

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА на диссертационную работу
Озеркина Дениса Витальевича

«Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры»,

представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы диссертации

Одной из наиболее важных задач, которые решают разработчики и создатели различного рода радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники, является задача обеспечения регламентированного теплового режима. Особое значение системы обеспечения теплового режима представляют в авиационной и космической технике, например, при создании космических аппаратов типа спутников различного назначения (связи, теле- и радиовещания, навигационных, метеорологических и др.). К электронной и радиоэлектронной аппаратуре последних предъявляются очень жесткие требования в связи с тем, что максимальные температуры открытых элементов поверхности приборных отсеков космических аппаратов могут достигать 150°C на освещенной солнцем стороне (без охлаждения этих поверхностей) и -150°C на теневой стороне (без подвода теплоты). По этим причинам в структуре модулей полезной нагрузки, энерго-двигательного и информационно-логического могут формироваться большие градиенты температур и, соответственно, достигаться на отдельных электрорадиоэлементах высокие (существенно превышающие допустимые для этих элементов) температуры. Поэтому актуальной становится задача и термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры. Решение такой задачи (выбор методов и средств стабилизации в жестких диапазонах изменения температуры конкретных элементов) экспериментально практически невозможно вследствие пространственного, как правило, характера переноса теплоты в таких технических системах и устройствах; неоднородности теплофизических свойств материалов основных элементов аппаратуры, интенсивного тепловыделения отдельными элементами, а также условий теплоотвода от нагреваемых поверхностей.

Решение задач обеспечения термостабильности радиоэлектронной аппаратуры также осложнено тенденциями повышения энергоемкости и, соответственно, рассеяния теплоты с одной стороны, и снижения массы и габаритов изделий с другой стороны.

При этом необходимо отметить, кроме вышеизложенного, что современная авиационная и космическая техника развивается, в том числе, и вследствие использования все более эффективных теплонагруженных систем управления и связи.

По этим причинам математическое моделирование является, как правильно отмечает автор диссертации, основным методом прогноза характеристик радиоэлектронной и электронной аппаратуры при анализе термостабильности последних.

В этой связи тема диссертации Д.В. Озеркина, целью которой является разработка моделей, методов математического моделирования и комплекса программ для анализа характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры, является безусловно актуальной.

При оценке актуальности темы диссертации Д.В. Озеркина следует отметить, что по своему содержанию, цели, задачам и достигнутым результатам она соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Транспортные и космические системы» (утверждено Указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика диссертации.

Рукопись диссертации Д.В. Озеркина состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых сокращений и списка литературы, который включает 228 наименований. Диссертация изложена на 321 странице машинописного текста, содержит 244 рисунка, 41 таблицу и два приложения.

Во введении автор обосновывает актуальность своего диссертационного исследования; приводит цель и задачи работы, научную новизну и практическую значимость результатов, представленных в диссертации. Также приведены выносимые на защиту основные защищаемые положения.

В первой главе проведен анализ современных способов термостабилизации электронных средств и выполнено обоснование системного принципа синтеза термостабильных электронных средств. В этой главе приведен краткий анализ программных комплексов, которые могут быть использованы для проектирования термостабильных электронных средств. Сделан вывод, что в настоящее время не существует программных комплексов, обеспечивающих полный цикл проектирования термостабильных электронных средств. Показано, что для достижения эффективных результатов моделирования термостабильных электронных средств необходима разработка комплекса программ для синтеза SPICE-моделей двухтерминальной дискретной, многотерминальной дискретной и многотерминальной интегральной электронной компонентной базы отечественного производства.

Во второй главе приведена постановка задачи (и ее решение) определения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности. Используются для

решения задачи методы статистического планирования эксперимента и регрессионного анализа. Предложено выделить два альтернативных вида уравнения температурной погрешности для однопараметрических электрорадиоэлементов и для многопараметрических. Для однопараметрических ЭРИ в процессе исследований был реализован план, в котором варьировалась величина термозависимого параметра каждого электрорадиоэлемента с последующей статистической обработкой и получением соответствующего уравнения. Для многопараметрических ЭРИ предложено при реализации плана эксперимента проводить варьирование не величины термозависимых параметров, а температуры элемента. В этом случае соответствующим образом изменяется уравнение температурной погрешности. Показано, что при реализации вычислительного факторного эксперимента могут использоваться широко известные программные продукты схемотехнического моделирования. Реализован вычислительный факторный эксперимент для стабилизатора напряжения. Совокупность приведенных в этой главе процедур классифицирована как модифицированный метод регрессионного анализа, обеспечивающий за шесть вычислительных процедур математическое описание температурной стабильности электронных средств.

