

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК [621.396.6-046.47]-027.31

На правах рукописи

ПОДЫМОВ
Артём Вячеславович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ РЭС**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ГОНОВ Александр Николаевич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ЛОБАТЫЙ Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и технологий международного института дистанционного образования БНТУ

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 г. года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Выпускаемые промышленностью изделия, в том числе и радиоэлектронные средства (РЭС), предназначены для выполнения заданных функций в течение определенного времени. Способность электронных устройств сохранять значения всех параметров и выполнять требуемые функции в указанных условиях характеризуются показателями надежности, отражающими определенные свойства изделия.

Одним из основных факторов, негативно влияющих на надежность приборов, является температура. Это согласуется с физической теорией надежности, согласно которой работа любого технического устройства является необратимым процессом.

Электронные компоненты зависят от проходящего через них электрического тока для выполнения их функций и, как следствие, становятся потенциальными площадками для экстремального нагрева. Миниатюризация электронных систем привела к резкому увеличению количества тепла, выделяемого на единицу объема. Если должным образом не спроектировать и не проконтролировать разработку, это может привести к высоким рабочим температурам для электронного оборудования, что ставит под угрозу его безопасность и надежность.

Частота отказов электронного оборудования экспоненциально возрастает с температурой. Кроме того, высокие термические напряжения в паяных соединениях электронных компонентов, установленных на печатных платах в результате изменения температуры, являются основными причинами отказов. Поэтому обеспечение и оптимизация тепловых режимов становятся все более важным при проектировании и эксплуатации электронного оборудования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современный этап развития радиоэлектронных средств характеризуется повышением функциональной сложности, уровня интеграции, быстродействия и тепловыделения элементной базы. Все это приводит к увеличению сложности конструкций и повышению требований к их производству, эффективности работы и т.п. Анализ и оптимизация тепловых режимов при проектировании РЭС является главным фактором эффективной работы и комплексной надежности всего устройства. Современные технологии вводят все более быстрые и точные методы анализа тепловых режимов, еще до начала этапа конструирования.

В связи с вышесказанным, актуальной является разработка методик анализа и обеспечения тепловых режимов с использованием современных САПР.

Степень разработанности проблемы

Исследование методов анализа тепловых режимов РЭС, использования методик и систем охлаждения осуществлялось на основе работ российских и белорусских ученых: Г.Н. Дульнева, В.Ф. Алексеева, В.А. Шуваева, А.А. Иофина, А.В. Муратова, А.Д. Фролов, И.С. Бобылкин и др.

В связи с развитием элементной базы, методов анализа и программного обеспечения, исследования, представленные в работах данных авторов, в некоторых аспектах являются устаревшими и требуют доработки.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе использования программ для теплового анализа *FloTHERM* и моделирования 3D конструкций *SolidWorks*.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является исследованием методов анализа и обеспечения тепловых режимов при конструировании РЭС.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Провести анализ задач обеспечения теплового режима современных РЭС, решаемых в рамках процесса теплового проектирования, и определить основные направления повышения его эффективности.

2. Провести обзор и анализ тепловых режимов и процессов тепло- и массообмена, влияние условий эксплуатации, систем охлаждения, элементов и устройств систем обеспечения тепловых режимов.

3. Разработать структуру и состав процесса прогнозирования и оценки тепловых характеристик при проектировании РЭС. Сформировать комплекс математических моделей тепловых процессов в РЭС, базирующихся на унифицированных тепловых моделях.

4. Реализовать предложенные методы обеспечения и оптимизации тепловых режимов на этапе конструирования РЭС в программно-методическом комплексе обеспечения теплового режима.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-38 80 04 Компьютерные технологии проектирования электронных систем.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области моделирования, анализа, обеспечения и оптимизации тепловых режимов при конструировании РЭС.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке процедур анализа и оптимизации тепловых режимов, отличающихся комплексным подходом к решению задач синтеза системы охлаждения и комплекса теплоотводящих средств на всех уровнях конструктивной иерархии РЭС.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе протекающих процессов теплообмена с использованием современных средств компьютерного моделирования.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанной схематехнической модели анализа, которая позволит оптимизировать процесс технической диагностики тепловых режимов РЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Системы, устройства и методики оптимизации тепловых режимов при конструировании РЭС.
2. Прогнозирование и оценка тепловых режимов РЭС.
3. Экспериментально установленное снижение температур тепловых полей конструкции РЭС при использовании методов охлаждения.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств».

