

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(ТУСУР)

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

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

Томск - 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ	14
1.1 Исходные предпосылки	14
1.2 Прецизионная отечественная элементная база	21
1.2.1 Дискретные двухтерминальные ЭРИ	22
1.2.2 Дискретные многотерминальные ЭРИ	25
1.2.3 Интегральные многотерминальные ЭРИ	28
1.2.4 Выводы	33
1.3 Термокомпенсация	34
1.4 Микротермостатирование	37
1.5 Распространенные комплексы программ, пригодные для проектирования термостабильных электронных средств	40
1.6 Основные результаты	46
ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	49
2.1 Исходные предпосылки	49
2.2 Алгоритмизация нахождения уравнения температурной погрешности	54
2.3 Реализация вычислительного факторного эксперимента для многопараметрических ЭРИ	68
2.5 Основные результаты исследования	76
ГЛАВА 3. СИНТЕЗ SPICE-МОДЕЛЕЙ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ	78
3.1 Методика синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров	78
3.1.1 Синтез термозависимых SPICE-моделей двухтерминального типа	78
3.1.2 Синтез термозависимых SPICE-моделей многотерминального дискретного типа	88
3.1.3 Синтез термозависимых SPICE-моделей многотерминального интегрального типа	102
3.2 Обобщенная методика синтеза термозависимых SPICE-моделей	117
3.3 Основные результаты исследования	134
ГЛАВА 4. МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ	136
4.1 Исходные предпосылки	136
4.2 Метод конечных разностей для решения задач распределения температурного поля	138
4.3 Метод конечных элементов для решения задач распределения температурного поля	149
4.4 Программные средства реализации численных методов расчета температурного поля	155
4.5 Оценка погрешности расчета температурного поля	178
4.6 Основные результаты исследования	185
ГЛАВА 5. МИНИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ	187
5.1 Несущие конструкции электронных средств	187
5.2 Методики и эвристические алгоритмы метода топологической термокомпенсации	190

5.3 Результаты топологической термокомпенсации для условно одномерных несущих конструкций электронных средств	220
5.4 Результаты топологической термокомпенсации для условно двухмерных несущих конструкций электронных средств	225
5.5 Результаты моделирования топологической термокомпенсации для трехмерных несущих конструкций электронных средств	235
5.6 Основные результаты исследования	243
ГЛАВА 6. МИНИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ	245
6.1 Метод микротермостатирования	245
6.2 Методика вычислительного факторного эксперимента для решения обратной задачи температурной стабильности	248
6.3 Результаты применения метода микротермостатирования	262
6.4 Основные результаты исследования	271
ГЛАВА 7. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ СИНТЕЗА SPICE-МОДЕЛЕЙ ПО ПРОТОТИПАМ ЭРИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	273
7.1 Метод структурной декомпозиции электрорадиоизделий	273
7.2 Структура комплекса программ «Российский компонент» на основе синтеза SPICE-моделей электрорадиоизделий отечественной электронной компонентной базы	281
7.3 Основные алгоритмы комплекса программ «Российский компонент»	286
7.4 Синтез SPICE-моделей	290
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	295
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	299
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	311
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	317

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 схемотехнических 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 схемотехнических 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 бортовой 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 бортовых комплексов 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 надежных комплексов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического 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 бортовой радиоэлектронной аппаратуры актуальны и имеют большую практическую ценность.

В диссертационной работе поставлена и решена важная научно-техническая проблема – обеспечение температурной стабильности параметров 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.

**Цель и задачи исследования:**

**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** диссертационной работы заключается в следующем:

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 натурного 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 натурного 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 аппаратуры.

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.** Научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации получены автором самостоятельно. Работы [1, 2, 3]

выполнены автором единолично. В работах [4-15], написанных в соавторстве, автору принадлежит от 70 до 80 % общего объема представленного материала, а именно: в публикациях [4, 6, 7] представлены методологические основы синтеза математических моделей отечественной электронной компонентной базы для случаев дискретных двухтерминальных ЭРИ, дискретных многотерминальных ЭРИ, интегральных многотерминальных ЭРИ, а также обобщенный случай синтеза термозависимых математических моделей; в публикациях [1, 10, 11] рассмотрены методы, методики, алгоритмы топологической термокомпенсации для разных компоновочных решений на несущих конструкциях ЭС: одномерная, двумерная и трехмерная комплектация ЭРИ; в публикации [12] показан перспективный метод термостабилизации – микротермостатирование и его непосредственная связь со структурной математической моделью температурной стабильности – уравнением температурной погрешности; в публикациях [8, 9] рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты регрессионного анализа электронных схем с позиций температурной стабильности и особенности реализации вычислительного факторного эксперимента, в публикациях [5, 13-15] продемонстрированы программно-алгоритмические средства автоматизации для синтеза математических моделей ЭРИ с заданными температурными зависимостями. Автор непосредственно участвовал в разработке математических моделей отечественной электронной компонентной базы, применяемой при разработке радиоаппаратуры; алгоритмов комплектования термокомпенсированных локальных групп ЭРИ для различных пространственных случаев их расположения на несущих конструкциях ЭС; проведении теоретических и экспериментальных исследований, в обработке количественных и качественных данных. Под его руководством и непосредственном участии создан унифицированный ряд светодиодных филаментных нитей с минимизацией кривизны температурного профиля, которые внедрены в массовое производство на ООО «Руслед».

#### **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 свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ, 4 патентах на изобретения, патенте на полезную модель.

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

#### **Апробация результатов работы.**

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.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, семь глав, заключение, список сокращений и список литературы из 162 наименований. Диссертация изложена на 321 странице машинописного текста, содержит 168 рисунков, 18 таблиц, 2 приложения.

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

- генеральному директору АО «НПЦ «Полюс» Сергею Александровичу Русановскому;
- техническому директору ООО «ПСБ Софт» Александру Игоревичу Акулину;
- начальнику испытательного технического центра АО «НПЦ «Полюс» Владимиру Васильевичу Вавилову;
- сотрудникам АО «НПЦ «Полюс» и АО ИСС, оказавшим практическую поддержку в проведении экспериментальных исследований.

## ГЛАВА 1. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

Цель данной обзорной главы – исследование известных практических способов термостабилизации ЭС с последующим обоснованием системного принципа синтеза термостабильных ЭС.

### 1.1 Исходные предпосылки

Сначала рассмотрим базовые понятия, характерные для предстоящего исследования. Большой энциклопедический словарь «Физика» под редакцией А.М.Прохорова [16] дает определение понятию «температура». **Температура** (от лат. *temperatura* – надлежащее смещение, нормальное состояние) – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура количественно выражает интуитивное представление о различной степени нагретости тел.

Трактовка понятия «стабильность», как общекультурного термина, дается в свободной универсальной энциклопедии «Википедия» [17]. **Стабильность** – способность системы функционировать, не изменяя собственную структуру и находиться в равновесии. Это определение должно быть неизменным во времени.

ГОСТ Р 52562-2006 [18] дает определение понятию «электрорадиоизделие». **Электрорадиоизделие (ЭРИ)** – изделие (устройство), предназначенное для использования, производства, преобразования, распределения и передачи электромагнитной энергии.

Согласно ГОСТ Р 52003-2003 [19] **радиоэлектронное средство (РЭС)** – изделие и/или его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники. Возникновение понятия «радиоэлектронное средство» связано с тем, что несмотря на существование двух различных областей знаний (радиотехника и электроника), их реализация в технических средствах обычно происходит совместно и неразрывно, образуя единые комплексные принципы действия. Следует отметить, что Федеральный закон от 07.07.2003 №126-ФЗ «О связи» определяет РЭС иначе – как технические средства, предназначенные для передачи и/или приёма радиоволн, состоящие из одного или нескольких передающих и/или приёмных устройств либо комбинации таких устройств и включающие в себя вспомогательное оборудование.

Соединяя эти базовые понятия, можно утверждать, что температурная стабильность ЭРИ – это способность электронной компонентной базы, входящей в состав радиоэлектронных

средств, сохранять во времени неизменными свои физические параметры относительно температуры окружающей среды.

Широко известна классификация радиоэлектронных средств по таким признакам как условия размещения и условия эксплуатации. Так в [20] приводится классификация РЭС по условиям размещения:

- стационарные;
- возимые на наземных транспортных средствах;
- возимые на речных и морских судах;
- носимые и портативные;
- самолетные и ракетно-космические.

Упомянутый в классификации тип РЭС – ракетно-космические – будет объектом нашего дальнейшего исследования. Заметим, что в современной научно-технической литературе термины «радиоэлектронное средство» и «радиоэлектронная аппаратура» стали равнозначными. Следовательно, понятия «ракетно-космические радиоэлектронные средства» и «бортовая космическая радиоаппаратура» (БКРА) также можно считать тождественными. БКРА имеет ряд особенностей [20], среди которых:

- высокая безотказность работы;
- высокая ремонтпригодность в предстартовый период;
- большие ударные нагрузки;
- совместное воздействие вибраций и линейных ускорений при старте;
- явление термоударов на поверхности обшивки;
- длительная сохранность при многолетнем хранении;
- особая ограниченность массогабаритных показателей из-за минимизации стартовой массы носителя.

Кроме невесомости специфическим воздействием на БКРА является естественное космическое излучение потоков электронов и протонов с энергией более 1 МэВ. Для повышения надежности работы БКРА используют специальные схемотехнические и конструктивные методы: применение радиационно-стойкой электронной компонентной базы, термостатирование, термокомпенсация, хранение в специальных контейнерах с инертным газом и пр.

Рассмотрим теперь другой распространенный классификационный признак РЭС – по условиям эксплуатации. Этот признак регламентирует ГОСТ 15150-69 [21], который различает 10 климатических исполнений РЭС. Климатические исполнения зависят от макроклиматических районов базирования РЭС, а также от наличия/отсутствия моря. Наиболее широкий температурный диапазон окружающей среды (предельные рабочие значения от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ )

характерен для категории «О» – общеклиматическое исполнение. Применительно к летательным аппаратам, стандарт также регламентирует среднее и нижнее рабочие значения атмосферного давления в зависимости от высоты над уровнем моря. В частности, группы пониженного давления «л», «м», «н», «о», «п» характерны для эксплуатации РЭС на высотах космического пространства – от 91,7 км и до дальнего космоса. Развитием [21] является ГОСТ 15543.1-89 [22], в котором в удобной табличной форме сопоставлены виды климатического исполнения РЭС и граничные значения основных факторов окружающей среды: температуры воздуха, относительной влажности и атмосферного давления.

Условия эксплуатации РЭС неразрывно связаны с понятием «вредные воздействующие факторы». ГОСТ 26883-86 [23] дает определение: **внешний воздействующий фактор (ВВФ)** – явление, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процесс эксплуатации. В этом же стандарте выделяют пять разновидностей термических ВВФ:

- тепловой удар;
- радиационное разогревание;
- электрическое разогревание;
- ультразвуковое разогревание;
- аэродинамический нагрев.

Стойкость РЭС к ВВФ определяется на основе испытаний, которые регламентируются ГОСТ 30630.0.0-99 [24] в части общих требований и ГОСТ 30630.2.1-2013 [25] по отношению к климатическим ВВФ. Помимо прочего, в [22] в табличной форме перечислены термические испытания РЭС (№№201 – 205) и ссылка на подробное описание, содержащееся в [25]:

- испытание на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации (№201);
- испытание на воздействие верхнего значения температуры воздуха при транспортировании и хранении (№202);
- испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации (№203);
- испытание на воздействие нижнего значения температуры воздуха при транспортировании и хранении (№204);
- испытание на воздействие изменения температуры среды (№205).

Каждое из перечисленных испытаний, в свою очередь, насчитывает несколько методов в зависимости от специфики работы РЭС.

Термические испытания применимы не только к РЭС. Так ГОСТ 20.57.406-81 [26] распространяет свое действие на изделия электронной техники и устанавливает методы их испытаний. В Приложении к этому стандарту перечислены 36 типов ЭРИ, которые могут быть подвергнуты, в том числе, испытаниям №№201 – 205. В стандарте приводятся методические рекомендации по организации и проведению термических испытаний:

- определение температуры контролируемого участка изделия;
- определение минимально допустимого расстояния между тепловыделяющими изделиями и стенкой камеры;
- указания по размещению в полезном объеме камеры средств измерений температуры воздуха;
- определение минимально допустимого расстояния между тепловыделяющими изделиями;
- определение зависимости термочувствительного параметра изделия от температуры среды.

Помимо нормативно-технической документации для РЭС общего применения, существуют специализированные стандарты непосредственно для БКРА. ГОСТ Р 53802-2010 [27] дает определение понятию «бортовая аппаратура космического аппарата». **Бортовая аппаратура космического аппарата** – совокупность электрических, электромагнитных, электронных и оптических приборов и устройств, размещаемых на борту космического аппарата.

Требования к содержанию и построению разделов технического задания на разработку БКРА регламентирует ГОСТ Р 55996-2014 [28]. В подразделе «Требования живучести и стойкости к ВВФ» устанавливаются требования, обеспечивающие способность изделия выполнять свои функции в условиях воздействия окружающей среды, сопрягаемых и других объектов, а также в аварийных ситуациях. В частности, устанавливаются требования к воздействию климатических условий – колебаний и предельных значений температуры. В подразделе «Конструктивные требования» стандарт устанавливает совокупность требований к конструкции БКРА, соблюдение которых обеспечивает соответствие изделия его целевому назначению и заданному уровню качества в процессе создания, производства и эксплуатации. Среди прочих конструктивных требований – температурные требования к конструкции создаваемого изделия.

ГОСТ Р 56468-2015 [29] устанавливает общие технические требования к системам обеспечения теплового режима (СОТР) БКРА. Исходя из способа терморегулирования оборудование БКРА подразделяется на группы:

- А – оборудование, тепловой режим которого обеспечивается пассивными средствами;
- В – оборудование, тепловой режим которого обеспечивается нагревателями;

- С – оборудование, тепловой режим которого обеспечивается жидкостным контуром.

В стандарте вводится понятие «гарантированный температурный диапазон».

**Гарантированный температурный диапазон** – прогнозируемая температура элементов конструкции, аппаратуры или оборудования при наихудших случаях летных условий плюс (для максимальной температуры) или минус (для минимальной температуры) неопределенности прогноза. Различается два вида температурных диапазонов БКРА: квалификационный и приемочный. *Квалификационный температурный диапазон* элементов конструкции БКРА должен иметь верхний гарантированный температурный предел, который минимум на 10 °С выше, чем максимальная гарантированная температура, и нижний предел, который минимум на 10 °С ниже, чем минимальная гарантированная температура. *Приемочный температурный диапазон* должен иметь верхний предел, который минимум на 5 °С выше, чем максимальная гарантированная температура, и нижний предел, который минимум на 5 °С ниже, чем минимальная гарантированная температура.

В стандарте отмечается, что техническое задание на СОТР БКРА должно содержать такие требования как:

- температурные диапазоны;
- температурная стабильность;
- температурная равномерность;
- тепловые потоки;
- распределение тепловыделений;
- распределение телеметрических и командных параметров;
- распределение массы оборудования и СОТР в целом.

Разработка нормативно-технической документации для БКРА постоянно продолжается, сообразно научно-техническому прогрессу и задачам заказчиков. Головной институт Госкорпорации «Роскосмос» «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИмаш) периодически выпускает информационные указатели документов по стандартизации ракетно-космической техники. В указателях приводятся, в том числе, сведения о ГОСТах, находящихся в стадии разработки (проекты ГОСТов). Например, в указателе ИУС-2-2019 [30] можно обнаружить такие проекты, связанные с тематикой данного исследования, как:

- ракетно-космическая техника. Терморегулирующие покрытия для космических аппаратов. Технические требования;
- системы космические. Измерения терморadiационных характеристик терморегулирующих материалов и покрытий;
- ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Общие положения;

- ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Порядок выбора, применения и проведения испытаний;

- системы космические. Методы измерения коэффициента поглощения солнечного излучения и коэффициента теплового излучения терморегулирующих покрытий и материалов.

Рассмотрим еще один аспект, связанный с высокими эксплуатационными показателями БКРА и регламентируемый соответствующими стандартами – деление на категории качества применяемой электронной компонентной базы. ГОСТ Р 56648-2015 [31] распространяет свое действие на электронную компонентную базу отечественного производства (ОП) и иностранного производства (ИП) для разработки, производства и ремонта ракетно-космической техники гражданского и коммерческого назначения. В нем вводится понятие «категория качества электронной компонентной базы». **Категория качества электронной компонентной базы** – градация качества изделий электронной компонентной базы иностранного и отечественного производства, характеризуемая уровнем надежности и, при необходимости, другими эксплуатационными свойствами, обуславливающими пригодность их применения в аппаратуре определенного назначения. Стандарт различает несколько категорий качества электронной компонентной базы (рисунок 1.1):

- электронная компонентная база иностранного производства без заданного уровня надежности (качества);

- *ВП* – электронная компонентная базы отечественного производства, для которой устанавливаемый в конструкторской и технологической документации, стандартах и технических условиях уровень требований надежности и стойкости к другим эксплуатационным характеристикам, а также к обеспечению и контролю качества обуславливает пригодность ее применения в аппаратуре, отказ которой ведет к существенным последствиям, ремонт и замену которой осуществляют на уровне ячеек и блоков;

- *ОС* – электронная компонентная база отечественного производства повышенного уровня качества относительно электронной компонентной базы категории качества *ВП*, обеспечивающая повышенную надежность аппаратуры, отказ которой ведет к катастрофическим последствиям, ремонт и замена которой труднодоступны или невозможна;

- *ОСД* – электронная компонентная база отечественного производства повышенного уровня качества, изготавливаемая, как правило, в порядке, предусмотренном для электронной компонентной базы категории качества *ОС*, с учетом дополнительных требований, установленных в конструкторской и технологической документации и обеспечивающих заданный уровень деградационных процессов в электронной компонентной базе отечественного производства при длительных сроках активного функционирования;

- *ОСМ* – электронная компонентная база отечественного производства повышенного уровня качества, изготовленная, как правило, в порядке, предусмотренном для электронной компонентной базы категории качества *ОС*, и поставляемая малыми партиями;

- *Н* – совокупность бескорпусных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем отечественного производства повышенного уровня качества и надежности.

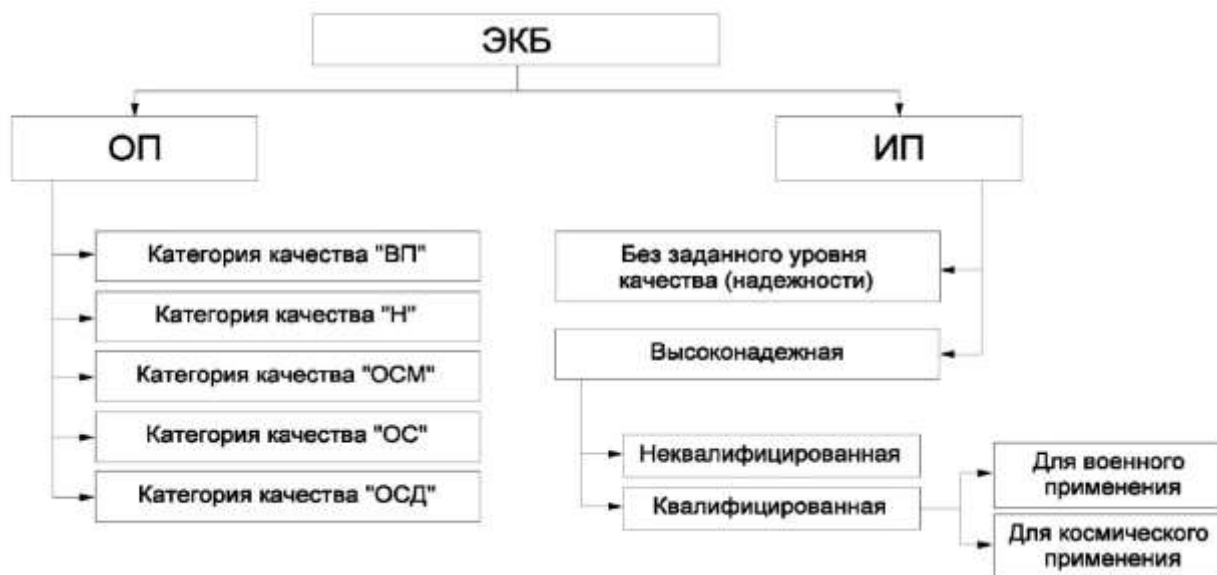


Рисунок 1.1 – Классификация электронной компонентной базы по категориям качества

В отличие от [43] Государственный классификатор стандартов Российской Федерации определяет категории качества не только для ракетно-космической техники. Так, согласно классификатору:

- приемка с 1 по 3 применяется для оценки качества изделий гражданского назначения;
- приемка 5 применяется для оценки качества изделий в наземной, морской и авиационной аппаратуре военного назначения и двойного применения;
- приемка 6 применяется для оценки качества изделий на водном транспорте и технике;
- приемка 7 и 8 применяется для оценки качества изделий в авиационной технике;
- приемка 9 применяется для оценки качества изделий в космической и атомной технике.

