

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

УДК 004.94-046.47

*На правах рукописи*

**ЖУКОВСКИЙ**  
Алексей Сергеевич

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ  
В СРЕДЕ «ANSYS»**

**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 «Информационные системы и технологии» МИДО БНТУ

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 г. года в 10<sup>00</sup> 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

На этапе конструкторского проектирования радиоэлектронных средств (РЭС) при выборе вариантов конструкции и компоновки наряду с задачами обеспечения монтажно-коммутационных требований, помехоустойчивости, технологичности и вибростойкости необходимо решать задачи обеспечения нормального теплового режима. Уменьшение размеров и веса блоков, применение интегральных микросхем, интенсивный режим эксплуатации радиоаппаратуры часто в условиях повышенной температуры окружающей среды – усложняют задачу обеспечения правильного теплового режима РЭС.

При повышении температуры происходит физическое изменение материалов, нарушение изоляционных свойств, интенсивное старение материалов с потерей механических и электрических свойств. При колебании температуры изменяется емкость конденсаторов, снижается сопротивление изоляции, меняется собственная емкость, добротность контуров и сопротивление резисторов. В результате нарушается настройка РЭС, снижается чувствительность и избирательность радиоприемных устройств.

Правильно подобранный тепловой режим оказывает большое влияние на работоспособность большинства устройств и агрегатов. В связи с этим необходимо проводить математическое моделирование, которое позволяет: оценить работоспособность и параметрическую надежность схемы с электро-тепловой точки зрения; разместить элементы, минимизировав локальный нагрев и градиенты температуры, обусловленные наличием элементов, рассеивающих мощность.

Программные средства *FloTHERM*, *Pro/ENGINEER Mechanical*, АСОНИКА выполняют моделирование тепловых процессов в РЭС. В работе рассматривается универсальная система *ANSYS*, позволяющая эффективно решать широкий спектр задач, связанных с тепловым анализом электронных устройств.

На сегодняшний день существует большое число работ в области моделирования тепловых процессов. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в области моделирования тепловых процессов (Г.Н. Дульнев, В.А. Зорин, В.Ф. Алексеев, В.Н. Кузьменых);

Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации производимой аппаратуры к воздействию температур и, как следствие, повышение их качества доказывает актуальность темы.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Минимизация размеров, высокие требования к производительности, совместное использование и интеграция электронных устройств предполага-

ют необходимым уделять серьезное внимание в процессе проектирования тепловым процессам. Имитационное моделирование тепловых процессов позволяет обнаружить изъяны в РЭС до их производства.

В связи с вышесказанным, актуальным является проведение имитационного моделирования тепловых процессов с помощью современных САПР.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследование методов моделирования тепловых полей в РЭС осуществлялось на основе работ российских и белорусских ученых: Г.Н. Дульнев, В.А. Зорин, В.Ф. Алексеев, В.Н. Кузьменных и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в работах данных авторов, является недостаточно полное описание процессов моделирования тепловых процессов с использованием современных программных средств.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка с помощью использования программ для теплового моделирования от *ANSYS*.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является проведение комплексных исследований, направленных на получение научно-обоснованных технических и методических решений, способствующих созданию моделей теплофизических процессов.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Построить математические модели тепловых процессов для двумерных и трехмерных конструктивных модулей РЭС
2. Осуществить аппроксимацию непрерывной искомой функции температуры, зависящей от двух координат, кусочно-непрерывной, определенной на множестве двумерных конечных элементов (КЭ).
3. Смоделировать тепловые процессы РЭС с помощью программных продуктов *ANSYS*.

### **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 80 04-2012 специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области математического моделирования тепловых процессов, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

*Информационная база* исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

## **Научная новизна**

*Научная новизна* и значимость полученных результатов работы заключается в разработке методики моделирования виртуальных картин тепловых полей в двумерных и трехмерных конструктивных модулях РЭС, осуществляемой с помощью разбиения конструкции на КЭ, позволяющей создать базы данных параметров элементной базы и деталей конструкций РЭС, зависящих от температуры.

*Теоретическая значимость* работы заключается в детальном анализе уравнений математической физики, описывающих тепловые поля в двумерном и трехмерном пространствах, с учетом особенностей компьютерного моделирования.