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 21 страницу.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе проведен обзор и анализ тепловых режимов и процессов тепло- и массообмена, влияние условия эксплуатации, систем охлаждения, элементов и устройств систем обеспечения тепловых режимов.

Во второй главе рассмотрены методы анализа тепловых режимов РЭС, а также исследованы основные тепловые и математические модели.

В третьей главе выполнено моделирование при помощи САПР тепловой режим РЭС с использованием методов обеспечения и оптимизации тепловых режимов.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 107 страниц. Из них 73 страницы основного текста, 42 иллюстраций на 15 страницах, 8 таблицы на 5 страницах, библиографический список из 75 наименований на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 3 приложений на 33 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено важность обеспечения и оптимизации работоспособности и тепловых режимов РЭС в современном мире.

В общей характеристике работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе обозначены основные понятия и характеристики теплообмена и теплопроводности, отмечено влияние условий эксплуатации на тепловые процессы и выделена классификация РЭС по объектам установки и эксплуатации. Проведен обзор систем, элементов и устройства охлаждения.

Из анализа следует, что проблему по объектам установки и эксплуатации РЭС можно классифицировать следующим образом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация РЭС по объектам установки и эксплуатации

Сделан вывод, что в некоторых условиях и случаях защита устройства от перегрева не является основной проблемой и обеспечивать надежность устройства надо другими методами.

Рассмотрены способы переноса теплоты в конструкциях РЭС:

- теплопроводность;
- конвекция;
- тепловое излучение.

Показана классификация методов охлаждения РЭС:

- по способу организации (индивидуальная, групповая);
- по роду хладагента (воздух, жидкость);
- по способу движения хладагента (естественное, принудительное);
- по виду теплового контакта (прижим, резьба);
- по виду материала теплоотвода (керамика, металл);
- по способу передачи теплоты в окружающую среду (без промежуточного теплоносителя и с ним).

Установлено, что основными средствами оптимизации тепловых режимов РЭС является сочетание эффективных конструктивно-технологических решений, систем охлаждения, элементов и специальных средства систем обеспечения тепловых режимов.

Показана возможность применение принудительной приточно-вытяжной вентиляции, обеспечиваемой воздушными нагнетателями, которую эффективно использовать в сочетании с радиатором. Вследствие чего была разработана упрощенная схема РЭС, показанная на рисунке 2, которая в дальнейшем может быть использована для моделирования и оптимизации тепловых режимов.

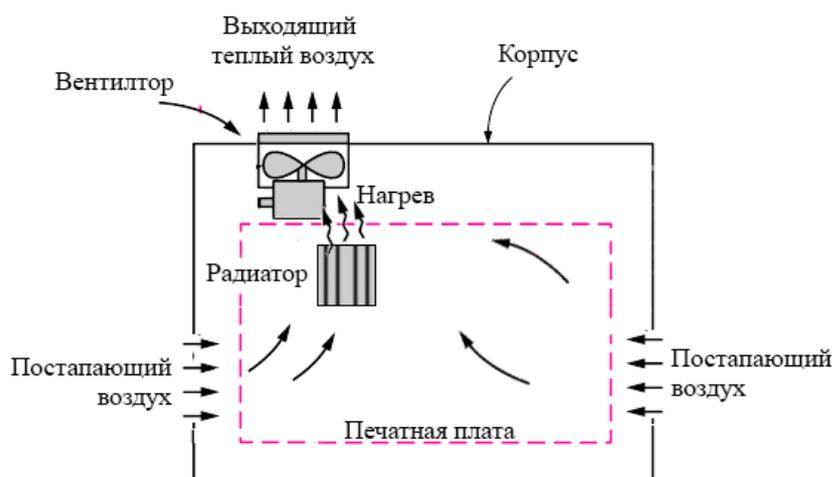


Рисунок 2 – Упрощенная схема моделируемого радиоэлектронного средства

Во второй главе представлена упрощенная модель расчета интенсивности отказов РЭС с увеличением температуры, описана комплексная методика прогнозирования и оценки тепловых характеристик РЭС, а также основные тепловые модели и характеристики.

