

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»



Т.Н. А.И. Отто

04 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»
на диссертацию Озеркина Дениса Витальевича на тему
«Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы исследования

Разработка и классификация математических моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, а также алгоритмов и программного инструментария для их решения продолжает оставаться актуальной проблемой. С одной стороны, исследования в области синтеза математических моделей отечественной электронной компонентной базы направлены на достижение детализации математической модели следующего иерархического уровня, а именно – уравнения температурной погрешности радиоэлектронной аппаратуры. С другой стороны, уравнение температурной

погрешности позволяет на ранних стадиях проектирования термостабильной радиоэлектронной аппаратуры обоснованно выбирать методы термостабилизации и отвечать на вопросы на необходимости и достаточности температурной стабильности характеристик и параметров. Оба этих направления имеют целью разработку моделей, методов математического моделирования и комплекса программ для анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры. Работа соискателя посвящена одному из направлений обеспечения температурной стабильности современной радиоэлектронной аппаратуры – а именно использование классических положений регрессионного анализа и полного факторного эксперимента. Методам исследования в диссертационной работе присущи естественные ограничения: в частотной области (от 3 Гц до 300 МГц), в диапазоне температур (от минус 55 до +125 °С), в конструктивных линейных размерах (от 2 мкм до 470 мм). Компетенции, предъявляемые к специалисту по разработке термостабильной радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время необычайно широки: знания, умения и навыки в области схемотехнического моделирования электронных схем, в области численных методов расчета температурных полей несущих конструкций, в области топологического проектирования электрических цепей. Однако, успешное использование указанных компетенций приводит к исключению рутинных этапов и операций проектирования, а, следовательно, к значительному сокращению времени разработки и созданию цифровых двойников термостабильной радиоэлектронной аппаратуры.

Основная идея диссертационной работы состоит в использовании уравнения температурной погрешности как исходной математической модели для разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры. Уравнение температурной погрешности, полученное на основе регрессионного анализа, позволяет установить аналитическую зависимость выходного параметра и выходной характеристик радиоэлектронной аппаратуры от рабочих температур электрорадиоизделий (ЭРИ) и температуры окружающей среды.

Для достижения выбранной цели соискателем поставлены и решены следующие задачи:

1. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного факторного эксперимента с целью получения уравнения температурной погрешности.
2. Разработка новых методик синтеза частных математических моделей ЭРИ с зависимостью электрических параметров и характеристик от температуры.
3. Разработка, обоснование и тестирование вычислительных программных блоков и методик с применением современных компьютерных технологий, практически пригодных для нахождения значений абсолютных и относительных рабочих температур конструкций электронных средств (ЭС) в уравнении температурной погрешности.
4. Развитие метода топологической термокомпенсации для случаев одно-, двух- и трехмерных компоновочных решений в несущих конструкциях ЭС на основе анализа уравнения температурной погрешности.
5. Комплексные исследования научно-технической задачи микротермостатирования на уровне отдельных групп ЭРИ с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.
6. Разработка комплекса программ «Российский компонент» на основе SPICE-моделей электрорадиоизделий отечественной электронной компонентной базы с учетом действия теплового фактора.

Общая характеристик содержания диссертации

Диссертационная работа изложена на 321 странице, состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 228 наименований и двух приложений.

Во введении обоснована актуальность темы, представлена степень проработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны научная новизны, теоретическая и практическая значимость, приведены основные защищаемые положения.

В **первой главе** дается аналитический обзор известных практических способов термостабилизации электронных средств с последующим обоснованием системного принципа синтеза радиоэлектронной аппаратуры. Впервые предложено всю номенклатуру электронной компонентной базы подразделять на дискретные двухтерминальные ЭРИ; дискретные многотерминальные ЭРИ; интегральные многотерминальные ЭРИ. Это позволяет однозначно оценивать степень сложности синтезируемых моделей ЭРИ для последующего создания программно-имитационных моделей термостабильных электронных средств. Распространенные методы термостабилизации для обеспечения температурной стабильности современных ЭС предложено разделить на три основных метода: применение прецизионной электронной компонентной базы; применение термокомпенсации; применение микротермостатирования. Распространенные методы термостабилизации для обеспечения температурной стабильности современных ЭС предложено разделить на три основных метода: применение прецизионной электронной компонентной базы; применение термокомпенсации; применение микротермостатирования.

Во **второй главе** найдена аналитическая зависимость выходного параметра ЭС от параметров ЭРИ и температуры – уравнение температурной погрешности. Для нахождения уравнения температурной погрешности и проверки его адекватности использованы основные положения теории планирования факторного эксперимента в сочетании с регрессионным анализом. Впервые предложена алгоритмизация по замещению физического факторного эксперимента на вычислительный факторный эксперимент с целью снижения трудоемкости и экономических затрат в реализации экспериментальных исследований температурной стабильности. Объект исследования заменяет математическая модель ЭС, которая достаточно объективно отображает тепловые процессы, происходящие в объекте-прототипе. Доказано, что в реализации вычислительного факторного эксперимента могут использоваться широко известные программные продукты схемотехнического моделирования.

