

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

УДК [(536-3)-042.4]:621.38

*На правах рукописи*

РУСАК  
Алексей Андреевич

**МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ,  
ПРОТЕКАЮЩИХ В КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технологии приборостроения

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
ГОНОВ Александр Николаевич

Минск 2016

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:

**Бондарик Василий Михайлович,**  
кандидат технических наук, доцент, декан факультета непрерывного и дистанционного обучения учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2016 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-80, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

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

СОГЛАСОВАНО:

\_\_\_\_\_ А.Н. Гонов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач управления качеством радиоэлектронных средств (РЭС) является задача анализа и обеспечения тепловых режимов элементов конструкций РЭС. Традиционно эта задача решалась методом макетирования. Сложность современных устройств, повышение плотности монтажа зачастую делает невозможным макетирование. Развитие вычислительной техники и появление мощных программных средств позволяет все шире использовать методы расчета тепловых режимов на основе математического моделирования.

Основной задачей математического моделирования является получение достоверной информации о поведении проектируемого или реального объекта исследования. Основная роль отводится дискретным моделям, ориентированным на использование численных методов, например, метода конечных элементов.

Математическое моделирование позволяет проводить исследование на ранних этапах, когда объект проектирования представлен технической документацией. В этом случае появляется возможность проведения проектных исследований без использования макетов, опытных образцов, и получить информацию для прогнозирования поведения объекта.

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

В настоящее время, общая тенденция миниатюризации микроэлектронных изделий решается не только за счет минимизации одного размера, но и более полного использования объема. Здесь можно выделить два направления: системы на кристалле и модульные конструкции (системы в корпусе).

Системы на кристалле являются предметом исследований и разработок последнего десятилетия. Они должны решить задачу дальнейшего повышения степени интеграции не только отдельной микросхемы (микропроцессор, память, преобразователь и т. д.), но и функционального блока, включая так называемые блоки с интеллектуальными свойствами.

Все эти тенденции требуют применения средств математического моделирования на всех этапах проектирования микроэлектронных изделий и создания систем автоматизированного проектирования (САПР).

По мере усложнения микроэлектронных изделий и появления новых изделий, вопросы отвода тепла, разработки математических моделей и методов расчета их тепловых режимов приобретают особую актуальность. В настоящее время подсистемы САПР микроэлектронных изделий, связанные с моделированием тепловых процессов, становятся неотъемлемой частью этих САПР.

Тепловой режим микроэлектронных изделий характеризуется температурным полем. Надежность их функционирования определяется максимальными значениями локальных температур и резко падает с повышением рабочей темпера-

туры. Так, при повышении температуры на 10°C в диапазоне 20 – 70°C интенсивность отказов интегральных микросхем увеличивается в среднем на 25%.

В настоящее время существует достаточно большое количество работ, рассматривающих вопросы тепловых режимов электронных систем, моделирование этих процессов в различных *CAE (Computer-aided engineering)* системах, а также содержащих результаты исследований методов и средств защиты электронных систем от негативных тепловых процессов (Алямовский А.А., Репнев Д.Н., Мельников А.А., Сулейманов С.П., Бешейнов А.В., Басов К.С.). Заслуживают внимания работы Aziz A.K, Cook R.D. и Barthil R.L. и других зарубежных авторов.

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие негативное воздействие тепловых процессов на изделия электроники. Однако вопросам моделирования этих процессов не уделяется должного внимания. В этой связи исследования по теме диссертации, направленные на разработку методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

Выражаю благодарность за оказанную помощь в ходе подготовки диссертационной работы своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС Гонову Александру Николаевичу, а также за высококвалифицированные консультации по возникающим вопросам кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС Алексею Виктору Федоровичу.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Достаточно большое количество исследований по теме диссертации направлены на разработку и оптимизацию существующих алгоритмов решения математических моделей, описывающих тепловые процессы, протекающие в конструкциях электронных систем (ЭС), в то время как не уделяется внимание вопросам создания универсальной методики проведения инженерного анализа тепловых режимов ЭС на базе существующих *CAE* систем. В связи с этим, вопросы, связанные с разработкой подобной методики, являются актуальными.