Сущность методики (рисунок 3) состоит в том, что для анализа необходимо использовать основные тепловые характеристики РЭС, выбрать способы теплопередачи, необходимые тепловые модели конструкции и тепловых полей, спроектировать систему охлаждения. Для быстроты и удобства проектирования системы охлаждения рекомендуется воспользоваться пакетом специальных прикладных программ.

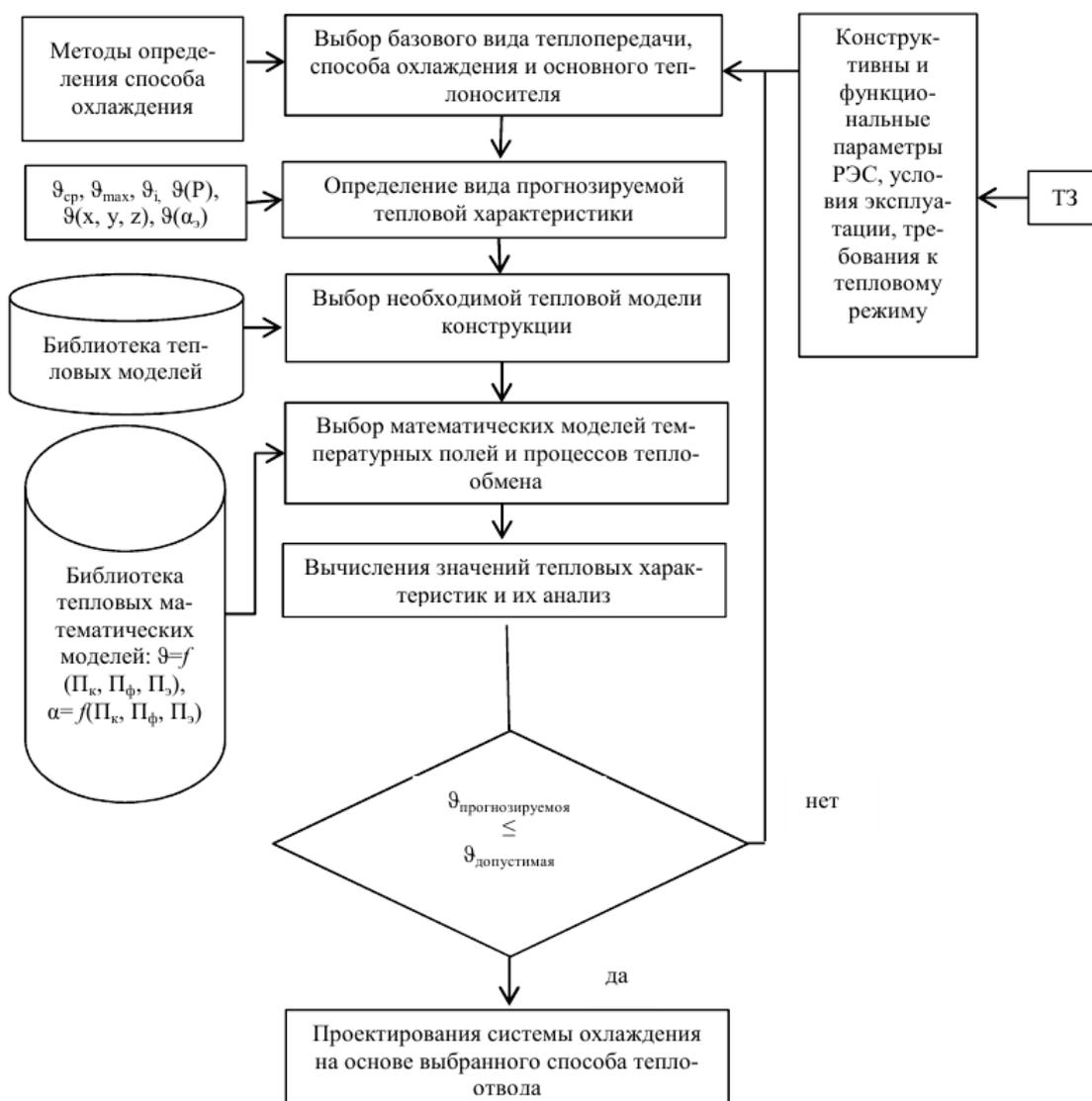


Рисунок 3 – Прогнозирование и оценка тепловых характеристик при проектировании радиоэлектронного средства

Показано, что при численном моделировании требуется построение подробной расчетной сетки, что ведет к увеличению времени расчета. С этой

точки зрения задача построения упрощенных математических моделей, которые позволят обеспечить сокращение вычислительных ресурсов, необходимых для проведения анализа, является актуальной. Данные упрощения будут использованы при моделировании в САПР.

В третьей главе проведен анализ актуальных на данный момент прикладных программ для моделирования тепловых процессов, была разработана печатная плата с элементной базой, был сконструирован 3D корпус, представлен эксперимент по эффективности использования принудительной воздушной вентиляции в сочетании с радиатором по сравнению с обычной конструкцией.

Моделирование тепловых процессов проводилось во *FloTHERM*, в сочетании с дополнительными встроенными модулями, в конструирование 3D объектов с использованием *SolidWorks*.

Корпус моделируемого ПЭС состоит из верхней и нижней крышки показанных на рисунках 5 и 6 соответственно.

