
ВОПРОСЫ РОБОТОТЕХНИКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 658.512 : 621.396.6.001.2

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ УЧЕБНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 24.02.2014, в окончательном варианте 08.04.2014.

Горячев Николай Владимирович, заведующий лабораторией, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная 40, e-mail: ra4foc@yandex.ru

Петрянин Дмитрий Львович, аспирант, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная 40, e-mail: petryanin@r4f.su

В работе предложена тепловая математическая модель для учебной системы охлаждения (УСО) радиоэлектронных средств и отдельных электрорадиоизделий, входящих в их состав. Рассматриваемая УСО – это унифицированная система, на поверхность которой установлены контактные датчики температуры. Тепловая модель УСО была построена по известной аналогии с законом Ома – с использованием таких параметров: температура, тепловая мощность, тепловое сопротивление. В ходе натурных испытаний было выявлено расхождение между результатами расчетов для модели и фактическими результатами для реальной системы охлаждения. Для устранения расхождения было предложено использовать корректирующий коэффициент, который учитывает суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом УСО с окружающей средой. Это позволило повысить точность результатов для используемой модели охлаждения на 13,5 %. Расчеты для этой модели осуществлялись с помощью специально созданной компьютерной программы. Новизна работы заключается в разработке тепловой математической модели УСО, отличающейся введением эмпирически полученного корректирующего коэффициента, учитывающего суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом поверхности исследуемого объекта с окружающей средой, что позволило повысить достоверность расчета системы охлаждения для охлаждаемого элемента, режим работы которого близок к максимально допустимому.

Ключевые слова: электрорадиоизделие, электронное средство, охлаждение, теплоотвод, проектирование, тепловая модель, система охлаждения, расчет, тепломассообмен, радиатор, компьютеризация расчетов

THERMAL MODEL OF EDUCATIONAL COOLING SYSTEM

Goryachev Nikolay V., Head of the Laboratory, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: ra4foc@yandex.ru

Petryanin Dmitriy L., post-graduate student, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: petryanin@r4f.su

We propose a mathematical model for the thermal cooling system training (Ofsted) electronic means and individual electrical radio within them. Regarded USO – a unified system to the surface, which established contact temperature sensors. The thermal model was built by Ofsted known analogy with Ohm's law – the use of such parameters: temperature, heat capacity, thermal resistance. During field tests was a discrepancy between the results of calculations for the model and the actual results for a real cooling system. To resolve discrepancies were invited to use a correction factor that takes into account the total losses caused by convective and radiant heat exchange with the environment USO. It is possible to increase the accuracy of the model used for cooling at 13.5 %. Calculations for this model were made with a specially designed computer program. Novelty of this work is to develop a mathematical model of heat USO differing introduction

empirically derived correction factor that takes into account the total losses caused by convective and radiant heat exchange surface of the object with the environment, thus improving the accuracy of the calculation of the cooling system for cooling element mode which is close to the maximum admissible.

Keywords: electroradio product, electronic means, cooling, heat sink, design, thermal model, cooling system, calculation, heatmass exchange, radiator, computerization of calculations

Введение. Важнейшей задачей при разработке электронных средств (ЭС) является обеспечение их нормального теплового режима (НТР) в процессе эксплуатации. Принято считать НТР такой режим, при котором температура каждого из элементов ЭС находится в диапазоне значений, допустимых по техническим условиям (ТУ) на данный элемент. Поэтому крайне важно обеспечить адекватный расчёт теплоотводов и систем охлаждения (СО) каждого из теплонагруженных элементов ЭС. Как правило, целью такого расчёта является выбор конкретного типа теплоотвода из существующей номенклатуры изделий того или иного производителя. Выбор теплоотвода можно провести, основываясь на тепловом сопротивлении теплоотвода, так как этот параметр хорошо характеризует возможности теплоотвода. Проводить тепловой расчет удобно, используя аналог закона Ома [8]. При этом по аналогии напряжение заменяется на температуру (T), ток – на мощность (P), а сопротивление – на тепловое сопротивление (R_{Θ}) с размерностью $^{\circ}\text{C}/\text{Ватт}$:

$$T = P \cdot R_{\Theta}. \quad (1)$$

В случае теплового расчёта полупроводникового электрорадиоизделия (ЭРИ), для обеспечения его нормального теплового режима необходимо, чтобы температура кристалла (T_j) не превышала допустимую, а лучше – была бы ниже на 25 % [1, 17, 19].

При проведении исследований мы отказались от использования имитационных моделей на основе конечно-разностных или конечно-элементных методов. Причина – высокая сложность таких методов для рассматриваемых задач не оправдывается возможностями отслеживания динамики нагрева-охлаждения электрорадиоэлементов и систем теплоотвода, точностями получаемых результатов.

Разработка тепловой модели. Мы разработаем тепловую модель учебной СО (УСО), применяемой в качестве наглядного пособия в специализированном лабораторном стенде [2]. В качестве охлаждаемого элемента ЭРИ примем интегральную микросхему (ИМ) в стандартном корпусе «ТО-220» с металлическим фланцем. При отсутствии теплоотвода тепловая модель (схема) ИМ примет вид, показанный на рис. 1.