В третьей главе описана разработка методики синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, адекватных для последующего определения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности. Выделена группа представляющих наибольший интерес электрорадиоизделий, их моделей и выполнен анализ температурных зависимостей ЭРИ. Также в главе приведены практические примеры синтеза моделей ЭРИ с температурной зависимостью параметров, прототипы которых представляют образцы отечественной электронной компонентной базы. Рассмотрены примеры двухтерминального ЭРИ, дискретного многотерминального ЭРИ и интегрального многотерминального ЭРИ. По результатам синтеза SPICE-моделей трех рассмотренных различных ЭРИ решена более общая задача – разработка методики синтеза обобщенной модели для SPICE-моделирования, учитывающей температурную зависимость параметров. Разработанная обобщенная методика синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с различной степенью интеграции позволяет достичь значений относительной погрешности от 0,1% до 7% для моделируемых термозависимых характеристик по сравнению с результатами физических экспериментов. Методика использована с целью определения коэффициентов влияния в математическом описании температурной стабильности электронных средств.

В четвертой главе приведено описание процесса разработки методик решения уравнений теплопроводности в одно-, двух- и трехмерной постановках, обеспечивающих определение значений абсолютных и относительных рабочих температур элементов конструкции электронных средств в уравнении температурной погрешности. Решены задачи теплопроводности для плоской многослойной конструкции типа плата в условиях конвективно-радиационного теплообмена с окружающей средой. По результатам численного решения поставленных задач теплопроводности проведено сравнение различных конструктивных вариантов исполнения электронных средств по критерию температурной стабильности.

В пятой главе приведены результаты анализа влияния эффекта неоднородности температурного поля несущих конструкций со значительными собственными тепловыделениями на температурную стабильность выходных параметров электронных средств. В этой главе введено в рассмотрение понятие «локальная группа» с целью анализа возможности термокомпенсации на двумерных несущих конструкциях электронных средств, как метода повышения температурной стабильности при взаимном влиянии параметров электрорадиоизделий на выходной параметр электронного средства. В пятой главе также приведены результаты экспериментов на образце условно одномерной несущей конструкции – сборочной единицы светодиодного линейного модуля (массива светодиодных кристаллов на подложке). Эксперименты для условно двумерных несущих конструкций проведены на прецизионном источнике опорного напряжения. Исследована температурная стабильность выходного напряжения двух вариантов конструкции источника опорного напряжения. Эксперименты для трехмерных несущих конструкций проведены на импульсном усилителе мощности. По результатам проведенных экспериментов сделан ряд выводов о влиянии групп ЭРИ на температурную стабильность электронных средств при использовании ЭРИ на условно одномерных, условно двумерных и трехмерных несущих конструкциях. Предложена минимизация функции температурной погрешности методом топологической термокомпенсации, которая повышает температурную стабильность до 30%.

Глава шестая диссертации посвящена исследованию процессов микротермостатирования. Показано, что уравнение температурной погрешности, полученное при реализации вычислительного факторного эксперимента, может применяться для решения обратной задачи температурной стабильности. В этой главе приведены результаты экспериментов, выполненных в камере микротермостата цилиндрической формы с целью сравнения температурной стабильности стабилизатора напряжения для случаев отсутствия специальных методов термостабилизации и

применения микротермостатирования по отношению к источнику опорного напряжения (стабилизатора). Эксперименты показали, что при работе системы микротермостатирования температурная стабильность повышается более чем в 2,5 раза. Установлено также, что в диапазоне температур от -45°C до $+10^{\circ}\text{C}$ погрешность напряжения стабилизации составляет не более 3,5%. Сделан вывод, что уравнение температурной погрешности при заданных уровнях температурной погрешности выходного параметра электронного средства может использоваться для определения основных конструктивных параметров микротермостата.

В седьмой главе представлены результаты решения задачи по автоматизации процесса синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров. Созданный автором диссертации комплекс программ позволят синтезировать неограниченное число образцов SPICE-моделей в рамках одного семейства электрорадиоизделий с сохранением достоверности температурной зависимости их параметров.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Общая методология и методика исследования

По своему содержанию, цели, задачам, методам исследования и основным результатам диссертация Д.В. Озеркина соответствует научным направлениям «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей» паспорта специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автор выполнил большой комплекс теоретических исследований с использованием современных методов научного анализа: теории планирования эксперимента, регрессионного анализа, метода конечных разностей и метода конечных элементов, метода электротепловой аналогии. Имитационные исследования проведены с помощью группы хорошо апробированных программных комплексов. Анализ процессов теплопереноса в электронных средствах и их элементах выполнен в рамках современных физических и математических моделей теплопроводности, учитывающих пространственную неоднородность температурных полей и нестационарность процессов теплопереноса. Результаты теоретических исследований Д.В. Озеркина верифицированы по результатам экспериментов, проведенных с использованием современного сертифицированного

оборудования испытательно-технического центра АО НПО «Полюс», аккредитованного на право проведения сертификационных испытаний электрорадиоизделий отечественного производства.

Степень обоснованности и достоверности результатов научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов диссертационного исследования Д.В. Озеркина обоснована корректностью постановок решаемых в диссертации математических задач, использованием современных программных комплексов для моделирования процессов, протекающих в электрорадиоизделиях, а также циклом экспериментов в испытательно-техническом центре АО НПО «Полюс»

Научная новизна полученных результатов.

Д.В. Озеркин получил результаты, соответствующие, по мнению оппонента, критерию научной новизны. Наиболее значимыми, скорее всего, являются следующие.