Самая распространенная из перечисленных – это приемка 1, она же приемка *ОТК* (отдела технического контроля).

Проведенный анализ нормативно-технической документации по теме исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Все многообразие государственных стандартов, регламентирующих жизненный цикл РЭС, можно разделить на две категории: общего применения и имеющие узкую направленность для БКРА.



2. В процессе эксплуатации БКРА испытывает влияние комплекса вредных воздействующих факторов, среди которых можно выделить для дальнейшего исследования группу термических воздействий: тепловой удар, радиационное разогревание, электрическое разогревание, ультразвуковое разогревание, аэродинамический нагрев.

3. Техническое задание на СОТР БКРА устанавливает требования к следующим теплофизическим параметрам: температурные диапазоны, температурная стабильность, температурная равномерность, тепловые потоки, распределение тепловыделений.

4. Электронная компонентная база, применяемая в БКРА, как правило, имеет градацию по категориям качества. Номенклатура отечественной ЭКБ повышенного качества и надежности характеризуется категориями: *ВП, ОС, ОСМ, ОСД, Н*.

## 1.2 Прецизионная отечественная элементная база

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  $\gamma$  следует определять в зависимости от того, во сколько раз увеличивается трудоемкость синтеза модели при увеличении числа ее входов на единицу [32]. 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.

Приведенное деление содержит ряд условностей. Например, класс ЭРИ «блок резисторов» будем относить к первой категории, несмотря на то, что блок имеет множество терминалов (выводов). Здесь дополнительным фактором является наличие во внутренней структуре этого класса ЭРИ функционально автономных единиц – резистивных элементов. Представители класса ЭРИ «сборка транзисторная» могут быть отнесены либо ко второй категории (дискретные многотерминальные), либо к третьей (интегральные многотерминальные). Здесь также дополнительным определяющим фактором выступает внутренняя структура ЭРИ. Сборка

транзистора, состоящая из независимых, несоединенных друг с другом элементов, будет относиться ко второй категории. Сборка транзисторов, образующая функционально законченную электрическую схему, будет относиться к третьей категории.

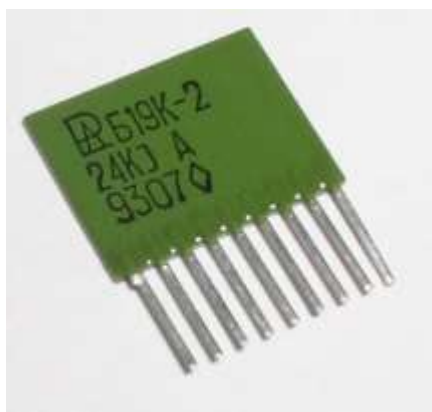
### 1.2.1 Дискретные двухтерминальные ЭРИ

АО «**Контакт**» (в прошлом Марийский завод радиодеталей, г. Йошкар-Ола) основан в 1964 г. как специализированное предприятие по изготовлению проволочных переменных и постоянных резисторов [33]. В 1965 году освоено производство непроволочных переменных резисторов. Приказом министерства электронной промышленности 20 июня 1969 года Марийский завод радиодеталей переименован в Марийский завод «Контакт». Указом Президиума Верховного Совета РСФСР от 1972 года заводу присвоено звание имени 50-летия СССР. Основным видом деятельности предприятия с момента создания являлось производство резисторов. С 1965 года аккредитовано представительство заказчика, подчиненное Министерству обороны РФ. Приемка и отгрузка продукции ведется в соответствии с требованиями действующих стандартов. Система менеджмента качества АО «Контакт» сертифицирована и соответствует требованиям ГОСТ РВ 15.002-2003, РД В 319.015-2006, ГОСТ Р ИСО 9001-2001.

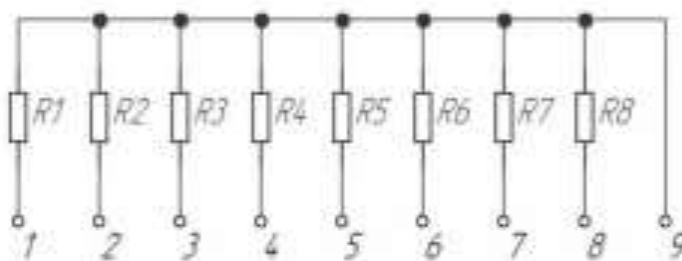
Типичными представителями продукции АО «Контакт» являются резисторные блоки Б19К (рисунок 1.2, *a*), изготавливаемые по АДПК.431413.000 ТУ. Резисторные блоки предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсных режимах. Интервал рабочих температур от  $-60$  до  $+85$  °С, ТКС для резисторов сопротивлением 510 Ом и выше составляет  $\pm 250 \cdot 10^{-6}$  °С $^{-1}$ . Семейство резисторных блоков Б19К насчитывает 34 варианта исполнения, отличающихся электрической схемой соединения, номинальным сопротивлением резисторов, отклонением номинального сопротивления. На рисунке 1.2, *б* изображена электрическая схема варианта Б19К-2.

Научно-исследовательский институт «**Гириконд**» (г. Санкт-Петербург) [34] был основан в 1939 году и стал родоначальником новой подотрасли – конденсаторостроения. За эти годы предприятие прошло целый ряд этапов в своем развитии от НИИ-34 до АО «НИИ «Гириконд», всегда оставаясь одним из головных предприятий отрасли. Наряду с конденсаторостроением в институте получил развитие целый ряд важнейших направлений в области пассивных компонентов, в первую очередь, таких как нелинейные полупроводниковые резисторы, помехоподавляющие фильтры, прецизионные непроволочные потенциометры,

фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы, специальные материалы и т.д. На протяжении 80-летней научно-технической деятельности институт продолжал заниматься разработкой традиционных видов своей продукции – конденсаторов и нелинейных полупроводниковых резисторов. Сегодня основная задача института – разработка конкурентоспособных изделий, соответствующих мировому уровню. Интеллектуальная собственность института составляет 45 патентов РФ и 1500 авторских свидетельств СССР на изобретения. Изделия отмечены более чем 500 медалями различных выставок и ярмарок, из них 31 золотой. АО «НИИ «Гириконд» входит в состав холдинга «Российская электроника» и является базовым предприятием радиоэлектронного комплекса РФ в области конденсаторов и нелинейных полупроводниковых резисторов. Институт в настоящее время разрабатывает и производит электронные компоненты, датчики и приборы, как универсального применения, так и уникальные изделия для специфических и экстремальных условий эксплуатации (для СВЧ-диапазона частот, для работы при повышенных температурах и механических нагрузках и др.) и материалы для них.



а



б

Рисунок 1.2 – Блок резисторный Б19К-2

К новинкам продукции АО «НИИ «Гириконд» можно отнести керамический конденсатор К10-83 (рисунок 1.3, а), изготавливаемый по АЖЯР. 673511.008 ТУ. Предназначен для работы в режимах постоянного, переменного и пульсирующего напряжения. Интервал температур при эксплуатации от  $-60$  до  $+125$  °С. Для группы МП0 зависимость емкости от температуры имеет линейный характер и не превышает  $\pm 1$  % во всем диапазоне рабочих температур (рисунок 1.3, б).

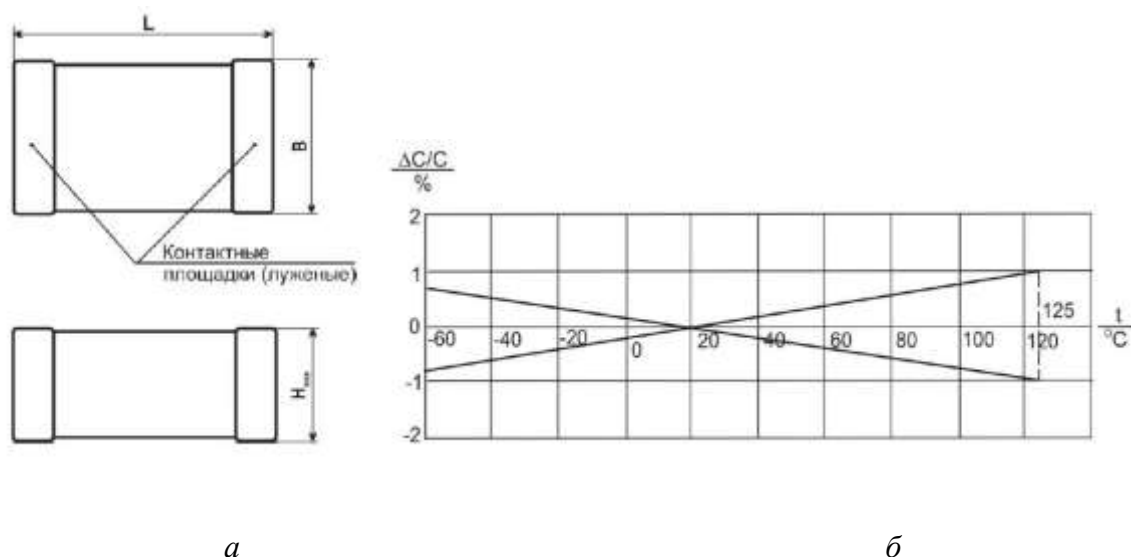


Рисунок 1.3 – Конденсатор керамический К10-83

АО «Завод «Метеор» (г. Волжский) – ведущее предприятие российской радиоэлектронной промышленности, специализируется на разработке и производстве кварцевых резонаторов, генераторов и фильтров [35]. Завод был основан в 1959 году. Первой продукцией стал кварцевый резонатор «Астра» уже на следующий год. На «Метеоре» впервые в СССР было освоено производство резонаторов типа КБ (НС-27/У) и КА (НС-29/У).

К концу 1980-х годов завод «Метеор» оставался самым крупным в стране производителем кварцевых резонаторов и фильтров, которыми комплектовалось более 50% производимой радиоаппаратуры в стране. В 1989 г. на предприятии работало 5 500 человек (что составляло более 7 % трудоспособного населения города), предприятие являлось одним из градообразующих. Продукцией завода комплектовались и комплектуются в настоящее время космические корабли, воздушные, надводные и подводные суда, ракетные установки. Завод обеспечивает сквозной цикл от проектирования до серийного производства кварцевых резонаторов, фильтров и генераторов, включая изготовление кристаллических элементов и корпусов изделий.

АО «Завод «Метеор» имеет лицензии Министерства экономики РФ на разработку и производство изделий пьезоэлектроники. Система качества сертифицирована в соответствии с требованиями систем сертификации Военэлектронсерт и ISO 9001.

В номенклатуре продукции завода «Метеор» можно выделить семейство кварцевых резонаторов К1 (рисунок 1.4, а), изготавливаемых по РЦЗ.382.255 ТУ (приемка ВП). Диапазон номинальных частот на 1 гармонике от 5 до 20,5 МГц. Рабочий диапазон температур составляет

от  $-60$  до  $+100$  °С. Температурная нестабильность частоты при этом не превышает  $\pm 40 \cdot 10^{-6}$  (рисунок 1.4, б).

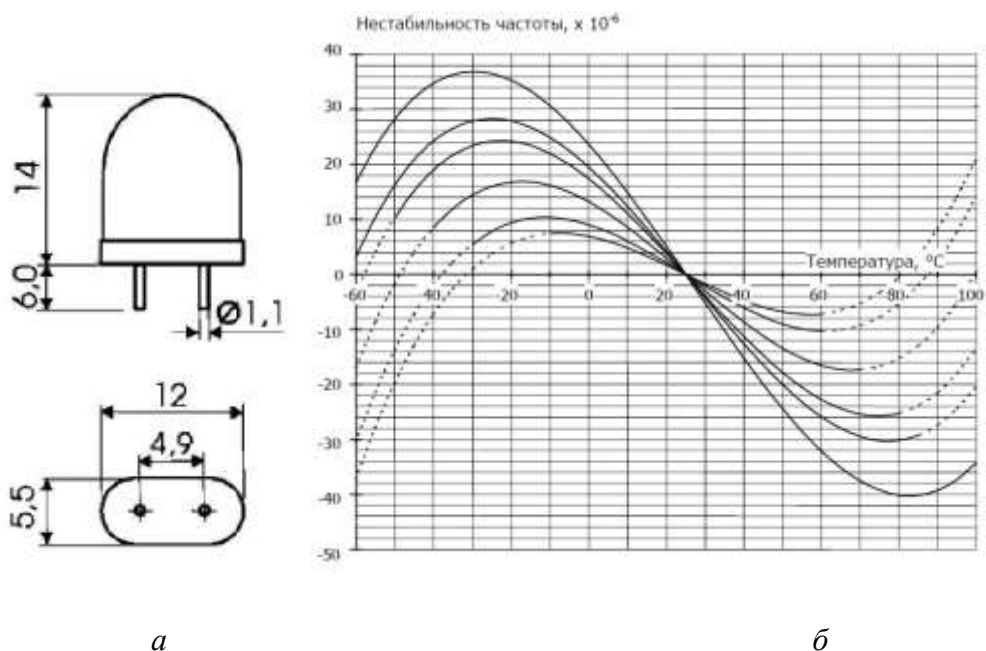


Рисунок 1.4 – Резонатор кварцевый вакуумный К1

### 1.2.2 Дискретные многотерминальные ЭРИ

АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов – сборка» (ВЗПП-С) [36] является одним из крупнейших поставщиков элементной базы для предприятий-изготовителей радиоэлектронной продукции. Продукция используется в более чем 450 предприятиях России и стран ближнего зарубежья. Предприятие образовано в 2002 году на базе имущественного комплекса ЗАО «ВЗПП-Микрон». В свою очередь, «ВЗПП-Микрон» создано в 2000 году на базе цехов кристалльного производства НПО «Электроника». Совместно с другими предприятиями российской микроэлектроники входит в состав дивизиона «Микроэлектронные решения» группы компаний «РТИ Системы».

Основная серийно-выпускаемая продукция включает в себя более 900 типонаименований: транзисторные сборки; логические ИС и ПЛИС; мощные  $n$ - и  $p$ -канальные полевые транзисторы; IGBT; драйверы; мощные диоды Шоттки; высоковольтные быстровосстанавливающиеся диоды; выпрямительные мосты на основе мощных диодов; мощные ВЧ и СВЧ транзисторы; силовые модули на основе полевых транзисторов и диодов; стабилизаторы напряжения.

Представителями семейства многотерминальных дискретных ЭРИ, выпускаемых на предприятии, являются сборки транзисторные 2Т689АС и 2Т690АС структур  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$ ,



А. Выпускаются на фиксированные напряжения 5, 6, 8, 9, 10, 12, 18, 20, 24, 27 В. Оборудованы встроенной защитой от перегрузки по току, короткому замыканию и перегрева. Разность напряжений вход/выход – 2,5 В. Рассеиваемая мощность для корпусов 4116.3 и КТ-28-2 – 2 Вт (рисунок 1.6, а, б), для корпуса КТ27-2 – 1 Вт (рисунок 1.6, в). Выпускаются в том числе с приемкой ОС по БКО.347.397 СТУ и с приемкой ОСМ по БКО.347.098 ТУ7. Приборы рассчитаны на длительную эксплуатацию в жестких условиях при температуре окружающей среды от –60 до +125 °С.

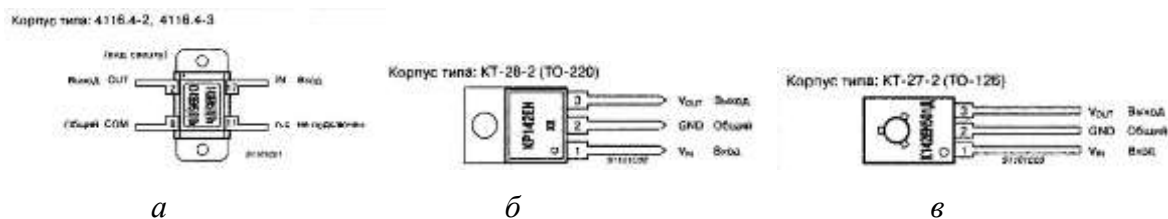


Рисунок 1.6 – Стабилизаторы положительного напряжения 142ЕН8

АО «Оптрон» выпускает также дискретные многотерминальные ЭРИ [38]. Среди прочего – семейство оптопар транзисторных ЗОТ122 (рисунок 1.7, а). Оптопара состоит из кремниевого планарного составного транзисторного приёмника и меза-эпитаксиального инфракрасного диодного излучателя (рисунок 1.7, б). Оптопары выпускаются по аАО.339.200 ТУ в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами. Предназначены для коммутации цепей постоянного тока с гальванической развязкой между входом и выходом. Входное напряжение – не более 1,6 В. Выходное остаточное напряжение – не более 1,9 В. Диапазон рабочих температур –60 до +80 °С.

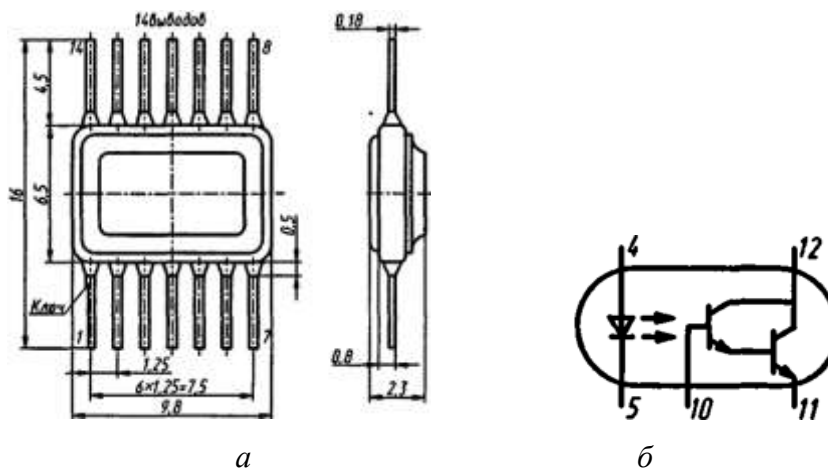


Рисунок 1.7 – Оптопара транзисторная ЗОТ122

### 1.2.3 Интегральные многотерминальные ЭРИ

АО «Экситон» (г. Павловский Посад, Московская область) выпускает более 600 типов интегральных схем и полупроводниковых приборов [39]. 30 ноября 1943 г. Государственный Комитет Обороны СССР постановил организовать специализированный завод по производству конденсаторов и резисторов в г. Павловский Посад. Это постановление стало точкой отсчета в истории развития завода «Экситон». В военный, 1944 год, завод стал выпускать бумажные, слюдяные, специальные конденсаторы, непроволочные резисторы. К 1957 году на заводе были созданы первые поточно-механизированные линии по производству слюдяных, стеклоэмалевых конденсаторов всех типов. В 1966 году завод осваивает производство микромодулей, переходит к производству сложных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении. В 1967 завод освоил 10 типов толсто пленочных гибридных интегральных микросхем серии «Тропа», разработанных НИИТТ (г. Зеленоград), начато создание массового производства толсто пленочных и тонко пленочных микросхем различных серий. В 1975 г. завод «Экситон» был включен в число предприятий-разработчиков полупроводниковых изделий (КМОП и ТТЛ микросхем). С 1975 по 1992 год в ОКБ «Экситон» были разработаны и внедрены в серийное производство 169 типов полупроводниковых микросхем. Собственные разработки ОКБ завода были технологичны и обеспечивали более высокий процент выхода микросхем в массовой серии 564.

Производственная программа ОКБ «Экситон», помимо прочего, представлена микросхемой 1564ЛП11 ЭП. Это шесть повторителей с отдельными элементами управления входами по 2-м и 4-м повторителям и тремя состояниями на выходе (рисунок 1.8, *а*). Микросхема изготавливается по АЕЯР.431200.424-18 ТУ; с использованием процесса 3 мкм КМОП. Микросхема предназначена для применения в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения. Диапазон напряжения питания составляет от 2 до 6 В. Номинальный диапазон рабочих температур от  $-60$  до  $+125$  °С. Время задержки распространения сигнала – не более 27 нс. Максимальное выходное напряжение низкого уровня – не более 0,1 В. Минимальное выходное напряжение высокого уровня - не менее 1,9 В. Микросхема обладает стойкостью к воздействию спецфакторов. В зависимости от требований заказчика возможны варианты конструктивного исполнения: в корпусе 402.16-33НБ (рисунок 1.8, *б*), либо кристаллы без корпуса и без выводов.