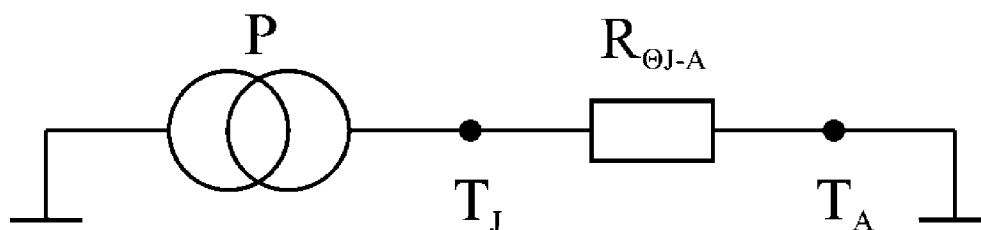


Рис. 1. Тепловая модель ИМ без теплоотвода:

T_j – температура кристалла; P – мощность, рассеиваемая кристаллом; $R_{\Theta J-A}$ – тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда»; T_A – температура окружающей среды

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

$$T_J = (P \cdot R_{\Theta J-A}) + T_A = (50 \cdot 5) + 25 = 275^\circ\text{C}. \quad (2)$$

T_J значительно превышает допустимое значение. Изменить ситуацию помогает установка ЭРИ на теплоотвод, который в данном случае следует считать пассивной СО (рис. 2).

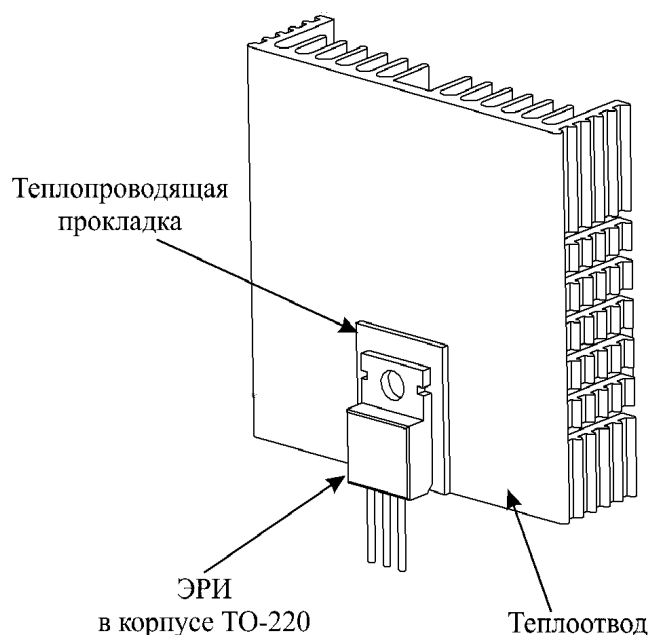


Рис. 2. Установка ЭРИ на теплоотвод

При установке ЭРИ на теплоотвод претерпит изменения и тепловая модель (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» (этот параметр приводится в технической документации на теплоотвод).

Особое внимание из них следует уделять $R_{\Theta C-H}$. Оно зависит от теплопроводности прокладки между корпусом ЭРИ и теплоотводом, которая необходима, так как разная степень чистоты обработки поверхностей металлического фланца ЭРИ и теплоотвода приводит к возникновению воздушного зазора между ними (рис. 3). Воздух обладает низкой теплопроводностью, поэтому необходимо заполнить зазор каким-либо материалом с высоким коэффициентом теплопроводности (КТ).

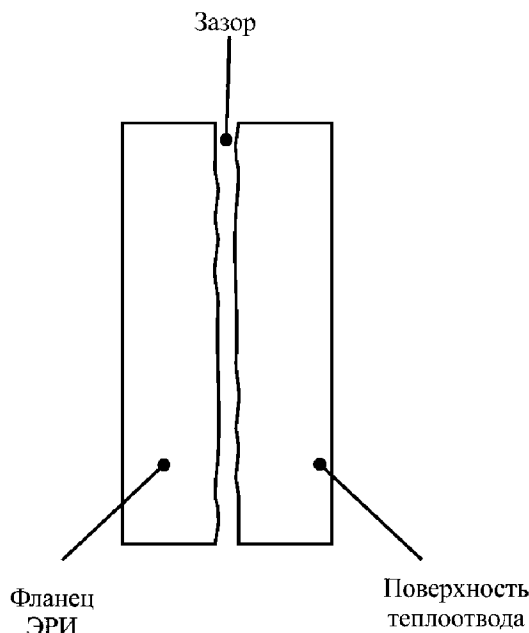


Рис. 3. Воздушный зазор между корпусом ЭРИ и теплоотводом

В качестве прокладки может использоваться слюда, теплопроводящая электроизоляционная силиконовая прокладка, а также теплопроводящая паста или клей, целиком заполняющие воздушный зазор. Современные силиконовые прокладки, в частности широко известные «Номакон» марки КППД, обладают КТ при разных условиях эксплуатации в интервале 0,8–1,5 Вт/(м °С) [14]. Самая распространенная в России паста КПП-8 имеет КТ 0,75 Вт/(м °С). При охлаждении микросхем процессоров между ними и радиаторами обычно применяется именно теплопроводящая паста, в которой не должно быть «воздушных пузырей».

При известном значении КТ несложно получить тепловое сопротивление «корпус – теплоотвод»:

$$R_{\Theta C-H} = \frac{L}{\lambda \cdot S}, \quad (3)$$

где L – толщина прокладки; λ – КТ; S – площадь одной стороны прокладки.