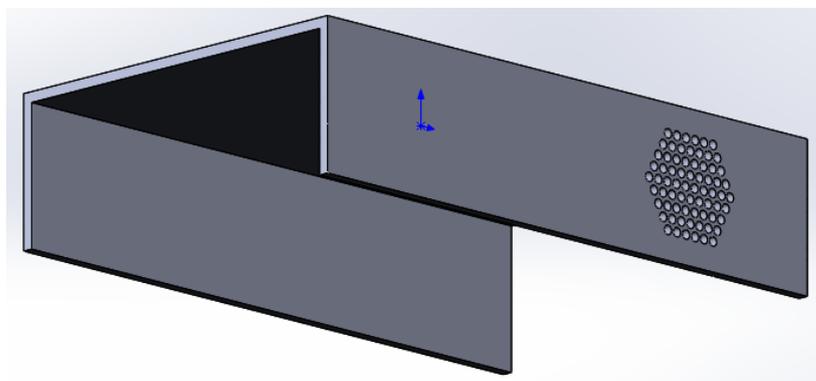


Рисунок 4 – Верхняя крышка корпуса моделируемого радиоэлектронного средства

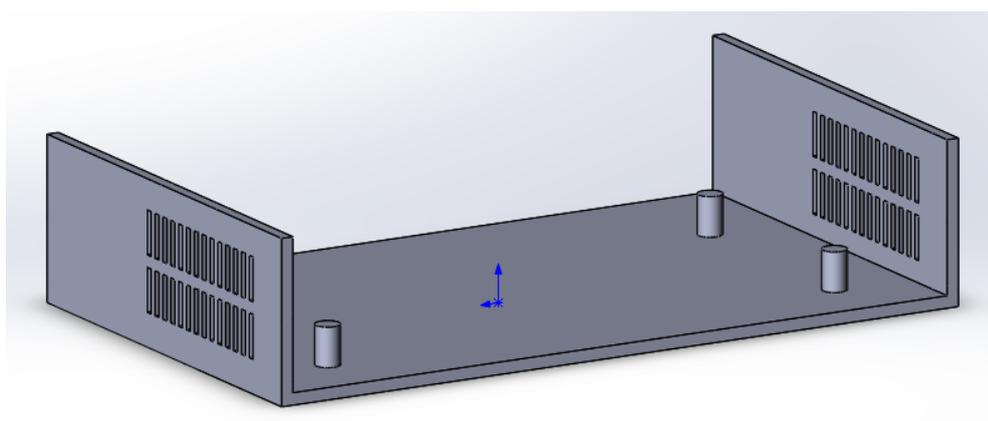


Рисунок 5 – Нижняя крышка корпуса моделируемого радиоэлектронного средства

Для сравнения было проведено моделирование тепловых процессов с

внедрением предлагаемой СО и без нее. В результате были получены тепловые поля (рисунок 6), потоки воздуха (рисунки 7 и 8).