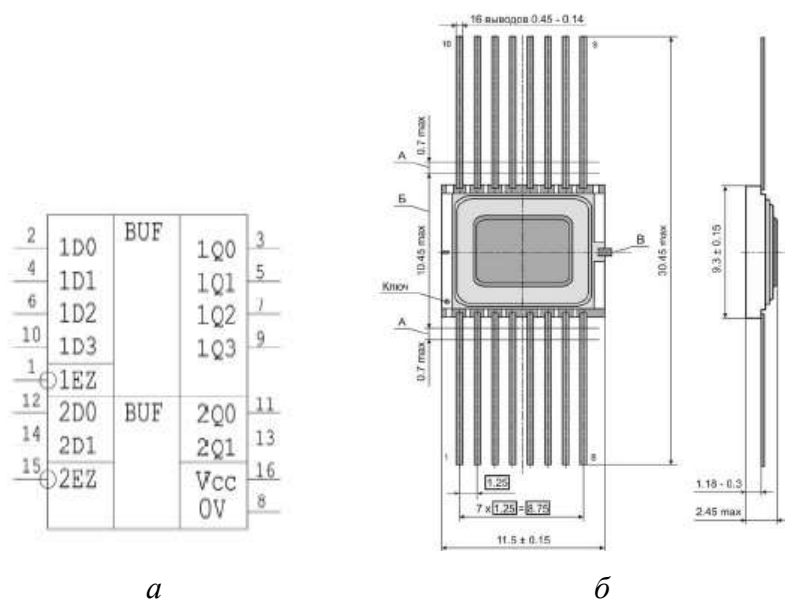


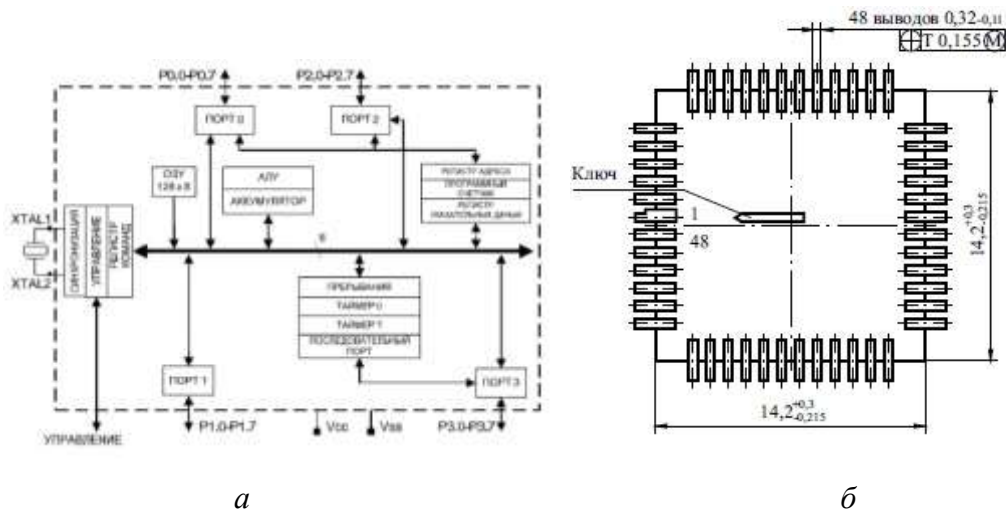
Рисунок 1.8 – Повторитель с отдельными элементами управления входами 1564ЛП11 ЭП

История АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (НИИЭТ) (г. Воронеж) берет свое начало в 1961 году, когда при Воронежском заводе полупроводниковых приборов (ВЗПП) было основано Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) [40]. Основной задачей предприятия в первые годы его становления было создание и освоение серийного выпуска полупроводниковых приборов (диодов и транзисторов) на основе германия и кремния. Одним из знаковых достижений ЦКБ при ВЗПП стала работа по разработке первой отечественной интегральной схемы.

В период 1967-1973 гг. было выполнено около 20 НИР и ОКР по созданию и внедрению в производство быстродействующих и маломощных ИС малой и средней степени интеграции серий 106, 134, 128, 149, 177. Сюда входили схемы транзисторно-транзисторной логики, динамические логические схемы, линейные схемы и т.д. В 70-е годы на предприятии были выполнены разработки цифровых ИС серий 531, 530, а в 80-е – биполярных БИС серии 1804 на основе инжекционной логики. Одним из основных направлений научно-технической деятельности предприятия становится разработка микроконтроллеров и однокристальных микро-ЭВМ.

В 1986 г. ФГУП «НИИЭТ» приказом по Министерству электронной промышленности был определен головным предприятием отрасли по созданию цифровых процессоров обработки сигналов (DSP) для специальной техники. В начале 90-х годов было освоено производство 8-разрядных микроконтроллеров Н1830ВЕ31, Н1830ВЕ51 с архитектурой 8051 (Intel), а в 1999 г. была начата разработка первого 16-разрядного микроконтроллера с тактовой частотой 12-20 МГц на основе ядра MCS-96. Результатом явилось освоение выпуска микроконтроллеров 1874ВЕ36, Л1874ВЕ36, которые положили начало серии 1874.

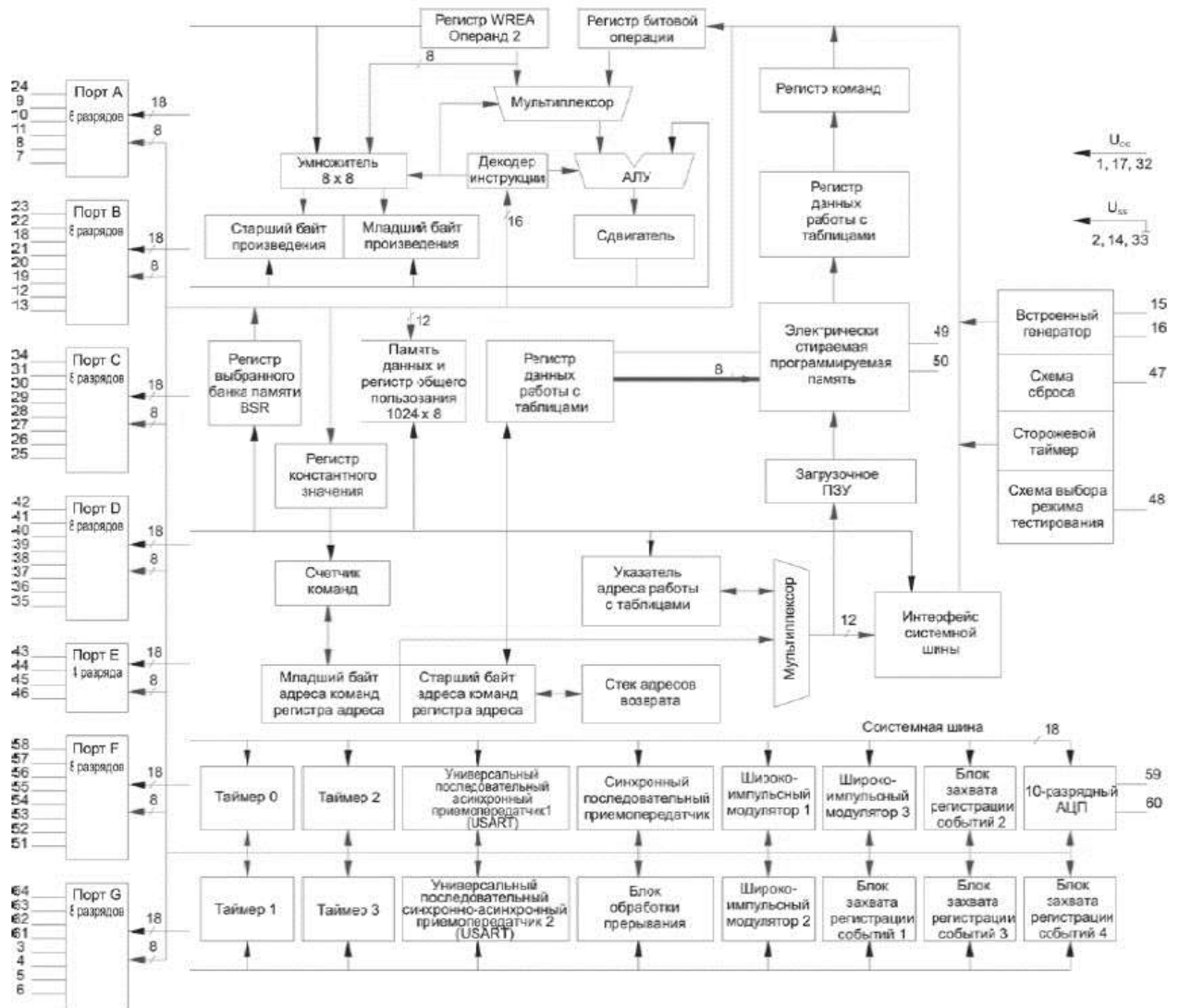
Стабильным спросом среди продукции АО «НИИЭТ» пользуется однокристалльный микроконтроллер N1830BE31. Микросхема представляет собой 8-разрядное устройство без ПЗУ (рисунок 1.9, а). Микроконтроллер предназначен для применения во встроенных системах управления и обработки информации. Тактовая частота 12 МГц. Регистровое ОЗУ имеет организацию 128×8 бит. Адресуемая память программ 64 кБ. Адресуемая память данных 64 кБ. Время выполнения команд не превышает 4 мкс. Имеется последовательный порт ввода/вывода UART. Диапазон рабочих температур составляет –60 до +85 °С. Микросхема изготавливается по АЕЯР.431280.070 ТУ в корпусе N16.48-2В (рисунок 1.9, б).



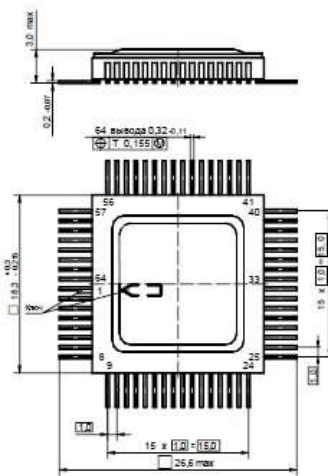
разработан российский микроконтроллер, предназначенный для систем учёта электроэнергии, энергосберегающих систем и систем с автономным электропитанием. В 2012 году компанией была приобретена лицензия на микропроцессорное ядро ARM Cortex-M4F для дальнейшего использования в собственных разработках. В 2014 году изготовлены первые образцы высокопроизводительного процессора по технологии «Флип-Чип».

Основная специализация компании «Миландр» – реализация проектов в области разработки и производства изделий микроэлектроники (микроконтроллеры, микропроцессоры, микросхемы памяти, микросхемы приемопередатчиков, микросхемы преобразователей напряжения, радиочастотные схемы), универсальных электронных модулей и приборов промышленного и коммерческого назначения, разработки ПО для современных информационных систем и изделий микроэлектроники. «Миландр» – первая российская компания, получившая лицензию на использование микропроцессорного ядра ARM в микроконтроллерах собственной разработки.

В номенклатуре выпускаемой продукции АО «ПКК Миландр», помимо прочего, имеется однокристалльная микро-ЭВМ с электрически стираемым перепрограммируемым постоянным запоминающим устройством (ЭСППЗУ) 1886BE2У (рисунок 1.10, а). Микросхема предназначена для широкого применения в аппаратуре общего назначения, в качестве периферийного контроллера, организующего сбор и первичную обработку информации. Может использоваться для организации малопроизводительных вычислительных систем и в качестве устройства совмещения различных типов интерфейсов. Тактовая частота до 33 МГц. Минимальная длительная цикла выполнения команды от 121 нс. Наличие 8-разрядного АЛУ. Параллельные 16-разрядная шина команд и 8-разрядная шина данных. Количество циклов стирания/записи внутренней памяти программ – не менее 10 000. Микросхема изготавливается по АЕЯР.431200.459-02 ТУ в 64-выводном металлокерамическом корпусе Н18.64-1В (рисунок 1.10, б). Диапазон рабочих температур составляет –60 до +85 °С. Микросхемы изготавливают с приемкой *ОТК* и *ВП*.



а



б

Рисунок 1.10 – Однокристалльная микро-ЭВМ 1886BE2У

## 1.2.4 Выводы

Проведенный анализ отечественной электронной компонентной базы позволяет сделать следующие выводы:

1. Диапазон рабочих температур для электронной компонентной базы, предназначенной для работы в аппаратуре специального назначения, составляет, как правило, от минус 60 до +125 °С. Более узким температурным диапазоном обладают такие классы ЭРИ, как резисторы, оптопары, трансформаторы, фильтры, ИВЭП, микроконтроллеры, коммутаторы.

2. Количество термозависимых параметров  $\alpha_i$ , 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;  $\Theta$  – функция температурной стабильности по техническому заданию на разработку ЭС;  $\alpha_i$  – 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.

3. В отличие от зарубежных производителей отечественные предприятия не осуществляют разработку SPICE-моделей на выпускаемую ими электронную компонентную базу. Как следствие этого, реализация этапа моделирования аппаратуры специального назначения с использованием отечественной ЭКБ вызывает объективные трудности в связи с отсутствием необходимых математических моделей.

### 1.3 Термокомпенсация

Термокомпенсация, как метод повышения температурной стабильности, основана на взаимном уравновешивании влияния ЭРИ на выходные параметры ЭС. Пусть  $a_1 = f_{ij}(T)$  и  $a_2 = f_{pk}(T)$  – законы изменения  $j$ -ого параметра для  $i$ -ого ЭРЭ и  $k$ -ого параметра для  $p$ -ого ЭРИ от температуры, соответственно. Тогда для осуществления термокомпенсации должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} |f_{ij}(T)| = |f_{pk}(T)|; \\ |T_i - T_p| \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (1.1)$$

С расширением диапазона рабочих температур  $\Delta T$ , как отмечается в [42], термокомпенсация затруднена, поскольку мала вероятность полного совпадения законов изменения термозависимых параметров ЭРЭ  $a_1 = f_{ij}(T)$  и  $a_2 = f_{pk}(T)$ . Нетрудно заметить, что условие (1.1) справедливо только для случая изначального равенства рабочих температур ЭРИ, т.е. равномерности температурного поля. Иначе говоря, схемотехническая термокомпенсация подразумевает такую абстрактную несущую конструкцию ЭС (плата, подложка и т.п.), свойства которой не влияют на параметры ЭРИ. В большинстве практических случаев, наоборот, свойства несущей конструкции ЭС оказывают непосредственное влияние на размещенные ЭРИ и при некотором условии приводят к эффекту топологической термокомпенсации. Для обеспечения топологического аспекта термокомпенсации необходимо, чтобы помимо (1.1) выполнялось условие:

$$|f_{ij}(T, x_i, y_i)| = |f_{pk}(T, x_p, y_p)|, \quad (1.2)$$

где  $x_i, y_i$  и  $x_p, y_p$  – координаты точек привязки  $i$ -ого и  $p$ -ого ЭРИ на несущей конструкции ЭС.

Проведенный обзор научных работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных проблеме термокомпенсации ЭС, позволяет выделить некоторые классификационные признаки (рисунок 1.11), позволяющие всесторонне оценить существующие направления исследований: уровни реализации; методы реализации; устройства; источники информации. Как было сказано в начале данного параграфа, термокомпенсация, как метод термостабилизации, может быть реализован либо на схемотехническом уровне, либо на уровне топологии (конструктивно-технологический уровень).



Рисунок 1.11 – Классификационные признаки термокомпенсации, как способа термостабилизации

Следует заметить, что большинство научных работ рассматривают схемотехнический уровень термокомпенсации. Представителями этого направления исследований можно признать А.И.Кривоносова [42], А.В.Косых [43], А.В.Баранова и А.Л.Козикова [44], J.Liang и др. [45], Т.-Н.Cho и др. [46], M.R.Lee и др. [47]. Работы, посвященные топологической термокомпенсации, менее распространены. Сюда можно отнести исследования И.В.Никонова [48], М.Тихана [49]. 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, М.Р.Lee и др.). Основные источники информации, через которые исследователи доносят свои результаты до научной общественности, традиционны – монографии (А.И.Кривоносов), статьи (И.В.Никонов, А.В.Косых, А.В.Баранов и А.Л.Козиков, М.О.Тихан, J.Liang и др.), результаты интеллектуальной деятельности (Т.-Н.Cho и др., М.Р.Lee и др.).

Анализ рассмотренных выше работ в [42...49], посвященных температурной компенсации ЭС, позволяет утверждать:

1. Подавляющее большинство научных работ рассматривает термокомпенсацию на схемотехническом уровне: термокомпенсирующие ЭРИ, цепи, контуры, схемы и т.д. Работы, рассматривающие топологические особенности обеспечения температурной компенсации ЭС (подложки, мембраны, несущие конструкции), встречаются реже. 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.

2. Термокомпенсация наиболее эффективна на уровне ЭРИ. Лучшие образцы термокомпенсированных ЭС обладают температурной стабильностью параметров на уровне  $(0,5...10) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

3. Термокомпенсация наиболее эффективна в узком температурном диапазоне, в связи с нелинейностью температурных зависимостей параметров ЭРИ.

4. 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.



## 1.4 Микротермостатирование

Известно [50], что микроэлектроника – это подраздел электроники, связанный с изучением и производством электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов порядка несколько микрометров и меньше. В ОСТ 1 02546-85 [51] дается определение термину «термостатирование» – поддержание температуры оборудования или воздуха вокруг него в заданных пределах. По причине отсутствия в нормативно-технической литературе термина «микротермостатирование» применим метод композиции, а именно объединим вместе два вышеприведенных понятия. В итоге имеем: 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.

Проведённый анализ научных работ отечественных и зарубежных учёных по проблемам микротермостатирования позволяет выделить некоторые особенности.

Все многообразие работ делится на две категории:

- исследование и разработка подогревных микротермостатов [52-66];
- исследование и разработка охлаждающих микротермостатов [67-79].

Объектами микротермостатирования могут являться электрорадиоизделия, температурная зависимость которых значительно зависит от температуры и определяет в конечном итоге стабильность работы всего электронного средства. Так в работе [67] рассмотрено термостатирование болометра и фоторезистора; в работе [63] – кварцевого резонатора; в работах [62, 64] – абстрактной интегральной схемы; в работе [78] – модуля памяти на магнитных цилиндрических доменах; в работе [79] – лазерного диода и т.д. Есть ряд работ [52-61, 66, 68-71, 73, 75-76], в которых объект термостатирования явно не детализируется, что придаёт таким конструктивно-технологическим вариантам универсальность дальнейшего применения.

В количественном отношении эти работы в научном информационном пространстве представлены примерно в равной пропорции и отражают, как правило, устоявшиеся научные школы, занимающиеся той или иной проблематикой. К наиболее известным и

признанным работам можно отнести труды Г.Н.Дульнева [53], Е.А.Коленко [67], Т.А.Исмаилова [68]. 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 [54] также представляет собой пример глубокого научного исследования, посвящённого подогревным микротермостатам, сопровождается большим объемом экспериментального материала.

Как уже было сказано выше, в связи со сложностью решения полной математической модели микротермостата исследователи применяют последовательные шаги по ее детализации. Этот тезис подтверждается рядом работ [52, 56-59], отличительная черта которых – рассмотрение микротермостатов как объектов с сосредоточенными параметрами. Авторы предлагают перспективный способ анализа конструкций микротермостатов с помощью метода электротепловой аналогии, где каждому элементу конструкции сопоставляется ЭРИ с определёнными теплофизическими параметрами. В пользу такого подхода говорит факт успешного применения программных комплексов схемотехнического моделирования для отыскания статических и динамических характеристик микротермостатов.

Ряд работ [52, 56-59] посвящён разработке гибридно-пленочных микротермостатов. В таких конструкциях обязательно присутствует термостатируемая подложка, с размещёнными на ней ЭРИ, чья температурная стабильность определяет стабильность всего ЭС. Научный интерес авторов к этому направлению исследований объясняется сочетанием двух особенностей, присущих гибридно-пленочным микротермостатам. С одной стороны, гибридно-пленочные микротермостаты – устройства, легко интегрируемые с остальной микроэлектронной компонентной базой. С другой стороны – гибридно-пленочная технология оставляет для разработчика гораздо больший простор для конструкторско-технологических идей без применения дорогостоящих процедур разработки подложек, присущих интегральной технологии [79].

Ряд работ [55, 72, 77] отражает перспективную идею соединения исполнительных, измерительных блоков микротермостата с цифровой системой управления. Средством реализации выступает, как правило, микроконтроллер или микропроцессор. Авторы работ справедливо замечают – в современных ЭС аппаратные возможности микроконтроллеров (микропроцессоров) часто задействованы не в полном объёме. В связи с этим контроль за температурой ЭРИ может стать дополнительной функцией, без введения в состав ЭС дополнительного цифрового устройства. Кроме этого, цифровой способ управления позволяет гибко изменять в процессе работы микротермостата основные эксплуатационные характеристики: температуру статирования, закон управления, время выхода на режим.

Результаты интеллектуальной деятельности (патенты, авторские свидетельства, полезные модели) демонстрируют различные конструктивные подходы к реализации микротермостатов [56-59, 62-64, 75-76, 78-79]: гибридно-пленочные, интегральные, функциональные. Прочие работы [52-55, 60-61, 65-74, 77] относятся к монографиям, диссертационным исследованиям, научным статьям.

В зарубежных работах [65] упоминается способ реализации микротермостатов без использования внешних электрических источников, на основе применения эффекта памяти формы. Такой подход оправдывает себя в энергоэкономичных устройствах.