Тепловая модель (схема) при установке ИМ на теплоотвод с использованием теплопроводящей пасты примет вид, показанный на рис. 4.

Исходя из (1), температура кристалла для модели, показанной на рис. 4, определяется как:

$$T_J = (P \cdot R_{\Theta J-C} + R_{\Theta C-H} + R_{\Theta H-A}) + T_A. \quad (4)$$

Найдём T_J и T_H при тех же исходных данных, что и в (2), но дополнительно приняв $R_{\Theta J-C} = 3^\circ\text{C}/\text{Ватт}$, $R_{\Theta H-A} = 4^\circ\text{C}/\text{Ватт}$, $R_{\Theta C-H} = 0,4^\circ\text{C}/\text{Ватт}$:

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

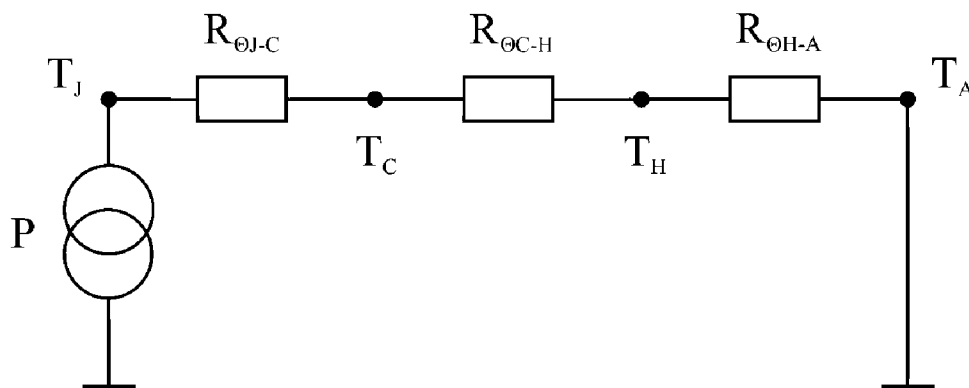


Рис. 4. Тепловая модель ИМ с УСО
(T_H – температура теплоотвода)

Из расчёта по (5) видно, что температура кристалла ЭРИ, установленного на теплоотвод, значительно ниже, чем без него и составляет 62 °С, т.е. соответствует нормальному температурному режиму.

При расчёте температуры ЭРИ определяющим является условие:

$$T_J < (T_{J_{\max}} - (T_{J_{\max}} \cdot 0,25)),$$

где $T_{J_{\max}}$ – максимально допустимая температура кристалла ЭРИ, указанная в ТУ; 0,25 соответствует 25% «запасу» по температуре.

Для увеличения теплоотдачи от радиатора в воздух применяются следующие инженерные решения: использование на радиаторе «ребер» для увеличения площади теплоотдачи; химическое травление или иные способы обработки поверхности радиатора, обеспечивающие увеличение поверхности контакта с воздухом на единицу его площади; принудительный обдув корпуса радиатора воздухом для усиления конвективного теплообмена [11, 13]. При этом «вдоль» тока воздуха нежелательно располагать «теплочувствительные» элементы радиоэлектронных схем [3, 9].

Принудительный обдув радиатора требует применения вентилятора, для которого нужно электропитание (энергозатраты). В связи с этим отметим, что в системных блоках ПЭВМ сейчас часто используются схемы охлаждения собственно процессоров с регулируемой скоростью вращения вентиляторов. При этом сигнал обратной связи «заводится» с датчиков, контролирующих непосредственно температуру охлаждаемого объекта.

Отвод тепла радиатором за счет излучения чаще всего невелик, и в тепловых расчетах он должен учитываться лишь в отношении «теплочувствительных» элементов, расположенных в непосредственной близости от радиатора [9].

Используя тепловую модель, показанную на рис. 4, несложно рассчитать и температуру перегрева теплоотвода, которая в данном случае составит:

$$T_H = P \cdot R_{\Theta H-A} + T_A = 5 \cdot 4 + 25 = 45^\circ \text{C}. \quad (6)$$

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

Тепловой расчёт по (6) был авторами автоматизирован с помощью разработанной компьютерной программы, алгоритм которой показан на рис. 5.

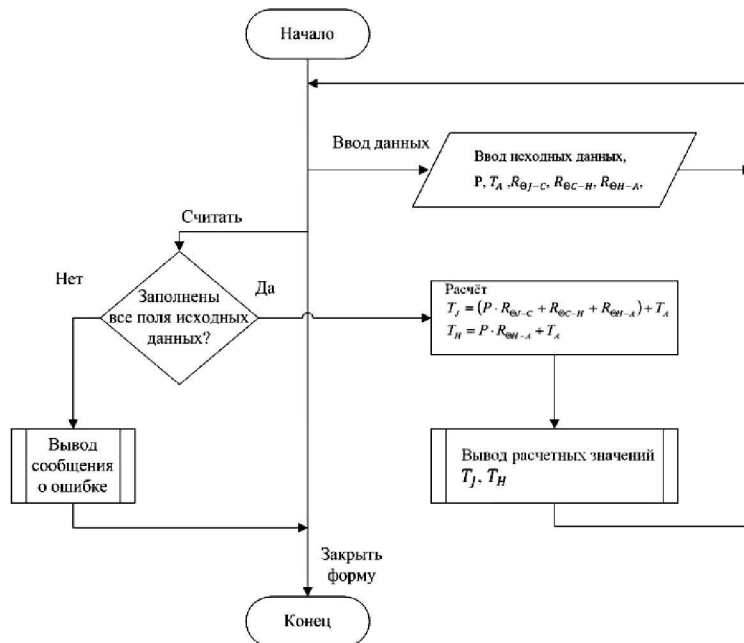


Рис. 5. Алгоритм программы расчёта температуры перегрева теплоотвода

Программа была написана авторами на объектно-ориентированном языке программирования ObjectPascal. Она имеет интуитивно понятный интерфейс, включающий в себя расчетную схему задачи. Главное окно программы показано на рис. 6.

