

На правах рукописи

ОЗЕРКИН Денис Витальевич

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕРМОСТАБИЛЬНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Специальность 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск
2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный консультант **Туев Василий Иванович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кофанов Юрий Николаевич, д.т.н., профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшей школы экономики»

Шалумов Александр Славович, д.т.н., академик Международной академии информатизации, генеральный директор ООО «НИИ «АСОНИКА»


Кузнецов Гений Владимирович, д.ф.-м.н., профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 23 мая 2024 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 24.2.415.02 ТУСУРа по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/29bp8vxz> и в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Т.Н.Зайченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Значительное место в проектировании современных электронных средств (ЭС) занимает проблема обеспечения температурной стабильности их параметров в условиях как внешних (окружающая среда), так и внутренних (тепловыделения в электрорадиоизделиях (ЭРИ)) тепловых воздействий. Для обеспечения температурной стабильности широко используется математическое моделирование протекающих в ЭС теплофизических процессов, численные методы решения фундаментальных дифференциальных уравнений и комплексы программ, позволяющие автоматизировать описание математических моделей.

Электронные средства с высокой температурной стабильностью незаменимы в комплексах радиоэлектронной аппаратуры, работающих в экстремальных условиях внешней среды. Традиционно особое внимание уделяется надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры военного и космического назначения, в том числе ее температурной стабильности.

Применение новой элементной базы и конструктивных материалов, внедрение новых технологических операций приводят к существенному уменьшению массы и объема ЭС, что в целом положительно отражается на эксплуатационных, конструкторско-технологических и экономических показателях. Вместе с тем, особенно актуальной становится задача разработки численных методов математического моделирования в связи с характерными особенностями, присущими современному поколению термостабильной аппаратуры: увеличение плотности компоновки, что приводит к сложению удельных рассеиваемых мощностей ЭРИ, взаимная корреляция параметров, сложный механизм теплообмена и пр.

Исторически сложилось так, что отечественные производители электронной компонентной базы не сопровождают выпускаемую ими продукцию разработкой соответствующих математических моделей, в частности – разработкой SPICE-моделей. Актуальной становится задача разработки комплекса программ для автоматизации создания математических моделей отечественных ЭРИ с температурной зависимостью параметров.

Степень разработанности проблемы.

В ряде работ отечественных и зарубежных исследователей (Г.Н.Дульнев, Л.Л.Роткоп, Ю.Е.Спокойный, В.П.Алексеев, Кофанов Ю.Н., Косых А.В., Солдатов А.И. F.P.Incropera, G.Hetsroni, Y.H.Wang, E.M.Alawadhi) рассматривались вопросы обеспечения температурной стабильности ЭС на основе различных методов термостабилизации (применение прецизионной электронной компонентной базы; применение термокомпенсации; применение микротермостатирования). Однако в работах указанных авторов не в полной мере нашли обоснование и отражение вопросы: детализация структурной математической модели по обеспечению заданной температурной стабильности ЭС; методологические вопросы синтеза адекватных математических моделей ЭРИ с позиций температурной стабильности; методика регрессионного анализа температурной стабильности электронных схем с использованием компьютерных схмотехнических симуляторов; применение методов топологической термокомпенсации на основе выбора оптимальной по критерию температурной стабильности топологии размещения электрорадиоизделий ЭРИ для одно-, двух- и трехмерных конструктивных исполнений несущих конструкций ЭС; учет особенностей использования современных программных продуктов анализа и синтеза схмотехнических решений для термостабильных ЭС; исключение рутинных операций при создании математических моделей ЭРИ с температурными зависимостями параметров за счет автоматизированного формирования их описания по исходным данным.

Разработке радиоэлектронной аппаратуры с повышенной температурной стабильностью методами математического моделирования посвящено значительное число научных исследований в организациях нашей страны, включая АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва, АО «Научно-производственный центр «Полус», АО «Научно-производственное объединение имени С.А.Лавочкина», АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г.Иосифьяна», ФГУП «Государственный Космический Научно-Производственный Центр имени М.В.Хруничева», ПАО

«Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева» и др. Работы по математическому моделированию температурной стабильности радиоэлектронной аппаратуры ведутся за рубежом известными предприятиями: MDA Ltd. (Канада), Thales Alenia Space (Франция-Италия), Space Systems Loral (США), Airbus Defense and Space (Франция), Boeing Company (США), Orbital ATK (США), Lockheed Martin Corporation (США) и др.

Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что разработка радиоэлектронной аппаратуры специального назначения в значительной степени зависит от создания эффективных средств обеспечения температурной стабильности их параметров. Поэтому научные исследования в области математического моделирования, численных методов решения и применения комплексов программ на различных стадиях проектирования термостабильной радиоэлектронной аппаратуры актуальны и имеют большую практическую ценность.

В диссертационной работе поставлена и решена важная **научно-техническая проблема** – обеспечение температурной стабильности параметров и характеристик электронных средств в условиях как внешних (окружающая среда), так и внутренних (тепловыделения в электрорадиоизделиях) тепловых воздействий.

Объектом исследования является совокупность математических моделей термостабильной радиоэлектронной аппаратуры, оснащенной системами обеспечения теплового режима по ГОСТ Р 56468-2015.

Предмет исследования: методы математического моделирования температурной стабильности радиоэлектронной аппаратуры; алгоритмическое обеспечение способов термостабилизации; численные методы моделирования обозримого вида; программные комплексы, применяемые на различных стадиях проектирования радиоэлектронной аппаратуры с повышенной температурной стабильностью.

Целью настоящей работы является разработка моделей, методов математического моделирования и комплекса программ для анализа характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры.

Для достижения поставленной цели проводится **решение следующих задач:**

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 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.

Методы исследования. В качестве основных методов теоретического исследования используются классические положения регрессионного анализа и полного факторного эксперимента; способы подбора эмпирических функциональных зависимостей от температуры; оценка адекватности результатов вычислительного эксперимента по критериям Фишера, Стьюдента; методы конечных разностей и конечных элементов; метод электротепловой аналогии. Методам исследования в диссертационной работе присущи 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). Обоснование указанных ограничений приведено в тексте диссертационного исследования в главах 1, 3, 5.

Имитационные исследования проведены с помощью программных комплексов Cadence OrCAD, Altium Designer,

SolidWorks Simulation, КОМПАС. Теоретические результаты подтверждены циклом экспериментальных исследований, выполненных на измерительном оборудовании в испытательно-техническом центре (ИТЦ) АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск), аккредитованного на право проведения сертификационных испытаний электрорадиоизделий отечественного производства в Федеральной системе сертификации космической техники, и испытательной лаборатории, аккредитованной в системе добровольной сертификации «Военэлектронсерт» на право проведения испытаний продукции отечественного производства.

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.

Научная новизна работы:

В области математического моделирования:

- 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 (*п. 4 паспорта специальности – разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели*);

- 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 (*п. 2 паспорта специальности - разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий*);

- 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 (*п. 7 паспорта специальности – качественные или аналитические методы исследования математических моделей*);

- впервые показано, что уравнение температурной погрешности пригодно для вывода аналитических выражений с целью нахождения первичных параметров микротермостата (*п. 5 паспорта специальности – разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей*).

В области численных методов:

- 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 (*п. 2 паспорта специальности - разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий*).

В области комплексов программ:

- 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 (*п. 6 паспорта специальности – разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей*).

Теоретическая значимость. 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.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. Разработанная методика синтеза адекватных математических моделей ЭРИ в формате SPICE позволяет получать адекватные, с точки зрения температурной зависимости их параметров, математические модели: дискретных двухтерминальных, дискретных многотерминальных и интегральных многотерминальных ЭРИ.

2. Разработанный программный комплекс «Российский компонент» для генерации SPICE-моделей, реализованный на скриптовом языке высокого уровня TCL/Тк, позволяет осуществлять взаимодействие как с пользовательским интерфейсом схемного редактора программного комплекса OrCAD Capture, так и с базой данных проектов в OrCAD. Отличительной особенностью программного комплекса является возможность синтеза всех возможных вариантов SPICE-моделей по отношению к существующему семейству прототипов ЭРИ.

3. Практическое применение функции локализации кристаллов ЭРИ с заданным коэффициентом дихотомии позволяет уменьшить на порядок кривизну температурного профиля экспериментального образца условно одномерной структуры несущей конструкции БКРА.

4. Топологическая термокомпенсация, как метод термостабилизации, позволяет улучшать температурную стабильность конструктивных образцов электронных средств на 8...10 %. Такой результат может оказаться удовлетворительным в условиях жестких ограничений в техническом задании на применение иной элементной базы и/или иных (материалоемких) методов термостабилизации.

5. Предложенная конструкция микротермостата ЭС на основе уравнения температурной погрешности, лишенная значительной материалоемкости и экономических затрат, позволяет увеличить температурную стабильность выходного параметра не менее, чем в 2 раза по сравнению с конструктивным вариантом без применения термостатирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированный метод регрессионного анализа позволяет за 6 вычислительных процедур обеспечить математическое описание температурной стабильности электронных средств. Метод применен для снижения трудоемкости и экономических затрат в реализации экспериментальных исследований температурной стабильности ЭС.

2. Обобщенная методика синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с различной степенью интеграции позволяет достичь значений относительной погрешности в диапазоне (0,1...7) % для моделируемых термозависимых характеристик по сравнению с результатами физического эксперимента. Методика использована в современных компьютерных SPICE-симуляторах с

целью нахождения коэффициентов влияния в математическом описании температурной стабильности ЭС.

3. Вычислительные программные блоки и методики по решению уравнения теплопроводности в постановках различной геометрической размерности позволяет находить значения температурного поля в произвольных точках несущей конструкции ЭС с отклонением в 0,8 % от теоретических значений. Числовые значения температурного поля используются для сравнительного анализа различных конструктивных вариантов исполнения ЭС по критерию температурной стабильности.

4. Модифицированный метод топологической термокомпенсации позволяет улучшить температурную стабильность до 30 %. Применение модифицированного метода топологической термокомпенсации позволяет достичь заданной температурной стабильности ЭС в жестких условиях ограничений по использованию других методов термостабилизации.