### **Степень разработанности проблемы**

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, большое внимание уделяется методу конечных элементов, как способу решения математических моделей тепловых процессов, прорабатываются вопросы повышения точности результатов и оптимизации машинного времени решения поставленных задач. В настоящее время существует достаточно большое количество работ, рассматривающих вопросы тепловых режимов электронных систем, моделирование этих процессов в различных *CAE (Computer-aided engineering)* системах, а также содержащих результаты исследований методов и средств защиты электронных систем от негативных тепловых процессов (Алямовский А.А., Репнев Д.Н., Мельников А.А., Сулейманов С.П., Бешейнов А.В., Басов К.С.). Заслуживают внимания работы Aziz A.K., Cook R.D. и Barthil R.L. и других зару-

бежных авторов.

Несмотря на это в научно-технической литературе не были найдены какие-либо методики или алгоритмы моделирования тепловых процессов, протекающие в конструкциях различных электронных систем.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертации состоит в разработке методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- провести обзор современного состояния вопросов, связанных с построением тепловых моделей;
- провести анализ современных САПР для решения инженерных задач;
- определить способы оптимизации трехмерных моделей, при решении задач расчета тепловых режимов;
- разработать алгоритмы моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях ЭС.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 «Технологии приборостроения».

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

В основу работы легли работы белорусских и зарубежных ученых по изучению воздействия тепловых процессов на изделия электроники, моделирование процессов, протекающих в конструкциях электронных систем, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Обработка данных проводилась с использованием *SolidWorks Simulation*.

**Информационная база** исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой производителями САПР и CAE систем, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** работы заключается в разработке алгоритма проведения моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

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

1. Разработка методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.
2. Анализ и обоснование использования систем автоматизированного проектирования и систем инженерного анализа для проведения моделирования тепловых процессов.

3. Обоснование использования метода конечных элементов, в качестве метода решения математических моделей, описывающих тепловые процессы, протекающие в конструкциях электронных систем.

**Теоретическая значимость:** проведен обзор современного состояния микроэлектроники, основных тенденций развития и проблем тепловых режимов электронных систем, проанализированы современные системы автоматического проектирования и анализа электронных систем, использующих метод конечных элементов для решения инженерных задач, а также рассмотрен метод нелинейной дискретизации сетки конечных элементов, как способ оптимизации тепловых моделей.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что предложенная методика моделирования тепловых процессов, позволяет провести инженерный анализ рассматриваемое электронной системы в любой системе инженерного анализа, в основе которой лежит метод конечных элементов.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследований были представлены на 52-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь 25 – 30 апреля 2016 г.); Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, Российская Федерация, 9 – 12 ноября 2015 г.). Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Системы автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств» и «Конструирование и технология электронных устройств», «Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов».

#### **Публикации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 19 листов.

#### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений.

**В первой главе** проведен обзор современного состояния и тенденции развития микроэлектроники, проведен обзор современных САПР, использующих метод конечных элементов для решения инженерных задач.

**Во второй главе** рассматривается оптимизация тепловых моделей электронных систем с помощью метода нелинейной дискретизации сетки конечных элементов и использование базы материалов для повышения точности расчетов.

**В третьей главе** проводится создание трехмерной модели печатной платы и проведение моделирования тепловых процессов для различных вариантов темпе-

ратуры окружающей среды. На основе результатов, полученных в дипломном проектировании и результатов моделирования в диссертационной работе, предлагается методика моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

**В приложении** представлены методика создания трехмерной модели электронной системы, результаты моделирования дипломного проектирования, графическая часть и акты внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 88 страниц. Объем основного текста диссертации – 60 страниц. Работа содержит 9 таблиц, 42 рисунка. Библиографический список включает 71 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние математического моделирования и основные тенденции развития микроэлектроники, указаны основные направления исследований, проводимых в мире по данной тематике, а также описано обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы цель и задачи диссертации, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** был проведен обзор основных тенденций развития микроэлектроники и проблем, связанных с тепловыми режимами электронных систем. Рассмотрены три наиболее широко применяемых ранее метода теплового моделирования РЭС:

1. Метод однородного анизотропного тела состоит в представлении реальной конструкции или её части однородным анизотропным телом в виде прямоугольного параллелепипеда или иной простой геометрической фигуры, для которого находят эквивалентные коэффициенты теплопроводности по направлениям осей координат  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ . При известных коэффициентах теплопроводности и геометрических размерах тела  $l_x, l_y, l_z$  можно определить тепловое сопротивление между центром тела и его поверхностью.

