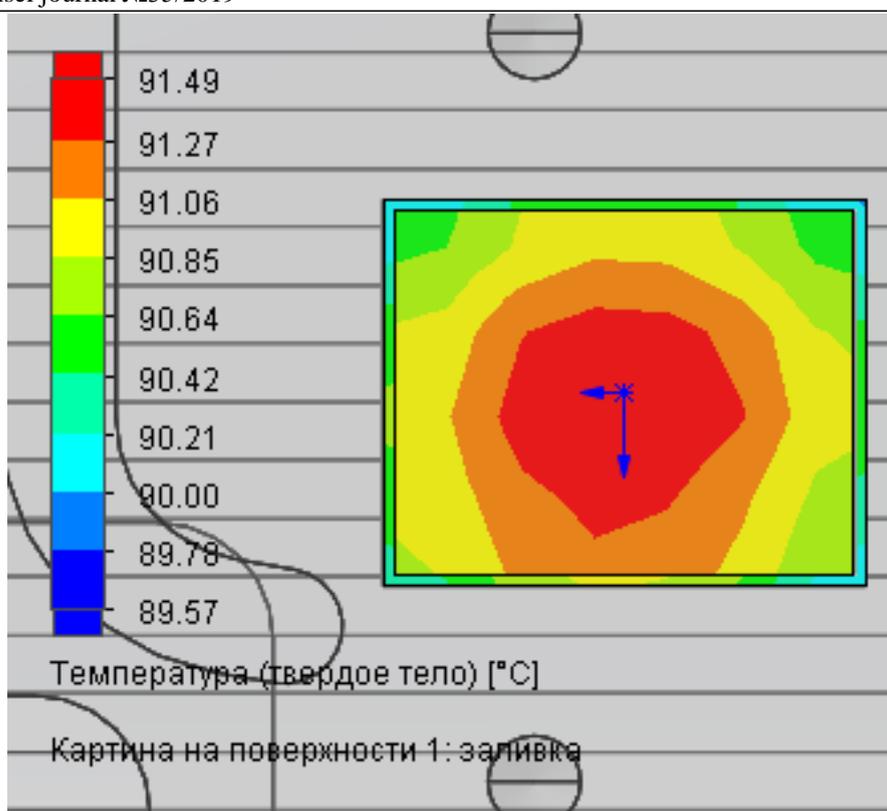


Рисунок 9 – Эюра распределения температуры на поверхности транзистора EMM5068VU в устройстве базового состава