*Практическая значимость* диссертации состоит в разработанной математической модели тепловых полей, которая позволит оптимизировать процесс технической диагностики тепловых режимов РЭС.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Анализ методов теплового моделирования и приближенного расчета тепловых режимов конструкций РЭС.
2. Конечно-элементная дискретизация конструктивных модулей РЭС. Некоторые подходы к разбиению области на КЭ.
3. Моделирование тепловых процессов в среде *ANSYS*.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Физические основы проектирования 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** рассмотрены основы теории теплообмена в РЭС. Анализируются методы теплового моделирования и приближенного расчета тепловых режимов конструкций РЭС на основе электротепловой аналогии.

**Во второй главе** построены математические модели теплофизических процессов. Решены уравнений математической физики, описываю-

щие тепловые поля в трехмерном и двумерном пространствах. Так же внимание уделено постановке краевых задач и конечно-элементной аппроксимации плоских конструктивных модулей РЭС.

**В третьей главе** представлен анализ существующих САПР для моделирования тепловых процессов. Описана реализация МКЭ в ANSYS. Произведено имитационное моделирование тепловых процессов в среде ANSYS.

**В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 107 страницы. Из них 67 страниц основного текста, 26 иллюстраций на 23 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 70 наименований на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 4 приложений на 33 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы моделирования тепловых полей, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, а также описано обоснование актуальности темы.

**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** рассмотрены основы теории теплообмена в РЭС, включающего три способа передачи тепла: теплопроводность, конвекция и излучение. Приведены четыре критерия подобия, предназначенные для определения конвективного коэффициента теплопередачи в условиях естественной и принудительной конвекции в РЭС. Анализируются методы теплового моделирования и приближенного расчета тепловых режимов конструкций РЭС на основе электротепловой аналогии.

Показано, что под тепловым режимом РЭС понимается пространственно-временное распределение температуры в пределах конструкции. Количественно тепловой режим РЭС характеризуется температурным полем и перегревом.

Так же показано, что исследование теплового режима конструкции РЭС состоит в определении температуры в некоторой точке  $t_j = t_j(\tau, P)$  и температурного перегрева  $\Delta t_j = \Delta t_j(\tau, P)$ . В установившемся (стационарном) режиме  $\Delta t_j$  не зависит от времени  $\tau$ , а зависимость  $\Delta t_j = \Delta t_j(P)$  называется тепловой характеристикой  $j$ -й точки (области) конструкции.

Показано, что наиболее часто тепловое моделирование выполняется методами изотермических поверхностей, однородного анизотропного тела и

экспериментальными методами. Выбор данного исследования обусловлен тем, что:

1. Метод изотермических поверхностей основан на выделении в конструкции поверхностей с одинаковыми температурами в каждой точке поверхности.

2. Метод однородного анизотропного тела состоит в представлении реальной конструкции или ее части однородным анизотропным телом в виде прямоугольного параллелепипеда с внутренними источниками тепла, для которого находят эквивалентные коэффициенты теплопроводности  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  и  $\lambda_z$  по направлениям осей координат, перпендикулярных граням параллелепипеда.

3. Экспериментальный метод теплового моделирования заключается в создании макета конструкции РЭС, воспроизводящего процесс теплообмена реальной конструкции. Степень приближения макета к конструкции зависит от конкретной задачи исследования.

Одной из основных задач расчета показателей теплового режима является определение температур в некоторых критических точках конструкции или построение тепловой характеристики. Методы расчета показателей теплового режима:

1. Метод последовательных приближений представляет собой итеративный процесс установления соответствия с некоторой наперед заданной точностью между температурой  $t_j$  или перегревом  $\Delta t_j$ , эквивалентной тепловой проводимостью  $\sigma_z$  и тепловым потоком  $P$ .

2. Метод тепловой характеристики состоит в построении по расчетным данным зависимости  $\Delta t_j = f(P)$ , по которой для любого значения теплового потока  $P$  можно найти перегрев и температуру  $j$ -й точки или области конструкции.

**Вторая глава** посвящена построению математических моделей теплофизических процессов в конструктивных модулях, постановке краевых задач, конечно-элементной аппроксимации плоских конструктивных модулей РЭС.