1. Разработан метод регрессионного анализа температурной стабильности выходного параметра электронного средства с целью получения уравнения температурной погрешности.

2. Разработана методика синтеза нестандартных SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, отличающаяся от известных декомпозицией разрабатываемой модели на типовые каскады с последующим выбором эмпирических выражений для функциональных зависимостей с использованием нелинейной аппроксимации.

3. Установлено, что уравнение температурной погрешности можно использовать для вывода аналитических выражений с целью определения первичных параметров микротермостата.

4. Разработаны вычислительные программные блоки и методики численного определения значений температур несущих конструкций электронных средств.

5. Разработан комплекс программ на основе скриптового языка, отличающийся модульной структурой и обеспечивающий возможность синтеза текстовых описаний нестандартных SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с заданной температурной зависимостью параметров.

Совокупность полученных Д.В. Озеркиным при выполнении своего диссертационного исследования результатов можно квалифицировать как новое крупное

достижение в развитии математического моделирования процессов переноса в электронных средствах.

Практическая значимость полученных результатов.

Диссертация Д.В. Озеркина имеет достаточно очевидную практическую направленность. Этот вывод подтверждается внедрением результатов диссертационного исследования Д.В. Озеркина в ООО «Руслед», а также в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева. Практическая значимость результатов исследований Д.В. Озеркина подтверждается четырьмя патентами на изобретения, одним патентом на полезную модель и одним свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

Замечания по содержанию диссертации.

1. При постановке задачи расчета поля температур учитывался конвективный и радиационный теплообмен при относительно низкой интенсивности отвода теплоты от поверхностей рассматриваемой многослойной системы. В тексте главы 4 нет обоснования влияния излучения на формирование температурного поля объекта.

2. При проведении численного анализа в четвертой главе использовалось значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Такое значение α соответствует режиму очень высокой интенсивности термогравитационной конвекции. В реальной практике интенсивность теплоотвода может быть существенно (в 2-3 раза) меньше, соответственно, и уровень температур будет другой. В тексте главы отсутствует обоснование выбора численного значения коэффициента теплоотдачи. Предложенный более пятидесяти лет назад Г.Н. Дульневим с соавторами подход к моделированию «Теплообмена в радиоэлектронных аппаратах» был обоснован отсутствием электронно-вычислительной техники в шестидесятые годы прошлого века. В настоящее время можно существенно более достоверно описывать условия теплообмена электронных систем с внешней средой.

3. Необоснованным является использование словосочетания «Эффект анизотропности теплового поля». В пятой главе более обоснованным был бы термин «неоднородность». Термин «анизотропность» в теории теплопереноса используется только при описании коэффициентов теплопроводности разного рода композиционных материалов.

4. Названия ряда таблиц и подписей к рисункам не соответствуют современной научной терминологии. Так, например, смысл названия таблицы 5.2 «Количественный

анализ образцов светодиодных линейных модулей ФСЛ» трудно понять, т.к. это процесс, а в таблице могут быть только результаты анализа. Кроме того в технических науках анализ всегда «количественный», поэтому слова «количественный анализ» в названии таблицы 5.2 являются лишними и не отражают содержание таблицы.

5. В главе 4 автор диссертации не пояснил почему именно применяется метод правой прогонки при решении системы разностных уравнений пространственно-временной сетки.

6. В главе 4 автор диссертации при рассмотрении задачи пространственно-временной дискретизации указывает «потребное количество ячеек для хранения данных будет 9×10^6 ». Однако указанный результат не пояснен расчетной формулой.

Однако число и содержание данных замечаний не критичны для восприятия и анализа работы, для высокой оценки научной и практической значимости полученных диссертантом результатов. Материал диссертации Д.В. Озеркина изложен последовательно и развернуто, доступным и ясным для понимания языком, без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован качественно оформленными рисунками, фотографиями, приложенными таблицами.

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации также отражают основные положения диссертации. У оппонента нет сомнения в соответствии представленной диссертации требованиям ВАК к докторским диссертациям. Основные результаты диссертационного исследования Д.В. Озеркина в полной мере опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Результаты диссертации были многократно и успешно апробированы на профильных международных и отечественных конференциях.

Оформление диссертации в целом соответствует современным требованиям по подготовке рукописей и авторефератов докторских диссертаций.

Общее заключение о соответствии диссертации критериям.

Диссертация Д.В. Озеркина представляет серьезное и обширное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований, соответствующих критерию новизны.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации можно

сделать заключение, что диссертация Д.В. Озеркина «**Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры**» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), а её автор Озеркин Денис Витальевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Кузнецов Гений Владимирович



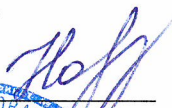
подпись

Доктор физико-математических наук, профессор
специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
kuznetsovgv@tpu.ru
Тел.: 8 (3822) 60-62-48; вн. телефон: 1615.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822) 60-62-48

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:
И.о. ученого секретаря Национального
исследовательского Томского
политехнического университета



Новикова В.Д.

18.04.2024