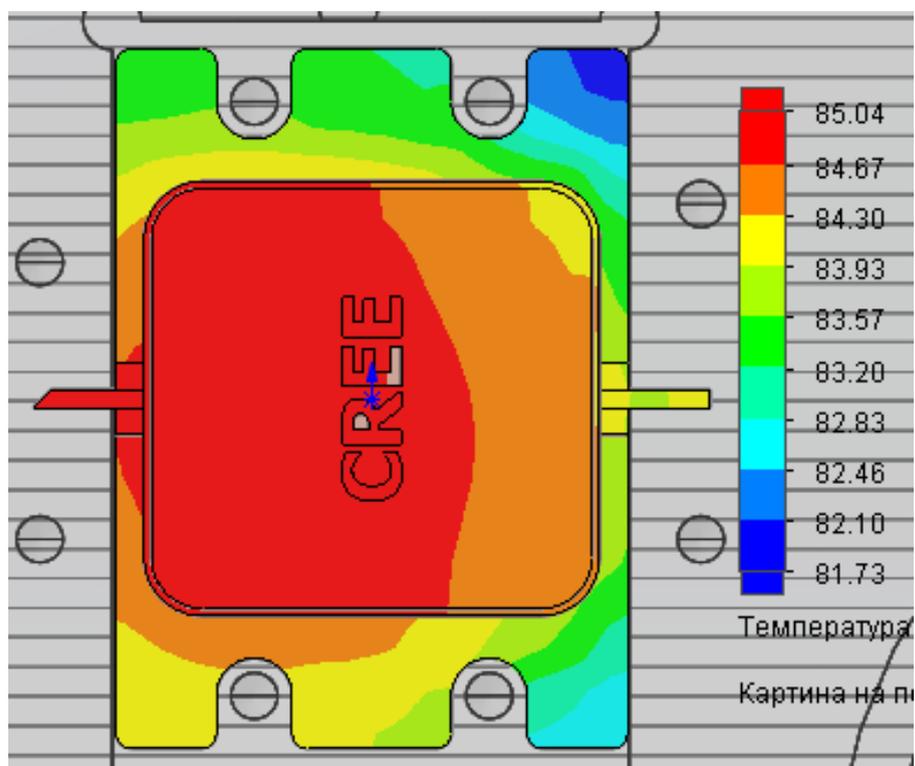


Рисунок 10 – Эюра распределения температуры на поверхности верхнего транзистора SGC8598-50A-R в устройстве базового состава

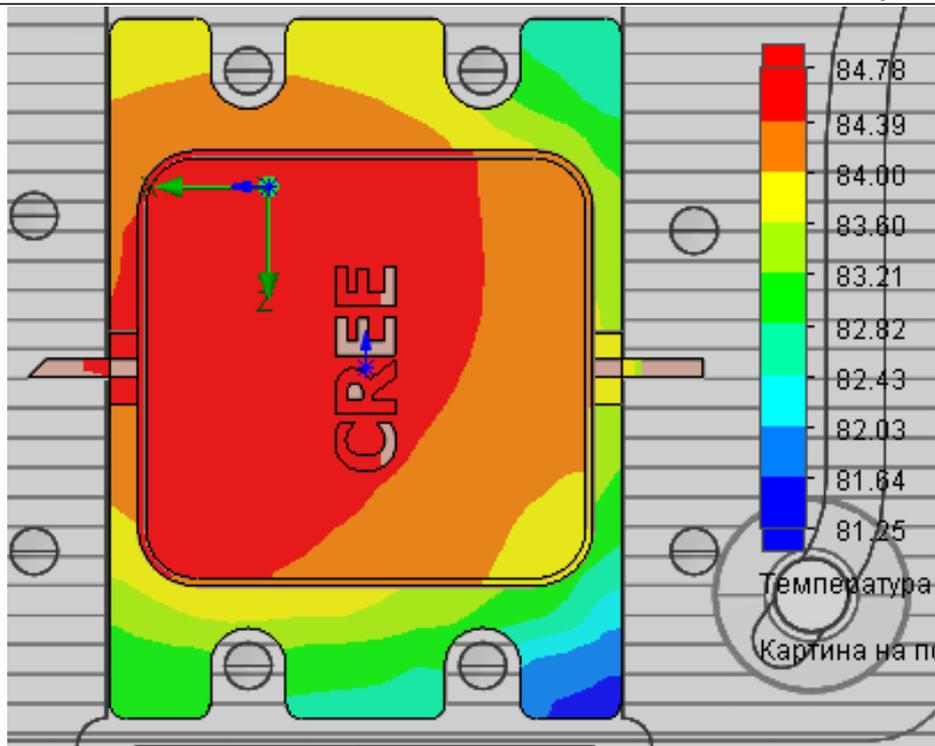


Рисунок 11 – Эюра распределения температуры на поверхности нижнего транзистора SGC8598-50A-R в устройстве базового состава