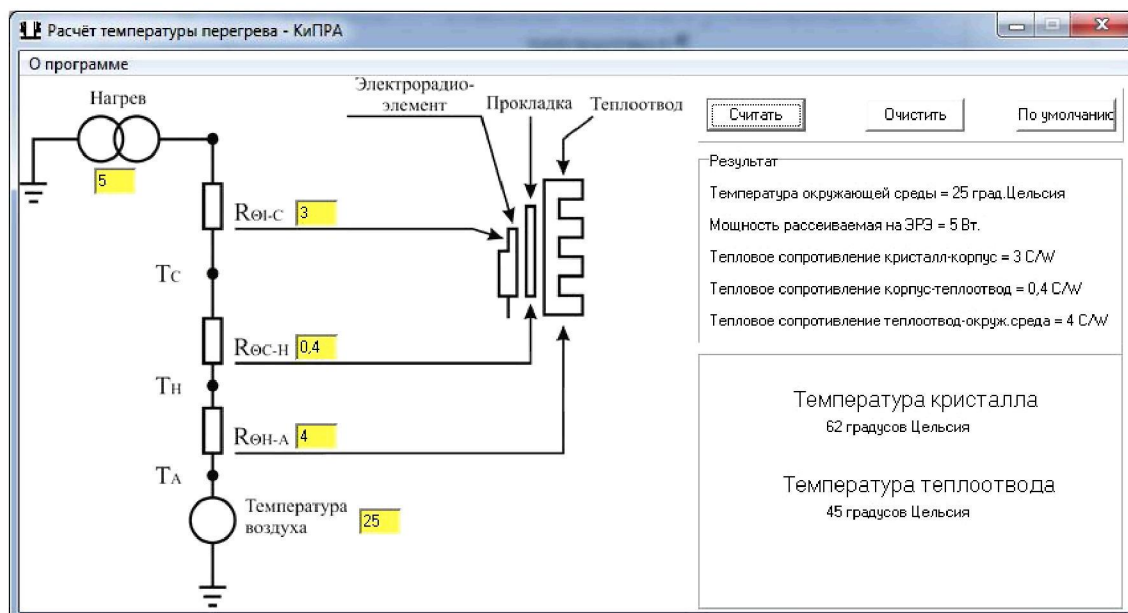


Рис. 6. Главное окно программы

На основе результатов работы программы конструктором принимается решение о выборе типа теплоотвода с заданным $R_{\Theta H-A}$ (при этом использование обдува радиатора

воздухом обычно не предполагается). Такой выбор осуществляется из номенклатуры унифицированных типов теплоотводов, выпускаемых промышленностью. Если ни один из существующих типов не подходит, то на основе требуемого значения $R_{\Theta H-A}$ проводится расчёт геометрических параметров теплоотвода в соответствии с методикой, описанной в [8]. Отдельный модуль программы используется для расчета тепловых сопротивлений при реализации методики теплофизического проектирования, описание которой приведено в [7].

Экспериментальное исследование модели. Была проведена серия экспериментальных исследований, задачей которых было определение температуры перегрева УСО полупроводникового радиокомпонента, на основе использования модели (4). При этом было выявлено расхождение между результатами экспериментальных исследований реальной УСО и результатами расчетов по модели. Сравнение числовых значений приведено в табл. 1.

При проведении реальных экспериментов УСО была установлена в закрытом сменном блоке, а для вычислительного эксперимента использовались паспортные данные СО и радиокомпонента. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью комплекса, описанного в [2, 12].

Таблица 1

Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями

Температура $T_{CO}, ^\circ C$	Температура $T_H, ^\circ C$	$T_{CO} - T_H, ^\circ C$	Расхождение, %
38,5	33,19	5,31	13,8
48	41,37	6,63	13,8
51,5	43,64	7,86	15,2
56,5	48,3	8,2	14,5
60	51,72	8,28	13,8
63,5	54,74	8,76	13,8
67	57,76	9,24	13,8

В рамках анализа потенциальных причин полученных расхождений прежде всего отметим возможное влияние кожуха радиоэлектронной системы [8, 18] на эффективность работы УСО, температуру охлаждаемого объекта.

Актуальность поставленной цели по выявлению причины расхождения результатов обуславливается несколькими обстоятельствами.

А. Адекватность результатов экспериментального исследования наиболее важна при работе УСО в температурном режиме, близком к критическому для охлаждаемого радиокомпонента. В этом случае неточности расчетов могут привести к превышению НТР радиокомпонентов. Как следствие, возможны нарушение режима его функционирования; сокращение срока службы; температурный пробой компонента (особенно при длительном превышении НТР). Неточные результаты тепловых расчетов УСО могут рассматриваться и как потенциальная «угроза информационной безопасности» при проведении проектных работ [4].