5. Уравнение температурной погрешности при заданных уровнях температурной погрешности выходного параметра ЭС служит для определения основных конструктивных параметров микротермостата.

6. Оригинальный комплекс программ «Российский компонент» позволяет синтезировать неограниченное число образцов SPICE-моделей в рамках одного семейства ЭРИ с сохранением точности температурной зависимости их параметров. Комплекс программ позволяет исключить рутинные операции при создании математических моделей ЭРИ в исследованиях температурной стабильности ЭС.

Личный вклад автора.

Результаты диссертационной работы, соответствующие поставленным задачам и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Вклад автора состоит в разработке методологии по обеспечению температурной стабильности на основе анализа и синтеза различных способов термостабилизации при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры специального назначения, а также в разработке методики синтеза частных математических моделей ЭРИ, наиболее адекватно отражающих реальные температурные зависимости параметров прототипов.

Программная реализация программного комплекса «Российский компонент» выполнялась совместно с В.О.Бондаренко. Экспериментальная обработка первичных физических параметров отечественной электронной компонентной базы осуществлялась совместно с В.В.Вавиловым и В.В.Бабешко. Некоторые результаты исследований получены совместно с соавторами опубликованных работ.

Реализация результатов диссертационной работы.

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». В рамках готовящейся к лицензированию образовательной программы уровня магистратуры 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» подготовлен ряд учебно-методических пособий, в которых нашли отражение теоретические материалы представленного диссертационного исследования: «Проектирование сложных систем», «Эксперимент: планирование, проведение, анализ», «Моделирование тепловых и оптических свойств светодиодов и светотехнических устройств».

Результаты диссертационного исследования нашли отражение в 4 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель и 1 свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ.

Подтверждением промышленного и учебного использования результатов диссертационной работы является наличие 5 актов о внедрении, приведенных в Приложении к диссертационной работе.

Апробация результатов исследования.

Научные исследования выполнялись в рамках ФЦП «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»; ФЦП 32/17 «Создание отечественных электрооптических модуляторов на основе квантово-размерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400 Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации»; НИОКР 38/09 «Проведение вычислительного моделирования модулей на основе низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики для бортовой радиоэлектронной аппаратуры»; НИОКР 95/10 «Разработка моделей и методик исследования унифицированных электронных модулей систем управления и электропитания перспективных космических аппаратов».

Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на II Международной конференции по спутниковым коммуникациям ICSC-96, Москва, 1996; IV Минском международном форуме «Тепломассообмен ММФ-2000», Минск, 2000; V Международной

конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2000; VII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» Сибресур-7-2001, Томск, 2001; VI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2010; Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2011», Томск, 2011; XVI Международной молодежной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2016)», Москва, 2016; XII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2016; Международной научно-практической конференции «Новая наука: опыт, традиции, инновации», Стерлитамак, 2016; XIX Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2016; Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи (SIBCON-2019), Томск, 2019.

Публикации.

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.

Объем и структура диссертации:

Диссертационная работа включает введение, семь глав, заключение, список сокращений и список литературы из 228 наименований. Диссертация изложена на 487 страницах машинописного текста, содержит 244 рисунка, 41 таблицу, 2 приложения.

Благодарности:

Автор диссертации выражает благодарность коллегам за помощь в техническом обеспечении представленного исследования:

- генеральному директору АО «НПЦ «Полус» Сергею Александровичу Русановскому;
- техническому директору ООО «ПСБ Софт» Александру Игоревичу Акулину;

- начальнику испытательного технического центра АО «НПЦ «Полус» Владимиру Васильевичу Вавилону;
- сотрудникам АО «НПЦ «Полус» и АО ИСС, оказавшим практическую поддержку в проведении экспериментальных исследований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

Глава 1 содержит обзор известных практических способов термостабилизации ЭС с последующим обоснованием системного принципа синтеза термостабильных ЭС.

Распространенные методы термостабилизации для обеспечения температурной стабильности современных ЭС предложено разделить на три основных метода: применение прецизионной электронной компонентной базы (ЭКБ); применение термокомпенсации; применение микротермостатирования.

Номенклатура ЭКБ с высокой температурной стабильностью отличается большим разнообразием. Среди множества возможных классификационных признаков ЭКБ целесообразно выделить такой, который позволяет однозначно оценить степень сложности синтезируемой SPICE-модели относительно его прототипа. Сложность модели должна учитывать число входов n и выходов m модели (для простоты не будем различать управляемые и неуправляемые входы). Пусть сложность имеет вид $L = L(n, m)$. Например, $L = n^\gamma m$, где $\gamma > 1$, так как число входов сильнее влияет на сложность, чем число выходов. Величину γ следует определять в зависимости от того, во сколько раз увеличивается трудоемкость синтеза модели при увеличении числа ее входов на единицу. Такой подход в наиболее общем случае позволяет разделить номенклатуру ЭКБ на три категории:

1. Дискретные двухтерминальные ЭРИ.
2. Дискретные многотерминальные ЭРИ.

3. Интегральные многотерминальные ЭРИ.

Диапазон рабочих температур для электронной компонентной базы, предназначенной для работы в аппаратуре специального назначения, составляет, как правило, от минус 60 до +125 °С. Количество термозависимых параметров α_i , нормируемых в справочной документации, зависит от уровня интеграции этого элемента и может варьироваться от двух (резисторы, конденсаторы) до 15 (микроконтроллеры, запоминающие устройства). Следовательно, математическая модель термостабильного ЭС в самом общем виде выглядит как:

$$F(\alpha_1[T_1], \alpha_2[T_2], \dots, \alpha_n[T_n]) \leq \Theta(T),$$

где F – функция температурной стабильности разработанного ЭС; Θ – функция температурной стабильности по техническому заданию на разработку ЭС; α_i – вектор термозависимых функций i -ого ЭРИ, входящего в состав ЭС; n – количество ЭРИ, температурная зависимость которых влияет на температурную стабильность ЭС; T_i – рабочая температура i -ого ЭРИ; T – температура окружающей среды.

Термокомпенсация, как метод повышения температурной стабильности, основана на взаимном уравновешивании влияния ЭРИ на выходные параметры ЭС. Термокомпенсация, как метод термостабилизации, может быть реализован либо на схемотехническом уровне, либо на уровне топологии (конструктивно-технологический уровень). Следует заметить, что большинство научных работ рассматривают схемотехнический уровень термокомпенсации. Представителями этого направления исследований можно признать А.И.Кривоносова, А.В.Косых, А.В.Баранова и А.Л.Козикова, J.Liang и др., Т.-Н.Cho и др., M.R.Lee и др. Работы, посвященные топологической термокомпенсации, менее распространены. Сюда можно отнести исследования И.В.Никонова, М.Тихана. По методам реализации термокомпенсированных ЭС четко выделяются два альтернативных варианта: аппаратные средства и программные средства. К аппаратным средствам можно отнести термокомпенсирующие ЭРИ, цепи, подложки, мембраны (работы А.И.Кривоносова, А.В.Баранова и А.Л.Козикова, И.В.Никонова, М.О.Тихана, J.Liang и др.). Программные средства предполагают наличие в составе ЭС микроконтроллера или микропроцессора с соответствующим программно-управляющим кодом (работы

А.В.Косых, Т.-Н.Cho и др., M.R.Lee и др.). Среди устройств с температурной компенсацией параметров наиболее часто встречаются источники питания (работы J.Liang и др., Т.-Н.Cho и др.), усилительные устройства (работы А.И.Кривоносова, А.В.Баранова и А.Л.Козикова), генераторы гармонических и импульсных сигналов (работы А.И.Кривоносова, И.В.Никонова, А.В.Косых), датчики различных физических величин (работы М.О.Тихана, M.R.Lee и др.).

Несмотря на малочисленность работ по топологической термокомпенсации, авторы отмечают зависимость пространственного расположения термочувствительных ЭРИ на температурную стабильность выходных параметров ЭС. Таким образом, проблема влияния анизотропности температурного поля несущих конструкций на температурную стабильность ЭС, являясь актуальной, еще не исследована в должной степени.

Перспективным способом реализации температурной компенсации ЭС с заданными и перестраиваемыми характеристиками следует признать программно-управляемые реализации на основе микроконтроллеров или микропроцессоров. Несмотря на кажущуюся сложность аппаратной реализации адаптивной термокомпенсации, современные микроконтроллеры позволяют выполнить все операции по адаптации без существенного усложнения аппаратной части ЭС.

Микротермостатирование – это поддержание температуры в заданных пределах для электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов микронного и субмикронного порядка. Отказ от дальнейшего рассмотрения традиционных систем термостатирования в пользу микротермостатирования обусловлен тем, что объектами настоящего исследования является бортовая космическая радиоаппаратура. Характерной особенностью БКРА всегда остается жесткое ограничение на массогабаритные показатели, что, как правило, не позволяет применять традиционные материалоемкие и энергоемкие системы термостатирования.

Все многообразие работ по микротермостатированию делится на две категории: исследование и разработка подогревных микротермостатов; исследование и разработка охлаждающих микротермостатов. К наиболее известным и признанным работам можно отнести труды Г.Н.Дульнева, Е.А.Коленко, Т.А.Исмаилова. Эти труды отражают многолетний опыт авторов и их соратников в

теоретических и экспериментальных изысканиях по тепловому проектированию ЭС. Монография Н.А.Ярышева и Л.Б.Андреевой также представляет собой пример глубокого научного исследования, посвященного подогревным микротермостатам, сопровождается большим объемом экспериментального материала.

Наиболее совершенные подогревные микротермостаты характеризуются точностью поддержания температуры статирования до $\pm 0,01$ °С и температурой статирования от 20 до 60 °С. Основным недостатком подогревных микротермостатов – интенсификация деградационных процессов в термостатируемых ЭРИ при повышении рабочей температуры функционирования. Основной недостаток охлаждающих микротермостатов – явления конденсации влаги и возможность короткого замыкания. Нетрудно заметить, что указанные негативные явления, характерные для подогревных и охлаждающих микротермостатов, отрицательно влияют на надежность ЭС в целом.