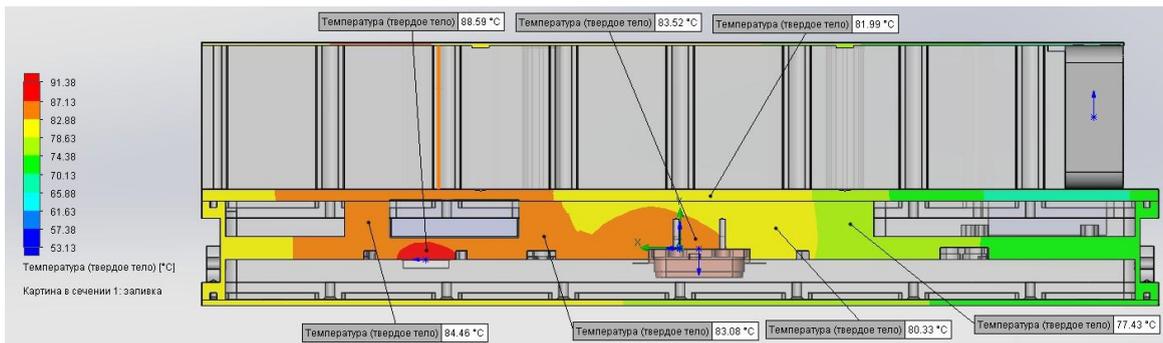


Рисунок 12

Эюра распределения температуры в твердых телах устройства базового состава в сечении

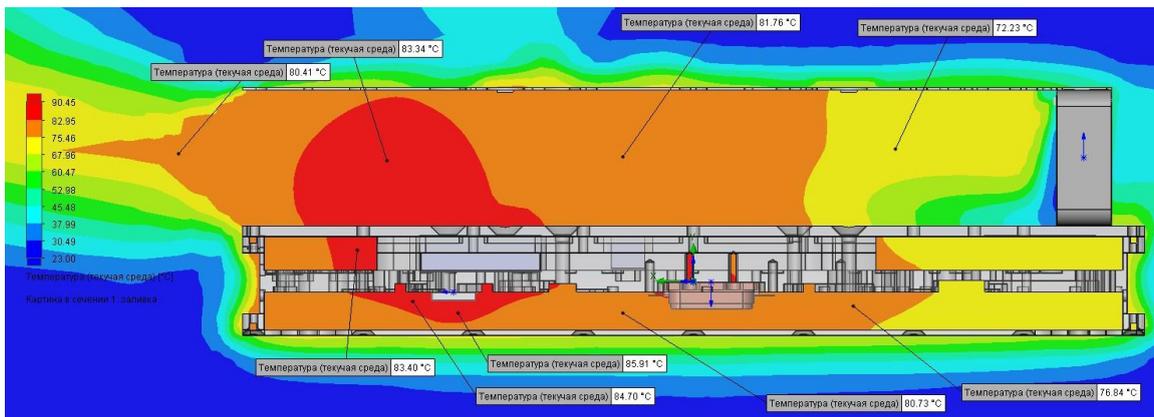


Рисунок 13

Эюра распределения температуры текучей среды в устройстве базового состава в сечении