(б) Также легко предположить, что расхождения, показанные в табл. 1, могут ввести конструктора в заблуждение, так как, не имея точных данных о состоянии УСО, он будет включать в проект систему охлаждения с избыточными массогабаритными показателями (т.е. применит УСО с большей чем требуется площадью контакта с воздухом) или необоснованно использует систему с принудительной конвекцией.

Поэтому очень важно выявить и устранить причину расхождения результатов.

Для проработки гипотезы о возможном влиянии кожуха УСО и измерительные элементы были вынуты из корпуса сменного блока (рис. 7 а, б), и эксперименты повторены (табл. 2).

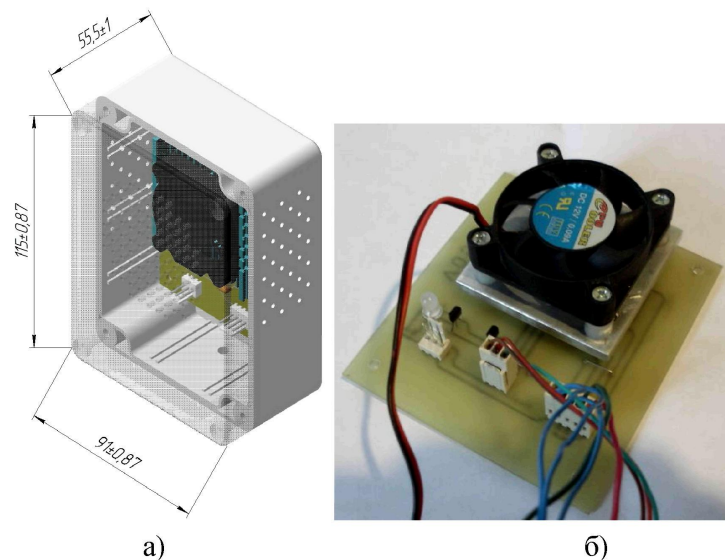


Рис. 7. Учебная система охлаждения:
 а) габаритный чертеж; б) со снятым кожухом

Таблица 2

**Расхождения между экспериментом и вычислительным исследованием
 для УСО, используемой без кожуха**

Температура (T_{CO}) CO, используемой без кожуха, $^{\circ}C$	Температура T_H , $^{\circ}C$	$ T_{CO} - T_H $, $^{\circ}C$	Расхождение, %
33	33,19	0,19	0,5
41,5	41,37	0,13	0,3
43,5	43,64	0,14	0,3
48	48,3	0,3	0,6
51,5	51,72	0,22	0,4
54,5	54,74	0,24	0,4
57,5	57,76	0,26	0,4

При сравнении результатов в табл. 2 видно, что реальные расхождения не превышают $0,5^{\circ}C$ и фактически определяются погрешностью примененных цифровых датчиков температуры. Поэтому можно считать, что предложенная авторами гипотеза о влиянии корпуса сменного блока подтверждается.

Дальнейший анализ полученных результатов приводит к следующему заключению. При проведении вычислительного эксперимента с тепловой моделью (4) в качестве температуры окружающей среды T_A указывалась температура помещения, в котором проходит исследование. В то же время при экспериментальном исследовании фактически T_A – это температура, которая установилась в корпусе сменного блока, и, как видно из сравнения данных в табл. «1» и «2», она выше температуры в помещении. По мнению авторов, именно это и приводит к неточности определения с помощью (4) температуры перегрева УСО, установленной в сменный блок (т.е. внутрь кожуха).

Поэтому целесообразна корректировка (уточнение) модели с целью учета реальной температуры внутри сменного блока. «Любовым» решением этой проблемы является уста-

новка дополнительного измерительного элемента, фиксирующего фактическое значение температуры в корпусе сменного блока. Однако это повлечет за собой усложнение аппаратной части сменного блока и необходимость разработки устройства, осуществляющего передачу значения T_A со сменного блока в программу, обеспечивающую прием/обработку данных вычислительного эксперимента. Между тем, в сменном блоке происходит измерение температуры непосредственно СО. При этом согласно тепловой схеме, лежащей в основе модели, «связующим элементом» между температурой СО T_H и T_A в сменном блоке является тепловое сопротивление «СО – окружающая среда» $R_{\Theta H-A}$. Это обстоятельство позволяет использовать $R_{\Theta H-A}$ для корректировки значения температуры СО, полученной в ходе вычислительных экспериментов, проведенных на основе модели. Для этого необходимо в модель (тепловую схему) ввести коэффициент, корректирующий тепловое сопротивление СО. Такой коэффициент был получен авторами эмпирически в результате проведения серии экспериментов с СО, установленной в сменном блоке. Поскольку коэффициент корректирует $R_{\Theta H-A}$, то он учитывает суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом СО с окружающей средой. На рис. 8 показана полученная эмпирическая зависимость поправочного коэффициента $q_{КЛ}$ от температуры СО.