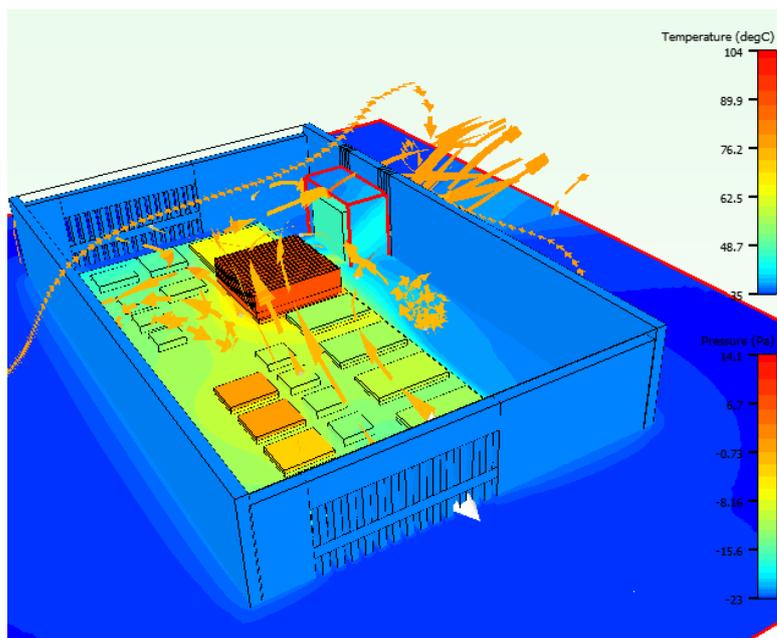


Рисунок 6 – Тепловые поля РЭС с вентиляционной системой охлаждения

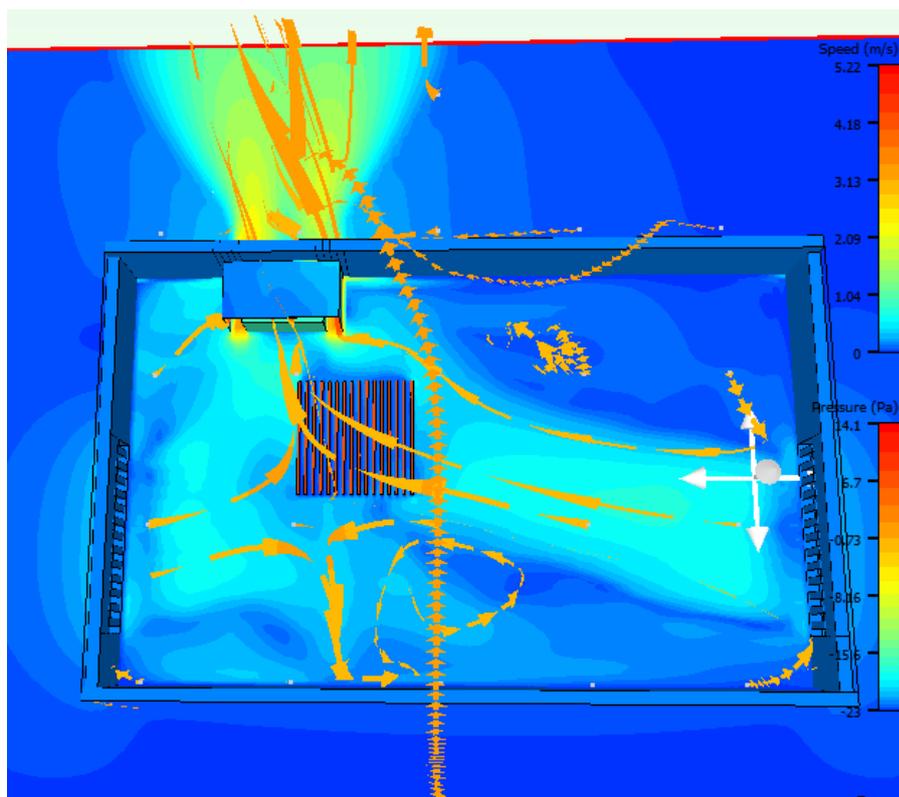


Рисунок 7 – Воздушные потоки РЭС с вентиляционной системой охлаждения

Если не обеспечить РЭС системой СО то максимальная температура поднимается до 160 °С (рисунок 10), при этом максимальная скорость воздушных потоков была равна 0,11 м/с, а давление 0,7 Па.

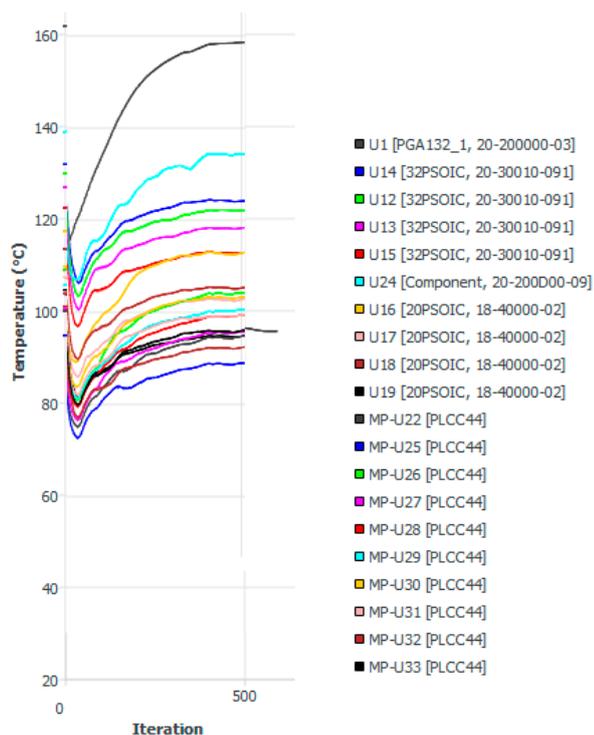


Рисунок 10 – График зависимости температуры элементов от итерации без применения системы охлаждения

По результатам моделирования РЭС с вентиляционной СО заметно, как через боковые отверстия в корпусе воздух охлаждает радиатор, а вентилятор выводит теплый воздух за пределы корпуса. Элементом с наибольшим выделением тепла, как и предполагалось, является PGA-312, температура на его поверхности достигала около 92 °С (рисунок 11). Максимальная скорость воздушных потоков на выходе из вентилятора была равна 5 м/с, а давление 14 Па.