2. Метод изотермических поверхностей предполагает выделение в конструкции поверхностей с одинаковыми или условно одинаковыми температурами в каждой точке поверхности. Считается, что теплообмен осуществляется между этими поверхностями. В зависимости от конкретной задачи исследования к изотермическим поверхностям конструкций относят поверхность корпуса со среднеповерхностной температурой  $t_k$ , поверхность нагретой зоны с температурой  $t_3$ , поверхность отдельной функциональной ячейки с температурой  $t_{3i}$ , поверхность отдельного элемента с температурой  $t_{3i}$  и т.д.

3. Метод конечных разностей предполагает дискретизацию независимой переменной  $x$ , т.е. строится множество или сетка  $1 + 1$  дискретных равноотстоящих точек  $x_i (i = 0, 1, 2, \dots, L)$  на отрезке  $0 \leq x \leq L$  с  $x_0 = 0, x_1 = L, x_{i+1} - x_i = \Delta x$ .

Показаны наиболее важные преимущества метода конечных элементов, благодаря которым, он широко используется:

- свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять метод к телам, составленным из разных материалов;

- криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов. Таким образом, метод может быть использован для областей с различными геометрическими формами границ;

- размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость;

- с помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

Проанализированы современные системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как *SolidWorks, Ansys Workbench, Catia*.

**Во второй главе** разбираются способы оптимизации математической модели в методе конечных элементов. В частности, одним из предложенных методов является метод нелинейной дискретизации сетки конечных элементов.

При расчете теплового режима конструкции методом конечных элементов такое распределение градиента температур говорит о возможном возрастании погрешности дискретизации в ближней области от источника тепла, которая зависит от шага сетки КЭ. В ближней области от источника тепла при одинаковом шаге сетки КЭ эта погрешность возрастает по сравнению с дальней зоной.

Погрешность дискретизации может быть уменьшена использованием более мелких элементов сетки, однако такой подход приведет к резкому возрастанию размерности задачи. В свою очередь увеличение шага сетки и, следовательно, снижение количества конечных элементов приводит к резкому падению точности расчета.

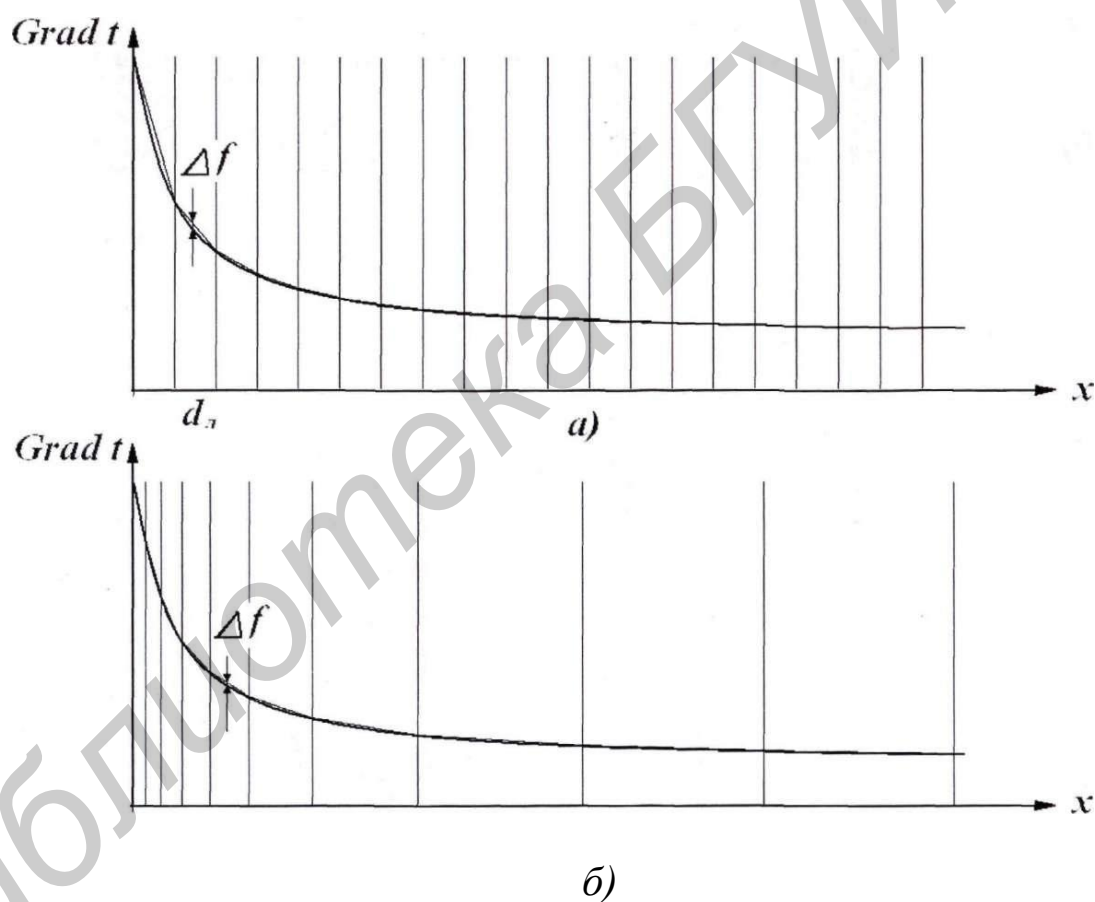
Компромиссным решением данной противоречивой ситуации является применение нелинейной дискретизации на основе предварительного анализа изделия и протекающих в нем физических процессов. Нелинейная дискретизация предполагает изменение шага сетки КЭ области источника тепла. В непосредственной близости от источника шаг сетки уменьшается до достижения заданной точности расчета и увеличивается по мере удаления от источника. Пример использования нелинейной дискретизации представлен на рисунке 1 (а, б).