В ряде работ [64, 66] предлагается идея оптимизации процессов измерения температуры и исполнения управляющих воздействий микротермостата путём совмещения этих функций в одних и тех же элементах. В частности, наиболее простой способ, когда биполярный транзистор играет роль датчика и нагревателя. Очевидно, что в таких конструкциях авторы предусматривают временное разделение измерительных и управляющих сигналов. При этом схема управления становится сложнее.

Наиболее совершенные подогревные микротермостаты характеризуются точностью поддержания температуры статирования до  $\pm 0,01$  °С и температурой статирования от 20 до 60 °С [66].

Основной недостаток 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 [76, 77]. Как правило, исполнительным элементом в таких устройствах является элемент Пельтье (термобатарея), которая в зависимости от полярности может выступать и нагревателем, и охладителем.

В наиболее ранних работах по разработке охлаждающих микротермостатов сразу задан весьма высокий уровень их эксплуатационных показателей. Так в [67] предложена серия микрохолодильников с точностью поддержания температуры в  $0,1$  °С и температурой статирования до  $-60$  °С.

Ряд трудов по разработке охлаждающих микротермостатов демонстрирует использование физико-химических процессов в процессе функционирования. Сюда относятся работы [69, 73-74], где используются фазовые переходы рабочего вещества; причем температура плавления рабочего вещества совпадает с температурой статирования.

Другой физико-химический принцип положен в основу диссертационного исследования Л.И.Жилиной [70] – связывание свободных носителей заряда на горячих спаях термоэлементов за счет их сегнетоэлектрического покрытия. Автор показывает, что это даёт значительное снижение потерь термоэлементов, т.е. достигается экономичность устройства.

Ряд работ посвящён конструкции микротермостатов с распределёнными параметрами. Так в диссертационном исследовании [71] в отличие от работ [52, 56-59] камера микротермостата изучается как неизотермический объект.

Распространены работы по исследованию охлаждающих микротермостатов, в которых авторы предлагают для повышения точности и надёжности их функционирования каскадные структуры термобатарей [67, 75, 78]. В таких устройствах вторая термобатарея начинает работать в условиях большой разности температур, что позволяет достичь более низких значений температуры статирования.

Большинство работ, посвящённых разработке охлаждающих микротермостатов, представляют собой малогабаритные устройства, в которых имеется камера с внутренним размещением объекта термостатирования. Типичный представитель таких устройств – работа [79], где имеется малогабаритный корпус, схема управления, объект термостатирования, датчик. В этом ряду резко отличаются труды нидерландских учёных D.D.L.Wijngaards и R.F.Wolffenbuttel, например [77], в которых идеи реверсивного термостатирования реализованы непосредственно на уровне интегральной топологии микросхемы.

### 1.5 Распространенные комплексы программ, пригодные для проектирования термостабильных электронных средств

После анализа известных практических способов термостабилизации рассмотрим распространенные комплексы программ, пригодные для проектирования термостабильных электронных средств.

Применение *прецизионной электронной компонентной базы* при разработке термостабильных электронных средств обуславливает на ранних стадиях проектирования, в частности на этапе схемотехнического моделирования, наличие адекватных математических моделей ЭРИ по критерию температурных зависимостей их параметров. Разработка математических моделей SPICE-формата для зарубежных ЭРИ, в том числе и с заданными температурными зависимостями параметров, реализована в таких программных

комплексах, как MicroCAP и OrCAD. В программном комплексе MicroCAP инструмент синтеза SPICE-моделей интегрирован в основную среду. Это модуль расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов MODEL. Он запускается непосредственно из основного интерфейса программы (рисунок 1.12). Суть работы в этом модуле заключается в построении экспериментальных зависимостей параметров прототипа ЭРИ на основе его табличных данных, а затем - в последующей экстракции параметров SPICE-модели.

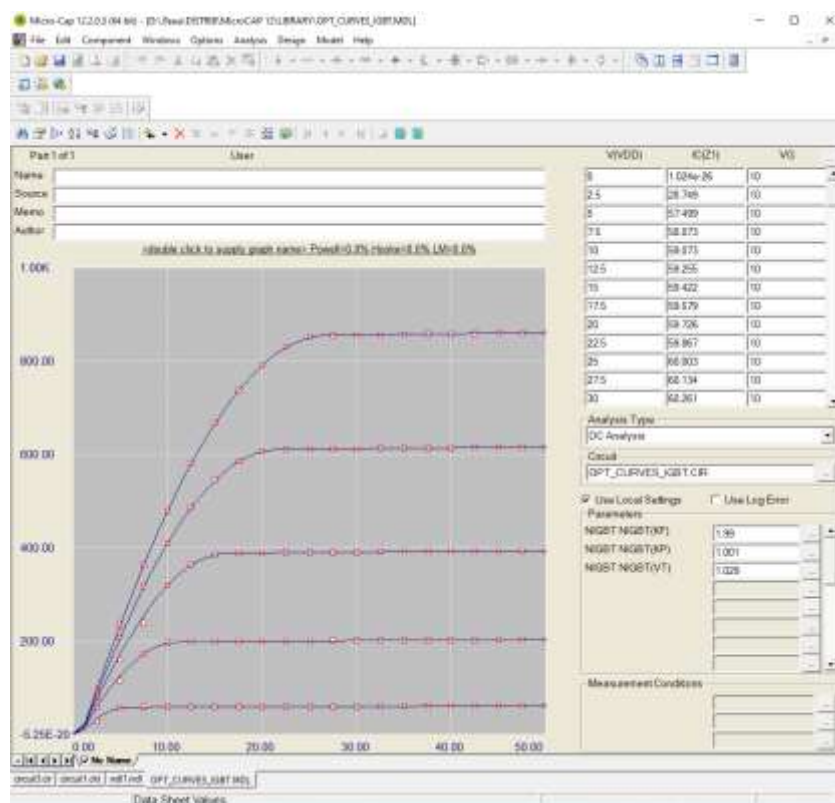


Рисунок 1.12 – Модуль расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов MODEL в составе программного комплекса MicroCAP

В отличие от программного комплекса MicroCAP, синтез SPICE-моделей ЭРИ в программном комплексе OrCAD происходит с помощью отдельной утилиты Model Editor (рисунок 1.13). Утилита запускается самостоятельно, запуск основной среды OrCAD Capture при этом необязателен. Еще одним отличием программного комплекса OrCAD от среды MicroCAP является наличие двух сценариев синтеза SPICE-моделей ЭРИ. Первый сценарий аналогичен модулю MODEL программного комплекса MicroCAP, а именно – синтез по графикам экспериментальных зависимостей. Второй сценарий называется «на основе шаблонов» и предусматривает исключительно табличный ввод паспортных данных на ЭРИ. Затем, также как и в первом сценарии, происходит экстракция параметров SPICE-модели.



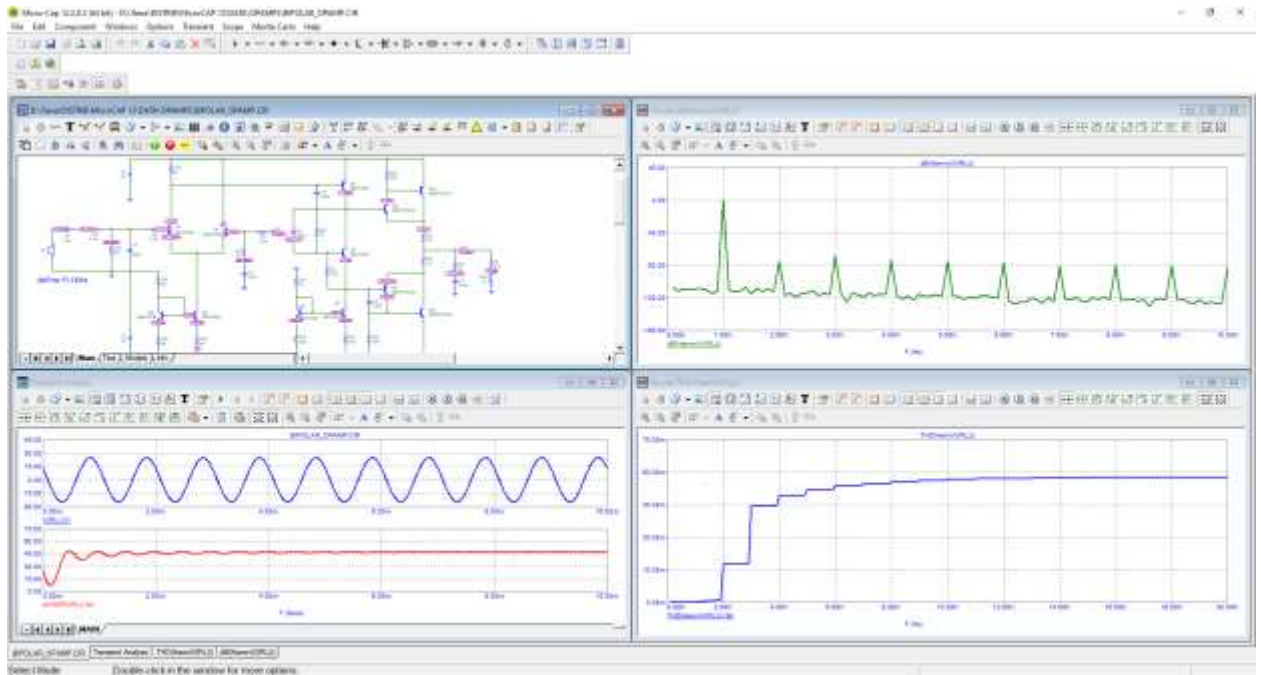


Рисунок 1.14 – Симулятор электронных схем в составе программного комплекса MicroCAP

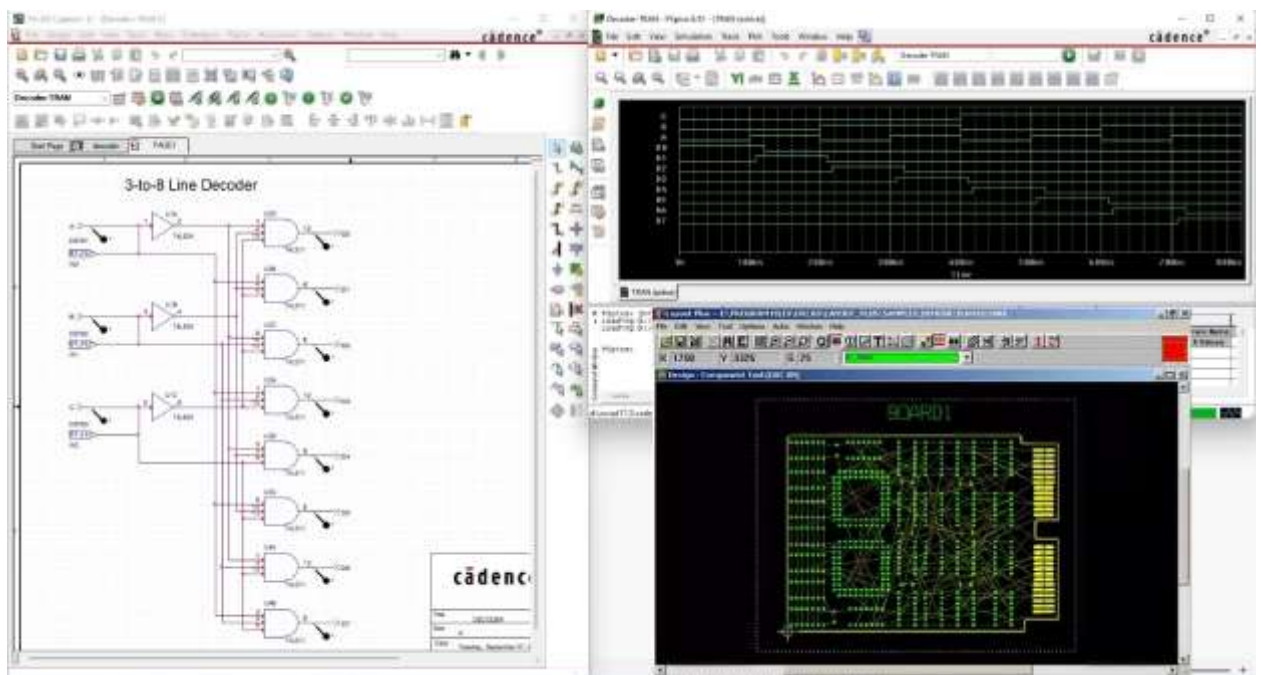


Рисунок 1.15 – Симулятор электронных схем Capture и топологический редактор Layout в составе программного комплекса OrCAD

Методы топологической термокомпенсации и микротермостатирования предполагают решение инженерных задач расчета температурных полей несущих конструкций электронных средств. К отечественным разработкам таких программных



комплексов относится автоматизированная система комплексного моделирования физических процессов в электронной аппаратуре. В состав программного комплекса АСОНИКА входит 18 подсистем. Для целей настоящего диссертационного исследования наибольший интерес представляет подсистема АСОНИКА-Т (рисунок 1.16). Она предназначена для моделирования тепловых процессов микросборок, радиаторов, теплоотводящих оснований и произвольных несущих конструкций.

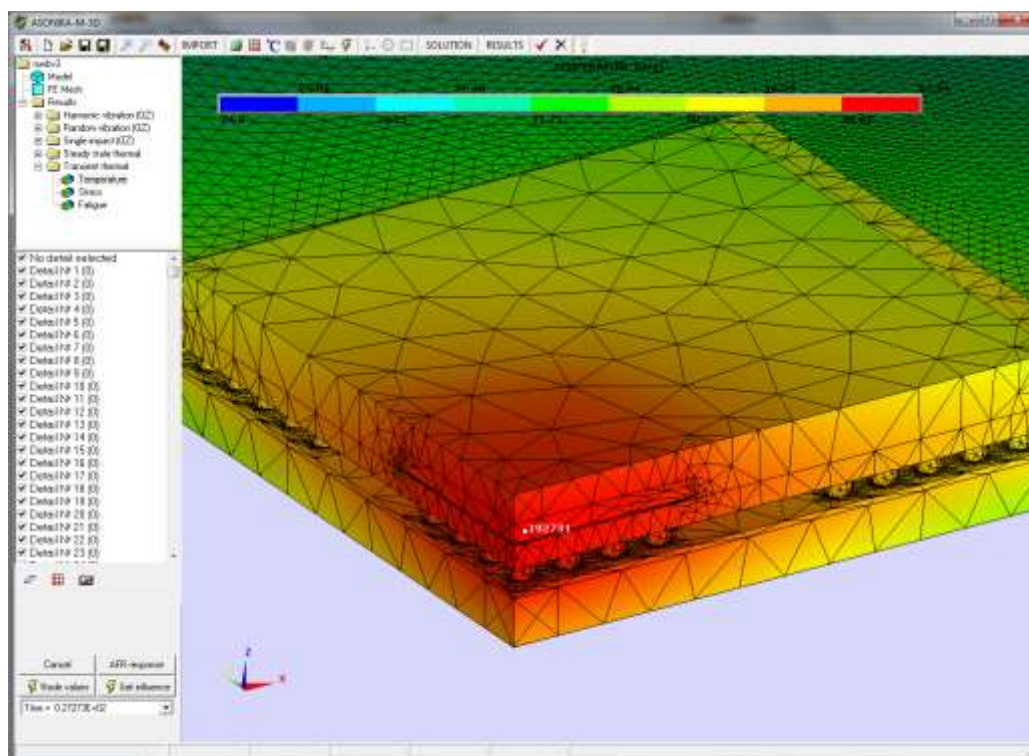


Рисунок 1.16 – Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик конструкций электронных средств Т в составе программного комплекса АСОНИКА

Зарубежная разработка – модуль инженерных расчетов Simulation, входящий в состав программного комплекса SolidWorks – использует численный метод конечных элементов для решения задач механики, теплопроводности, электромагнетизма. Тепловые расчеты в среде SolidWorks Simulation возможны как стационарном, так и в нестационарном режиме (рисунок 1.17). Визуализация результатов тепловых расчетов происходит всевозможными способами: зондирование отдельных точек, табулированный вывод данных, построение температурных профилей по заданным сечениям, представление температурного поля цветовой градацией.



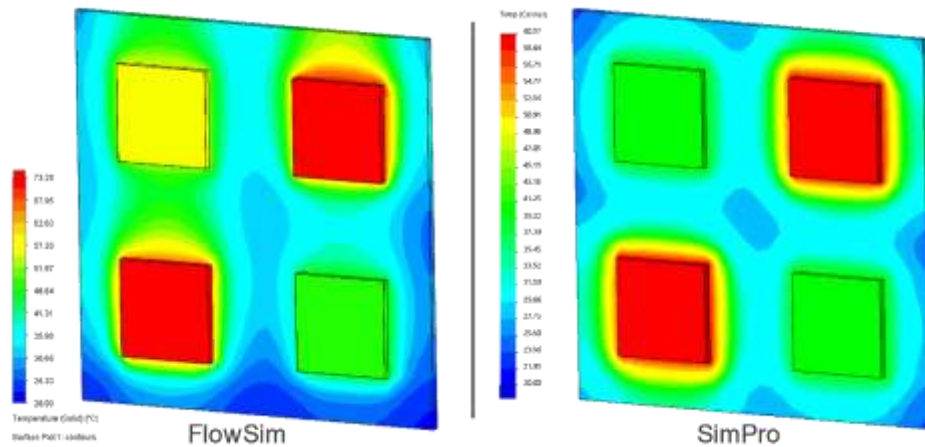


Рисунок 1.17 – Модуль инженерных расчетов Simulation в составе программного комплекса SolidWorks

Ansys Workbench – это пользовательская оболочка, призванная соединить различные физические модели в одной расчетном проекте и предоставить инженеру интуитивно понятный интерфейс управления расчетным проектом. Программный комплекс позволяет выбрать пользователю несколько расчетных задач. В частности, выбор задачи Steady-State Thermal/Transient Thermal позволяет провести анализ стационарного/нестационарного теплового поля на основе решения дифференциального уравнения стационарной/нестационарной теплопроводности (рисунок 1.18).

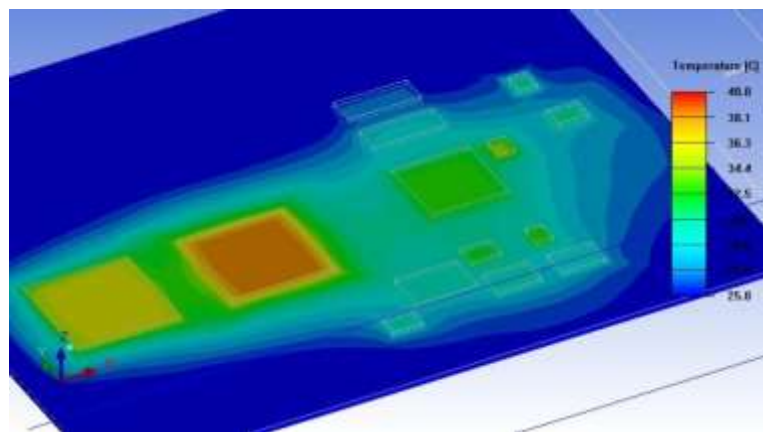


Рисунок 1.18 – Модуль теплового анализа Steady-State Thermal программного комплекса Ansys Workbench

Проведенный краткий обзор программных комплексов, пригодных для проектирования термостабильных электронных средств позволяет сделать выводы:

1. На сегодняшний день не существует ни одного программного комплекса для реализации полного (сквозного) цикла проектирования термостабильных электронных средств.

2. Среди рассмотренных программных комплексов наиболее пригодным для целей проектирования термостабильных электронных средств является программный комплекс Cadence OrCAD. Он позволяет реализовать: синтез SPICE-моделей ЭРИ, в том числе с заданными температурными зависимостями; схемотехническое моделирование электрической схемы с элементами термокомпенсации; топологическое проектирование печатного узла.

3. На ранних стадиях проектирования термостабильных электронных средств нерешенной является *задача синтеза SPICE-моделей ЭРИ отечественной электронной компонентной базы*. Несмотря на наличие в программных комплексах MicroCAP и OrCAD средств синтеза SPICE-моделей, их эффективность в российском электронном приборостроении невелика. Рассмотренные выше модули MicroCAP MODEL и OrCAD Model Editor направлены на создание дискретных двухтерминальных и дискретных многотерминальных ЭРИ зарубежного производства. Исторически сложилось, что в отличие от зарубежной радиоэлектронной промышленности, российские производители электронной компонентной базы не поддерживают свою продукцию созданием SPICE-моделями для целей моделирования. В результате важный этап стадии проектирования – моделирование электронных средств, в том числе моделирование термостабильных электронных средств – остается либо нереализованным, либо реализованным с неадекватными математическими моделями ЭРИ. Подтверждением актуальности указанной проблемы могут служить: НИОКР «Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы российского производства» по заказу АО ИСС (г. Железногорск); НИР «Интеграция системы Cadence и системы АСОНИКА» по заказу российского представительства Cadence ООО «ПСБ Софт».