В ходе построения математической модели теплофизических процессов выведено уравнение описывающее тепловые процессы в трехмерном пространстве. Начальное условие в отличие от уравнения гиперболического типа состоит лишь в задании функции  $u(x, y, z, t)$  в начальный момент  $t_0$ .

Для выделения единственного решения уравнения теплопроводности к уравнению присоединены начальные и граничные условия.

Показано, что граничные условия могут быть различны в зависимости от температурного режима на границах. Рассмотрены три основных типа граничных условий:

1. На границе стержня задана температура.
2. На границе задано значение производной.
3. На границе задано линейное соотношение между производной и функцией.

МКЭ является одним из наиболее популярных методов решения краевых задач в САПР. В общем случае алгоритм МКЭ состоит из четырех этапов.

Этап 1. Выделение конечных элементов (разбиение заданной области на конечные элементы).

Этап 2. Определение аппроксимирующей функции для каждого элемента (определение функции элемента).

Этап 3. Объединение конечных элементов в ансамбль.

Этап 4. Определение вектора узловых значений функции.

В качестве аппроксимирующих функций элементов чаще всего используются полиномы. В зависимости от степени последних используются конечные элементы: симплекс-, комплекс- и мультиплекс-элементы. Полиномы симплекс-элементов содержат константы и линейные члены; полиномы комплекс-элементов – константы, линейные члены, а также члены более высоких степеней. Комплекс-элементы, как правило, кроме граничных, имеют дополнительные внутренние узлы.

Полиномы мультиплекс-элементов также содержат члены более высоких степеней. Однако на мультиплекс-элементы накладывается дополнительно еще одно условие: их границы должны быть параллельны координатным осям.

**В третьей главе** представлен анализ существующих САПР для моделирования тепловых процессов. Описана реализация МКЭ в *ANSYS*. Выполнено имитационное моделирование тепловых процессов на примере устройства состоящего из корпуса и печатной платы в среде *ANSYS*.

Представлено описание таких программных продуктов, как *FloTHERM*, *Pro/ENGINEER Mechanical*, *ANSYS Icepack*.

Программный комплекс *ANSYS* решает методом конечных элементов стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные задачи из таких областей физики, как механика твёрдого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика.

Показано решение МКЭ поставленной краевой задачи программой *ANSYS* в три этапа соответственно логике метода.

На первом этапе (препроцессинге) создаётся основа конечно-элементной модели исследуемого объекта.

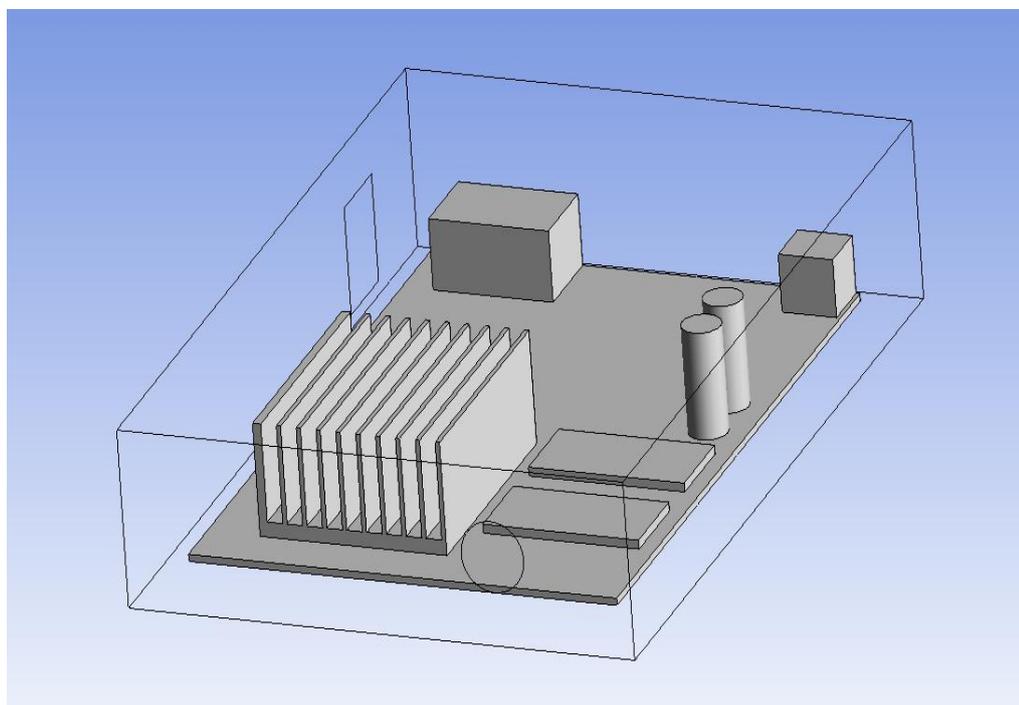
Второй этап – наложение на модель необходимых физических условий