На рисунке 1,а представлена аппроксимация градиента температуры от границы источника тепла вдоль оси посредством линейных отрезков. Шаг дискретизации  $d_a$ , остается постоянным на всем участке. Это типичный пример дискрети-



зации при помощи однородных элементов, используемый во многих САПР. Как видно из рисунка 1,а, максимальная погрешность  $\Delta f$  при таком типе дискретизации возникает на тех участках, где градиент температуры имеет наибольшее значение. По мере его уменьшения, погрешность существенно падает.

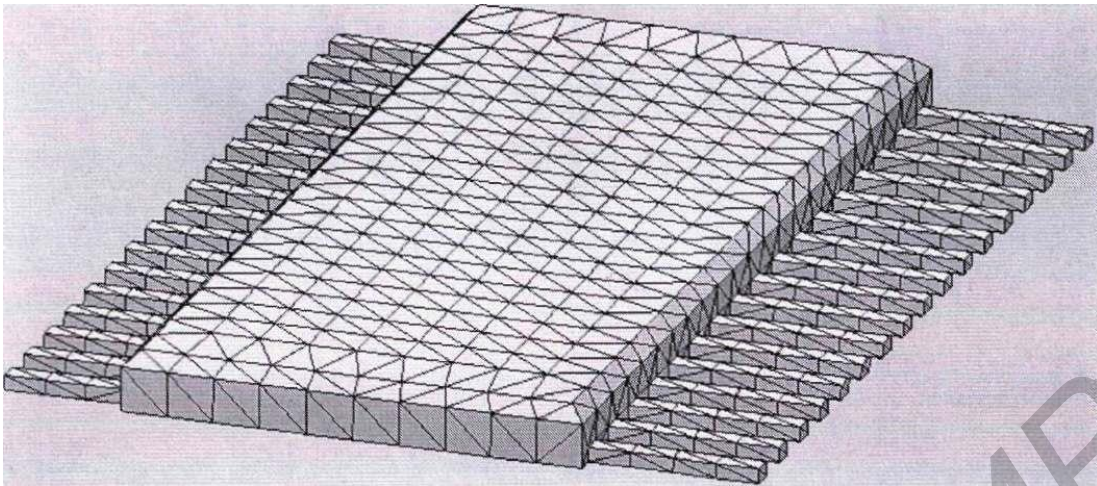
Использование нелинейной дискретизации сетки конечных элементов(КЭ), иллюстрируется рисунком 1, б. Шаг дискретизации не является постоянным на всей области и увеличивается по мере снижения значения градиента температуры. Характер увеличения шага в общем случае зависит от параметров конструкции, являющихся исходными данными для расчета. Посредством этих параметров появляется возможность оценки предполагаемого градиента температуры еще до выполнения основной расчетной программы, что позволяет создать сетку конечных элементов, заранее адаптированную для расчета конкретной конструкции.