Промежуточное положение занимают работы, в которых реализованы реверсивные микротермостаты. Как правило, исполнительным элементом в таких устройствах является элемент Пельтье (термобатарея), которая в зависимости от полярности может выступать и нагревателем, и охладителем.

Современный уровень техники по температурной стабильности ЭС характеризуется высокими эксплуатационными показателями. Лучшие образцы прецизионной электронной компонентной базы имеют температурные коэффициенты определяющего параметра на уровне миллионных долей °С⁻¹. Температурный коэффициент напряжения стабилизации, усреднённый при температуре окружающей среды от минус 5 до +60 °С для модели стабилитрона 2С117В составляет $\pm 0,0005$ % / °С. Наиболее удачные образцы ЭС с применением метода термокомпенсации обладают температурной стабильностью на уровне менее, чем миллионная доля °С⁻¹. Конструкция термокомпенсированного генератора частоты с адаптивной динамической компенсацией характеризуется температурной стабильностью $0,5 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹ в температурном интервале (0...60) °С. Лучшие мировые образцы микротермостатов имеют нестабильность температуры в камере термостатирования ниже сотых долей градуса. Измеренное значение нестабильности температуры в камере термостатирования для высокоточного

микротермостата составляет менее 0,01 °С при изменении температуры окружающей среды ± 10 °С.

При разработке сложных термостабильных ЭС остаются вне рассмотрения ответы на два вопроса, касающихся качественного и количественного обеспечения температурной стабильности, а именно:

а) обоснование применения конкретного метода термостабилизации (прецизионная ЭКБ, термокомпенсация, термостатирование, их комбинации);

б) мера температурной стабильности отдельных элементов, необходимая и достаточная для достижения температурной стабильности всего ЭС, заданной в ТЗ.

В главе 1 проведен краткий обзор программных комплексов, пригодных для проектирования термостабильных электронных средств: Spectrum MicroCAP, Cadence OrCAD, АСОНИКА, SolidWorks, Ansys. На сегодняшний день не существует ни одного программного комплекса для реализации полного (сквозного) цикла проектирования термостабильных электронных средств. Среди рассмотренных программных комплексов наиболее пригодным для целей проектирования термостабильных электронных средств является программный комплекс Cadence OrCAD. Он позволяет реализовать наибольшее число этапов проектирования. Его недостаток – программный модуль Model Editor направлен на синтез математических моделей дискретных ЭРИ исключительно зарубежного производства.

Показано, что для достижения эффективных результатов моделирования термостабильных электронных средств требуется разработка комплекса программ для синтеза SPICE-моделей двухтерминальной дискретной, многотерминальной дискретной и многотерминальной интегральной электронной компонентной базы отечественного производства под условным названием «Российский компонент».

Глава 2 посвящена установлению аналитической зависимости выходного параметра ЭС от рабочих температур ЭРИ и температуры окружающей среды.

Впервые комплексный подход к обеспечению требуемой температурной стабильности ЭС был обозначен в монографии В.П.Гусева в качестве частной задачи при анализе производственных

погрешностей и электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. Выходной параметр ЭС рассматривается как функция многих переменных:

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n),$$

где N – выходной параметр ЭС; q_1, q_2, \dots, q_n – параметры ЭРИ.

После ряда преобразований над выходным параметром ЭС получаем уравнение температурной погрешности выходного параметра ЭС:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \right] \Delta T,$$

где $\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} = B_i$ – коэффициенты влияния.

Далее в главе 2 поставлена и решена задача нахождения коэффициентов влияния B_i для уравнения температурной погрешности методом статистического планирования эксперимента в сочетании с регрессионным анализом. Известно, что температурные зависимости параметров ЭРИ случайны по величине и знаку в пределах заданных значений, поэтому для математического описания температурной погрешности ЭС целесообразно использование метода статистического планирования эксперимента. Кроме того, появляется возможность получения как линейного, так и нелинейного уравнения температурной погрешности ЭС в виде степенного ряда, что сопровождается статистически строгой оценкой адекватности полученного полинома и значимости уравнения регрессии. Уравнение регрессии, получаемое по результатам эксперимента, может быть представлено в общем виде как:

$$n = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i q_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} q_i^2 + \dots,$$

где n – оценка генерального значения выходного параметра N ; k –

число факторов в эксперименте; $b_0 = \sum_{j=1}^m n_j / m$ – свободный член,

равный математическому ожиданию; n_j – значение выходного параметра в j -ом опыте матрицы планирования эксперимента; m –

число опытов в эксперименте ($2^k = m$); $b_i = \left(\sum_{j=1}^m n_j Q_i \right) / m$ – эмпирические коэффициенты уравнения регрессии, являющиеся оценками соответствующих генеральных коэффициентов; Q_i – нормировочный фактор.

Для проверки гипотезы об адекватности применяется F -критерий (критерий Фишера):

$$F = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{вос}}^2,$$

где $S_{\text{ад}}^2$ - дисперсия адекватности; $S_{\text{вос}}^2$ - дисперсия воспроизводимости.

Проверка значимости каждого коэффициента регрессии проводится независимо. Для этого применяют построение доверительного интервала:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_{\text{вос}}}{\sqrt{m}},$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы m , с которым определялась величина $S_{\text{вос}}^2$.

Блок-схема алгоритма нахождения коэффициентов влияния для уравнения температурной погрешности представлена на рисунке 1. В развитие положений статистического анализа температурных погрешностей ЭС, предложено выделить два альтернативных вида уравнения температурной погрешности: для однопараметрических ЭРИ и для многопараметрических ЭРИ.

Для *однопараметрических ЭРИ* в процессе исследований реализуется план (рисунок 2, а), в котором проводится варьирование величиной термозависимого параметра каждого ЭРИ с последующей статистической обработкой и получением уравнения вида:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \alpha_i \Delta T_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} \alpha_i \alpha_j \Delta T_i \Delta T_j + \dots,$$

где $a_i = (b_i \cdot U_i^0) / (\Delta U_i \cdot b_0)$ – коэффициент влияния термозависимого параметра i -ого ЭРИ; b_i – коэффициент регрессии; U_i^0 – нулевой уровень варьлируемого параметра ЭРИ; ΔU_i – интервал варьирования величины U_i^0 ; α_i – максимальное значение температурного

коэффициента варьируемого параметра; ΔT_i – изменение рабочей температуры i -ого ЭРИ.

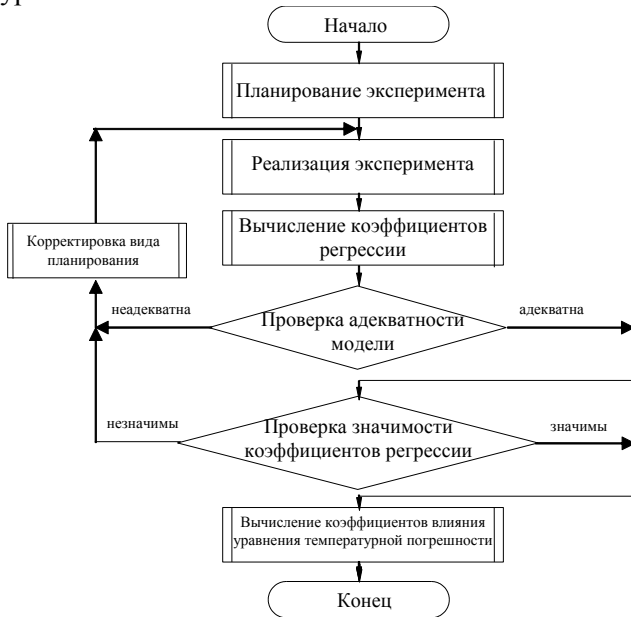


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма нахождения коэффициентов влияния для уравнения температурной погрешности

Для *многопараметрических* ЭРИ предлагается при реализации плана эксперимента проводить варьирование не величиной термозависимых параметров, а температурой ЭРИ ΔT_i . В этом случае уравнение температурной погрешности имеет вид:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots,$$

где $a_i = (b_i \cdot T_0) / (\Delta T \cdot b_0)$ – коэффициент влияния i -ого ЭРИ; T_0 – номинальная температура (нулевой уровень варьирования); ΔT – интервал варьирования температуры; $\Delta T_i / T_i$ – относительное изменение рабочей температуры ЭРИ.

Основное отличие блок-схемы вычислений с целью нахождения уравнения температурной погрешности для многопараметрических

ЭРИ (рисунок 2, б) от аналогичной схемы для однопараметрических ЭРИ заключается в установлении рабочей температуры применительно ко всем термовызисимым параметрам ЭРИ, участвующим в полном факторном эксперименте.