## 1.6 Основные результаты

1. Впервые предложено всю номенклатуру электронной компонентной базы подразделять на дискретные двухтерминальные ЭРИ; дискретные многотерминальные ЭРИ; интегральные многотерминальные ЭРИ, что позволяет однозначно оценивать степень сложности синтезируемых математических моделей ЭРИ для последующего создания программно-имитационных моделей термостабильных ЭС. Распространенные методы термостабилизации для обеспечения температурной стабильности современных ЭС предложено разделить на три основных метода: применение прецизионной электронной

компонентной базы; применение термокомпенсации; применение микротермостатирования. В свою очередь каждый из этих методов можно рассматривать как базовый классификационный признак, насчитывающий несколько подчиненных иерархических делений. Применение метода термокомпенсации ведет к двум подметодам: схемотехнический уровень реализации; топологический уровень реализации. Применение микротермостатирования распадается на конструкции, отличающиеся по температуре статирования: подогревные; охлаждаемые и реверсивные микротермостаты.

2. Показано, что 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  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Наиболее удачные образцы ЭС с применением метода термокомпенсации обладают температурной стабильностью на уровне менее, чем миллионная доля  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

3. Проанализировано, что 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.

4. Осуществлена постановка задачи для ответа на вопросы по качественному и количественному обеспечению температурной стабильности ЭС. Необходимо иметь глобально-оптимизирующую математическую модель, которая 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;  $\Theta$  – функция температурной стабильности по техническому заданию на разработку ЭС;  $\alpha_i$  – 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.

5. Анализ существующих программных комплексов отечественного и зарубежного происхождения, направленных на моделирование термостабильных электронных средств, позволяет поставить задачу. 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. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Цель данной главы – установление аналитической зависимости выходного параметра ЭС от рабочих температур ЭРИ и температуры окружающей среды.

### 2.1 Исходные предпосылки

Впервые комплексный подход к обеспечению требуемой температурной стабильности ЭС был обозначен в монографии [80] в качестве частной задачи при анализе производственных погрешностей и электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. Выходной параметр ЭС рассматривается как функция многих переменных:

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.1)$$

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

Большинство параметров ЭРИ являются функциями температуры, величины которых представляются как:

$$q = q_0[1 + \alpha(T - 293)], \quad (2.2)$$

где  $q_0$  – величина параметра ЭРИ при температуре 293 К;  $\alpha$  – температурный коэффициент данного параметра;  $T$  – текущая температура.

Если заменить параметры ЭРИ в (2.1) соответствующими функциями от температуры (2.2), то получим аналитическую зависимость выходного параметра ЭС  $N$  от параметров ЭРИ и температуры:

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n, T). \quad (2.3)$$

Для функции нескольких переменных при условии ее дифференцируемости по формуле полного дифференциала можно записать:

$$dN = \frac{\partial N}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial N}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial N}{\partial q_n} dq_n + \frac{\partial N}{\partial T} dT. \quad (2.4)$$

Переходя от дифференциалов к конечным приращениям при условии малости последних, выражение (2.4) примет вид:

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial N}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial N}{\partial q_n} \Delta q_n + \frac{\partial N}{\partial T} \Delta T. \quad (2.5)$$

Предполагая, что  $\alpha(T - 293) \ll 1$ , производится замена:

$$\frac{\alpha \Delta T}{1 + \alpha(T - 293)} \approx \alpha \Delta T. \quad (2.6)$$

Разделив уравнение (2.5) на уравнение (2.3) и учитывая (2.6), получаем уравнение относительной погрешности выходного параметра ЭС:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N}{N} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} + \alpha_i \Delta T \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \frac{\Delta q_i}{q_i} + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \Delta T, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $\alpha_i$  – температурный коэффициент  $i$ -ого параметра;  $\Delta T = (T - 293)$  К.

Второе слагаемое уравнения (2.7) является уравнением температурной погрешности выходного параметра ЭС:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \right] \Delta T, \quad (2.8)$$

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.

Первоначально анализ ЭС с позиций температурной стабильности сводился к определению температурного коэффициента выходного параметра ЭС. Отдельную задачу представляет собой нахождение коэффициентов влияния  $B_i$ , для решения которой можно использовать теоретический и экспериментальный методы. Легко заметить, что уравнение температурной погрешности (2.8) обладает малой практической ценностью с точки зрения практики разработки термостабильных ЭС по следующим причинам:

1. Линейность уравнения, из которого следует, что действия погрешностей отдельных ЭРИ независимы.
2. Равенство рабочих температур всех ЭРИ, входящих в ЭС.
3. Малая информативность, поскольку элементарным слагаемым в уравнении (2.8) является отдельный параметр ЭРИ.
4. Трудоемкость нахождения коэффициентов влияния  $B_i$  теоретическим (аналитическим) и экспериментальным методами.

В работе [81] предложено устранение четвертого из перечисленных недостатков. В частности, задача нахождения коэффициентов влияния  $B_i$  уравнения температурной погрешности (2.8) решается методом статистического планирования эксперимента в сочетании с регрессион-

ным 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:

$$n = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i q_i + \sum_{i < j} b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} q_i^2 + \dots, \quad (2.9)$$

где  $n$  – оценка генерального значения выходного параметра  $N$ ;  $k$  – число факторов в экспери-

менте;  $b_0 = \frac{\sum_{j=1}^m n_j}{m}$  – свободный член, равный математическому ожиданию;  $n_j$  – значение выходного параметра в  $j$ -ом опыте матрицы планирования эксперимента;  $m$  – число опытов в экспери-

менте ( $2^k = m$ );  $b_i = \frac{\sum_{j=1}^m n_j Q_i}{m}$  – эмпирические коэффициенты уравнения регрессии, являющиеся оценками соответствующих генеральных коэффициентов;  $Q_i$  – нормировочный фактор.

Для нахождения уравнения регрессии (2.9) и проверки его адекватности используются основные положения теории планирования факторного эксперимента [82-84]. Параметры ЭРИ, как функции температуры (2.2), выступают в качестве факторов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . При этом их номинальные значения  $q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$  определяются номинальной температурой в (2.2). В ходе планирования эксперимента вводится нормировочный фактор:

$$Q_i = \frac{q_i(T - T_0)}{|q_i(T - T_0)|}, \quad Q_i \equiv \pm 1, \quad (2.10)$$

где  $(T - T_0) = \Delta T$  – интервал (шаг) варьирования.

Реализация полного факторного эксперимента типа  $2^k$  сводится к варьированию каждого фактора на двух уровнях:

$$\begin{aligned} (q_i[T_0 + \Delta T]) &\rightarrow Q_i = +1, \\ (q_i[T_0 - \Delta T]) &\rightarrow Q_i = -1. \end{aligned}$$

Так как каждый фактор, кроме свободного члена, варьируется на двух уровнях  $+1$  и  $-1$ , то вычисление коэффициентов регрессии  $b_i$  сводится к приписыванию столбцу выходного параметра знаков соответствующего фактору столбца и алгебраическому сложению полученных значений. Деление результата на число опытов в матрице дает искомый результат  $b_i$ .

Число степеней свободы равно:

$$f = m - (k + 1). \quad (2.11)$$

После сопоставления каждому столбцу матрицы планирования в кодовой реализации соответствующего коэффициента полинома (2.9) имеем:

$$n = B_0 Q_0 + \sum_{i=1}^k B_i Q_i + \sum_{i < j} B_{ij} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} Q_i^2 + \dots \quad (2.12)$$

От полинома с нормированными членами (2.12) можно перейти с помощью (2.10) к уравнению с натуральными единицами измерения переменных (2.9). Для нахождения остаточной суммы квадратов выходного параметра следует вычислить по уравнению регрессии значение  $n$  в условиях каждого опыта. Такое значение называется предсказанным и обозначается  $\hat{n}$ . Затем надо найти все невязки (отрезки), возвести их в квадрат и сложить. Схема расчета остаточной суммы квадратов показана ниже:

$$\begin{array}{c} n \\ \nearrow \\ \hat{n} \end{array} \rightarrow \Delta n = n - \hat{n} \rightarrow \Delta n^2 \rightarrow \sum_{j=1}^m \Delta n_j^2$$

Остаточная сумма квадратов, деленная на число степеней свободы, есть остаточная дисперсия или дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta n_j^2}{f}. \quad (2.13)$$

Дисперсия воспроизводимости для случая однократных опытов в каждой точке факторного пространства соответствует условиям вычислительного эксперимента и будет выглядеть:

$$S_{\text{вос}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (n_j - b_0)^2}{m - 1}. \quad (2.14)$$

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

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{вос}}^2}. \quad (2.15)$$

Удобство использования критерия Фишера состоит в том, что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением [82]. Обычно значение  $F$ -критерия Фишера берется при 5%-ном уровне значимости и соответствующем числе степеней свободы для числителя и знаменателя (2.15). Если рассчитанное значение  $F$ -критерия не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.



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

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_{\text{вос}}}{\sqrt{m}}; \quad (2.16)$$

где  $t$  – табличное значение критерия Стьюдента [82] при числе степеней свободы, с которым определялась величина  $S_{\text{вос}}^2$ , и выбранном уровне значимости.

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала  $b_i > \Delta b_i$ .

Возвращаясь к уравнению температурной погрешности выходного параметра ЭС (2.8) с учетом найденных эмпирических коэффициентов влияния  $b_i$  можно записать:

$$\frac{\Delta N}{N} = \left[ \sum_{i=1}^k b_i \alpha_{q_i} + \sum_{i < j}^k b_{ij} \alpha_{q_i} \alpha_{q_j} + \sum_{i=1}^k b_{ii} (\alpha_{q_i})^2 + \dots \right] \Delta T, \quad (2.17)$$

где  $b_i = \frac{\partial n}{\partial q_i} \frac{q_{i0}}{n_0}$  – коэффициент влияния линейных членов;  $b_{ij} = \frac{\partial^2 n}{\partial q_i \partial q_j} \frac{q_{i0} q_{j0}}{n_0}$  – смешанный коэффициент влияния второго порядка, характеризующий тепловое взаимодействие ( $i$ - $j$ ) пары факто-

ров на выходной параметр;  $b_{ii} = \frac{\partial^2 n}{\partial^2 q_i} \frac{q_{i0}^2}{n_0}$  – коэффициент влияния второго порядка.

Блок-схема нахождения коэффициентов влияния для уравнения температурной погрешности представлена на рисунке 2.1.

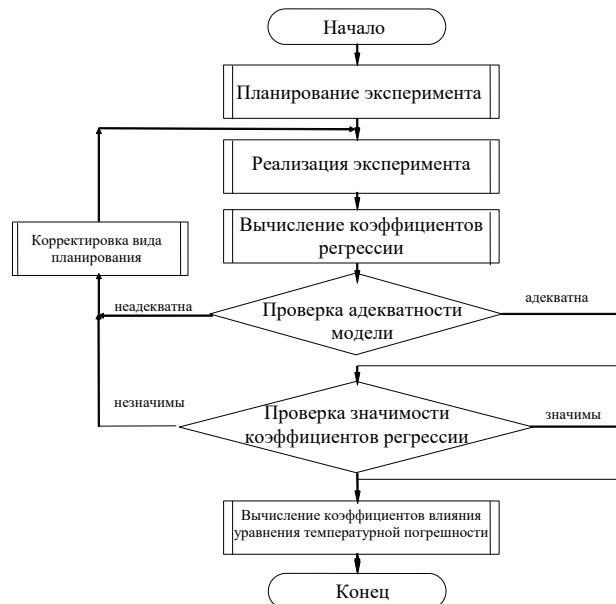


Рисунок 2.1 – Блок-схема нахождения коэффициентов влияния для уравнения температурной погрешности

## 2.2 Алгоритмизация нахождения уравнения температурной погрешности

В развитие положений статистического анализа температурных погрешностей ЭС, рассмотренных в [52, 80, 81], предложено выделить два альтернативных вида уравнения температурной погрешности: для однопараметрических ЭРИ и для многопараметрических ЭРИ. Для **однопараметрических ЭРИ** в процессе исследований реализуется план, в котором проводится варьирование величиной термозависимого параметра каждого ЭРИ с последующей статистической обработкой и получением уравнения вида:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \alpha_i \Delta T_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} \alpha_i \alpha_j \Delta T_i \Delta T_j + \dots, \quad (2.18)$$

где  $a_i = \frac{b_i \cdot U_i^0}{\Delta U_i \cdot b_0}$  – коэффициент влияния термозависимого параметра  $i$ -ого ЭРИ;  $b_i$  – коэффициент регрессии;  $U_i^0$  – нулевой уровень варьируемого параметра ЭРИ;  $\Delta U_i$  – интервал варьирования величины  $U_i^0$ ;  $\alpha_i$  – максимальное значение температурного коэффициента варьируемого параметра;  $\Delta T_i$  – изменение рабочей температуры  $i$ -ого ЭРИ.

Распространенным методом статистического анализа электрических схем является метод Монте-Карло (метод статистических испытаний) [85]. Вместе с тем, применение названного метода по отношению к исследованию температурной стабильности ЭС рождает две основные задачи:

1. Синтез математических моделей ЭРИ по критерию адекватности температурных зависимостей параметров к их реальным характеристикам.
2. Реализация метода Монте-Карло по сценарию факторного эксперимента с целью оправданной минимизации количества статистических испытаний.

Сложность решения первой задачи обуславливает ее рассмотрение в отдельной главе (глава 3). Здесь же акцентируем внимание на решении второй задачи – реализации численного метода Монте-Карло в задаче анализа температурной стабильности электронных средств с целью нахождения (2.18).

Блок-схема вычислений при использовании метода Монте-Карло (рисунок 2.2) включает в себя основные процедуры:

1. Реализация случайного вектора  $\mathbf{Q}$ , т.е. выработка случайных значений параметров компонента  $q_i$  в соответствии с их законами распределения.

2. Одновариантный анализ электрической схемы при полученной реализации случайного вектора  $\mathbf{Q}$ .
3. Вычисление значения целевой функции  $V$  с целью установления выходного параметра ЭС.
4. Заранее заданный повтор процедур № 1, 2, 3, соответствующий общему количеству испытаний.
5. Статистическая обработка результатов всех испытаний.

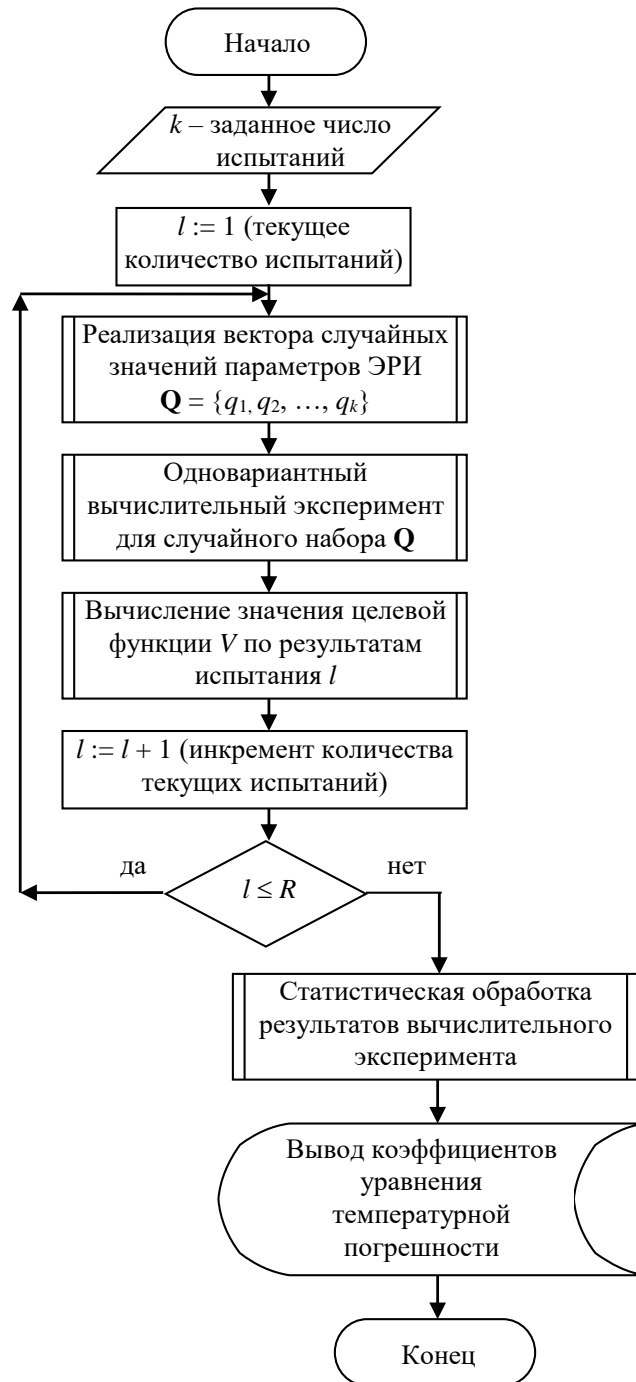


Рисунок 2.2 – Блок-схема реализации вычислительного эксперимента для случая однопараметрических ЭРИ

Специфичными для численного метода Монте-Карло в задаче анализа температурной стабильности электронных средств являются подходы в реализации процедур №1, 3, 5. Рассмотрим подробнее эту реализацию.

Известно [86], что для однопараметрических ЭРИ (резисторы, конденсаторы, индуктивности) температурный коэффициент характеризует обратимые изменения параметра  $q$  с изменением температуры. Температурный коэффициент параметра (ТКП)  $\alpha_q$  – это его относительное изменение при изменении температуры на 1 °С:

$$\alpha_q = \frac{1}{q} \frac{dq}{dT}.$$

При линейной зависимости параметра от температуры, которая обычно наблюдается в узком диапазоне температур окружающей среды, ТКП вычисляет как:

$$\alpha_q = \frac{q(T) - q(T_0)}{q(T_0)(T - T_0)},$$

где  $q(T)$ ,  $q(T_0)$  – значение параметра соответственно при повышенной (пониженной) рабочей температуре  $T$  и при нормальной температуре  $T_0$ .

Если зависимость  $q(T)$  имеет нелинейный характер, то температурную стабильность параметра можно характеризовать относительным изменением параметра  $\delta q$ :

$$\delta_q = \frac{q(T) - q(T_0)}{q(T_0)} \cdot 100\%.$$

Пусть  $i$ -ый ЭРИ электрической схемы обладает набором функциональных параметров  $q_{ij}$  (вектор **Set<sub>i</sub>**):

$$\mathbf{Set}_i = \{q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, \dots\}.$$

С позиции исследования температурной стабильности  $i$ -ого ЭРИ каждый функциональный параметр есть функция температуры. Следовательно, **Set<sub>i</sub>** тоже векторная функция от температуры:

$$\mathbf{Set}_i(T) = \{q_{i1}(T), q_{i2}(T), q_{i3}(T), \dots\}.$$

В частном случае однопараметрических ЭРИ (элементов с одним ярко выраженным функциональным параметром) векторная функция вырождается в функцию одного параметра от температуры:

$$\mathbf{Set}_i(T) = \{q_i(T)\} \Rightarrow q_i(T). \quad (2.19)$$

Температура  $T$ , присущая  $i$ -ому однопараметрическому ЭРИ в условиях как внешних, так и внутренних тепловых воздействий, величина вероятностная. Предположим, что вероятностная величина  $T$  для  $i$ -ого ЭРИ подчинена закону нормального распределения:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где  $f(T)$  – функция плотности вероятности случайной величины  $T$ ;  $T_0$  – нормальная температура;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение случайной величины  $T$ .

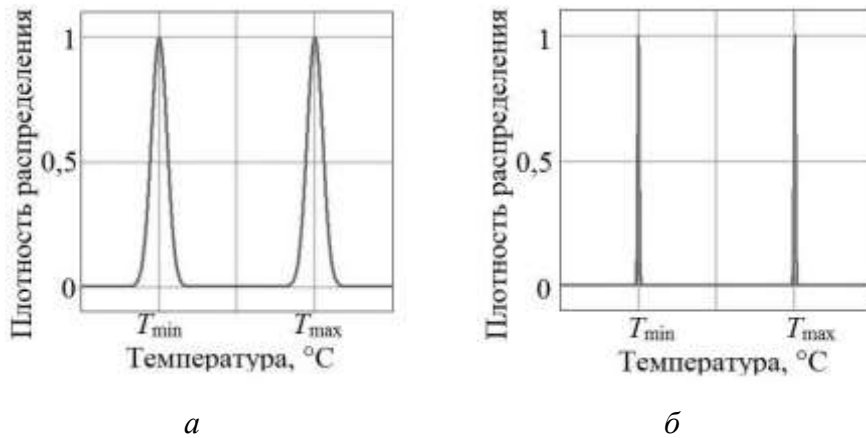
Определим некоторый диапазон рабочих температур для  $i$ -ого ЭРИ  $[T_{\min}, T_{\max}]$ . По сценарию проведения факторного эксперимента [82-84] рабочая температура  $i$ -ого ЭРИ  $T$  может равновероятно находиться вблизи точечных оценок  $T_{0\min}$  и  $T_{0\max}$ . Тогда сумма функций плотности вероятности случайной величины  $T$  есть функция плотности бимодального распределения:

$$bi(T) = \frac{f(T_{\min}) + f(T_{\max})}{norm} = \frac{1}{norm\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{1}{\sigma_{\min}} \exp\left[-\frac{(T_{\min}-T_{0\min})^2}{2\sigma_{\min}^2}\right] + \frac{1}{\sigma_{\max}} \exp\left[-\frac{(T_{\max}-T_{0\max})^2}{2\sigma_{\max}^2}\right] \right\},$$

где  $norm$  – нормирующий коэффициент;  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  – случайные величины рабочих температур на границах заданного диапазона;  $\sigma_{\min}$  и  $\sigma_{\max}$  – соответствующие  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  среднеквадратические отклонения.