*а – аппроксимация градиента температуры от границы источника тепла вдоль оси посредством линейных отрезков,  
б – Использование нелинейной дискретизации сетки КЭ*

**Рисунок 1–Аппроксимация при различном шаге дискретизации**

Пример разбиения модели микросхемы на сетку КЭ с использованием методики оптимизации сетки конечных элементов методом нелинейно дискретизации представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Пример разбиения микросхемы на сетку КЭ**

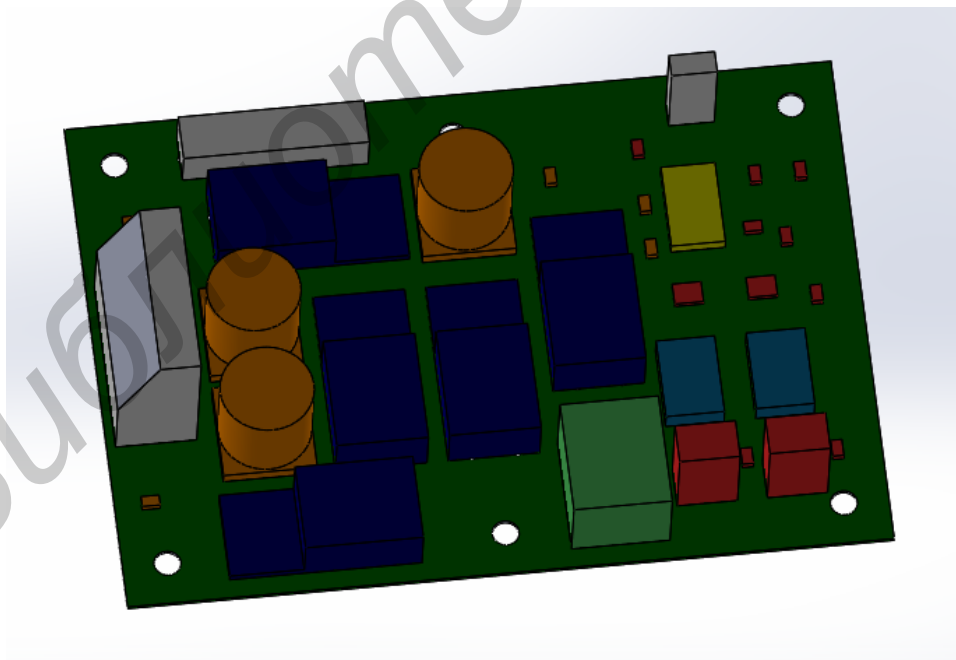
Приводиться пример повышения точности расчета и оптимизации результатов моделирования, путем использования базы данных материалов.

**Третья глава** посвящена разработке модели печатной платы (ПП) и проведению моделирования тепловых процессов в САПР *SolidWorks Simulation*.

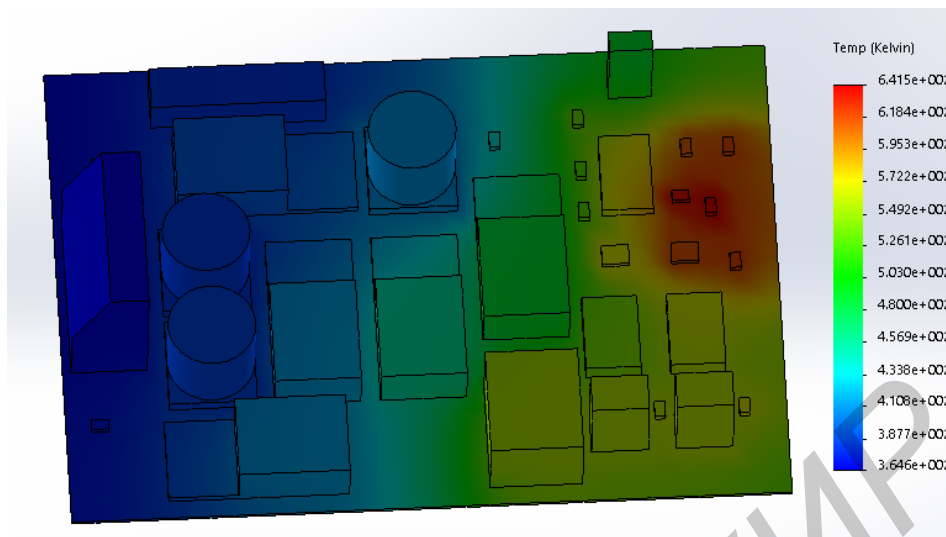
Модель печатной платы представлена на рисунке 3.