Результатов проведения занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирование

Система	Максимальная температура, (°C)	Скорость потоков воздуха, (м/с)	Давление, (Па)
Без вентиляции	160	0,11	0,7
С вентиляцией	92	5	14

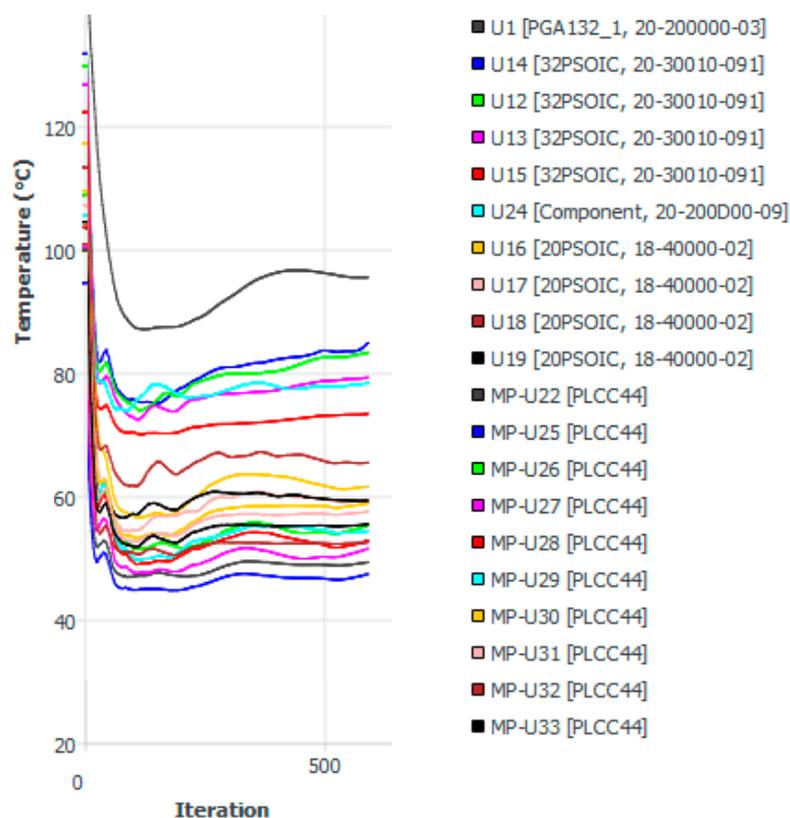


Рисунок 9 – График зависимости температуры элементов от итерации для радиоэлектронного средства с вентиляционной системой охлаждения

По числовым результатам видно, что система справилась со своей задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Выполнен анализ общих характеристик и основных понятий тепло- и массообмена, влияния условия эксплуатации и окружающей среды на тепловые режимы. Были описаны основные средства и система охлаждения, подразделяющиеся на следующие виды: воздушные, жидкостные, испарительные, кондуктивные, радиационные, специальные, комбинированные.

Предложена комплексная методика прогнозирования и оценки тепловых характеристик РЭС, имеющую интегрированный характер и позволяющую адаптироваться к различным формам постановки задач и наборам исходных данных. Она включает следующие этапы:

1. Выбор базового вида теплопередачи, способа охлаждения и основного теплоносителя.
2. Определение вида прогнозируемой характеристики.

3. Выбор необходимой тепловой модели.
4. Выбор математических моделей.
5. Вычисление значений тепловых характеристик и их анализ.

Рассмотрены подходы к созданию упрощенных моделей базирующихся на общепризнанных методах и подходах.

Посредство пакета прикладных программ *SolidWorkds* и *FloTHERM* была разработана и смоделировано РЭС с воздушной СО с принудительной вентиляцией. Поэтапно описан способ моделирования с указанием главных нюансов, которые могут возникнуть при моделировании.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1. Вилюха, Ю.Е. Факторы, влияющие на надежность полупроводниковых приборов / Ю.Е Вилюха , А.В. Подымов, А.С. Жуковский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов Международной научно-практической конференции Цент научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 379–382.

2. Подымов, А.В. Методы оптимизации и обеспечения теплового режима РЭС / А.В. Подымов, А.С. Жуковский, В.Д. Калейчик // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов Международной научно-практической конференции Цент научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 398–404.

3. Подымов, А.В. Методы и анализ обеспечения и оптимизации тепловых режимов РЭС: Обзор методик оценки и анализа / А.В. Подымов, А.С. Жуковский, Ю.Е. Вилюха // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов Международной научно-практической конференции Цент научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 390–397.