Очевидно, что вычислительный факторный эксперимент в отличие от натурального эксперимента позволяет с высокой точностью задавать значения уровней варьирования в каждой реализации эксперимента. Следовательно, в условиях вычислительного факторного эксперимента ( $\sigma_{\min} \approx \sigma_{\max}$ )  $\rightarrow 0$ . Графически этот эффект показан на рисунок 2.3. Функция плотности бимодального распределения при этом может быть записана проще:

$$bi(T) = \frac{1}{norm \cdot \sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left[-\frac{(T_{\min}-T_0)^2}{2\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(T_{\max}-T_0)^2}{2\sigma^2}\right] \right\}.$$



$a$  – случай  $\sigma \neq 0$ ;  $b$  – случай  $\sigma \rightarrow 0$

Рисунок 2.3 – Функция плотности бимодального распределения случайной величины  $T$

Предельный случай, когда  $\sigma = 0$ , позволяет ввести понятие дискретной случайной величины  $T$ , т.е. рабочей температуры  $i$ -ого ЭРИ, принимающей только значения  $T_{0\min}$  и  $T_{0\max}$ . Аналитически дискретная случайная величина  $T$  определяется функцией распределения  $Bi(T)$ :

$$Bi(T) = \begin{cases} 0 \in (-\infty; T_{\min}]; \\ 0,5 \in (T_{\min}; T_{\max}]; \\ 1 \in (T_{\max}; +\infty). \end{cases}$$

Графический вид функции распределения  $Bi(T)$  представлен на рисунке 2.4.

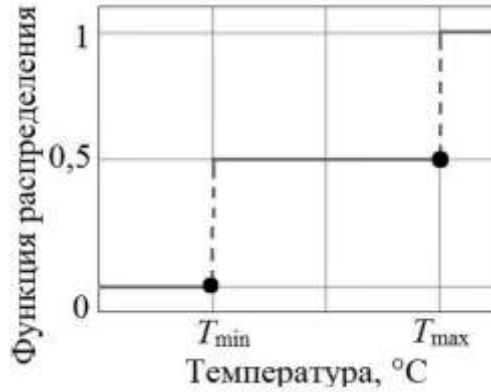


Рисунок 2.4 – Функция распределения дискретной случайной величины  $T$

В результате для функции (2.19)  $i$ -ого ЭРИ область определения состоит только из двух значений:

$$q_i(T) = q_i \left\{ \begin{matrix} T_{\min} \\ T_{\max} \end{matrix} \right\}.$$

Функция  $q_i(T)$  является, в свою очередь, одним из параметров для уравнения относительной погрешности ЭС (2.8). Следовательно, по отношению к уравнению (2.8) допустимыми параметрами для  $i$ -ого ЭРИ будут:

$$Q_i = \left\{ \begin{matrix} q_i^{\min} \\ q_i^{\max} \end{matrix} \right\}.$$

Факторное пространство вычислительного эксперимента есть множество всех  $q_i$ :

$$\mathbf{Q} = \left\{ \begin{matrix} Q_1 = \left\{ \begin{matrix} q_1^{\min} \\ q_1^{\max} \end{matrix} \right\}; \\ Q_2 = \left\{ \begin{matrix} q_2^{\min} \\ q_2^{\max} \end{matrix} \right\}; \\ \dots \\ Q_k = \left\{ \begin{matrix} q_k^{\min} \\ q_k^{\max} \end{matrix} \right\}, \end{matrix} \right.$$

где  $k$  – число факторов, т.е. число однопараметрических ЭРИ, варьируемых в эксперименте.

В условиях реализации вычислительного факторного эксперимента будет получен вектор  $\mathbf{V}$ . Элементом вектора  $\mathbf{V}$  выступает функция одновариантного испытания ЭС  $\theta_i$ , которая содержит уникальное (неповторяющееся) сочетание значений  $q_i$ :

$$\mathbf{V} = \begin{cases} V_1 = \theta_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_1(q_1^{\min}, q_2^{\min}, \dots, q_k^{\min}); \\ V_2 = \theta_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_2(q_1^{\max}, q_2^{\min}, \dots, q_k^{\min}); \\ \dots \\ V_m = \theta_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_m(q_1^{\max}, q_2^{\max}, \dots, q_k^{\max}), \end{cases}$$

где  $m = 2^k$ .

Статистическая обработка вычислительного эксперимента направлена на нахождении коэффициентов регрессии. Введем вспомогательную матрицу  $\mathbf{K}$  размерностью  $m \times (k + 1)$ , содержащую кодовые значения уровней варьируемых факторов:

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & \dots & -1 \\ 1 & -1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

Нулевой столбец матрицы (крайний левый) содержит единичные значения и предназначен для вычисления свободного члена уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{K}^{<0>}}{m}. \quad (2.20)$$

Остальные столбцы матрицы  $\mathbf{K}$  (от 1 до  $k$ ) служат для вычисления коэффициентов регрессии соответствующего фактора:

$$b_1 = \frac{\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{K}^{<1>}}{m}; \dots; b_k = \frac{\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{K}^{<k>}}{m}. \quad (2.21)$$

Нелинейное взаимодействие факторов в вычислительном эксперименте может быть учтено путем добавления столбцов с кодовой реализацией факторов  $q_i q_j$ ,  $q_i q_j q_k$ , ... . Очевидно, что исследование нелинейного взаимодействия приведет к увеличению размерности матрицы  $\mathbf{K}$  до:

$$m \times (k + 1 + p),$$

где  $p$  – число нелинейных взаимодействий факторов.

Для нахождения уравнения температурной погрешности (2.18) необходимо пересчитать коэффициенты регрессии  $b_i$  в коэффициенты влияния термозависимого параметра  $i$ -ого ЭРИ  $a_i$ :

$$a_i = \frac{b_i \cdot q_i^0}{\Delta q_i \cdot b_0}, \quad (2.22)$$

где  $q_i^0$  – нулевой уровень варьируемого параметра  $i$ -ого ЭРИ;  $\Delta q_i$  – интервал варьирования величины  $q_i^0$ .

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

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots, \quad (2.23)$$

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

SPICE-модели с термозависимыми параметрами, встроенные в схемотехнические симуляторы [87-88], допускают два способа задания температур. Первый способ – это значение температуры, при которой были измерены физические величины прототипа элемента. Параметр  $T\_MEASURED$  указывают в качестве одной из строк в описании модели элемента:

$$T\_MEASURED = value,$$

где  $value$  – числовое или параметрическое значение температуры.

Второй способ предполагает задание частных рабочих температур для модели элемента. Это делается тремя альтернативными действиями:

1. Задание рабочей температуры элемента с помощью параметра  $T\_ABS$ , равному температуре окружающей среды  $T_{nom}$ :

$$T\_ABS = T_{nom}.$$

2. Задание относительной температуры элемента с помощью параметра  $T\_REL\_GLOBAL$ , причем итоговая рабочая температура элемента равна сумме температуры окружающей среды  $T_{nom}$  и перегрева  $T\_REL\_GLOBAL$ :

$$T\_ABS = T_{nom} + T\_REL\_GLOBAL.$$

3. Задание относительной температуры элемента с помощью параметра  $T\_REL\_LOCAL$ , причем итоговая рабочая температура элемента равна сумме рабочей температуры для образцовой модели элемента  $T_{ref}$  и перегрева  $T\_REL\_LOCAL$  относительно этой модели:

$$T\_ABS = T_{ref} + T\_REL\_LOCAL.$$

По аналогии с параметром  $T\_MEASURED$  параметры  $T\_ABS$ ,  $T\_REL\_GLOBAL$ ,  $T\_REL\_LOCAL$  указывают в качестве одной из строк в описании модели элемента.



Основное отличие блок-схемы вычислений с целью нахождения (2.23) для многопараметрических ЭРИ (рисунок 2.5) от аналогичной схемы для однопараметрических ЭРИ заключается в установлении рабочей температуры применительно ко всем термозависимым параметрам ЭРИ, участвующим в ПФЭ:

1. Реализация матрицы планирования  $\mathbf{Q}$ , т.е. выработка частных значений параметров компонента  $\mathbf{q}_i(T)$  в соответствии с уровнями варьирования рабочей температуры ЭРИ  $T$  в матрице планирования. Каждый компонент  $\mathbf{q}_i(T)$  представляет собой вектор термозависимых параметров конкретного ЭРИ. Множество  $\mathbf{q}_i(T)$  образует матрицу  $\mathbf{Q}$ .
2. Одновариантный анализ электрической схемы при полученной реализации случайного вектора  $\mathbf{Q}$ .
3. Вычисление значения целевой функции  $V$  с целью установления выходного параметра ЭС.
4. Повтор процедур № 1, 2, 3, соответствующий общему количеству испытаний в ПФЭ.
5. Статистическая обработка результатов всех испытаний.

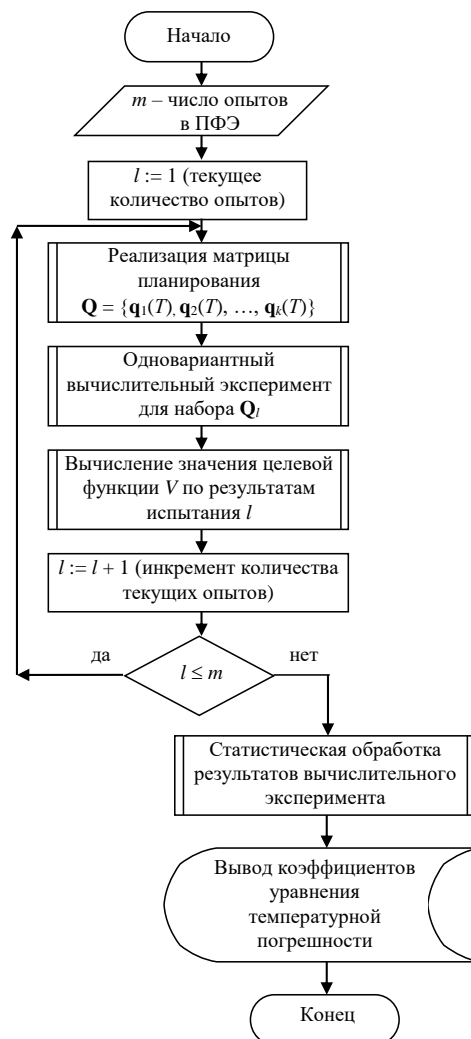


Рисунок 2.5 – Блок-схема реализации вычислительного эксперимента для случая многопараметрических ЭРИ

Факторное пространство вычислительного эксперимента есть множество всех  $q_{ij}$ :

$$\mathbf{Q} = \begin{cases} \mathcal{Q}_1 = \left\{ \begin{array}{l} q_{11}(T_{\min}), q_{12}(T_{\min}), \dots, q_{1s_1}(T_{\min}) \\ q_{11}(T_{\max}), q_{12}(T_{\max}), \dots, q_{1s_1}(T_{\max}) \end{array} \right\}; \\ \mathcal{Q}_2 = \left\{ \begin{array}{l} q_{21}(T_{\min}), q_{22}(T_{\min}), \dots, q_{2s_2}(T_{\min}) \\ q_{21}(T_{\max}), q_{22}(T_{\max}), \dots, q_{2s_2}(T_{\max}) \end{array} \right\}; \\ \dots \\ \mathcal{Q}_k = \left\{ \begin{array}{l} q_{k1}(T_{\min}), q_{k2}(T_{\min}), \dots, q_{ks_k}(T_{\min}) \\ q_{k1}(T_{\max}), q_{k2}(T_{\max}), \dots, q_{ks_k}(T_{\max}) \end{array} \right\}, \end{cases}$$

где  $k$  – число факторов, т.е. число многопараметрических ЭРИ, варьируемых в эксперименте;  $s_i$  – количество термозависимых параметров в  $i$ -ом ЭРИ;  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – нижний и верхний интервалы варьирования температуры.

В условиях реализации вычислительного факторного эксперимента будет получен вектор  $\mathbf{V}$ . Элементом вектора  $\mathbf{V}$  выступает функция одновариантного испытания ЭС  $\theta_i$ , которая содержит уникальное (неповторяющееся) сочетание значений  $\theta_i$ :

$$\mathbf{V} = \begin{cases} V_1 = \theta_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_1(T_1^{\min}, T_2^{\min}, \dots, T_k^{\min}); \\ V_2 = \theta_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_2(T_1^{\max}, T_2^{\min}, \dots, T_k^{\min}); \\ \dots \\ V_m = \theta_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_k) = \theta_m(T_1^{\max}, T_2^{\max}, \dots, T_k^{\max}), \end{cases}$$

где  $m = 2^k$ .

После получения вектора  $\mathbf{V}$  переходят к статистической обработке данных с целью нахождения сначала коэффициентов регрессии (2.20 – 2.21), а затем – коэффициентов влияния (2.22).

В общем случае ЭС состоит из  $k_1$  однопараметрических и  $k_2$  многопараметрических ЭРВ. Предлагается для исследования таких устройств использовать смешанное варьирование величиной параметра для  $k_1$  элементов и температурой для  $k_2$  элементов. Уравнение температурной погрешности устройства в этом случае имеет вид:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^{k_1} a'_i \alpha_i \Delta T_i + \sum_{j=1}^{k_2} a''_j \frac{\Delta T_j}{T_j}; \quad (2.24)$$

где  $a'_i$ ,  $a''_j$  – коэффициенты влияния однопараметрических и многопараметрических ЭРИ, соответственно.

Предложенные уравнения температурной погрешности (2.18), (2.23) позволяют обоснованно подойти к выбору метода термостабилизации ЭС. Рассмотрим возможные случаи комбинаций коэффициентов влияния  $a_i$  в конкретных реализациях (2.18), (2.23):

1. Случай равновеликих коэффициентов влияния  $a_i$ . В этой реализации коэффициенты влияния характеризуются величинами одного порядка и одного знака:

$$a_1 \approx a_2 \approx \dots \approx a_i$$

или

$$-a_1 \approx -a_2 \approx \dots \approx -a_i.$$

Для минимизации значения температурной погрешности выходного параметра  $\frac{\Delta N}{N}$  в (2.18), (2.23) наиболее выгодным техническим решением является применение прецизионной ЭКБ, поскольку минимизация отдельных слагаемых (коэффициентов влияния  $a_i$ ) приводит к минимизации всего выходного параметра  $\frac{\Delta N}{N}$ ;

2. Случай равномодульных коэффициентов влияния  $a_i$ . Для этой реализации характерны коэффициенты влияния одного порядка и разных знаков:

$$|a_1| \approx |a_2| \approx \dots \approx |a_i|.$$

Техническим решением для минимизации функций (2.18), (2.23) можно признать способ термокомпенсации на уровне схмотехнических решений и/или на уровне топологии термоанизотропных несущих конструкций ЭС. Положительный эффект способа термокомпенсации заключается либо во взаимном уравнивании коэффициентов влияния  $a_i + (-a_j) \approx 0$  (уровень схмотехнических решений), либо во взаимном уравнивании относительных рабочих температур ЭРИ  $\frac{\Delta T_i}{T_i}$  (уровень топологических решений). Очевидно, что оба технических подвида минимизируют  $\frac{\Delta N}{N}$  в (2.18), (2.23).

3. Случай доминирующих коэффициентов влияния  $a_i$ . Предполагается, что среди множества коэффициентов влияния в (2.18), (2.23) существуют несколько таких, чья абсолютная величина на порядок и более превосходит абсолютные величины остальных коэффициентов уравнения температурной погрешности:

$$|a_i| \gg \{|a_1| \approx |a_2| \approx \dots \approx |a_j|\}.$$

Техническим решением для этого случая оправдано применение микротермостатирования. Анализ (2.23) позволяет утверждать, что это техническое решение направлено на минимизацию изменения относительной рабочей температуры  $i$ -ого ЭРИ  $\frac{\Delta T_i}{T_i}$ , а значит – на минимизацию  $\frac{\Delta N}{N}$ .

Из сравнения с первоначальным уравнением температурной погрешности (2.8) следует, что такие недостатки как равенство рабочих температур ЭРИ и малая информативность не присущи уравнениям (2.18), (2.23). Таким образом, уравнения температурной погрешности (2.18), (2.23) пригодны с практической точки зрения в качестве математической модели высшего порядка для описания температурной стабильности проектируемого ЭС. Однако, использование метода статистического планирования эксперимента для нахождения коэффициентов влияния связано со значительной трудоемкостью в реализации факторного эксперимента. Можно заметить, что с увеличением числа факторов трудоемкость реализации эксперимента возрастает по закону  $2^k$ , где  $k$  – число факторов.

С целью снижения трудоемкости и экономических затрат в реализации факторного эксперимента в [52] выдвинута перспективная идея замещения физического факторного эксперимента на вычислительный факторный эксперимент. Главное отличие вычислительного факторного эксперимента заключается в том, что при его реализации отсутствует материальный объект исследования. Объект исследования заменяет некая математическая модель, которая должна достаточно объективно отображать процессы, происходящие в объекте-прототипе. Формально методика проведения вычислительного факторного эксперимента и последующее вычисление коэффициентов регрессии и коэффициентов влияния аналогична физическому факторному эксперименту [82].

Недостаток вычислительного факторного эксперимента – в непредсказуемости процессов и явлений вероятностного характера, а также в изменении условий окружающей среды, которые могут произойти при эксплуатации реального объекта-прототипа. Однако, учитывая значительную экономию временных и материальных ресурсов, проведение вычислительного факторного эксперимента оправдано, а в ряде случаев единственно возможно. Основная трудность в реализации вычислительного факторного эксперимента возникает при синтезе адекватной математической модели проектируемого ЭС.

С учетом (2.18), (2.23) под факторами подразумеваются ЭРИ, из которых состоит электронная схема ЭС. Таким образом, задача предварительного эксперимента – в выявлении тех ЭРИ электронной схемы, изменение термозависимых параметров которых оказывает наибольшее значение на изменение выходного параметра ЭС.

Методика предварительного эксперимента сводится либо к поочередному варьированию номиналов и типов ЭРИ, входящих в электронную схему ЭС, либо к поочередному изменению условий внешней среды для каждого ЭРИ, что является сложной и трудоемкой задачей на практике. При этом анализируется изменение выходного параметра. ЭРИ, вызывающие наибольшее изменение выходного параметра от исходного, являются существенными факторами.

Предварительный эксперимент для материального объекта исследования без изменения условий внешней среды проводится по следующей методике. Варьирование пассивных ЭРИ осуществляется заменой номиналов, отличающихся на 10...20 % от исходных номиналов, как в большую, так и в меньшую сторону. При варьировании активных ЭРИ измеряется один из термозависимых параметров этого элемента и подбираются ЭРИ со сходным термозависимыми параметрами.

Предварительный эксперимент для математической модели объекта проводится по иной методике. Для отсеивания несущественных факторов-ЭРИ исследуемой модели целесообразно применять теорию чувствительности. Применительно к температурным исследованиям, чувствительность  $i$ -ого ЭРИ  $S_i$  представляет собой производную выходного параметра исследуемого устройства  $N$  по величине термозависимого параметра ЭРИ  $U_i$ :

$$S_i = \frac{dN}{dU_i}.$$

Нормализованная чувствительность  $S_{Ni}$  равна произведению чувствительности  $S_i$  на величину термозависимого параметра ЭРИ  $U_i$ :

$$S_{Ni} = \frac{dN}{dU_i} U_i.$$

ЭРИ, обладающие наибольшей нормализованной чувствительностью, являются существенными факторами при проведении вычислительного факторного эксперимента.

Приведенные методики выбора существенных факторов-ЭРИ не являются единственными и неоспоримыми. Для этой цели можно также применять дробный факторный эксперимент. Однако, для относительно несложных схем применение дробного факторного эксперимента неоправданно. Целесообразность применения дробного факторного эксперимента возрастает с ростом количества факторов.

Учитывая предельную формализацию факторного эксперимента и сопутствующих ему вычислительных процедур [82-84], можно весь комплекс автоматизированных операций по проектированию термостабильных ЭС представить в виде трех задач. Исходя из уравнений температурной погрешности (2.18), (2.23), выделяется:

1. Задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ, входящих в электрическую схему ЭС.

2. Задача схемотехнического анализа (моделирования) электрической схемы для нахождения коэффициентов влияния уравнения температурной погрешности  $a_i = \frac{b_i \cdot T_0}{\Delta T \cdot b_0}$ .