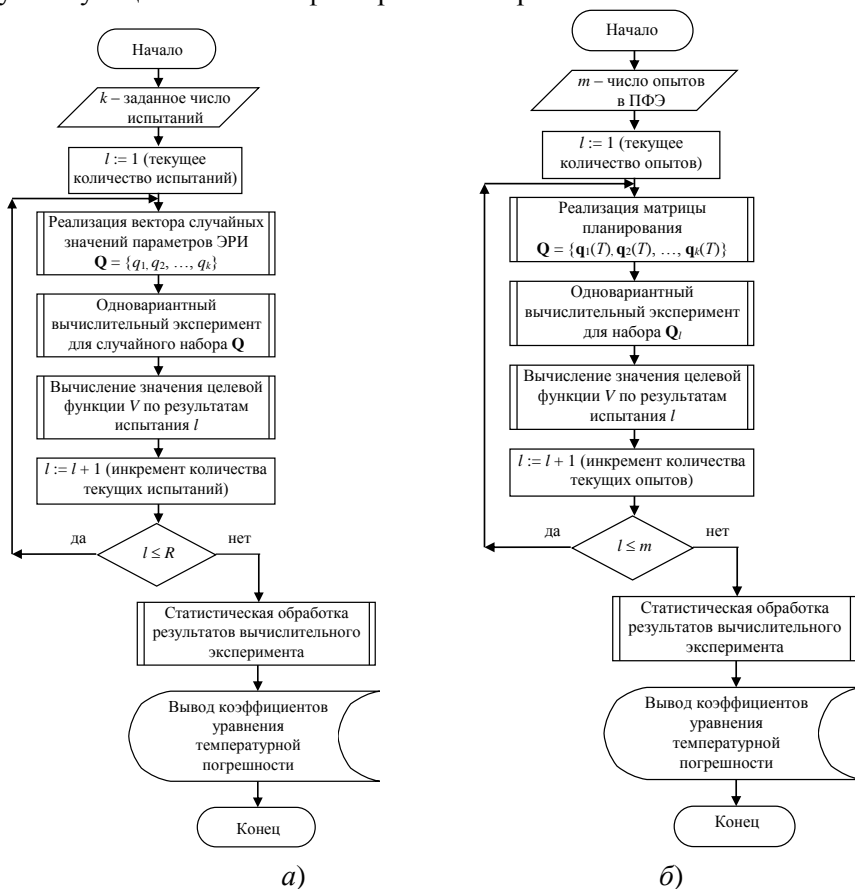


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма реализации вычислительного эксперимента для случая однопараметрических ЭРИ и многопараметрических ЭРИ

Доказано, что в реализации вычислительного факторного эксперимента могут использоваться широко известные программные продукты схемотехнического моделирования Spectrum Software

MicroCAP, Cadence OrCAD и др. Реализован вычислительный факторный эксперимент для стабилизатора напряжения в соответствии с блок-схемой для многопараметрических ЭРИ. Исходный линейный полином напряжения стабилизации:

$$U = 13,762 - 0,0019x_1 - 3,053 \cdot 10^{-16}x_2 - 7,494 \cdot 10^{-16}x_3 - 0,177x_4 - 0,276x_5 - 0,474x_6.$$

Дисперсия адекватности и дисперсия воспроизводимости составила соответственно: $S_{ад}^2 = 4,386 \cdot 10^{-7}$ и $S_{вос}^2 = 0,337$. Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше табличного значения, то с доверительной вероятностью 95 % линейный полином признан адекватной математической моделью.

Статистическая значимость коэффициентов регрессии линейного полинома оценена с помощью критерия Стьюдента. Коэффициенты регрессии при факторах x_1, x_2, x_3 – незначимы. Итоговое уравнение температурной погрешности для стабилизатора напряжения выглядит:

$$\frac{\Delta U}{U} = -0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} - 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} - 0,207 \frac{\Delta T_{VDS}}{T_{VDS}},$$

где индексы VT1, VT2, VDS – позиционные обозначенные ЭРИ в электрической схеме.

Вид уравнения температурной погрешности позволяет обоснованно подойти к выбору метода термостабилизации ЭС. В зависимости от конкретного сочетания коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности возможны следующие методы термостабилизации:

- применение прецизионной электронной компонентной базы;
- применение термокомпенсации на уровне схемотехнических и/или топологических решений;
- применение микротермостатирования для одного или группы ЭРИ.

Из общей задачи по нахождению уравнения температурной погрешности выделяются отдельные частные задачи:

- задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ, входящих в электрическую схему ЭС;
- задача схемотехнического анализа (моделирования) электрической схемы для нахождения коэффициентов влияния уравнения температурной погрешности;

- задача топологического проектирования для расчета температурного поля и нахождения изменений рабочих температур ЭРИ $\Delta T_i / T_i$.

Таким образом, в разделе предложен модифицированный метод регрессионного анализа, который позволяет за 6 вычислительных процедур обеспечить математическое описание температурной стабильности электронных средств. Метод применен для снижения трудоемкости и экономических затрат в реализации экспериментальных исследований температурной стабильности ЭС.

На основании уравнения температурной погрешности, полученного во второй главе диссертационной работы, в **главе 3** представлена разработка методика синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, пригодных для последующего нахождения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности.

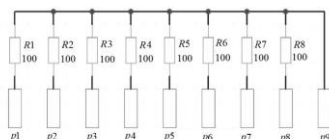
В начале главы рассмотрена номенклатура SPICE-моделей, применяемых в широко известных SPICE-симуляторах (Cadence OrCAD, Spectrum Software, Altium Designer): резистор, конденсатор, индуктивность, диод, биполярный транзистор, полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом, МОП-транзистор, арсенид-галлиевый транзистор. Основной акцент сделан на анализе температурных зависимостей параметров.

Затем выделены два способа синтеза математических моделей ЭРИ с учетом температурных зависимостей стандартными средствами SPICE-симуляторов: на основе справочных и/или экспериментальных данных, представляемых в виде графиков; на основе шаблонов, путем ввода типичных значений оцениваемых величин.

Далее в главе представлены практические примеры синтеза моделей ЭРИ с температурной зависимостью параметров, прототипы которых представляют образцы отечественной электронной компонентной базы. В частности, представлены этапы синтезирования SPICE-моделей: дискретного двухтерминального ЭРИ; дискретные многотерминального ЭРИ; интегрального многотерминального ЭРИ.

В качестве дискретного двухтерминального ЭРИ взят за основу резисторный блок с планарными выводами семейства Б19К (рисунок 3, а). Разработана методика синтеза дискретного двухтерминального ЭРИ на основе резисторного блока Б19К. Результатом синтеза

является SPICE-модель с относительной погрешностью температурного коэффициента сопротивления в $\pm 0,01\%$ по сравнению с образцом-прототипом (рисунок 3, б).



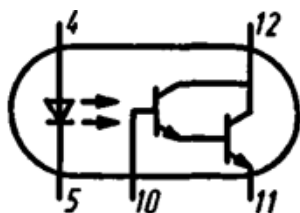
а)

```
.subckt b19k2-100-sample6 1 2 3 4 5 6 7 8 9
R1 1 9 TCR 100
R2 2 9 TCR 100
R3 3 9 TCR 100
R4 4 9 TCR 100
R5 5 9 TCR 100
R6 6 9 TCR 100
R7 7 9 TCR 100
R8 8 9 TCR 100
.model TCR RES (R=1 DEV=5% TC1=17.229E-6 TC2=355.591E-9)
.ends
```

б)

Рисунок 3 – Применение методики синтеза дискретных двухтерминальных ЭРИ

В качестве дискретного многотерминального ЭРИ взята за основу оптопара транзисторная 3ОТ122А (рисунок 4, а). Разработана методика синтеза дискретного двухтерминального ЭРИ на основе оптопары транзисторной 3ОТ122А. На основе методики синтезирована макромодель (рисунок 4, б), пригодная для SPICE-симуляторов. Невязка результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования для испытуемого образца составляет от $\pm 0,3$ до $\pm 0,7\%$.



а)



$$G1 = \{a1\} \cdot I(V1) + \{a2\} \cdot I(V1) + \{a3\} + \{b1\} \cdot T \cdot T + \{b2\} \cdot T + \{b3\}$$

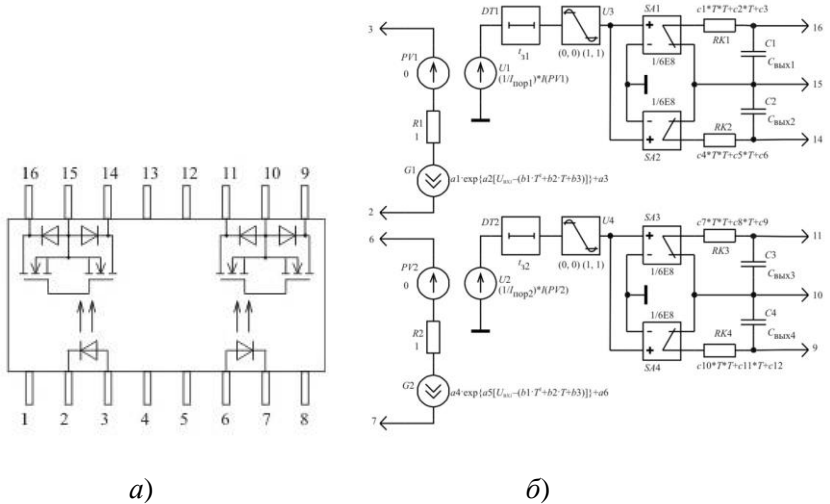
$$G2 = \{c1\} \cdot I(V1) + \{c2\} \cdot I(V1) + \{d1\} \cdot I(V2) + \{d2\} \cdot \text{abs}(I(V2)) + \{d3\}$$

б)

Рисунок 4 – Применение методики синтеза дискретных многотерминальных ЭРИ

В качестве интегрального многотерминального ЭРИ взято за основу МОП-реле 249КП4АТ (рисунок 5, а). Разработана методика синтеза интегрального многотерминального ЭРИ на основе МОП-реле 249КП4АТ. На основе методики синтезирована макромодель, содержащая два идентичных канала (рисунок 5, б). Относительная

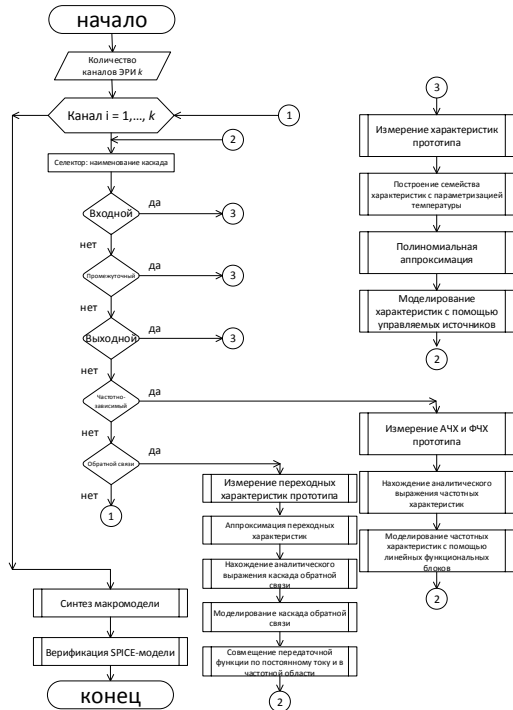
погрешность моделирования температурных зависимостей входных и выходных характеристик для полученной SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ не превышает $\pm 6,7\%$ по сравнению с результатами физического эксперимента.