После определения параметров испытаний, согласно которым будем проводить моделирование тепловых процессов на примере блока питания для усилителя мощности, проводим оптимизацию модели, согласно методике в главе 2.

Пример тепловой карты ПП представлен на рисунке 4.

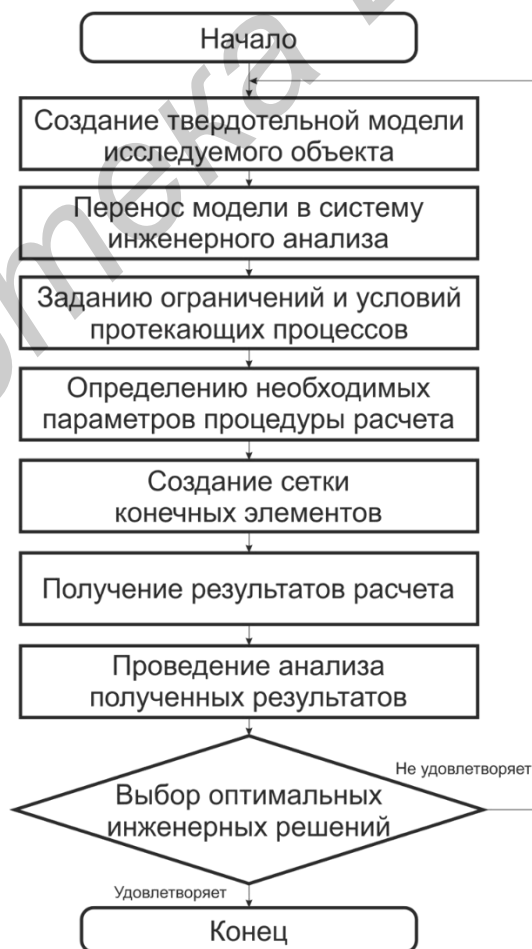


**Рисунок 3– Трехмерная модель печатной платы блока питания в *SolidWorks***



**Рисунок 4 – Тепловая карта печатной платы в *SolidWorks Simulation***

На основе проведенных исследований, предложена методика моделирования тепловых процессов (рисунок 5), протекающих в конструкциях электронных систем с пошаговым алгоритмом.



**Рисунок 5 – Алгоритм моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях ЭС**

В **приложении** представлены методика создания трехмерной модели электронной системы, приведены слайды презентации на защиту магистерской диссертации и акты внедрения в учебный процесс.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований в диссертации получены следующие основные научные результаты:

1. Проведен анализ основных тенденций развития современной микроэлектроники и конструктивно-технологических особенностей современных РЭС, к числу которых отнесены нерегулярность структур, локализация источников тепла и значительный рост рассеиваемых тепловых потоков.

2. Проанализированы современные САПР, построенные на моделях КЭ, отмечено, что при свойственной всем САПР универсальности, они не адаптированы к конкретным проектным задачам, в том числе и к задачам расчета показателей тепловых режимов РЭС.

3. Расчетные модели, построенные при фиксированном шаге КЭ, имеют необоснованно высокую размерность и предъявляют повышенные требования к системным ресурсам.

4. Предложены методы оптимизации моделей с помощью метода нелинейной дискретизации сетки КЭ, основу которого составляет регулирование шага сетки КЭ с учетом заданной точности результатов расчета и конструктивных параметров изделия.

5. Разработана методика и алгоритм проведения моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

1. Горбач, А.П. Моделирование механических процессов РЭС методом конечных элементов/ А.П. Горбач, А.А. Русак, В.Ф. Алексеев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. трудов по материалам междунар. Заоч. науч.-практич. конф., Воронеж, Российская Федерация / ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж. 2015. – С. 294–297.

2. Русак, А.А. Анализ методов теплового моделирования радиоэлектронных средств/ А.А. Русак, А.П. Горбач, В.Ф. Алексеев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. трудов по материалам междунар. Заоч. науч.-практич. конф., Воронеж, Российская Федерация / ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж. 2015. – С. 391–394.