В третьей главе разработана методика синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров, пригодная для схемотехнического анализа в современных SPICE-симуляторах с целью последующего нахождения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности. Опираясь на частные результаты синтеза SPICE-моделей для случаев дискретных двухтерминальных, дискретных многотерминальных и интегральных многотерминальных ЭРИ, решена более общая задача – разработка методики синтеза термозависимой модели для SPICE-моделирования.

Четвертая глава посвящена разработке методик решения уравнения теплопроводности в одно-, двух- и трехмерной постановке, пригодных для нахождения значений абсолютных и относительных рабочих температур конструкций электронных средств в уравнении температурной погрешности. Автор отмечает, что аналитические методы расчета температурного поля позволяют реализовать лишь простейшие одномерные модели. По существу, удается получить аналитические выражения обобщимого вида лишь для решений отдельных линейных уравнений. Применение вычислительной техники и численных методов расчета значительно расширяет классы исследуемых задач теплообмена, позволяя получать приближенные решения многомерных, нелинейных, нестационарных задач, для которых использование точных и приближенных аналитических методов не представляется возможным.

В пятой главе проведено исследование эффекта анизотропности теплового поля несущих конструкций, обладающих значительными собственными тепловыделениями, на температурную стабильность выходных параметров электронных средств. Впервые предложена для целей обеспечения температурной стабильности электронных средств методом топологической термокомпенсации классификация несущих конструкций I и II уровня на три категории: условно одномерные; условно двухмерные; трехмерные. Классификационным критерием выступает соотношение габаритных показателей по длине, ширине, высоте несущей конструкции.

Шестая глава посвящена исследованию метода термостабилизации электронных средств посредством микротермостатирования, когда уравнение температурной погрешности содержит доминирующие коэффициенты влияния. Показано, что уравнение температурной погрешности, полученное по методике вычислительного факторного эксперимента, пригодно для решения обратной задачи температурной стабильности. В частности, если задан уровень температурной стабильности выходного параметра ЭС, становится возможным вывод аналитических выражений для величин абсолютного отклонения температуры статирования, для величин номинальной температуры статирования и для величин перегрева внутри камеры микротермостата.

В **седьмой главе** приведено описание комплекса программ «Российский компонент» для синтеза SPICE-моделей относительно прототипов электрорадиоизделий отечественной электронной компонентной базы. Автор отмечает, что для сокращения материальных и временных ресурсов при формировании SPICE-моделей целесообразно применение средств автоматизации для генерации текстовых описаний. Рассмотренный подход по автоматизированному формированию SPICE-моделей может быть распространен на другие типы электрорадиоизделий отечественного и зарубежного производства.

В главах 5 и 6 приводятся результаты апробации разработанных математических SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы и соответствующих методов и алгоритмов их синтеза.

Поставленные автором диссертационной работы задачи решены успешно, что обеспечило достижение поставленной в ней цели. Публикации соискателя в полной мере отражают содержание исследования, автореферат в целом отражает содержание диссертационной работы.

Научные результаты работы

В диссертационной работе Озеркина Д.В. представлены следующие научные результаты:

1. Предложен модифицированный метод регрессионного анализа температурной стабильности выходного параметра электронного средства с целью получения уравнения температурной погрешности. Предложенный метод отличается от классического нормированным представлением полинома, что позволяет дать рекомендации по структурно-компонентному улучшению температурной стабильности системы. Метод предназначен для обеспечения заданной температурной стабильности и выбора конкретного метода термостабилизации при проектировании электронных средств.

2. Предложена методика для синтеза нестандартных SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, отличающаяся от классических методик декомпозицией разрабатываемой модели на типовые каскады с последующим подбором эмпирических формул функциональных зависимостей с помощью нелинейной аппроксимации. Методика применима по отношению к элементной базе малой и средней степени интеграции, что позволяет использовать ее при решении задач обеспечения заданной температурной стабильности электронных средств.

3. Для метода топологической термокомпенсации впервые введено понятие локальной группы компонентов по отношению к непрерывной области решения уравнения теплопроводности. Модифицированный метод на основе локальных групп отличается применимостью к анизотропным тепловым полям и позволяет рационально использовать явление термокомпенсации рабочих температур компонентов для увеличения температурной стабильности ЭС.

4. Впервые показано, что уравнение температурной погрешности пригодно для вывода аналитических выражений с целью нахождения первичных параметров микротермостата.

5. Предложены модифицированные вычислительные программные блоки и методики для численного нахождения значений температурного поля несущих конструкций ЭС, отличающиеся обоснованным выбором конкретного варианта реализации в зависимости от размерности исходной задачи. Программные блоки и методики практически пригодны для нахождения значений абсолютных и

относительных рабочих температур конструкций ЭС в уравнении температурной погрешности.

6. Разработан комплекс программ «Российский компонент» на основе скриптового языка, отличающийся модульной структурой и позволяющий синтезировать текстовые описания нестандартных SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с заданной температурной зависимостью параметров. Полученные текстовые описания предназначены для программно-имитационной модели электронного устройства при решении задачи обеспечения заданной температурной стабильности.