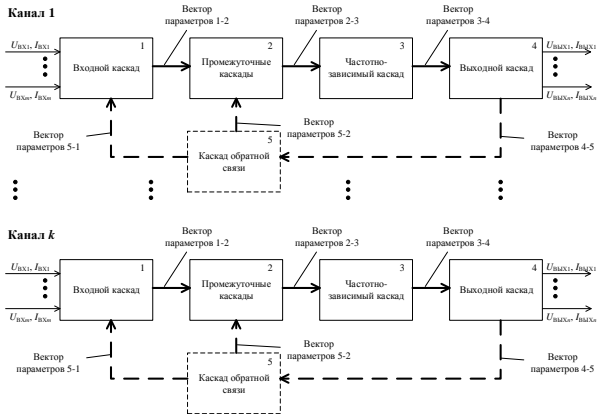
а) б)
Рисунок 5 – Применение методики синтеза дискретных многотерминальных ЭРИ

Опираясь на частные результаты синтеза SPICE-моделей для случаев дискретных двухтерминальных, дискретных многотерминальных и интегральных многотерминальных ЭРИ, решена более общая задача – разработка методики синтеза обобщенной термозависимой модели для SPICE-моделирования (рисунок 6, а). В общем случае прототип модели состоит из k каналов, причем каждый канал состоит из входного каскада, промежуточных каскадов, частотно-зависимых каскадов, выходного каскада и каскада обратной связи (рисунок 6, б).

Современные SPICE-симуляторы (OrCAD, MicroCAP, MultiSim, Altium Designer) содержат математические модели типовых ЭРИ, в которых реализованы температурные зависимости параметров. Этот факт делает возможным компьютерный схемотехнический анализ с учетом исследования температурной стабильности ЭС.



а)



б)

Рисунок 6 – Применение методики синтеза обобщенной термозависимой модели

В результате предложена обобщенная методика синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с различной степенью интеграции позволяет достичь значений относительной погрешности в диапазоне (0,1...7) % для моделируемых термозависимых характеристик по сравнению с результатами физического эксперимента. Методика использована в современных компьютерных SPICE-симуляторах с целью нахождения коэффициентов влияния в математическом описании температурной стабильности ЭС.

Воспользовавшись результатами второй главы диссертационного исследования в части представления уравнения температурной погрешности ЭС, глава 4 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.

За основу рассматриваемой ниже математической модели распределения температурного поля приняты известные численные методы решения дифференциальных уравнений. Однако, в отличие от универсальных методик расчета температурного поля предлагается разновидность математической модели для решения узкоспециализированной задачи – расчет температурного поля плоской многослойной конструкции типа плата или подложка (далее – твердотельная система) со следующими допущениями и ограничениями.

На шести поверхностях твердотельной системы (верхней, нижней и четырех боковых) заданы условия конвективно-радиационного теплообмена с окружающей средой, которые в общем случае различны: α_B , α_H , $\alpha_{Б1}$, $\alpha_{Б2}$, $\alpha_{Б3}$, $\alpha_{Б4}$ (рисунок 7). Уравнение для теплопроводности для i -ого слоя твердотельной системы выглядит следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{f=1}^F q_f(x, y),$$

где c – коэффициент теплоемкости материала i -ого слоя твердотельной системы; ρ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности материала.

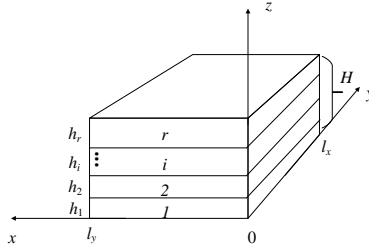


Рисунок 7 – Графическое представление теплофизической модели твердотельной системы

Граничные условия III и IV рода для слоев 1, r , i выглядят так:

$$\begin{aligned}
 -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z=0} &= \alpha_H (T_{CP} - T_1); \quad \lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial z_r} \Big|_{z=H} = \alpha_B (T_{CP} - T_r); \quad T_i \Big|_{z=h_i} = T_{i+1} \Big|_{z=h_{i+1}}; \\
 -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z_i} \Big|_{z=h_i} &= -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z_{i+1}} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = \alpha_{B1} (T_{CP} - T_i); \\
 \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= \alpha_{B2} (T_{CP} - T_i); \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} = \alpha_{B3} (T_{CP} - T_i); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} = \alpha_{B4} (T_{CP} - T_i),
 \end{aligned}$$

где T_{CP} – температура окружающей среды.

Начальное условие имеет вид:

$$T \Big|_{\tau=0} = T_{CP}(x, y, z).$$

Искомой в представленной выше задаче является функция $T(x, y, z, \tau)$, заданная в непрерывной области:

$$\Omega = \{0 \leq x \leq l_x\} \times \{0 \leq y \leq l_y\} \times \{0 \leq z \leq H\} \times \{0 \leq \tau \leq \tau_{\max}\}.$$

Аналитический способ решения уравнения теплопроводности для современных задач теплопроводности в двух- и трехмерной постановке в нестационарном режиме является чрезвычайно сложной задачей, решение которой практически невозможно представить в обозримом виде. Известны два основных численных метода решения уравнения в частных производных: метод конечных разностей (МКР); метод конечных элементов (МКЭ).

Рассматривая МКР, наиболее приемлемым для расчетов тепловых режимов плоской конструкции является его локально-одномерная схема, отличительной особенностью которой является сочетание

сильных сторон явных схем (малые затраты машинного времени на один шаг по времени) и неявных схем (безусловная устойчивость). На рисунке 8 представлена блок-схема алгоритма расчета температурного поля плоской конструкции по локально-одномерной схеме. Решение системы разностных уравнений сводится к расчету на каждом шаге по времени набора одномерных задач методом правой прогонки.

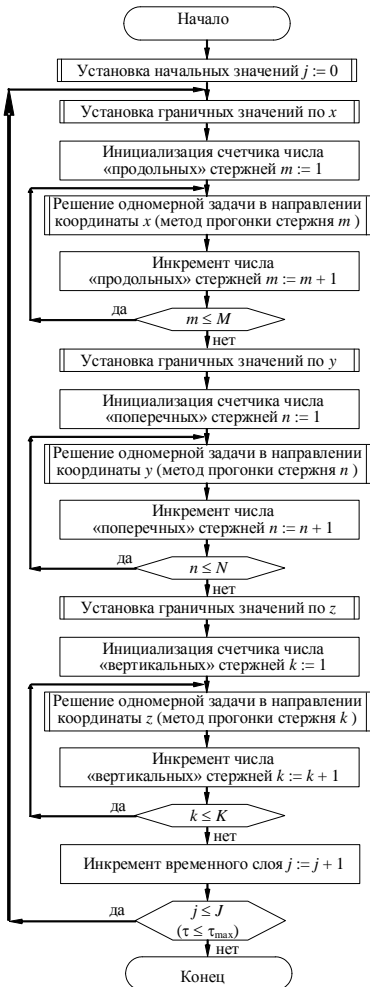


Рисунок 8 – Блок-схема обобщенного алгоритма расчета температурного поля по локально-одномерной схеме

В МКЭ твердотельная плоская конструкция представляет собой непрерывную область Ω с границами Γ . Проводится разбиение пространства η -ого слоя твердотельной системы на конечные элементы – тетраэдры. Каждый элементарный тетраэдр имеет порядковый номер μ и узлы (вершины): i, j, k, l . Объем конечного элемента обозначим как V^e . Полагаем, что текущая температура T в каждом конечном элементе μ может быть аппроксимирована как функция координат x, y, z . Пространственное распределение температуры внутри любого конечного элемента аппроксимируется суммой произведений координат на коэффициенты, равные приближенным значениям температуры в узловых точках, принадлежащих данному элементу.

После интегрирования и суммирования вариационной задачи она будет представлять систему алгебраических уравнений относительно температуры всех μ узлов. Итоговое уравнение теплопроводности в векторно-матричной форме выглядит как:

$$\mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{F},$$

где \mathbf{C} – матрица демпфирования, физический смысл заключается в зависимости температуры от времени; \mathbf{A} – матрица жесткости, физический смысл заключается в количественном описании характеристик материала η -ого слоя твердотельной системы; \mathbf{F} – вектор нагрузки, физический смысл заключается в получаемом количестве теплоты от внутренних источников тепловыделения.

На рисунке 9 представлена блок-схема алгоритма обобщенного алгоритма расчета температурного поля по методу конечных элементов.

Показано, что современные программные комплексы решения уравнения теплопроводности численными методами обладают высокой степенью адекватности. Сравнительный анализ решения тестовой задачи теплопроводности аналитическим и численным методами позволяет сказать, что погрешность численного счета не превышает 0,8 %.

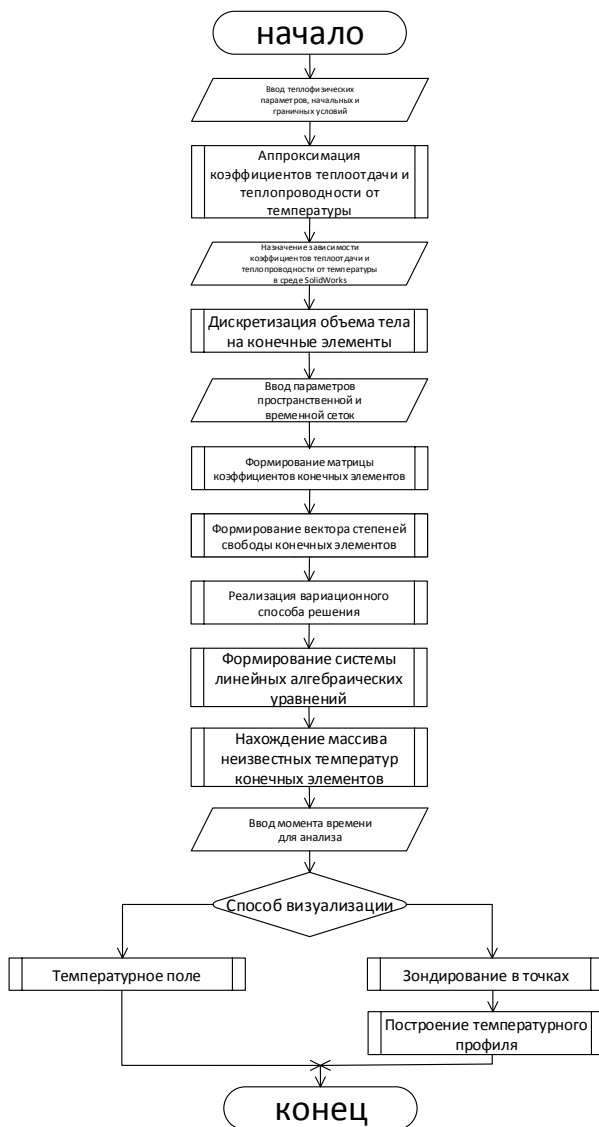


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма обобщенного алгоритма расчета температурного поля по методу конечных элементов

В главе 4 показано, что методики и вычислительные программные блоки для решения уравнения теплопроводности в постановках различной геометрической размерности позволяют находить значения температурного поля в произвольных точках несущей конструкции ЭС с отклонением в 0,8 % от верифицированных на основе тестовой задачи. Числовые значения температурного поля используются для сравнительного анализа различных конструктивных вариантов исполнения ЭС по критерию температурной стабильности.