и решение задачи – состоит из трёх основных шагов:

1. Задаются граничные условия – силы, перемещения (связи) и пр.
2. Выбирается тип анализа (статический, динамический, модальный и т.д.). Возможен выбор метода решения системы уравнений МКЭ и задание параметров вычислительных процедур (числа шагов нагружения, числа итераций и др.).
3. Осуществляется решение системы уравнений, полученной методом МКЭ. В результате решения формируется файл результатов, который содержит вектор найденных степеней свободы (узловых перемещений, узловых температур и т.д.).

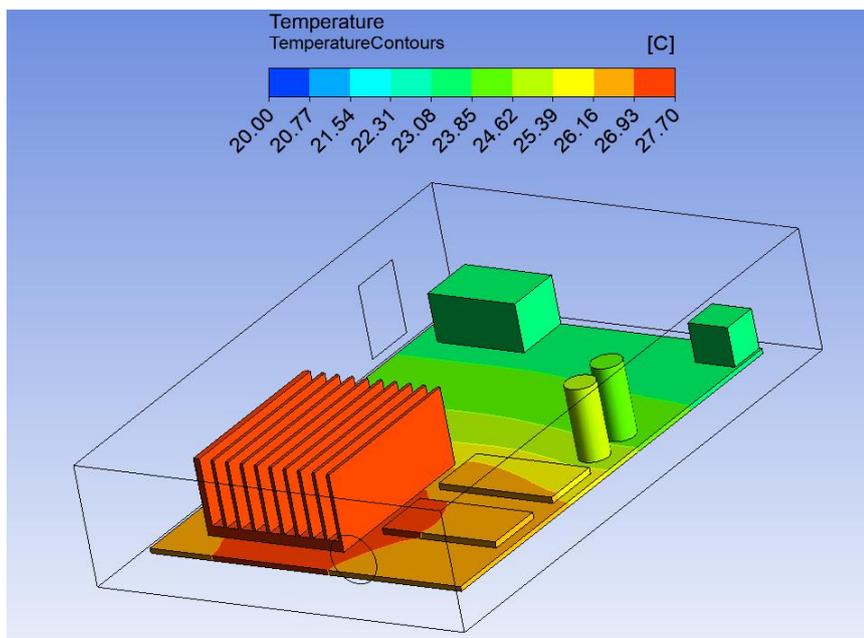
Третий этап (постпроцессинг) – анализ результатов расчёта. Рассчитанные МКЭ физические величины (перемещения, деформации, напряжения, температуры и др.) представляются в графическом окне *ANSYS* в виде картинок, таблиц, графиков, анимаций. Все эти результаты можно записать в соответствующие файлы.

Рассмотренно моделирование тепловых процессов в среде *ANSYS* модели устройства, состоящего из печатного узла и корпуса с вентиляционными отверстиями. Печатный узел включает в себя карты памяти, конденсаторы, ЦП и разъемы для периферийных устройств. Основным нагревающим элементом на плате является ЦП. Модель печатного узла представлена на рисунке 1.