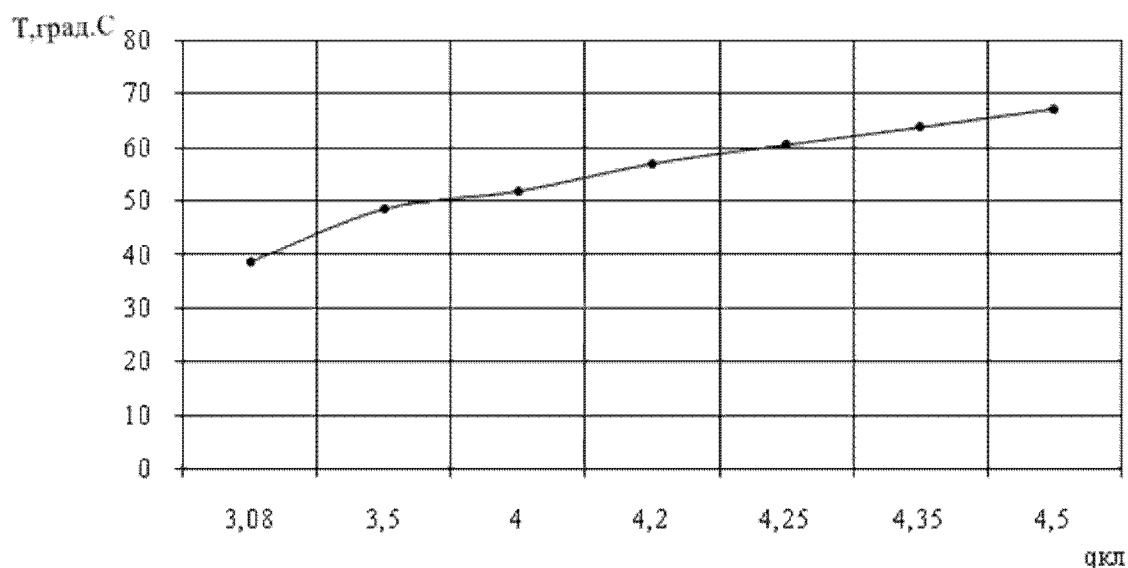


Рис. 8. Зависимость поправочного коэффициента от температуры

Таким образом, в ходе серии экспериментальных исследований была эмпирически получена зависимость для поправочного коэффициента (ПК) $q_{КЛ}$, учитывающего суммарные тепловые потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом УСО с окружающей ее средой. Подчеркнем, что зависимость на рис. 8 относится только к конкретным УСО и кожуху. При иных УСО и кожухах зависимости, естественно, будут меняться.

С использованием ПК проведем корректировку (пересчет) результатов, полученных в вычислительном эксперименте. Тогда на основе модели по (4) для выражения, определяющего коэффициент температуры перегрева теплоотвода, получаем:

$$T_H = P \cdot (R_{\Theta H-A} \cdot q_{КЛ}) + T_A.$$

Проведенная серия вычислительных экспериментов, учитывающих ПК, показала продуктивность его использования для СО, установленной в корпусе сменного блока. Результаты экспериментов, учитывающих ПК $q_{КЛ}$, объединены с результатами предыдущих экспериментов и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расхождение между экспериментальными данными и вычислительным экспериментом

Температура $T_{CO}, ^\circ C$	$T_H = P \cdot (R_{\Theta H-A} \cdot q_{КЛ}) + T_A,$ $^\circ C$	$T_H = P \cdot (R_{\Theta H-A} \cdot q_{КЛ}) + T_A,$ $^\circ C$	$q_{КЛ}$	Расхождение, %
38,5	33,19	38,8	3,08	0,7
48	41,37	48,4	3,5	0,8
51,5	43,64	51,7	4	0,4
56,5	48,3	56,9	4,2	0,7
60	51,72	60,5	4,25	0,8
63,5	54,74	63,9	4,35	0,4
67	57,76	67,3	4,5	0,3

Результаты исследования применимы не только к УСО, но и используются при исследовании причин отказов бытовой и промышленной аппаратуры. Так, при выяснении причин частых отказов импульсного источника питания (ИИП) модели АТХ-400PNF, которые приводят к выходу из строя силовых ключей и вспомогательных элементов источника, удалось установить, что при проектировании конструкторы допустили ряд серьезных ошибок. Основная из них, фактически приводящая к неисправности, – это некорректный тепловой расчет, в ходе которого не было учтено негативное влияние защитного кожуха ИИП. Вследствие чего ИИП, работающий в НТР без кожуха (рис. 9 а), при установке в кожух (рис. 9 б) выходит из НТР. Происходит разогрев вентилятора принудительной конвекции, высыхание смазки его подвижных элементов и, как следствие, резкое снижение эффективности всей СО. Последнее приводит к нарушению теплового режима силовых ключей (биполярные транзисторы D209L) и их тепловому пробую.