На основании результатов, полученных в третьей и четвертой главах, глава 5 посвящена исследованию эффекта анизотропности теплового поля несущих конструкций, обладающих значительными собственными тепловыделениями, на температурную стабильность выходных параметров электронных средств.

Современные электронные средства с позиций системного анализа подразделяются на 3 иерархических уровня: элементная база (I уровень); частные конструкции (II уровень); законченные конструкции (III уровень). Наиболее распространенным случаем частных конструкций II уровня является печатный узел.

В главе 4 было показано, что задача расчета температурного поля несущих конструкций численными методами возможно в различных постановках, а именно: в одномерной, двухмерной и трехмерной постановке с точки зрения пространственных координат. Исходя из этого, для предстоящего исследования анизотропности теплового поля несущих конструкций ЭС целесообразно ввести их оригинальную классификацию: условно одномерные; условно двухмерные; трехмерные.

Одним из перспективных вариантов реализации светодиодных линейных модулей в филаментных светодиодных лампах (ФСЛ) является применение подложки, выполненной из никелированной стали. Известно, что подложки светодиодных линейных модулей ФСЛ, изготовленные как из никелированной стали, так и из других материалов, в стационарном тепловом режиме имеют градиент температуры по длине подложки. Температурный градиент обуславливает эффект возникновения различных рабочих температур светодиодных кристаллов в зависимости от линейных координат.

Представим температурный профиль по длине подложки $v(x)$ как траекторию движения материальной точки $\phi(x)$ вдоль этой длины. Тогда можно количественно оценить степень нелинейности профиля с помощью кривизны плоской линии в точке профиля x . Для отыскания неизвестной функции локализации $Loc(x_i)$ воспользуемся методом дихотомии. Цикличность метода дихотомии (рисунок 10) предполагает, что можно составить рекуррентную формулу процесса локализации кристаллов.

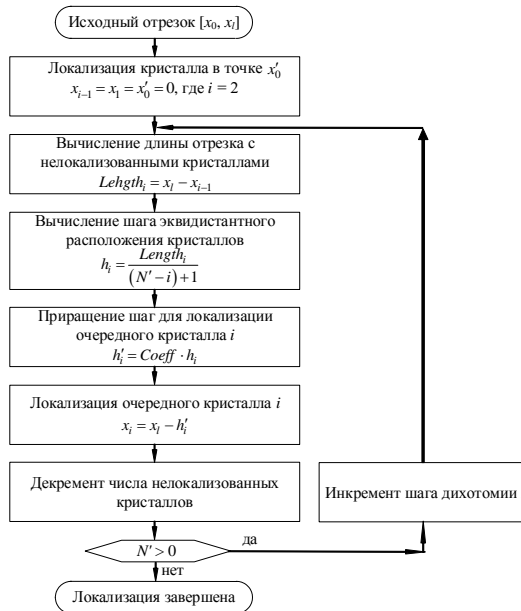


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма процесса дихотомии для случая с четным числом кристаллов

Функция локализации может быть представлена в виде:

$$Loc(i, Coeff) = C_1 + Coeff \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_3 - i},$$

где i - номер шага размещения кристалла; $Coeff$ – коэффициент дихотомии; C_1 – координата предыдущего размещенного кристалла; C_2 – длина подложки; C_3 – полусумма кристаллов.

Термокомпенсация на двухмерных несущих конструкциях ЭС, как метод повышения температурной стабильности, основана на взаимном влиянии параметров ЭРИ на выходной параметр электронного средства ЭС. В главе предлагается к рассмотрению понятие «локальная группа» (ЛГ). Локальная группа – это группа смежных ЭРИ, расположенных на изотермической линии (изотермической поверхности). На рисунке 11 представлена блок-схема эвристического последовательного алгоритма размещения ЭРИ с целью достижения топологической термокомпенсации.

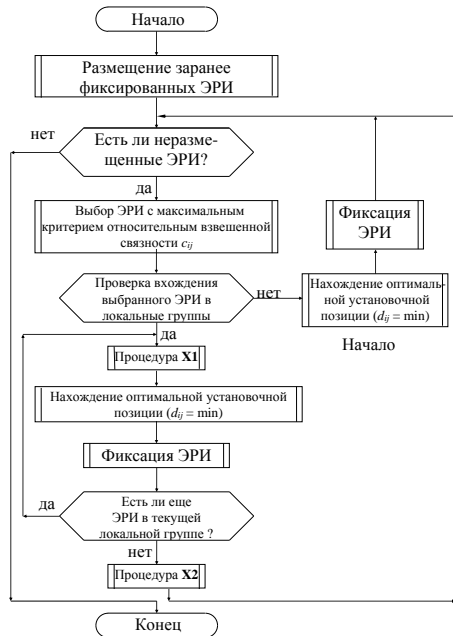


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма размещения ЭРИ с целью достижения топологической термокомпенсации

Неравномерность температурного поля конструкции объемных интегральных схем (ОИС) также влияет на температурную стабильность электрических выходных параметров ЭС. По аналогии с условно двухмерными несущими конструкциями и связанными с ними понятием локальной группы введено понятие «объемная локальная группа» для трехмерных несущих конструкций.

Экспериментальная часть исследования условно одномерных несущих конструкций представлена сборочной единицей светодиодного линейного модуля состоит из подложки *1* и массива светодиодных кристаллов *2* (рисунок 12, *а*). Применение неравномерного расположения светодиодных кристаллов для экспериментального образца №3 на рисунке 12, *б* позволило уменьшить кривизну профиля с 10^{-4} до 10^{-5} мм⁻¹ по сравнению с образцами *1* и *2* (ручное и автоматизированное эквидистантное размещение кристаллов, соответственно). Следовательно, для образца №3 экспериментально решена поставленная задача – найден способ расположения кристаллов на подложке с целью минимизации кривизны температурного профиля для характерной точки $x = 9$ мм.

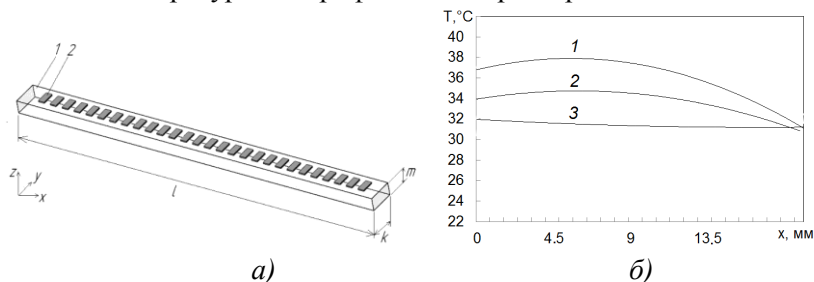


Рисунок 12 – Анизотропность теплового поля условно одномерных несущих конструкций

Экспериментальная часть исследования условно двухмерных несущих конструкций представлена прецизионным источником опорного напряжения (ПИОН).

Концепцию топологической термокомпенсации, положенную в основу улучшенного конструктивного исполнения ПИОН, поясняет рисунок 13, *а*. Удобно найти на плоскости несущей конструкции изотермическую линию, которая бы примерно совпадала по уровню с рабочей температурой стабилитрона VD1 ПИОН. При этом стабилитрон VD1 будет самостоятельно создавать себе рабочую температуру равную уровню изотермы, а остальные ЭРИ из уравнения температурной погрешности будут находиться на заданной линии, благодаря наведенному перегреву от транзистора VT4 (он находится в левом верхнем углу платы и условно не показан). В результате на

изотермической линии располагаются две комплементарные пары ЭРИ в соответствии с уравнением температурной погрешности

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = 0,011 \frac{\Delta T_{R7}}{T_{R7}} - 0,011 \frac{\Delta T_{R8}}{T_{R8}} + 0,062 \frac{\Delta T_{VD1}}{T_{VD1}} - 0,0065 \frac{\Delta T_{VT6}}{T_{VT6}},$$

которые обозначены как локальная группа №1 и локальная группа №2.

В результате проведения эксперимента была исследована температурная стабильность выходного напряжения двух вариантов конструкции ПИОН (рисунок 13, б). Кривая 1 соответствует температурной зависимости выходного напряжения для первого конструктивного варианта (без учета анизотропности теплового поля), кривая 2 – для второго конструктивного варианта (с учетом анизотропности теплового поля). Уровень 3 показывает номинальное значение выходного напряжения ПИОН $U_{\text{ВЫХ.НОМ}} = 10 \text{ В}$.