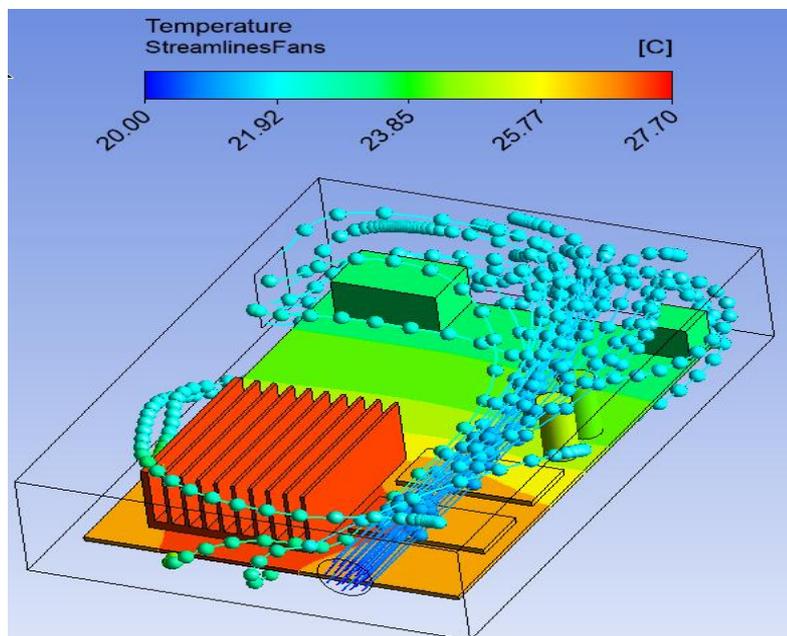
**Рисунок 1 – Модель печатного узла**

В ходе моделирования были получены изображения распределения температур на печатной плате. Графическая модель нагрева платы представлена на рисунке 2.



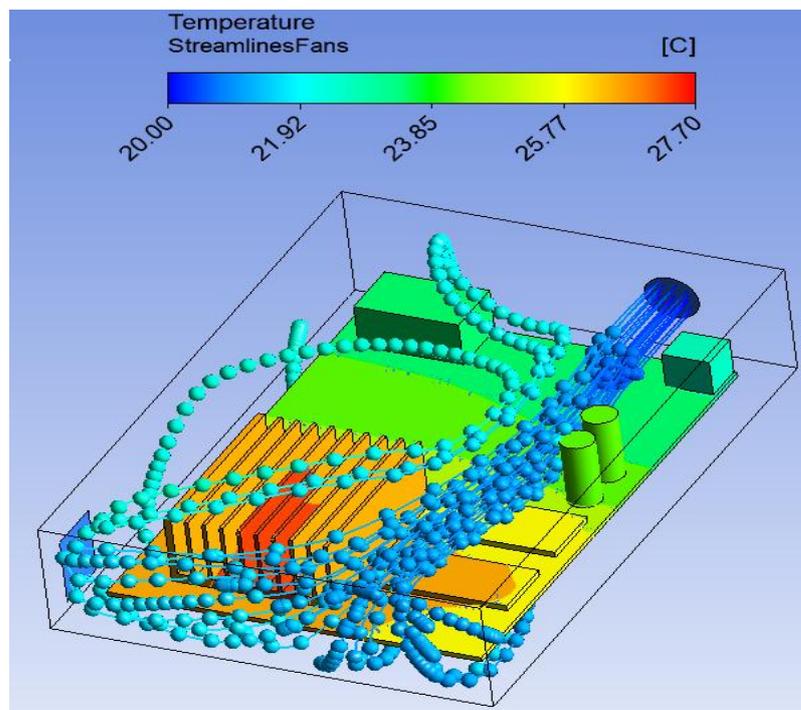
**Рисунок 2 – Распределение температур на печатной плате**

Так же выполнено моделирование распределения воздушных потоков внутри устройства, при различных вариантах размещения системы охлаждения в виде вентилятора. На рисунке 3 представлена модель распространения воздушных потоков внутри устройства при первом варианте размещения вентилятора.