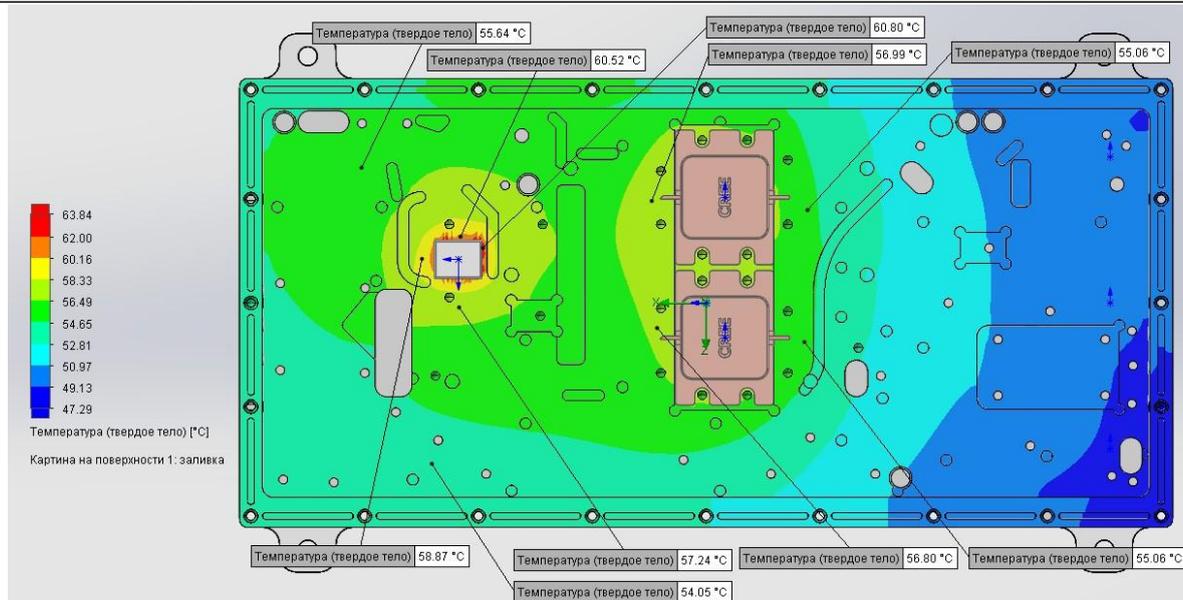


Рисунок 14

Эюра распределения температуры на поверхности корпуса устройства оптимального состава

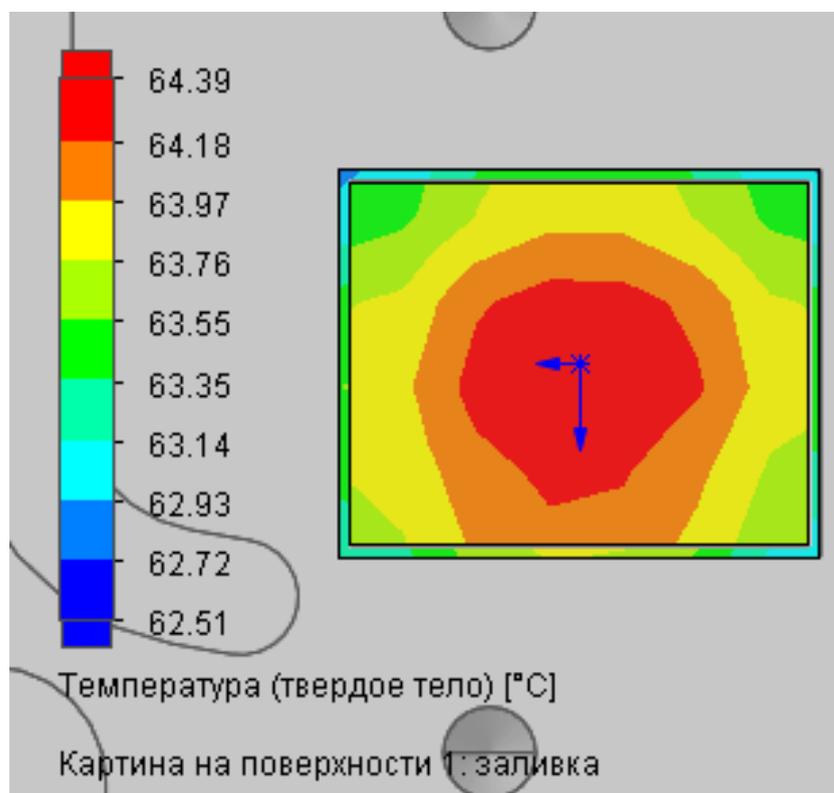


Рисунок 15 – Эюра распределения температуры на поверхности транзистора EMM5068VU в устройстве оптимального состава