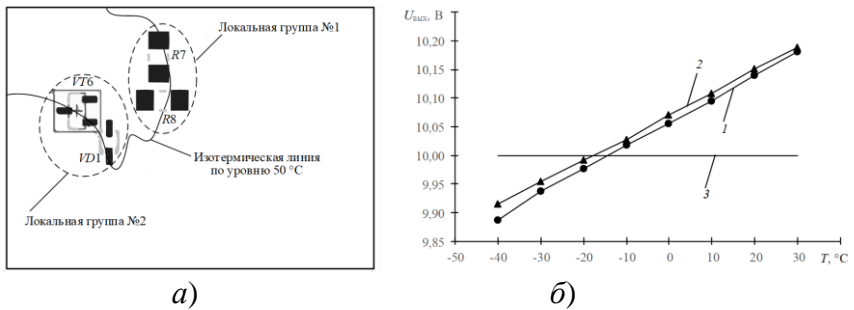


Рисунок 13 – Анизотропность теплового поля условно двумерных несущих конструкций

В относительном количественном выражении улучшение температурной стабильности конструктивного варианта №2 ПИОН по сравнению с вариантом №1 составило 8 %. В диапазоне температур окружающей среды минус 30 ... +30 °C сравниваемые конструктивные образцы ПИОН практически не отличаются по термостабильности выходного напряжения. Отличие начинает проявляться в области низких температур, ниже минус 30 °C.

Экспериментальная часть исследования трехмерных несущих конструкций представлена импульсным усилителем мощности (ИУМ).

Конструкция ОИС ИУМ представлена на рисунке 14, а. Основа конструкции – керамическая пластина корпуса ОИС толщиной 1 мм. На ней расположена многослойная структура ОИС, реализованная по технологии 3D TSV. На верхней полупроводниковой подложке расположены четыре тепловыделяющих ЭРИ: VT5...VT8. Расположение транзисторов в углах стека ОИС способствует более эффективному теплоотводу за счет конвекции. Размеры кристаллов транзисторов VT5...VT8 составляют 2×2×0,5 мм.

Теплофизическое моделирование конструкции ОИС ИУМ проведено в среде SolidWorks Simulation, которая позволяет бесшовно перейти от создания 3D модели ОИС непосредственно к анализу особенностей ее температурного поля. Результаты моделирования стационарного теплового режима ОИС ИУМ представлены на рисунке 14, а. Возможно размещение кристаллов ЭРИ VT3, VT4, VT9, VT10 в объемные локальные группы (ОЛГ1, ОЛГ2) на изотермической поверхности вблизи источников тепловыделения с необходимыми технологическими зазорами между ЭРИ. В конструкции ОИС существуют две такие изотермические поверхности (симметричные относительно центра) с температурой $T_{\text{ОЛГ1}} = T_{\text{ОЛГ2}} = 333 \text{ K}$ (60 °C) и координатами центров поверхностей (2,42; -5,46; 3,4) мм и (13,3; -15,2; 3,4) мм.

В графическом виде проведенный экспериментальный анализ можно представить на координатной плоскости в системе координат $\frac{\Delta 2U}{2U} = f(T_{\text{ОЛГ}})$ в виде семейства гиперболических кривых (рисунок 14, б). Разница между максимальным и минимальным значениями температурной погрешности составляет 7,95 раза. Разница температурной погрешности при $\Delta T = 10 \text{ K}$ составляет 1,32 раза.

Наличие в составе элементной базы электронных средств источников со значительными собственными тепловыделениями обуславливает анизотропность теплового поля на несущих конструкциях I и II уровня.

Локализация ЭРИ на условно одномерных несущих конструкциях позволяет уменьшить кривизну температурного профиля на порядок.

Формирование локальных групп ЭРИ на условно двухмерных несущих конструкциях позволяет увеличить температурную стабильность электронных средств до 8 %.

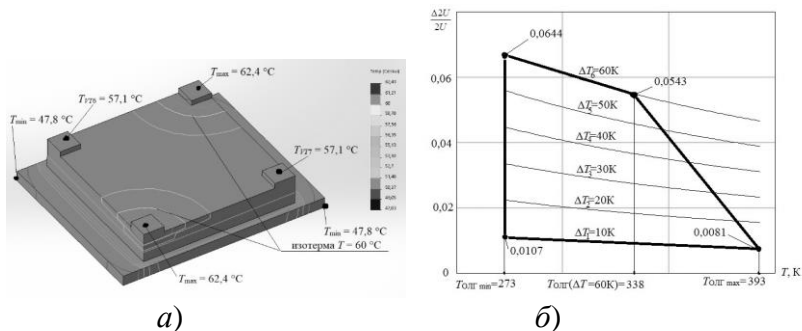


Рисунок 14 – Анизотропность теплового поля условно двумерных несущих конструкций

Формирование объемных локальных групп на трехмерных несущих конструкциях I уровня позволяет увеличить температурную стабильность объемных интегральных микросхем в 1,3 раза.

В итоге предложена минимизация функции температурной погрешности методом топологической термокомпенсации, которая позволяет улучшить температурную стабильность до 30 %. В отличие от известных методов схемотехнической термокомпенсации предлагается метод топологической термокомпенсации, отличающийся формированием локальных групп ЭРИ на несущих конструкциях электронных средств с анизотропными температурными полями.

Как было отмечено в первой главе диссертационного исследования, одним из перспективных методов термостабилизации является микротермостатирование. Глава 6 посвящена дальнейшему исследованию микротермостатирования, когда уравнение температурной погрешности содержит доминирующие коэффициенты влияния.

Показано, что уравнение температурной погрешности, полученное по методике вычислительного факторного эксперимента, может быть 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

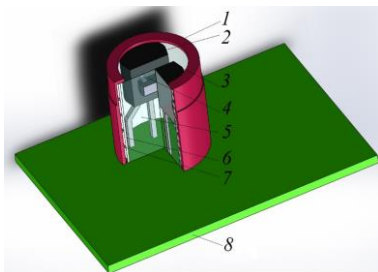
температуры статирования $\Delta T_{\text{СТ}}$, для величин номинальной температуры статирования $T_{\text{СТ}}$ и для величин перегрева внутри камеры микротермостата δT .

Экспериментальная часть исследования в этой главе посвящена сравнению температурной стабильности стабилизатора напряжения для двух случаев:

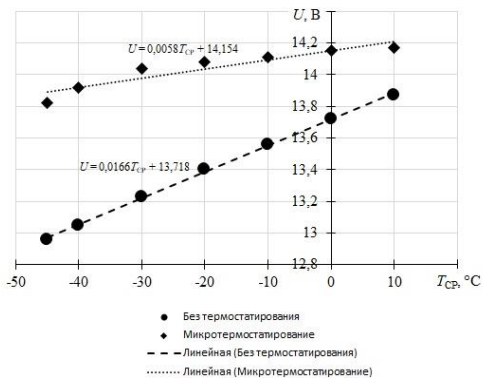
- отсутствие специальных методов термостабилизации;
- применение микротермостатирования по отношению к источнику опорного напряжения (стабилитрону) $VD5$.

Камера микротермостата (рисунок 15, а) представляет собой компактную цилиндрическую конструкцию диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Внутри камеры располагаются транзистор-нагреватель $BC337-25$, элемент термостатирования – стабилитрон $BZX84-C15$ и датчик температуры $LM35DZ$.

На координатной плоскости (рисунок 15, б) продемонстрирована температурная зависимость напряжения стабилизации для двух конструктивных исполнений стабилизатора напряжения: без применения термостатирования и с применением микротермостатирования стабилитрона $VD5$. Сравнение температурного коэффициента напряжения (ТКН) свидетельствует об увеличении температурной стабильности в 2,68 раза для конструктивного варианта с микротермостатированием.



а)



б)

Рисунок 15 – Сравнение температурной стабильности стабилизатора напряжения

Абсолютное отклонение температуры статирования в камере экспериментального микротермостата в диапазоне температур окружающей среды минус 45 ... +10 °С позволяет достигать погрешность напряжения стабилизации не хуже $\pm 3,5\%$.

Таким образом, уравнение температурной погрешности при заданных уровнях температурной погрешности выходного параметра ЭС служит для определения основных конструктивных параметров микротермостата.

В главе 7 показано, что в настоящее время задача синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы не решена. Используя разработанную методику синтеза SPICE-моделей отечественных ЭРИ с температурной зависимостью параметров в главе 3, в главе 7 представлены результаты решения задачи по автоматизации их создания.

Современные версии Cadence OrCAD позволяют конечному пользователю создавать оригинальные программные приложения с помощью встроенного в программный комплекс языка программирования скриптов (макросов) TCL/Tk Scripting. Механизм TCL/Tk Scripting дает неограниченные возможности для взаимодействия как с пользовательским интерфейсом схемного редактора Capture, так и с базой данных проекта.

В открытую архитектуру компонентов программного комплекса Cadence OrCAD (рисунок 16) внедрен оригинальный комплекс программ «Российский компонент», реализованный на языке высокого уровня TCL/Tk Scripting. После двукратного выбора (тип ЭРИ и наименование ЭРИ) пользователь переходит к процедуре автоматизированного синтеза SPICE-модели. Для этого с помощью экранных форм необходимо ввести массив паспортных данных на прототип создаваемой SPICE-модели. Затем с помощью программного кода TCL/Tk Scripting происходит генерация описания SPICE-модели. После этого комплекс программ записывает в текстовом виде созданную SPICE-модель в библиотеку SPICE-моделей.

В этой главе описан реализованный оригинальный комплекс программ «Российский компонент», отличающийся способностью генерировать в автоматическом режиме текстовые описания в формате SPICE для отечественной электронной компонентной базы всех видов исполнения, обеспечивает синтез неограниченного числа

образцов SPICE-моделей в рамках одного семейства ЭРИ с сохранением точности температурной зависимости их параметров. Комплекс программ позволяет исключить рутинные операции при создании математических моделей ЭРИ в исследованиях температурной стабильности ЭС.