3. Горбач, А.П. Моделирование конструкций электронных систем с использованием виброизоляторов/ А.П. Горбач, А.А. Русак, В.Ф. Алексеев // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С. 35–37.

4. Горбач, А.П. Анализ программных средств и методов моделирования механических процессов / А.П. Горбач, А.А. Русак, В.Ф. Алексеев // материалы

52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С. 38–39.

5. Русак, А.А. Моделирование тепловых процессов методом сеток/ А.А. Русак, А.П. Горбач, В.Ф. Алексеев // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С. 106–108.

6. Русак, А.А. Численное моделирование тепловых процессов в SolidWorks/ А.А. Русак, А.П. Горбач, В.Ф. Алексеев // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С. 109–111.

Библиотека БГУИР

## РЭЗІЮМЭ

Русак Аляксей Андрэвіч

### Методыка мадэлявання цеплавых працэсаў, якія праходзяць у канструкцыях электронных сістэм

**Ключавыя словы:** метада канчатковых элементаў, мадэляванне цеплавых працэсаў, матэматычная мадэль.

**Мэта работы:** распрацоўка методыкі мадэлявання цеплавых працэсаў, якія праходзяць у канструкцыях электронных сістэм.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** была распрацавана методыка мадэліравання цеплавых працэсаў, якія праходзяць у канструкцыях электронных сістэм на аснове мадэляў, створаных у САПР *Altium Designer* і *SolidWorks*. Інжынерны аналіз праводзіўся ў модулі *SolidWorks Simulation*. Прадстаўлены пакрокавы алгарытм правядзення інжынернага аналізу цеплавых працэсаў, які можна ўжываць для любых САЕ сістэм, заснаваных на метадазе канчатковых элементаў.

Праведзены аналіз і абгрунтаванне выкарыстання сістэм аўтаматызаванага праектавання і сістэм інжынернага аналізу для правядзення мадэліцыянавання цеплавых працэсаў, у аснове якіх ляжыць метада канчатковых элементаў.

Прадстаўлена абгрунтаванне выкарыстання метада канчатковых элементаў, у якасці метада рашэння матэматычных мадэляў, якія апісваюць цеплавыя працэсы, якія праходзяць у канструкцыях электронных сістэм.

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны на кафедры ПКС ў навучальны працэс.

**Вобласць ужывання:** канструкцыі электронных сістэм.

## РЕЗЮМЕ

Русак Алексей Андреевич

### Методика моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, моделирование тепловых процессов, математическая модель.

**Цель работы:** разработка методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем.

**Полученные результаты и их новизна:** была разработана методика моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем на основе моделей, созданных в САПР *Altium Designer* и *SolidWorks*. Инженерный анализ проводился в модуле *SolidWorks Simulation*. Представлен пошаговый алгоритм проведения инженерного анализа тепловых процессов, который можно применять для любых САЕ систем, основанных на методе конечных элементов.

Проведен анализ и обоснование использования систем автоматизированного проектирования и систем инженерного анализа для проведения моделирования тепловых процессов, в основе которых лежит метод конечных элементов.

Представлено обоснование использования метода конечных элементов, в качестве метода решения математических моделей, описывающих тепловые процессы, протекающие в конструкциях электронных систем.

**Степень использования:** результаты внедрены на кафедре ПИКС в учебный процесс.

**Область применения:** конструкции электронных систем.

## SUMMARY

**RusakAliaksei Andreevich**

### **Methods of modeling of thermal processes occurring in the construction of electronic systems**

**Keywords:** finite element method, modeling of thermal processes, mathematical model.

**The object of study:** to develop a methodology of modeling of thermal processes occurring in the construction of electronic systems.

**The results and novelty:** a technique has been developed modeling of thermal processes occurring in the construction of electronic systems based on models created in Altium Designer CAD and SolidWorks. Engineering analysis was conducted in SolidWorks Simulation module. Presented by-step algorithm engineering analysis of thermal processes, which can be used for any CAE systems based on the method of finite elements.

The analysis and study on the use of systems automated-foot design and engineering analysis systems for modeling thermal processes, which are based on the finite element methoding.

Presented study on the use of finite element method, as a method for solving mathematical models describing the thermal processes occurring in the construction of electronic systems.

**Degree of use:** results are implemented in the Department of PICS in the educational process.

**Sphere of application:** constructions of electronic systems.