4. Жуковский, А.С. Анализ САПР для имитационного моделирования физических и тепловых процессов / А.С. Жуковский, А.В. Подымов, Ю.Е. Вилюха // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов Международной научно-практической конференции Цент научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 383–386.

РЭЗІЮМЭ
Падымаў Арцём Вячаслававіч
Метады і алгарытмы рашэння задач забеспячэння і аптымізацыі
цеплавых рэжымаў пры праектаванні РЭС

Ключавыя словы: цеплавое праектаванне, цеплавы рэжым, цеплавыя працэсы, сістэмы астуджэння, забеспячэнне, прагназаванне, аптымізацыя.

Мэта працы: прааналізаваць цеплавы рэжым у канструкцыі РЭС, падабраць сістэму астуджэння і з выкарыстаннем сучаснага САПР эксперыментальна даказаць эфектыўнасць дадзенай сістэмы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз існуючых метадаў аналізу цеплавых рэжымаў, метадаў забеспячэння і аптымізацыі цеплавых рэжымаў пры канструяванні РЭС. Выяўлена, што ў цяперашні час у крыніцах недастаткова асветлена пытанне аналізу цеплавых працэсаў з выкарыстаннем сучасных пакетаў прыкладных праграм; падабрана комплексная методыка прагназавання і ацэнкі цеплавых характарыстык РЭС; разгледжаны асноўныя сродкі, сістэмы і прылады для астуджэння канструкцыі прыбора; у выніку мадэлявання цеплавых працэсаў для РЭС з сістэмай астуджэння і без, эксперыментальна даказаная аптымізацыя цеплавых працэсаў у першым выпадку.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў».

Вобласць ужывання: канструяванне РЭС, забеспячэнне надзейнасці РЭС.

РЕЗЮМЕ

Подымов Артём Вячеславович

Методы и алгоритмы решения задач обеспечения и оптимизации тепловых режимов при проектировании РЭС

Ключевые слова: тепловое проектирование, тепловой режим, тепловые процессы, системы охлаждения, обеспечение, прогнозирование, оптимизация.

Цель работы: проанализировать тепловые режим в конструкции РЭС, подобрать систему охлаждения и с использованием современного САПР экспериментально доказать эффективность данной системы.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ существующих методов анализа тепловых режимов, методов обеспечения и оптимизации тепловых режимов при конструировании РЭС. Выявлено, что в настоящее время в источниках недостаточно освещен вопрос анализа тепловых процессов с использованием современных пакетов прикладных программ; подобрана комплексная методика прогнозирования и оценки тепловых характеристик РЭС; рассмотрены основные средства, системы и устройства для охлаждения конструкции прибора; в результате моделирования тепловых процессов для РЭС с системой охлаждения и без, экспериментально доказана оптимизация тепловых процессов в первом случае.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

Область применения: конструирование РЭС, обеспечение надежности РЭС.

SUMMARY

Podymov Artyom Vyacheslavovich

Methods and algorithms for solving the problems of providing and optimizing thermal regimes in the design radio-electronic equipment

Keywords: thermal design, thermal regime, thermal processes, cooling systems, provision, forecasting, optimization.

The object of study: to analyze the thermal conditions in the design of the radio-electronic equipment, select a cooling system and with the use of modern CAD to experimentally prove the effectiveness of this system.

The results and novelty: have been made the analysis of existing methods for analyzing thermal regimes, methods for ensuring and optimizing thermal regimes in the design of radio-electronic equipment. It has been revealed that at present, the sources of research do not sufficiently cover the question of the analysis of thermal processes using modern software packages; has been selected a complex methodology for forecasting and estimating the thermal characteristics of radio-electronic equipment; have been considered systems and devices for cooling the device design; as a result of simulation of thermal processes for radio-electronic equipment with and without a cooling system, the optimization of thermal processes in the first case was experimentally proved.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Physical fundamentals of the design of radio-electronic means».

Sphere of application: design of radio-electronic equipment, reliability of radio-electronic equipment.