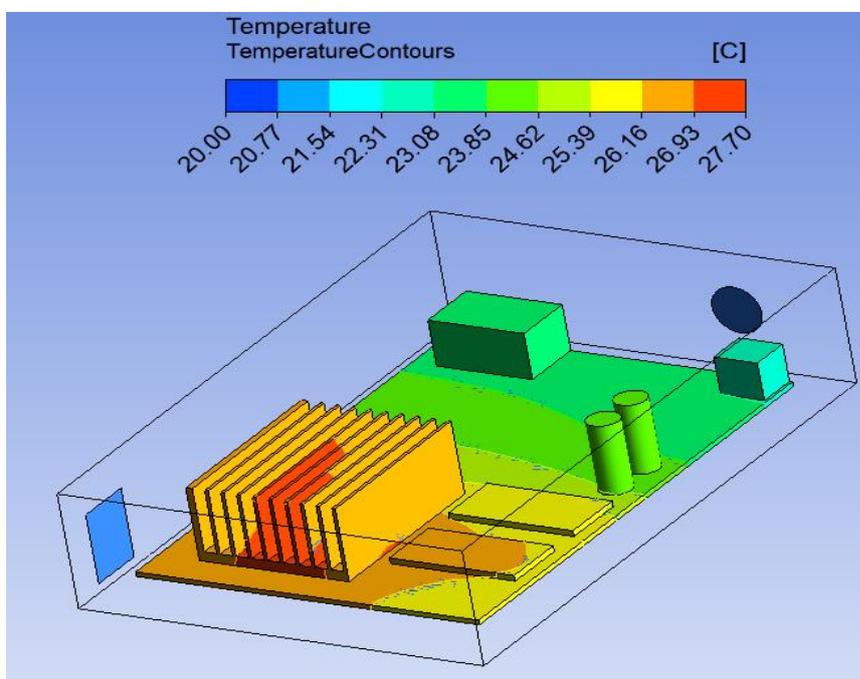
**Рисунок 3 – Распределение воздушных потоков внутри устройства при первом варианте размещения вентилятора**

На рисунке 4 представлена модель распространения воздушных потоков внутри устройства при втором варианте размещения вентилятора.



**Рисунок 4 – Распределение воздушных потоков внутри устройства при втором варианте размещения вентилятора**

На рисунке 5 показано распределение температур на печатной плате, после изменения расположения вентилятора.



**Рисунок 4 – Распределение температур на печатной плате, после изменения расположения вентилятора**

Исходя из данных полученных в ходе моделирования выяснили, что второй вариант расположения системы охлаждения позволяет достичь меньшего нагрева устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Выполнен анализ общих характеристик теплообмена. Рассмотрены методы теплового моделирования конструкций РЭС. Рассмотрены методы расчёта тепловых режимов конструкций РЭС.

В результате проведенного теоретического анализа уравнений математической физики, описывающих тепловые поля в двумерном и трехмерном пространствах, определен математический аппарат для применения его при имитационном моделировании картин тепловых полей в РЭС при их конечноэлементной дискретизации. Построены математические модели тепловых процессов для двумерных и трехмерных конструктивных модулей РЭС.

Осуществлена аппроксимация непрерывной искомой функции температуры, зависящей от двух координат, кусочно-непрерывной, определенной на множестве двумерных КЭ; определены наиболее подходящие функции формы для дискретизирующих конструкции РЭС КЭ.

Произведён анализ существующих САПР для моделирования тепловых процессов. Проведено имитационное моделирование тепловых процессов в среде ANSYS, на примере устройства состоящего из корпуса и печатной платы. Получены графические результаты распределения температур. Промоделировано движение воздушных потоков внутри устройства.

### Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные 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».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Тезисы конференций*

1. Вилюха, Ю.Е. Методы оптимизации и обеспечения теплового режима РЭС / Ю.Е Вилюха, А.В. Подымов, А.С. Жуковский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов Международной научно-практической конференции Центр научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 379 – 383.

2. 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 Центр научного развития «Большая книга» – Москва, 2018. – С. 383 – 387.

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. 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.

## РЭЗІЮМЭ

Жукоўскі Аляксей Сяргеевіч

Імітацыйнае мадэляванне цеплавых палёў у асяроддзі «ANSYS»

**Ключавыя словы:** цеплавая палі, мадэль.

**Мэта працы:** правядзенне комплексных даследаванняў, накіраваных на атрыманне навукова-абгрунтаваных тэхнічных і метадычных рашэнняў, якія садзейнічаюць стварэнню мадэляў цеплафізічных працэсаў.