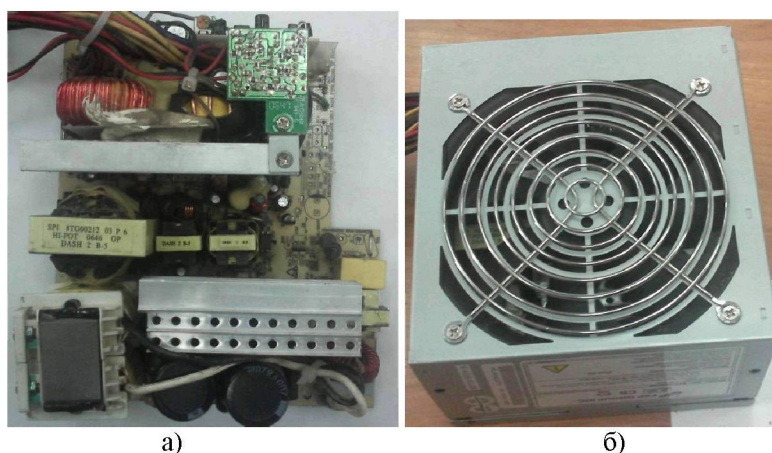


Рис. 9. Импульсный источник питания АТХ-400PNF:
а) печатная плата (вид сверху); б) в кожухе форм фактора АТХ

Используя результаты исследования, представленные выше, удалось определить требуемое тепловое сопротивление СО силовых ключей, а затем по методике [7] осуществить выбор СО, которая способна обеспечить НТР ИИП в кожухе.

Таким образом, исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие **выводы**.

1. Разработана тепловая модель «СО с теплоотводом», применяемой в качестве УСО. Модель позволяет получить численное значение температур кристалла охлаждаемого ЭРИ, его корпуса и СО.

2. Получена эмпирическая зависимость для ПК, который позволяет учесть влияние корпуса сменного блока (кожуха) на температуру перегрева СО. Как видно из приведенных в табл. 1 и 3 данных, использование ПК позволяет улучшить конечный результат на 13,5 %. Применение ПК особенно существенно при расчетах СО, когда температура охлаждаемого элемента близка к максимально допустимой.

3. Предложенная модель может быть основой для вычисления значения теплового сопротивления по методике, изложенной в [7].

4. Разработанное программное средство (ПС) для расчетов СО зарегистрировано в ФАП СО РАН [15]. Такая регистрация ПС действующему законодательству не является строго обязательной, но, безусловно, улучшает «охраноспособность» ПС [5], потенциально расширяет возможности его информационной поддержки.

5. Апробация ПС (путем сравнения с экспериментальными данными) показала, что при соответствующей модернизации оно может стать основой подсистемы автоматизированного выбора теплоотвода, которая (в свою очередь) является необходимым компонентом предложенной в [6] «автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов». Последняя предназначена для комплексного исследования, разработки СО и автоматизации теплового расчета радиоэлектронных средств.

Список литературы

1. Андреев П. Г. Основы проектирования электронных средств : учеб. пос. / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – 124 с.
2. Андреев П. Г. Стенд исследования тепловых полей элементов конструкций РЭС / П. Г. Андреев, Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, В. А. Трусов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – 2008. – Т. 2. – С. 162–166.
3. Бростилов С. А. Математическое моделирование процессов отражения и распространения электромагнитных волн в тонкой градиентной диэлектрической пластине / С. А. Бростилов, Е. В. Кучумов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – 2011. – Т. 1. – С. 281–283.
4. Брумштейн Ю. М. О возможных подходах к оценке вариантов улучшения информационной безопасности организаций / Ю. М. Брумштейн, Т. Т. Салхенов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2007. – № 4 (38). – С. 490–494.
5. Брумштейн Ю. М. Системный анализ необходимых и достаточных условий охраноспособности объектов авторского права / Ю. М. Брумштейн // Интеллектуальная собственность. Авторское право. – 2010. – № 2. – С. 4–17.
6. Горячев Н. В. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
7. Горячев Н. В. Автоматизированный выбор системы охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронных средств / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, К. С. Петелин, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4. – С. 136–143.
8. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учеб. / Г. Н. Дульнев. – Москва : Высшая школа, 1984. – 247 с.
9. Иофин А. А. Некоторые практические аспекты применения пластинчатых радиаторов в конструкциях бортовых РЭС / А. А. Иофин // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – 2012. – Т. 2. – С. 255–255.

10. Кузнецов Г. В. Об одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37, № 2. – С. 150–158.

11. Куликова И. В. Моделирование теплового воздействия лазерного излучения на биологические ткани / И. В. Куликова, С. П. Малюков, С. А. Бростилов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11–2. – С. 425–429.

12. Лысенко А. В. Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплоотводов электрорадиоэлементов / А. В. Лысенко, Н. В. Горячев, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. – 2012. – Т. 2. – С. 239–240.

13. Меркульев А. Ю. Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий / А. Ю. Меркульев, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Молодой ученый. – 2013. – №11. – С. 143–145.

14. НОМАКОН – Теплопроводящие электроизоляционные эластичные силиконовые листовые материалы, прокладки и подложки НОМАКОН™ КПТД-2, КПТД-2М. – Режим доступа: <http://www.nterm.ru/production/kptd-ru/list/> (дата обращения 12.11.2013), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

15. Расчёт температуры перегрева теплоотвода и кристалла радиоэлемента. – Режим доступа: <http://fap.sbras.ru/node/2059> (дата обращения 15.02.2014), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

16. Филин В. А. Математическая модель расчета температуры бетонных изделий при ИК-облучении / В. А. Филин, Е. М. Дербасова, Р. В. Муканов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 4. – С. 65–70.

17. Grigor'ev A. V. Sequential discrete multilevel automated system for recording electron-diffraction patterns / A. V. Grigor'ev, A. L. Drzhevetskii, X. V. Orekhov // Measurement Techniques. – 1996. – № 39 (5). – P. 483–486.

18. Kuznetsov G. V. Conjugate natural convection with radiation in an enclosure / G. V. Kuznetsov, M. A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Т. 52, № 9–10. – P. 2215–2223.