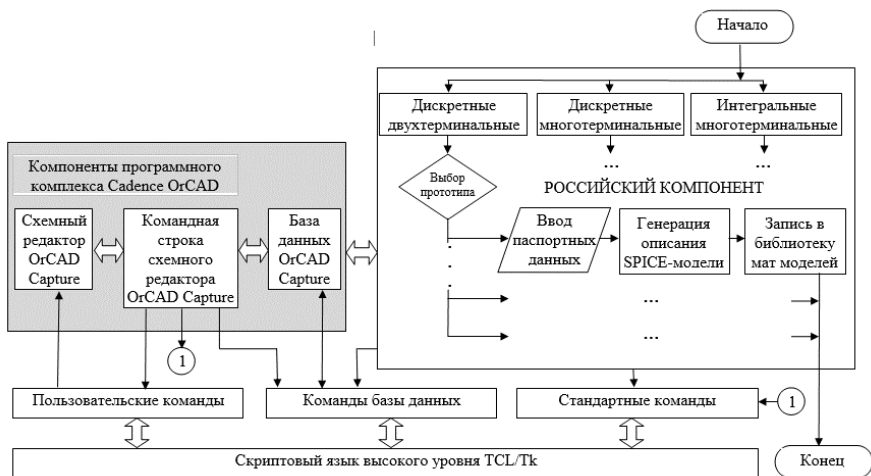


Рисунок 16 – Структурная схема комплекса программ «Российский компонент», выполненная на языке высокого уровня TCL/Tk Scripting

Оригинальный комплекс программ «Российский компонент» позволяет синтезировать неограниченное число образцов SPICE-моделей в рамках одного семейства ЭРИ с сохранением точности температурной зависимости их параметров. Комплекс программ позволяет исключить рутинные операции синтеза математических моделей ЭРИ, используемых для автоматизированных исследований температурной стабильности ЭС.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты:

1. Разработан модифицированный метод регрессионного анализа температурной стабильности ЭС для реализации вычислительного факторного эксперимента с применением широко известных программных комплексов схемотехнического моделирования OrCAD PSpice и Spectrum MicroCAP. Функциональные возможности этих программных комплексов позволяют проводить вычислительный

факторный эксперимент как для однопараметрических, так и для многопараметрических ЭРИ.

2. Решена задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ. Разработанная методика синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров практически пригодна для схемотехнического анализа в современных SPICE-симуляторах с целью последующего нахождения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности.

3. Разработаны методики и программные блоки для численного решения уравнения теплопроводности в одно-, двухмерной постановке в среде MathCAD, которые целесообразно применять для случаев конструкций ЭС в форме параллелепипедов. Разработаны программные блоки и методики по решению уравнения теплопроводности в трехмерной постановке в среде SolidWorks для случаев конструкций ЭС сложной, криволинейной формы.

4. Предложены оригинальные методики топологического позиционирования ЭРИ с целью обеспечения температурной компенсации в условиях термоанизотропности несущей конструкции ЭС. Применение модифицированного метода топологической термокомпенсации позволяет достичь заданной температурной стабильности ЭС в жестких условиях ограничений по использованию других методов термостабилизации.

5. Уравнение температурной погрешности пригодно для решения обратной задачи температурной стабильности.

6. Разработка комплекса программ «Российский компонент» для синтеза SPICE-моделей способствует сокращению материальных и временных ресурсов при формировании SPICE-моделей целесообразно применение средств автоматизации для генерации текстовых описаний.

Выполненная работа заключается в разработке перспективных подходов к проектированию бортовой радиоэлектронной аппаратуры, в развитии методов математического моделирования температурной стабильности, совокупность которых позволила решить научно-техническую проблему, имеющую важное хозяйственное значение в достижении заданных эксплуатационных характеристик электронных средств, включающих двухтерминальные дискретные, многотерминальные дискретные и многотерминальные интегральные

ЭРИ. В условиях жесткого импортозамещения предложенные методы математического моделирования температурной стабильности БКРА позволяют реализовать стратегические цели и задачи технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Основные публикации по материалам диссертации

Монографии и учебные пособия

1. Озеркин Д.В. Методология создания термозависимых SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы. Томск: Изд-во ТУСУР, 2020. 244 с.

2. Озеркин Д.В. Altium Designer. SolidWorks. Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. 280 с.

Статьи в зарубежных и отечественных журналах из списка Scopus

1. Starosek D.G., Ozerkin D.V., Tuev V.I., Ryapolova Y.V., Olisovec A.U., Ermolaev A.V. Investigation of Temperature Regime and Luminous Flux of Light-emitting Element of Light Emitting Diode Lamp // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015, Vol. 10, #16. Pp. 6944-6948.

2. Starosek D., Khomyakov A., Ozerkin D., Tuev V., Chulkov A. Fundamental Problem of Heat Transmission in the Closed Volume of Inert Gas // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 – Proceedings. Pp. 872-962.

3. Alekseev V., Rudzinsky V., Ushakov V., Ozerkin D. Automated Technology of Satellite Communication's Temperature-Controlled Device Designing // International Conference on Satellite Communications. ICSC, Proceedings of the 1996 2nd International Conference on Satellite Communications, ICSC'96, vol. 4. Pp. 120-123.

Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК

1. Ozerkin D.V., Rusanovskiy S.A. Monte Carlo Numerical Method in the Problem of Temperature Stability Analysis of Electronic Devices // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2018. Vol. 11. #5. Pp. 512 – 517.

2. Озеркин Д.В. Моделирование анизотропности температурного поля объемных интегральных микросхем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. №7. С. 657-665.

3. Озеркин Д.В., Русановский С.А. Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 2. С. 49–54.

4. Озеркин Д.В., Русановский С.А., Бондаренко В.О. Автоматизация проектирования SPICE-моделей резисторных блоков Б19К с позиции температурной стабильности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 90-97.

5. Озеркин Д.В., Русановский С.А. Методология моделирования транзисторных оптопар 3ОТ122 с учетом температурной стабильности // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 3(68). С. 76–94.

6. Озеркин Д.В., Бабешко В.В. Синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24. № 2. С. 185–196.

7. Озеркин Д.В., Русановский С.А. Регрессионный анализ в исследовании температурной стабильности электронных схем // Динамика сложных систем – XXI век. 2017. Т. 11. № 1. С. 65-72.

8. Озеркин Д.В., Чулков А.О. Повышение температурной стабильности выходного напряжения источника питания за счет анизотропности теплового поля его конструкции // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. №5. С. 13-24.

9. Озеркин Д.В., Бондаренко В.О. Применение метода микротермостатирования для повышения температурной стабильности бортовой электронной аппаратуры // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия «Приборостроение». 2020. №3 (132). С. 18-36.

10. Озеркин Д.В., Старосек Д.Г., Туев В.И. Топологическая термокомпенсация светодиодных линейных модулей филаментных ламп // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. № 6(726). С. 156-163.

Версия на английском языке (Scopus). Ozerkin D.V., Starosec D.G., Tuev V.I. Topological Thermocompensation for Light-Emitting Diode

Linear Modules of Filament Lamps // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 61. # 6. Pp. 1175-1184.

11. Озеркин Д.В. Расчет температурного поля многослойных несущих конструкций численными методами // Системы анализа и обработки данных. 2022. № 2 (86). С. 105–120.

Статьи в рецензируемых сборниках трудов

1. Мирзаев Х.М., Старосек Д.Г., Озеркин Д.В. Исследование нагревательного элемента газового термоанемометра // Новая наука: Опыт, традиции, инновации, 2016, №11-2. С. 118-121.

2. Кравцов Н.И., Шостак А.С., Озеркин Д.В. Интегрированная система контроля температуры электрорадиоэлементов печатного узла // «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDN-2016)». Труды XVI-ой Международной молодежной конференции, 2016. С. 230-231.

3. Алексеев В.П., Озеркин Д.В., Рудзинский В.П. Моделирование теплофизических процессов при оптимальном синтезе новых технических решений // IV Минский Международный форум «Тепломассообмен ММФ-2000», Т. 3. С. 306-312.

Патенты на изобретения и полезные модели

1. Озеркин Д.В. Проектирование SPICE-моделей резисторных сборок «Б19К» // Государственная регистрация программы для ЭВМ 2022663975 от 21.07.2022 г.

2. Козлов В.Г., Озеркин Д.В., Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры микросборок // Патент на изобретение RUS 2459231 от 30.09.2010 г.

3. Козлов В.Г., Алексеев В.П., Озеркин Д.В., Козлов Г.В. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок // Патент на изобретение RUS 2461047 от 05.07.2011 г.

4. Козлов В.Г., Озеркин Д.В., Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры элементов микросборок // Патент на изобретение RUS 2439746 от 01.06.2010 г.

5. Афонин К.Н., Вилисов А.А., Озеркин Д.В., Ряполова Ю.В., Солдаткин В.С., Старосек Д.Г., Туев В.И. Светодиодная лента для лампы // Патент на полезную модель RU 183304 U1, 17.09.2018.

6. Козлов В.Г., Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Микротермостат с позисторным нагревателем // Патент на изобретение RUS 2164709 от 29.04.1999 г.

Тезисы и доклады в трудах конференций

1. Бондаренко В.О., Озеркин Д.В. Синтез SPICE-моделей резисторных сборок Б19К при проектировании бортовой космической радиоаппаратуры // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 311 – 313.

2. Зырин И.Д., Шабловский А.В., Озеркин Д.В. Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы Российского производства // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2011». Томск. Издательство ТУСУР. 2011. С. 297-299.

3. Озеркин Д.В., Пепеляев А.В. Принципы формирования SPICE-моделей Российской электронной компонентной базы // Электронные средства и системы управления. 2010. №2. С. 11-14.

4. Мирзаев Х., Мирзаев Х., Тютюник С., Захаров Д., Старосек Д., Озеркин Д. Исследование движения потоков газа в лабораторном макете термоанемометра // Современные проблемы радиоэлектроники. Красноярск, издательство Сибирского федерального университета. 2016. С. 212-215.

5. Алексеев В.П., Белоусов А.В., Озеркин Д.В. Системное проектирование термоустойчивых бортовых радиотехнических устройств // 7-я международная науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-7-2001)». Барнаул: ТПУ. 2001. С.209-212.

6. Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Системная технология проектирования термоустойчивых бортовых радиотехнических устройств специального назначения // Материалы конференции «Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения». Омск. 2001. Т. 2. С. 315 – 317.

7. Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Использование типовых программ схемотехнического моделирования в конструкторском проектировании РЭС // Пятая Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск. 2000. Т. 5. С. 421 – 429.