3. Задача топологического проектирования для расчета температурного поля и нахождения изменений рабочих температур ЭРИ  $\frac{\Delta T_i}{T_i}$ .

В реализации перечисленных задач могут использоваться как широко известные, так и оригинальные программные продукты схемотехнического и топологического проектирования. Например, для реализации задачи схемотехнического анализа целесообразно использование известных программ схемотехнического моделирования [87, 88]. Рассмотрим это программное обеспечение подробнее.

OrCAD – пакет компьютерных программ, предназначенный для автоматизации проектирования электроники. Используется в основном для создания электронных версий печатных плат для производства печатных плат, а также для производства электронных схем и их моделирования. Название OrCAD произведено от слов Oregon и CAD. Продукты серии OrCAD принадлежат компании Cadence Design Systems.

В составе пакета следующие модули:

- Capture – редактор принципиальных схем;
- Capture CIS Option – менеджер библиотек Active Parts;
- PSpice Analog Digital – пакет аналого-цифрового моделирования;
- PSpice Advanced Analysis – пакет параметрической оптимизации;
- PSpice SLPS option – интерфейс связи с пакетом Matlab;
- PCB Designer - редактор топологий печатных плат;
- SPECCTRA for OrCAD – программа автоматической и интерактивной трассировки;
- Signal Explorer – модуль анализа целостности сигналов и перекрестных искажений.

Spectrum Software – это калифорнийская компания-разработчик программного обеспечения, которая специализируется на инструментах электрического моделирования и анализа, прежде всего на симуляторе микросхем Micro-Cap. Деятельность компании ведет начало с февраля 1980 года.

В августе 1981 года был выпущен первый программный продукт – Circuit Designer and Simulator. Его встроенный текстовый редактор позволял создавать описания схем для аналогового симулятора. В сентябре 1982 года был выпущен первый пакет Micro-Cap как преемник Circuit Designer и Simulator. По состоянию на 4 июля 2019 года компания закрылась, и программное обеспечение теперь распространяется бесплатно.

Как было сказано выше, нахождение коэффициентов уравнения температурной погрешности в (2.18), (2.23) предполагает не только схемотехнический анализ, но и последующую статистическую обработку экспериментальных данных. В связи с этим в таблице 2.1 приведены све-

дения о наиболее распространенных схемотехнических симуляторах, дополненные программным обеспечением по статистической обработке данных. В отдельные столбцы выделены достоинства и недостатки, присущие этим программным продуктам.

Таблица 2.1 – Сведения о программном обеспечении, пригодном для вычислительного факторного эксперимента

Тип программного продукта	Наименование программного продукта	Достоинства	Недостатки
Схемотехнический симулятор	OrCAD PSpice	Открытая архитектура. Возможность создания макросов на языке Tcl/Tk Scripting. Поддержка библиотеки приложений OrCAD Capture Marketplace. Интерфейс с программным комплексом MatLab	Повышенные требования к аппаратному обеспечению. Большой объем занимаемого дискового пространства.
	Spectrum Software MicroCAP	Компактность. Высокая производительность. Сбалансированность программного продукта только для целей схемотехнического моделирования. В настоящее время распространяется бесплатно.	Разработчик программного обеспечения с 2019 года перестал сопровождать программный комплекс и создание новых версий
Программное обеспечение для статистического анализа экспериментальных данных	Microsoft Excel	Широко распространенное программное обеспечение. Большое количество пользователей по всему миру. Расширенные функциональные возможности для построения и форматирования графиков	Статистический анализ данных в программном комплексе требует специальных навыков работы со встроенными функциями и электронными ячейками
	PTC MathCAD	Концепция максимального сходства записи математических выражений в программном комплексе по отношению к классической математике.	Комментарии на русском языке не всегда корректно отображаются при переходе от старых к новым версиям

Исходя из сведений в таблице 2.1 можно предложить четыре комбинации программного обеспечения для реализации вычислительного факторного эксперимента с целью нахождения уравнения температурной погрешности (2.18), (2.23):

- OrCAD PSpice + Microsoft Excel;
- OrCAD PSpice + PTC MathCAD;
- Spectrum Software MicroCAP + Microsoft Excel;
- Spectrum Software MicroCAP + PTC MathCAD.

В последующих разделах рассмотрим практические примеры вычислительных факторных экспериментов:

1. Проверка адекватности полиномиальной модели уравнения регрессии.
2. Реализация вычислительного факторного эксперимента для однопараметрических ЭРИ.
3. Реализация вычислительного факторного эксперимента для многопараметрических ЭРИ.

Перспективность предлагаемого нами вычислительного факторного эксперимента с целью нахождения уравнения температурной погрешности обусловлена следующими ключевыми особенностями:

- значительным сокращением материальных и временных ресурсов на ранних этапах проектирования термостабильных ЭС;
- рациональным и обоснованным выбором метода термостабилизации ЭС, следствием чего является минимизация технико-экономических показателей при его изготовлении.

### 2.3 Реализация вычислительного факторного эксперимента для многопараметрических ЭРИ

Объектом экспериментальных исследований служит электрическая схема стабилизатора напряжения (рисунок 2.6). В качестве источника используется генератор синусоидального напряжения  $V1$ . Параметры входного сигнала: амплитуда  $U_{ВХ} = 30$  В; частота  $f = 100$  Гц. Диодный мост  $VD1...VD4$  собран на кремниевых диодах средней мощности FR306 с барьером Шоттки. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения осуществляют емкости  $C1, C2$ , представляющие собой оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-18-32В-68мкф. Резистор  $R1$  номиналом 2 кОм – это один резистивный элемент блока Б19К1-1. Составной транзистор  $VT1, VT2$  включает  $n-p-n$ -транзистор средней мощности MJE340 и  $n-p-n$ -транзистор большой мощности MJE15032. Источник опорного напряжения  $VD5$  выполнен на стабилитроне VZX84C15 с напряжением стабилизации 15,1 В. Выбор импортной элементной базы обусловлен наличием адекватных SPICE моделей указанных прототипов (таблица 2.2).

Вычислительный факторный эксперимент выполняется с помощью комбинации программных комплексов Spectrum Software MicroCAP + PTC MathCAD. Требуется провести полный факторный эксперимент с целью нахождения уравнения температурной погрешности по (2.23) для электрической схемы стабилизатора напряжения.

Критерий оптимизации – минимизация относительной погрешности напряжения стабилизации, как функции относительных изменений рабочих температур ЭРИ:



$$\frac{\Delta U_{\text{СТАБ}}}{U_{\text{СТАБ}}} = f\left(\frac{\Delta T_i}{T_i}\right).$$

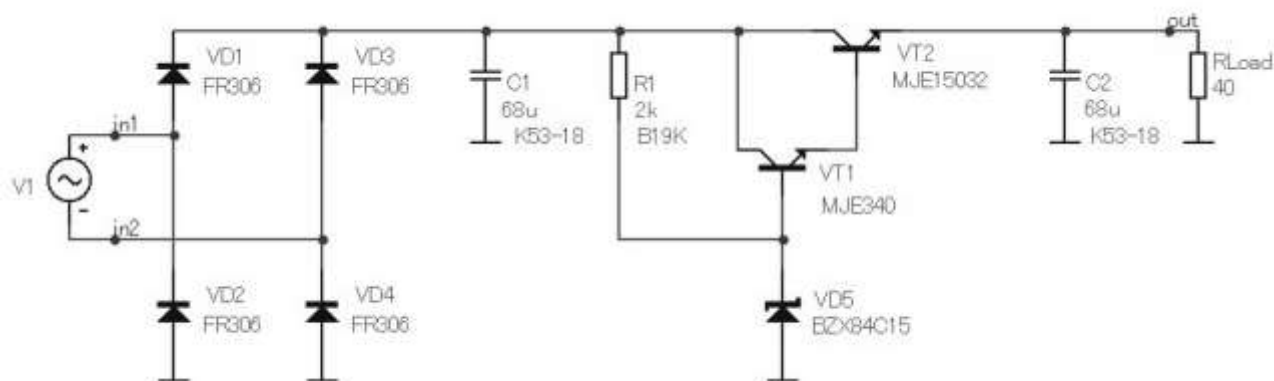


Рисунок 2.6 – Электрическая схема стабилизатора напряжения

Таблица 2.2 – Перечень SPICE моделей, применяемых в моделировании

№ п/п	Название SPICE модели	Источник происхождения
1	Кремниевый диод средней мощности FR306 с барьером Шоттки	Библиотека <i>microsem.lbr</i> , входящая в состав схемотехнического симулятора Spectrum Software MicroCAP
2	Оксидно-полупроводниковый танталовый конденсатор K53-18	Отчет по ОКР «Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы российского производства»
3	Резисторный блок B19K	Отчет по ОКР «Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы российского производства»
4	<i>NPN</i> -транзистор средней мощности MJE340	Библиотека <i>mpbjt.lbr</i> , входящая в состав схемотехнического симулятора Spectrum Software MicroCAP
5	<i>NPN</i> -транзистор большой мощности MJE15032	Разработка Symmetry Design Systems
6	Стабилитрон BZX84C15	Разработка Zetex PLC

Независимые переменные (факторы) – рабочие температуры ЭРИ, входящих в электрическую схему. Количество факторов  $k = 6$ :

1. Рабочая температура диодов  $VD1 \dots VD4$ .
2. Рабочая температура конденсаторов  $C1, C2$ .
3. Рабочая температура резистора  $R1$ .
4. Рабочая температура транзистора  $VT1$ .
5. Рабочая температура транзистора  $VT2$ .
6. Рабочая температура стабилитрона  $VD5$ .

Число опытов в матрице планирования  $m = 2^k = 64$ .

Номинальные значения независимых переменных:  $T_{ЭРИ} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Интервалы варьирования:  $\Delta T_{ЭРИ} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Кодированная запись факторов:

$$q_i = \frac{Q_i - 27}{50}; i \in [1 \dots 6].$$

Основные характеристики плана эксперимента приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	Значение фактора $Q_i$	Кодовое значение фактора $q_i$
Основной уровень	27 °C	0
Интервал варьирования	50 °C	---
Верхний уровень	77 °C	1
Нижний уровень	-23 °C	-1

Для ведения эксперимента применяется план 2<sup>6</sup> (таблица 2.4). Задание параметров моделирования во временной области проводится в два приема. Первый прием заключается в задании параметров для одновариантного анализа схемы во временной области для основного уровня (рисунок 2.7):

- Maximum Run Time (временной диапазон): **40m** ( $t \in [0 \dots 40]$  мс);
- Maximum Time Step (приращение шага по времени): **0.04m** ( $\Delta t = 0,04$  мс);
- Temperature (температура окружающей среды): **27** ( $T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- X Expression (переменная по оси абсцисс): **T** (время);
- Y Expression (переменная по оси ординат): **V(OUT)** (напряжение на выходе).

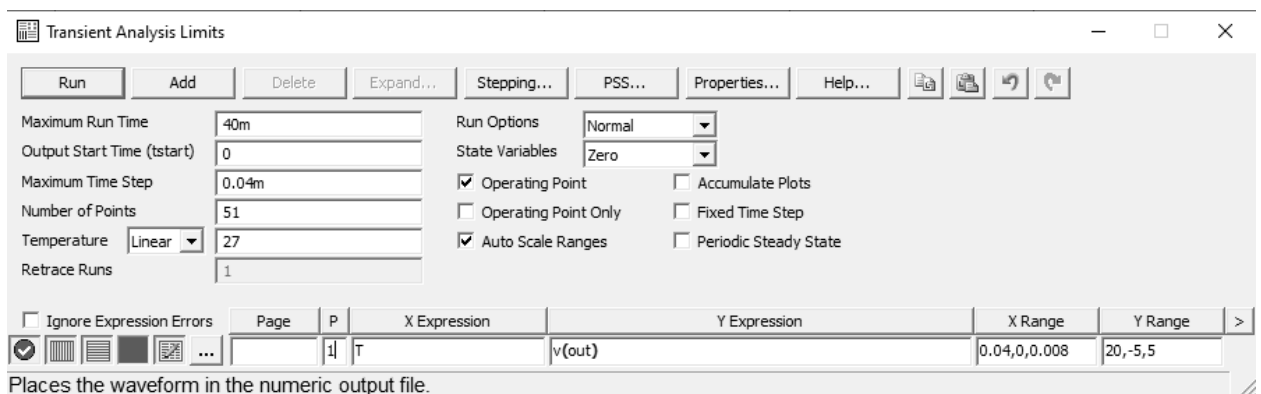


Рисунок 2.7 – Параметры моделирования для одновариантного анализа схемы во временной области

Схемотехническое моделирование электрической схемы стабилизатора позволило вычислить следующие параметры (рисунок 2.8):

- напряжение стабилизации  $U_{\text{СТАБ}} = 13,7 \text{ В}$ ;
- коэффициент стабилизации  $K_{\text{СТАБ}} = 34,362$ ;
- нестабильность выходного напряжения  $\delta_U = 0,029$ ;
- внутреннее сопротивление стабилизатора  $R_i = 23 \text{ Ом}$ ;
- температурная нестабильность  $\delta_T = 0,0139$ ;
- коэффициент сглаживания пульсаций  $q = 47,378$ ;
- коэффициент полезного действия  $\eta = 0,527$ .

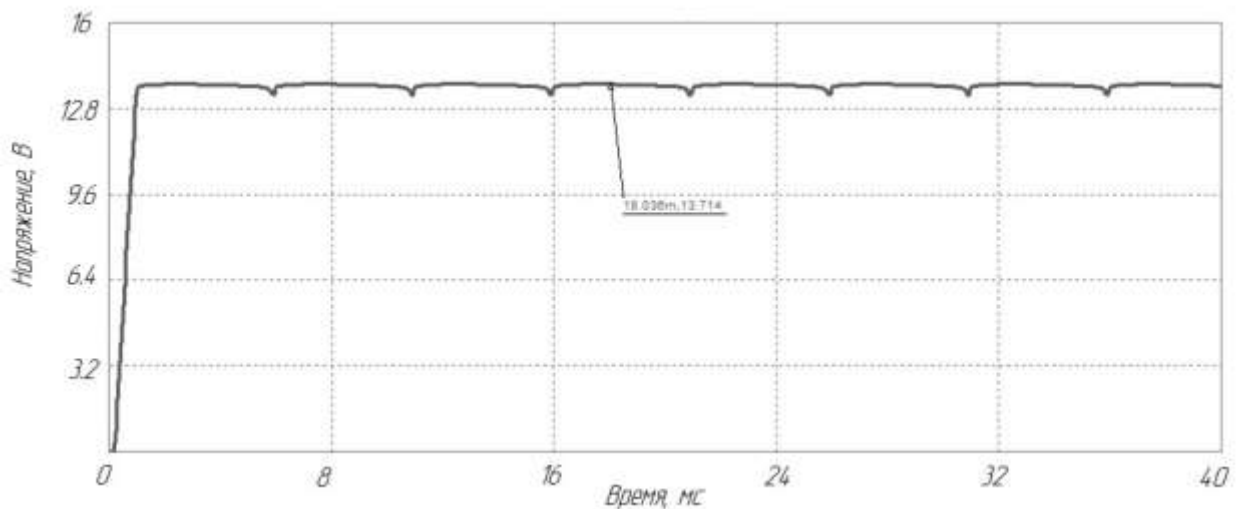


Рисунок 2.8 – Результаты моделирования во временной области

Второй прием – задание параметров многовариантного анализа (Stepping). Параметры многовариантного анализа (рисунок 2.9):

- количество варьируемых параметров: **6** (шесть вкладок в верхней части диалогового окна);
- Step What (тип варьируемого параметра): **D FR306 T\_Measured, CAP K53-18 T\_Measured, RES B19K T\_Measured, NPN MJE340 T\_Measured, NPN MJE15032 T\_Measured, D BZX84C15 T\_Measured** (варьирование рабочей температуры для перечисленных ЭРИ);
- List (значения температур): **-23, 77** (-23, 77 °C);
- Step It (включение многовариантного анализа): **Yes** (Да);
- Method (метод вариации): **List** (точечный);
- Parameter Type (тип параметра): **Model** (модель);
- Change (характер варьирования): **Step variables in nested loops** (вложенные циклы).

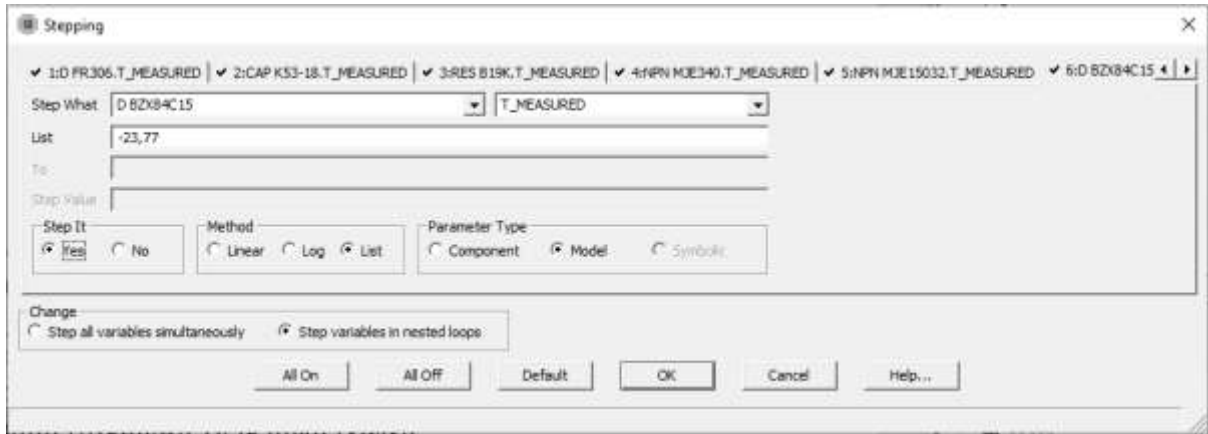


Рисунок 2.9 – Задание параметров для многовариантного анализа по сценарию ПФЭ

Результат варьирования параметров изначально представляет собой семейство выходных характеристик стабилизатора (рисунок 2.10). Такой вид представления неудобен для восприятия и количественного анализа. Устранить отмеченный недостаток возможно с помощью целевой функции (рисунок 2.11):

$$High\_Y(v(out), I),$$

где  $High\_Y$  – шаблон целевой функции, встроенной в MicroCAP, находит глобальный максимум функции  $y$ ; константа  $I$  – флаг разрешения исполнения целевой функции. Для нашего исследования  $y = v(out)$  – значение напряжения стабилизации.