**Атрыманая вынікі і іх навізна:** выкананы аналіз агульных характарыстык цеплаабмену. Разгледжаны метады цеплавога мадэлявання канструкцый РЭС. Разгледжаны метады разліку цеплавых рэжымаў канструкцый РЭС; у выніку праведзенага тэарэтычнага аналізу раўнанняў матэматычнай фізікі, якія апісваюць цеплавая палі ў двухмернай і трохмернай прасторах, вызначаны матэматычны апарат для прымянення яго пры імітацыйным мадэляванні карцін цеплавых палёў у РЭС пры іх конечноэлементарнай дыскрэтызацыі. Пабудаваныя матэматычныя мадэлі цеплавых працэсаў для двухмерных і трохмерных канструктыўных модуляў РЭС; ажыццёўлена апраксімацыя бесперапыннай пошукавай функцыі тэмпературы, якая залежыць ад двух каардынатаў, кавалкава-бесперапыннай, пэўнай на мностве двухмерных КЭ; вызначаны найбольш прыдатныя функцыі формы для дэскрытызійных канструкцый РЭС КЭ; выраблены аналіз існуючых САПР для мадэлявання цеплавых працэсаў. Праведзена імітацыйнае мадэляванне цеплавых працэсаў у асяроддзі ANSYS, на прыкладзе прылады якая складаецца з корпуса і друкаванай платы. Атрыманы графічныя вынікі размеркавання тэмператур. Прамадэляваны рух паветраных патокаў ўнутры прылады.

**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:** радыёэлектронная прамысловасць.

## РЕЗЮМЕ

Жуковский Алексей Сергеевич

### Имитационное моделирование тепловых полей в среде «ANSYS»

**Ключевые слова:** тепловые поля, модель.

**Цель работы:** проведение комплексных исследований, направленных на получение научно-обоснованных технических и методических решений, способствующих созданию моделей теплофизических процессов.

**Полученные результаты и их новизна:** выполнен анализ общих характеристик теплообмена. Рассмотрены методы теплового моделирования конструкций РЭС. Рассмотрены методы расчёта тепловых режимов конструкций РЭС; в результате проведенного теоретического анализа уравнений математической физики, описывающих тепловые поля в двумерном и трехмерном пространствах, определен математический аппарат для применения его при имитационном моделировании картин тепловых полей в РЭС при их конечноэлементной дискретизации. Построены математические модели тепловых процессов для двумерных и трехмерных конструктивных модулей РЭС; осуществлена аппроксимация непрерывной искомой функции температуры, зависящей от двух координат, кусочно-непрерывной, определенной на множестве двумерных КЭ; определены наиболее подходящие функции формы для дискретизирующих конструкции РЭС КЭ; произведён анализ существующих САПР для моделирования тепловых процессов. Проведено имитационное моделирование тепловых процессов в среде ANSYS, на примере устройства состоящего из корпуса и печатной платы. Получены графические результаты распределения температур. Промоделировано движение воздушных потоков внутри устройства.

**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:** радиоэлектронная промышленность.

## SUMMARY

Zhukovsky Alexey Sergeevich

### Simulation modeling of thermal fields in the «ANSYS» environment

**Keywords:** thermal fields, module.

**The object of study:** carrying out of complex researches, focused on reception scientifically-proved technical and methodical decisions promoting creation of models of thermophysical processes.

**The results and novelty:** have been analyzed general characteristics of heat exchange, considered methods of thermal modeling of radio-electronic equipment and methods for calculating the thermal conditions of the design of radio-electronic equipment; as a result of the theoretical analysis of the equations of mathematical physics describing the thermal fields in two-dimensional and three-dimensional spaces, has been defined mathematical apparatus for applying it in the simulation modeling of thermal fields in radio-electronic equipment during finite element sampling. Have been created Mathematical models of thermal processes for two-dimensional and three-dimensional structural modules of radio-electronic equipment; has been made an approximation of the continuous desired temperature function depending on two coordinates, piecewise continuous, defined on the set of two-dimensional finite elements; The most suitable form functions for the discretizing design of the electronic finite element means; analysis of CAD materials for simulation of thermal processes, through the example of a device consisting of a body and a printed circuit board.. Have been obtained graphical results of temperature distribution. Has been simulated the movement of air flows inside the device.

**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:** radioelectronic industry.