Достоверность и обоснованность основных результатов исследования

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, определяется строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным использованием современных методов научных исследований, а также подтверждается циклом экспериментальных исследований на макетных и программно-виртуальных образцах.

Результаты выполненных исследований отражены: в 2 монографиях; в 35 научных работах, в том числе 11 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК; в 4 статьях в изданиях Scopus; в 5 патентах на изобретения и полезные модели; в 1 свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ.

Значимость результатов, полученных в диссертационной работе

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что в нем осуществлена попытка решения комплексной проблемы обеспечения температурной стабильности ЭС на ранних стадиях проектирования, заключающаяся в учете как схемотехнических, так и топологических аспектов стабильности параметров ЭС в зависимости от внешних и внутренних

температурных воздействий. Решение этой проблемы достигнуто путем дальнейшего методологического развития теории допусков ЭРИ, регрессионного анализа и вычислительного факторного эксперимента.

Теоретическая значимость результатов диссертации также состоит в развитии декомпозиционных способов для обеспечения заданных показателей целевой функции ЭС, зависящей от факторов различной физической природы. В частности, в работе предложены теоретические основы нахождения коэффициентов влияния электронной подсистемы ЭС и обобщенная теория нахождения рабочих температур ЭРИ на основе численных методов и компьютерного моделирования для габаритно-топологической подсистемы ЭС.

Рекомендации по использованию результатов

Научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических, экспериментальных исследований и практические разработки внедрены на ООО «Руслед» (г. Томск). В частности, это конструктивно-технологические рекомендации для изготовления светодиодных ламп с конвекционным газовым охлаждением применительно к производственным особенностям указанного промышленного партнёра. Эти рекомендации были применены при исполнении федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств», идентификатор проекта RFMEFI57717X0266.

Методика синтеза математических моделей отечественных электрорадиоизделий нашла практическое применение при выполнении НИОКР «Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы российского производства», результаты которой впоследствии использованы на ранних стадиях разработки новых поколений малогабаритных космических

аппаратов в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнева (г. Железногорск).

Материалы диссертационного исследования также внедрены в учебный процесс Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Так теоретические и экспериментальные особенности проведения регрессионного анализа электронных схем и реализации вычислительного факторного эксперимента нашли отражения в учебном пособии «Основы научно-исследовательской деятельности» для обучающихся в аспирантуре по направлениям 03.06.01 «Физика и астрономия», 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

Замечания по диссертации

1. В главе 1 диссертации в разделе 1.2 «Прецизионная отечественная элементная база» автор не пояснил почему взяты в рассмотрение именно эти образцы отечественной элементной базы.

2. В главе 2 представлено регрессионное уравнение температурной погрешности, коэффициенты которого оцениваются по результатам экспериментов. Поскольку для проверки значимости модели используются критерии Фишера и Стьюдента, видимо предполагается, что случайная ошибка модели имеет нормальное распределение, однако исследования распределения остатков модели в работе не представлено.

3. В главе 3 остались без рассмотрения классические способы синтеза SPICE-моделей. В частности, возникает вопрос – возможно ли использовать при синтезе SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы утилиту PSpice Model Editor?

4. В главе 4 показано, что эффективным способом решения уравнения теплопроводности в различных постановках и в различных режимах являются численные методы, реализуемые с помощью современных программных

комплексов, таких как MathCAD и SolidWorks. Автор диссертации не пояснил, почему он взял в рассмотрение именно эти программные комплексы.

5. В главе 5 на стр. 227 приводятся сведения о применении в эксперименте тепловизора FLIR SC7000. Однако его основные технические характеристики, в частности, разрешающая способность, не указана.

6. В главе 6 рассмотрено применение метода микротермостатирования для стабилизатора напряжения. Для каких еще классов типов (классов) радиоэлектронной аппаратуры пригоден микротермостатирования?

7. В главе 7 при разработке комплекса программ «Российский компонент» автор не привел сведения о требованиях к программному и аппаратному обеспечению компьютера, на котором будет установлен этот продукт.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Заключение

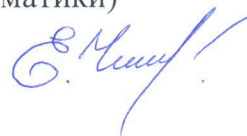
В целом, диссертационная работа Озеркина Д.В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новые научно-обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация написана понятным научным языком, характеризуется научной новизной и практической значимостью. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Диссертационная работы содержит научно-квалификационные признаки, соответствующие пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Озеркин Денис Витальевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация, автореферат и представленный отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры теоретической и прикладной информатики ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (протокол №3 от 01.04.2024 г.). На заседании присутствовали 12 преподавателей, из них 5 докторов наук и 6 кандидатов наук.

Профессор кафедры теоретической и
прикладной информатики Новосибирского
государственного технического университета
д.т.н. (спец. 05.13.17 – Теоретические основы информатики)



Е.В.Чимитова

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр-т Маркса, 20

Телефон: +7 (383) 346-08-43; +7 (383) 346-50-01

Адрес электронной почты: rector@nstu.ru, chimitova@corp.nstu.ru