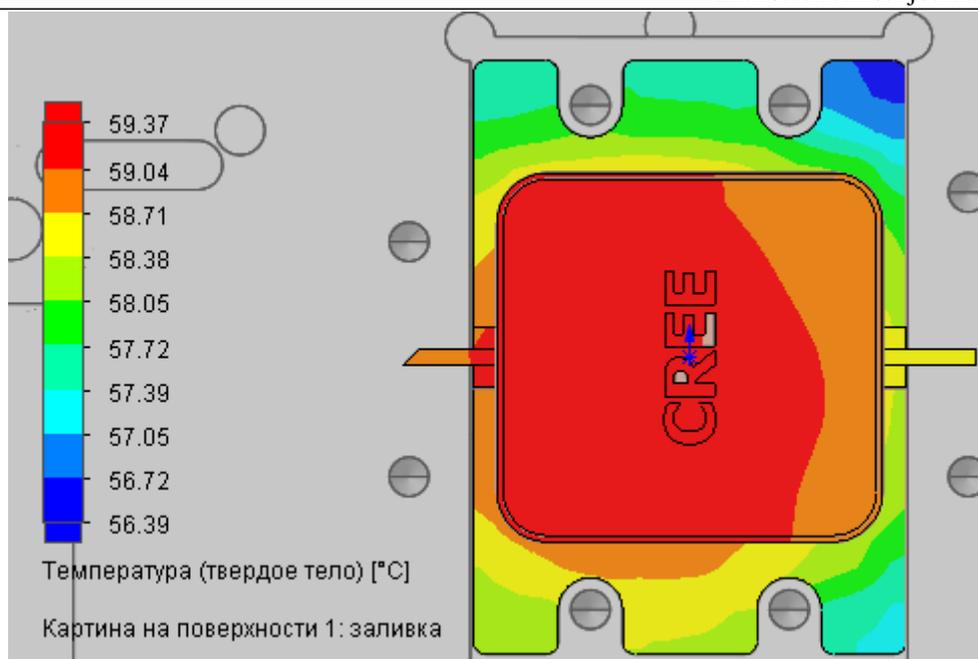


Рисунок 16 – Эюра распределения температуры на поверхности верхнего транзистора SGC8598-50A-R в устройстве оптимального состава

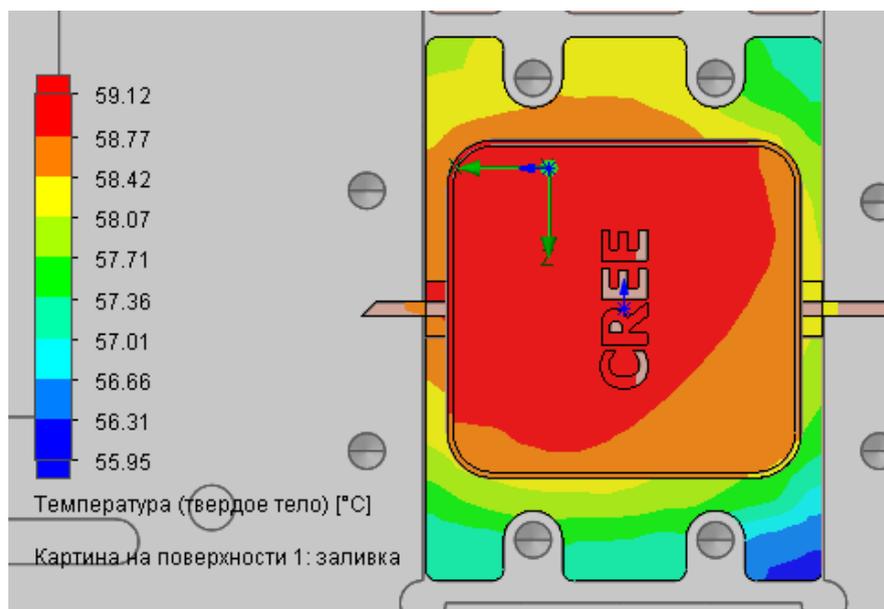


Рисунок 17 – Эюра распределения температуры на поверхности нижнего транзистора SGC8598-50A-R в устройстве оптимального состава