19. Yurkov N. K. Measurement of the parameters of three-element nonresonance two-terminal networks at a fixed frequency / N. K. Yurkov, M. V. Klyuev, E. V. Isaev // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 55, issue 6. – P. 1267–1274.

References

1. Andreev P. G., Naumova I. Yu. *Osnovy proektirovaniya elektronnykh sredstv* [Design fundamentals of electronic means]. Penza, Penza State Univ. Publ., 2010. 124 p.

2. Andreev P. G., Goryachev N. V., Grab I. D., Lysenko A. V., Trusov V. A. Stand issledovaniya teplovykh poley elementov konstruksiy RES [Stand of study of thermal fields of REM construction elements]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium], 2008, vol. 2, pp. 162–166.

3. Brostilov S. A., Kuchumov Ye. V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov otrazheniya i rasprostraneniya elektromagnitnykh voln v tonkoy gradientnoy dielektricheskoy plastine [Mathematical modeling of processes of reflection and propagation of electromagnetic waves in a thin dielectric gradient plate]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium], 2011, vol. 1, pp. 281–283.

4. Brumshteyn Yu. M., Salkhenov T. T. O vozmozhnykh podkhodakh k otsenke variantov uluchsheniya informatsionnoy bezopasnosti organizatsiy [On possible approaches to assessing options to improve information security of organizations]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya* [Information Technologies of Modeling and Control], 2007, no. 4 (38), pp. 490–494.

5. Brumshteyn Yu. M. Sistemy analiz neobkhodimykh i dostatochnykh usloviy okhranosposobnosti obektov avtorskogo prava [System analysis of necessary and sufficient conditions for eligibility of copyright]. *Intellektualnaya sobstvennost. Avtorskoe pravo* [Intellectual Property. Copyright], 2010, no. 2, pp. 4–17.

6. Goryachev N. V., Grab I. D., Lysenko A. V., Yurkov N. K. Struktura avtomatizirovannoy laboratorii issledovaniya teplootvodov [Structure of automated laboratory of heat sink research]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium], 2011, vol. 2, pp. 119–120.

7. Goryachev N. V., Grab I. D., Petelin K. S., Trusov V. A., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. Avtomatizirovannyi vybor sistemy okhlazhdeniya teplonagruzhenykh elementov radioelektronnykh sredstv

[Automated selection of the cooling system of thermally loaded components of electronic funds]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, no. 4, pp. 136–143.

8. Dulnev G. N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnay apparature* [Heat and mass transfer in electronic equipment]. Moscow, Vysshaya shkola, 1984. 247 p.

9. Iofin A. A. Nekotorye prakticheskie aspekty primeneniya platinchatykh radiatorov v konstruktivnykh bortovykh RES [Some practical aspects of application of plate radiators in constructions of airborne REM]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium], 2012, vol. 2, pp. 255–255.

10. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. Ob odnom podkhode k matematicheskomu modelirovaniyu teplovykh rezhimov radioelektronnay apparatury i elektronnoy tekhniki [An approach to the mathematical modeling of thermal modes of electronic equipment and electronic equipment]. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2008, vol. 37, no 2, pp. 150–158.

11. Kulikova I. V., Malukov S. P., Brostikov S. A. Modelirovanie teplovogo vozdeystviya lazernogo izlucheniya na biologicheskie tkani [Modeling of the thermal effect of laser radiation on biological tissues]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Researches], 2012, no. 11–2, pp. 425–429.

12. Lysenko A. V., Goryachev N. V., Grab I. D., Yurkov N. K. Informatsionno-izmeritelnyy laboratornyy kompleks issledovaniya teplootvodov elektroradioelementov [Information-measuring laboratory complex of research of electroradioelement heat sinks]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of the International Symposium], 2012, vol. 2, pp. 239–240.

13. Merkulev A. Yu., Goryachev N. V., Yurkov N. K. Sistemy okhlazhdeniya poluprovodnikovyykh elektroradioizdeliy [Cooling system of semiconductor electroradioproducts]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2013, no. 11, pp. 143–145.

14. NOMACON – Thermally insulating elastic silicone sheeting, gaskets and substrate NOMACON™ TCEI-2, TCEI -2M. Available at: <http://www.nterm.ru/production/kptd-ru/list/> (accessed 12 November 2013). (In Russ.)

15. Calculation of superheating temperature of heat sink and radioelement crystal. Available at: <http://fap.sbras.ru/node/2059> (accessed 15 February 2014). (In Russ.)

16. Filin V. A., Derbasova Ye. M., Mukanov R. V. Matematicheskaya model rascheta temperatury betonnykh izdeliy pri IK-obluchanii [Mathematical model for calculating the temperature of concrete products in the IR irradiation] *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2011, no. 4, pp. 65–70.

17. Grigor'ev A. V., Drzhevetskii A. L., Orekhov X. V. Sequential discrete multilevel automated system for recording electron-diffraction patterns. *Measurement Techniques*, 1996, no. 39 (5), pp. 483–486.

18. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. Conjugate natural convection with radiation in an enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 9–10, pp. 2215–2223.

19. Yurkov N. K., Klyuev M. V., Isaev E. V. Measurement of the parameters of three-element nonresonance two-terminal networks at a fixed frequency. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, issue 6, pp. 1267–1274.