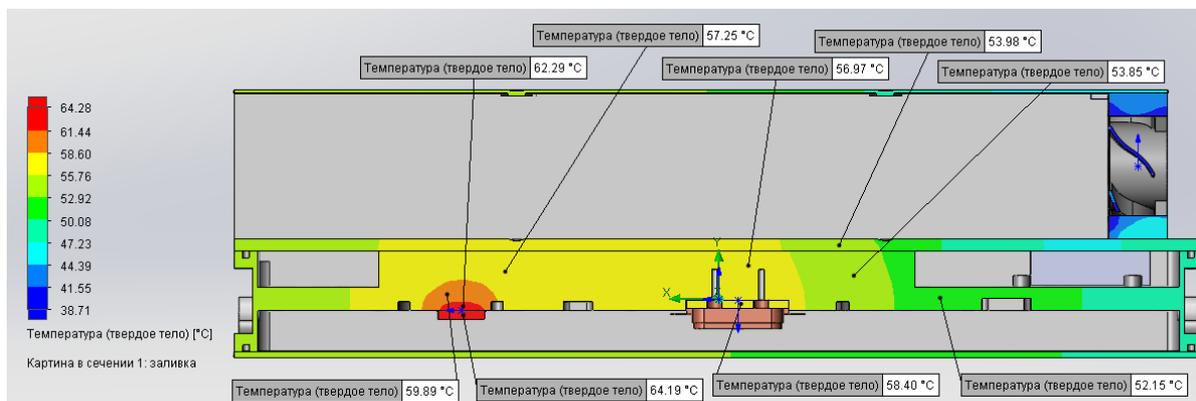


Рисунок 18

Эюра распределения температуры в твердых телах устройства оптимального состава в сечении

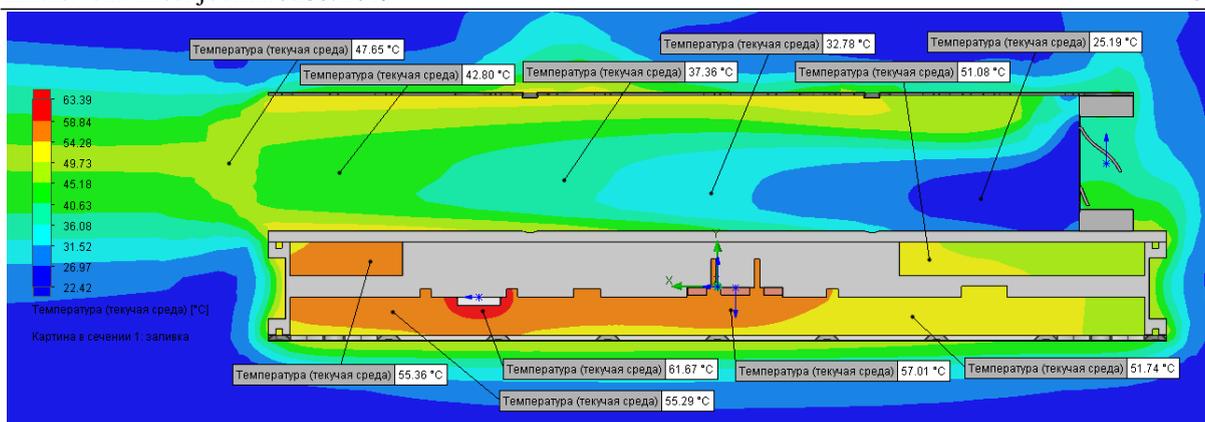


Рисунок 19

Этюра распределения температуры текущей среды в устройстве базового состава в сечении

**Моделирование оптимальной модели в условиях максимальной температуры окружающей среды.**

Учитывая специфику эксплуатации разработанного устройства, был проведен анализ теплового режима ППУ модернизированной конструкции для температуры +40 °C. Данное значение температуры обусловлено требованиями ГОСТ 15150-69 для климатического исполнения УХЛ 4.2. Результаты анализа приведены в таблице 12.

Таблица 12

Результаты моделирования теплового режима модернизированного ППУ при температуре окружающей среды  $T_{max,окр.} = +40\text{ °C}$

$T1_{max},\text{ °C}$	$T2_{max},\text{ °C}$	$T3_{max},\text{ °C}$	$T4_{max},\text{ °C}$
83,2	78,1	78,1	67,4

Примечание:  $T1_{max}$  – максимальная температура транзистора *EMM5068VU*;  $T2_{max}$  – максимальная температур верхнего транзистора *SGC8598-50A-R*;  $T3_{max}$  – максимальная температура нижнего транзистора *SGC8598-50A-R*;  $T4_{max}$  – максимальная температура воздушного потока на выходе радиатора

Полученные в ходе моделирования значения температур максимально теплонагруженных ЭРЭ в модернизированной конструкции ППУ находятся в диапазоне рабочих температур данных элементов согласно техническим условиям [19, 20].

**Заключение.** Выполненные исследования, направленные на автоматизацию расчёта и моделирования тепловых процессов радиоэлектронной аппаратуры, является одним из основных средств повышения качества и сокращения сроков разработки новых изделий. Благодаря корректному компьютерному моделированию конструкторы без особой сложности могут находить решения потенциальных проблем работы устройства, которые могли бы возникнуть в процессе его сборки и работы.

**Список литературы**

1. The Impact of ESD on Microcontrollers / G. A. Piskun [et al.] ; edited by PhD, Associate professor V. F. Alexeev. – Minsk : Kolorgrad, 2018. – 184 p.
2. Алексеев, В. Ф. Численное моделирование тепловых процессов электронных модулей на базе моделей, созданных в Altium Designer и SolidWorks / В.Ф. Алексеев, А.А. Константинов // Danish Scientific Journal. – 2018. – Vol.1, No 19. – Pp. 16–30.
3. Alexseev, V. Approaches to the optimization of the electronic module using the research of transformation of energy of mechanical exposure / Viktor F. Alexseev, Gennady F. Piskun, Dmitriy V. Likhachevsky // Slovak international scientific journal. – 2018. – Vol. 1, N 14. – Pp. 9–27.

4. End to end learning for a driving simulator / V. F. Alexeev and others // Доклады БГУИР. – 2018. – № 2 (112). – С. 85–91.
5. Моделирование джоулевого нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В. Ф. Алексеев и др. // Доклады БГУИР. – 2018. – № 7 (117). – С. 90–91.
6. Дульнев, Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин. – Л. : Энергия, 1968. – 360 с.
7. Теория тепломассообмена : Учебник для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – М. : Высш. школа, 1979. – 495 с.
8. Молодечкина, Т.В. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС». В 2 ч. Ч. 1. / Т.В. Молодечкина, В.Ф. Алексеев, М.О. Молодечкин. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 204 с. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 204 с.
9. Пискун, Г. А. Методика расчета распределения температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса до 2-х наносекунд в Comsol Multiphysics / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018. – №Д201807 от 05.01.2018.
10. Пискун, Г. А. Распределение температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса длительно-

- стью до 2-х наносекунд / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018. – №Д201806 от 05.01.2018.
11. Пискун, Г. А. Распределение температуры в токоведущих элементах интегральных схем при воздействии электромагнитного импульса длительностью до 2-х наносекунд / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018 . – №Д201805 от 05.01.2018.
12. Физические основы проектирования радио-электронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Исследование физических процессов в конструкциях РЭС : пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск : БГУИР, 2017. – 74 с.
13. Алексеев, В. Ф. Ускоренные испытания интегральных схем как способ прогнозирования долговечности средств медицинской электроники / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко // Медэлектроника – 2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей VIII Международная научно-техническая конференция (Минск, 10 – 11 декабря 2014 г.). – Минск : БГУИР, 2014. – С. 165.
14. Марочкин, Д. М. Моделирование физических процессов электронных средств в программном комплексе SIMULINK / Д. М. Марочкин, Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2013»: Материалы 9-ой международной молодежной научно-технической конференции. - Севастополь, 2013. – С. 369.
15. Алексеев, В. Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В. Ф. Алексеев, В. И. Журавлев // Доклады БГУИР. – 2005. – № 2 (10). – С. 65–72.
16. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов. Последние достижения/Под ред. Д. Миллера. М. : Радио и связь, 1989. - 280 с. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов. Последние достижения/Под ред. Д. Миллера. М. : Радио и связь, 1989. – 280 с.
17. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А.А. Чернышев [и др.]. – М. : Энергия, 1980. – 216 с.
18. ГОСТ 15150 – 69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). – Введ. 1971-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006 – 62 с.
19. *Datasheet EMM5068VU* [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: [https://www.sedi.co.jp/pdf/EMM5068VU\\_ED3-0](https://www.sedi.co.jp/pdf/EMM5068VU_ED3-0)
20. *Datasheet SGC8598-50A-R* [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: [https://www.sedi.co.jp/file.jsp?pdf/SGC8598-50A-R\\_ED1-5](https://www.sedi.co.jp/file.jsp?pdf/SGC8598-50A-R_ED1-5)
21. *Datasheet SQP-25W6RJ* [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://www.belchip.by/sitedocs/17508>