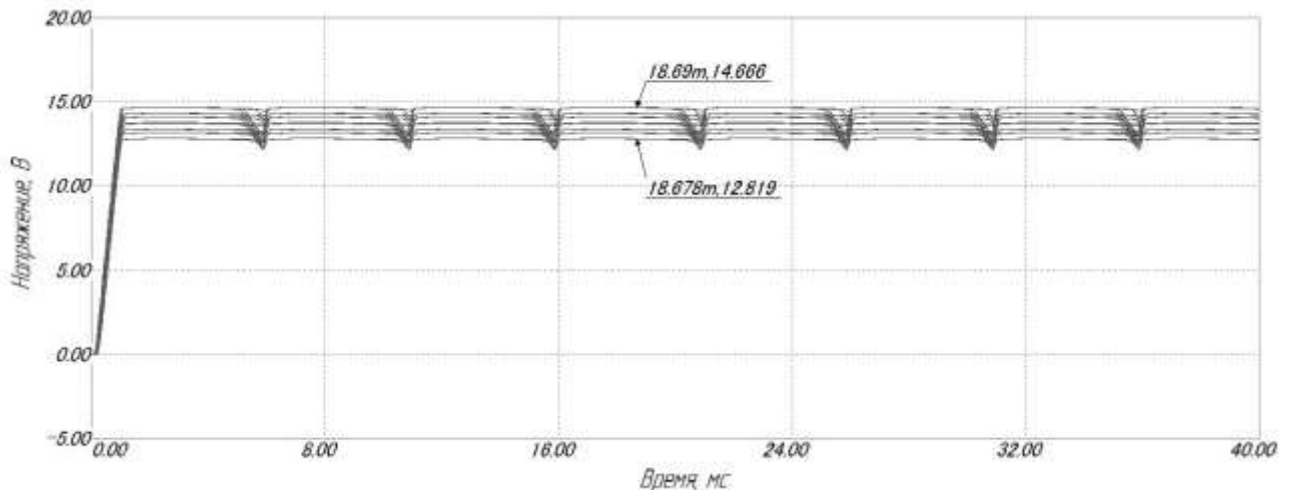


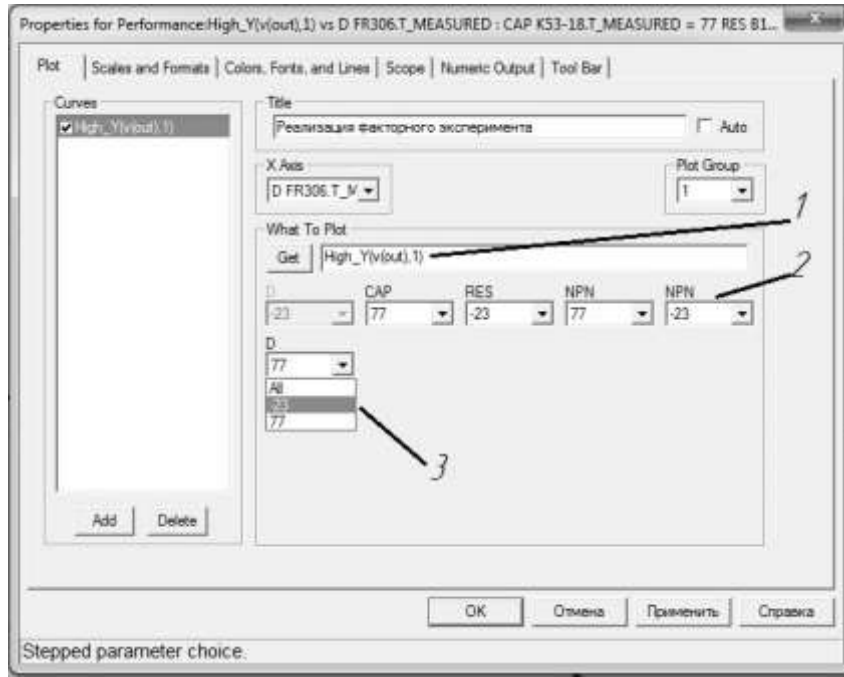
Рисунок 2.10 – Семейство выходных характеристик стабилизатора, полученных в ходе факторного эксперимента

С помощью выпадающих списков в диалоговом окне последовательно выставляется сочетание факторов эксперимента (позиция 3 на рисунке 2.11). Результат отображается на коорди-

натной плоскости в виде двух точек (рисунок 2.12). Две точки характеризуют два значения факторного эксперимента, поскольку ось абсцисс – это значение фактора №1 (рабочая температура диодов VD1...VD4):

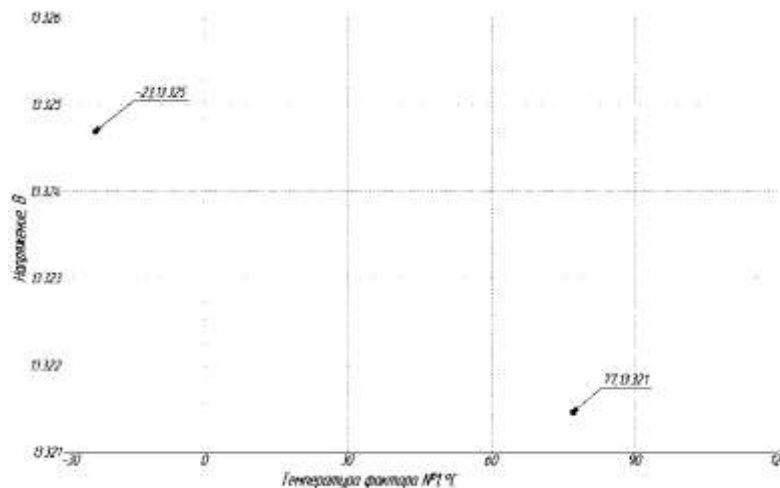
$-23^{\circ}\text{C}$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$ ;

$77^{\circ}\text{C}$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$ .



1 – целевая функция; 2 – список факторов; 3 – уровни варьирования факторов

Рисунок 2.11 – Механизм управления факторным экспериментом



Сочетание факторов:  $-23^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$ ;  $-23^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$ ;  $-23^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$  (левая точка);

Сочетание факторов:  $77^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$ ;  $-23^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$ ;  $-23^{\circ}\text{C}$ ;  $77^{\circ}\text{C}$  (правая точка)

Рисунок 2.12 – Значения целевой функции для двух определенных сочетаний факторов

Результаты факторного эксперимента записаны в столбец экспериментальных значений выходного параметра  $n_э$ . Столбцы  $n_т$  и  $\Delta n^2$  заполняются позже.

Таблица 2.4 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$q_0$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$n_э$	$n_т$	$\Delta n^2$
1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	14,691	14,691	$1,4 \cdot 10^{-7}$
2	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	13,743	13,743	$1,6 \cdot 10^{-8}$
3	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	14,139	14,139	$1,4 \cdot 10^{-7}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
64	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	12,835	12,834	$7,7 \cdot 10^{-7}$
									$\Sigma \Delta n^2 =$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Ортогональность столбцов матрицы планирования позволяет определить коэффициенты регрессии по (2.20), (2.21):

$$b_0 = 13,762;$$

$$b_1 = -0,0019;$$

$$b_2 = -3,053 \cdot 10^{-16};$$

$$b_3 = -7,494 \cdot 10^{-16};$$

$$b_4 = -0,177;$$

$$b_5 = -0,276;$$

$$b_6 = -0,474.$$

Следовательно, линейный полином имеет вид:

$$U = 13,762 - 0,0019x_1 - 3,053 \cdot 10^{-16}x_2 - 7,494 \cdot 10^{-16}x_3 - 0,177x_4 - 0,276x_5 - 0,474x_6. \quad (2.25)$$

Оценим адекватность линейного полинома (2.25). Вычислим дисперсию адекватности по (2.13):

$$S_{ад}^2 = 4,386 \cdot 10^{-7}.$$

Вычислим дисперсию воспроизводимости по (2.14):

$$S_{вос}^2 = 0,337.$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости и дисперсии адекватности будут  $k_> = (m - 1) = 63$ ;  $k_< = f = 57$ , соответственно. Вычислим расчетное значение критерия Фишера по (2.15):

$$F_{расч} = \frac{4,386 \cdot 10^{-7}}{0,337} = 1,301 \cdot 10^{-6}.$$

Определим табличное значение критерия Фишера при уровне доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$  [105]:

$$F_{\text{табл}}(k_>, k_<, \gamma) = 1,4.$$

Поскольку  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , то с доверительной вероятностью 95 % считаем полученный линейный полином (2.25) адекватной математической моделью.

Оценим статистическую значимость коэффициентов регрессии. Табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $k_> = 63$  и уровне доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$  определим по [105]:

$$t(\alpha, \gamma) = 2,00.$$

Согласно (2.16) доверительный интервал будет:

$$\Delta b_i = \pm \frac{2,00 \cdot \sqrt{0,337}}{\sqrt{64}} = 0,145.$$

Поскольку  $b_1, b_2, b_3 < \Delta b_i$ , считаем эти коэффициенты регрессии незначимыми. Для проверки возможности нелинейного полинома проведено дополнение к базовой матрице планирования. Введены столбцы с произведениями трех наиболее значимых факторов:  $q_4q_5$ ,  $q_4q_6$ ,  $q_5q_6$ ,  $q_4q_5q_6$  (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Дополненная матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$q_0$	$q_1$	...	$q_6$	$q_4q_5$	$q_4q_6$	$q_5q_6$	$q_4q_5q_6$	$n_э$	$n_т$	$\Delta n^2$
1	+1	-1	...	-1	+1	+1	+1	-1	14,691	14,977	0,082
2	+1	-1	...	+1	+1	-1	-1	+1	13,743	13,554	0,036
3	+1	-1	...	-1	-1	+1	-1	+1	14,139	14,021	0,014
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
64	+1	+1	...	+1	+1	+1	+1	+1	12,835	13,074	0,057
										$\Sigma \Delta n^2 =$	1,717

Вычисленная дисперсия адекватности для нелинейных взаимодействий составляет

$$S_{\text{ад.нелин}}^2 = 0,03,$$

что превышает аналогичный показатель для линейного полинома на много порядков. Следовательно, нелинейный полином нельзя считать адекватной регрессионной моделью для уравнения температурной погрешности исследуемого стабилизатора. Адекватной регрессионной моделью следует признать полином (2.25). С учетом малой значимости факторов  $q_1, q_2, q_3$ , запишем (2.25) в виде:

$$U_{\text{СТАБ}} = 13,762 - 0,177q_4 - 0,276q_5 - 0,474q_6. \quad (2.26)$$

Уравнение температурной погрешности в соответствии с (2.23) будет выглядеть:

$$\frac{\Delta U}{U} = -0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} - 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} - 0,207 \frac{\Delta T_{VD5}}{T_{VD5}}. \quad (2.27)$$

Анализ (2.27) позволяет утверждать:

- температурная погрешность напряжения стабилизации в основном зависит от температурной нестабильности трех ЭРИ: транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , стабилитрон  $VD5$ ;
- адекватной регрессионной моделью исследуемого процесса признан линейный полином (2.25);
- отрицательный знак коэффициентов регрессии в (2.27) свидетельствует об отрицательном тренде температурной зависимости параметров ЭРИ;
- для обеспечения заданной температурной стабильности данного устройства возможно два решения: применение высокостабильных ЭРИ  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ ; термостатирование ЭРИ  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ .

## 2.6 Основные результаты исследования

1. Найдена аналитическая зависимость выходного параметра ЭС от параметров ЭРИ и температуры – уравнение температурной погрешности. Для нахождения уравнения температурной погрешности (2.18), (2.23), (2.24) и проверки его адекватности использованы основные положения теории планирования факторного эксперимента в сочетании с регрессионным анализом.

2. 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.

3. Показано, что виды уравнений температурной погрешности (2.18), (2.23) позволяют 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.



4. Выделены отдельные частные задачи, вытекающие из общей задачи по нахождению уравнений температурной погрешности (2.18), (2.23):

- задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ, входящих в электрическую схему ЭС;

- задача схемотехнического анализа (моделирования) электрической схемы для нахождения коэффициентов влияния уравнения температурной погрешности  $a_i = \frac{b_i \cdot T_0}{\Delta T \cdot b_0}$ ;

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

Таким образом, в разделе предложен модифицированный метод регрессионного анализа, отличающийся формализацией проведения факторного эксперимента и сопутствующих ему автоматизированных операций, что позволяет за 6 вычислительных процедур обеспечить математическое описание температурной стабильности ЭС. Метод применен для снижения трудоемкости и экономических затрат в реализации экспериментальных исследований температурной стабильности ЭС.

## ГЛАВА 3. СИНТЕЗ SPICE-МОДЕЛЕЙ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ

Цель данной главы – разработка методики синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, пригодные для последующего нахождения коэффициентов влияния в уравнении температурной погрешности.

### 3.1 Методика синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров

#### 3.1.1 Синтез термозависимых SPICE-моделей двухтерминального типа

В номенклатуре ЭРИ, разрешенных к применению в бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены резисторные блоки с планарными выводами семейства Б19К. Как уже было сказано выше (см. п. 1.2.1), блоки Б19К мощностью рассеяния до 1 Вт предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсных режимах. В зависимости от конструкции и электрической принципиальной схемы блоки изготавливают одного типа, трех видов и тридцати четырех вариантов [89].

В работах отечественных ученых В.Н.Леухина, Ю.В.Кандырина, В.Г.Спирина и др. рассматривались вопросы проектирования и технологии пленочных резисторных блоков. Так в [90] проведен анализ влияния различных видов подгонки величины сопротивления и последующих технологических операций на стабильность сопротивления толстопленочных резисторных блоков типа Б19М. В [91] рассмотрена методика и принципы построения САПР резисторных сборок для промышленного и частного применения. Работа [92] посвящена исследованию влияния адгезионного слоя на температурную стабильность тонкопленочного резистора. Однако методологические вопросы синтеза адекватных математических моделей резисторных блоков с позиций температурной стабильности в должной мере еще не исследованы.

Широко распространена классическая методика экстракции параметров SPICE-моделей по справочным данным, представленным в графическом или табулированном виде. К достоинствам методики можно отнести простоту реализации, экономию временных

ресурсов и отсутствие значимых материальных затрат. Но применительно к задачам синтеза SPICE-моделей резисторных блоков с позиций температурной стабильности указанная классическая методика плохо применима по следующим причинам:

- отсутствие в известных SPICE-симуляторах программного средства синтеза моделей резистора;
- сведения в справочной литературе по температурным коэффициентам сопротивления (ТКС), как правило, отражают максимально допустимые (предельные) значения, несовпадающие с реальными значениями образцов;
- отсутствие в справочной литературе информации о трендах температурной зависимости сопротивления.

Предлагается методика создания SPICE-моделей резисторных блоков, основанная на следующих основных этапах [4]:

1. Экспериментальное исследование температурной зависимости сопротивления каждого резистивного элемента резисторного блока.
2. Группировка температурных зависимостей по критерию сходственности и подобия.
3. Усреднение группированных температурных зависимостей.
4. Установление линейных и нелинейных ТКС.

Для исследования были отобраны две партии однотипных блоков Б19К производства ОАО «Контакт»:

1. Б19К1-1-1 кОм $\pm$ 10% ОЖ0.206.018ТУ (рисунок 3.1, *а*). Приемка 9 – изделия категории качества *ОС*.

2. Б19К2-100 Ом $\pm$ 5% ОЖ0.206.018ТУ (рисунок 3.1, *б*). Приемка 9 – изделия категории качества *ОС*.

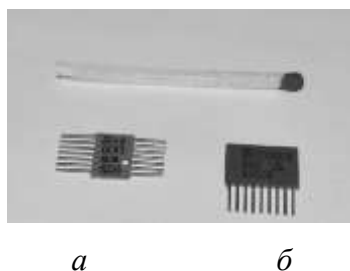


Рисунок 3.1 – Резисторные сборки с планарными выводами семейства Б19К

Резисторные блоки, помимо номиналов и допусков, отличаются также электрической схемой. Так, блок Б19К1-1-1 кОм представляет собой семь независимых (несвязанных между собой) резисторов (рисунок 3.2, *а*). Блок Б19К2-100 Ом содержит восемь резисторов.

В этом блоке реализовано внутреннее соединение одного из полюсов каждого резистора в общей узел и внешний вывод этого узла под номером 9 (рисунок 3.2, б). Блоки Б19К изготавливаются по толсто пленочной технологии с элементами резистивными на основе рутения и стекла.

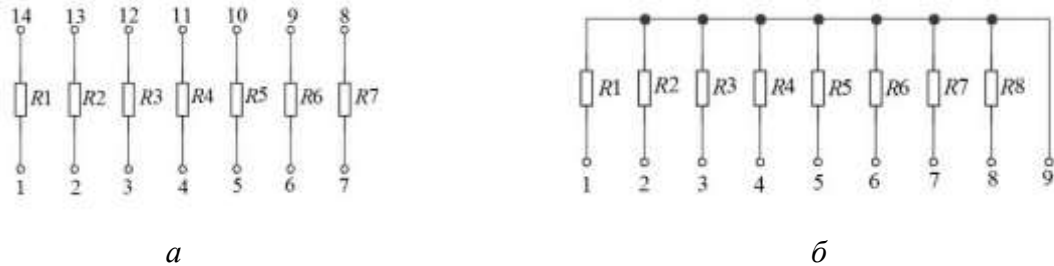


Рисунок 3.2 – Схемы электрические резисторных сборок Б19К

Первая часть методики направлена на проведение измерений температурной зависимости сопротивления резисторных сборок Б19К. Выбрано 6 образцов резисторных сборок из разных партий, причем 3 образца Б19К1-1-1 кОм и 3 образца Б19К2-100 Ом. Для измерений использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 3.3.

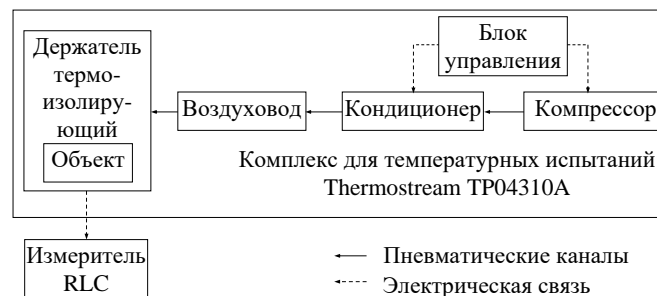


Рисунок 3.3 – Структурная схема измерительной установки

Основа экспериментальной установки – комплекс для температурных испытаний ЭРИ Thermostream TP04310A. Комплекс TP04310A специально разработан для быстрых, качественных и точных испытаний печатных плат, электронных компонентов и модулей. Принцип работы комплекса построен на температурном воздействии сжатого воздуха с большим расходом на испытываемый образец (микросхему или печатную плату). Вся остальная, не испытываемая поверхность объекта накрывается защитным термоизолирующим полотном (держатель термоизолирующий). Большой расход воздуха и давление позволяют комплексу менять температуру на образце за считанные секунды в очень широком диапазоне. Этот диапазон температур шире, чем у любых стандартных климатических ка-

мер. Главным преимуществом комплекса ТР04310А является очень высокая точность контроля температуры ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ), этот параметр превышает показатели самых качественных климатических камер.

Измерения сопротивления образцов при разных температурах осуществляется измерителем RLC прецизионным GW Instek LCR-821. Степень погрешности аппарата низка (0,1%), а надежность выгодно выделяет именно эту модель среди всех приборов такого рода.

Результаты измерений представлены в графическом виде (рисунки 3.4 и 3.5). Каждая координатная плоскость соответствует определенному образцу резисторного блока Б19К (образцы 1, 2, 3, 4, 5, 6). На координатной плоскости отображается температурная зависимость сопротивления для всех резистивных элементов, входящих в блок. Диапазон изменения температуры в эксперименте от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+80^\circ\text{C}$ , что соответствует предельным значениям пониженной и повышенной температуры по справочной документации на резисторный блок [89].

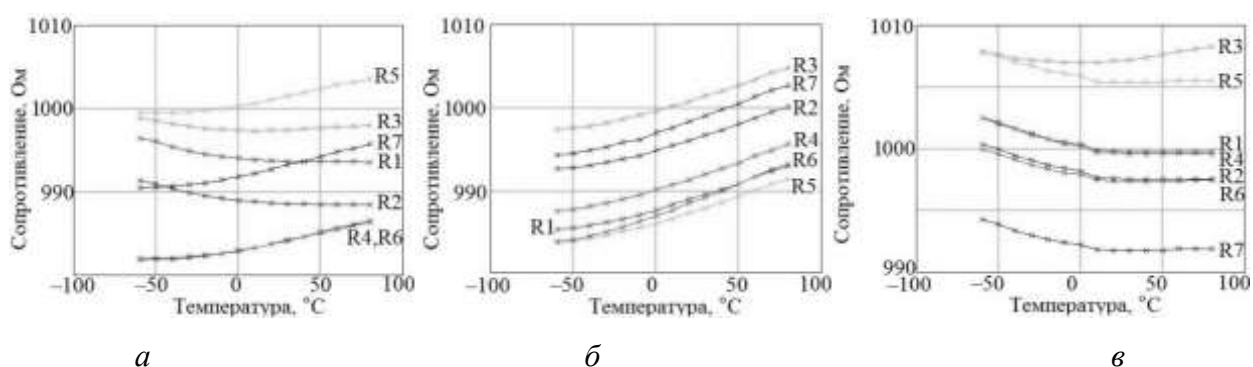


Рисунок 3.4 – Зависимость температурного коэффициента сопротивления сборок Б19К1-1-1 кОм

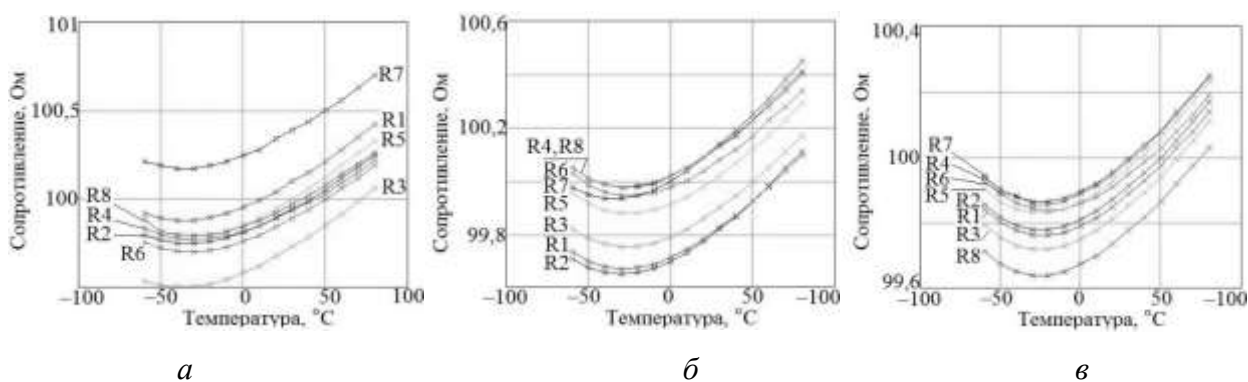


Рисунок 3.5 – Зависимость температурного коэффициента сопротивления сборок Б19К2-100 Ом

Проведем качественный анализ экспериментальных данных шести образцов. Температурные зависимости сопротивления блоков Б19К1-1-1 кОм отличаются разнообразием трендов (рисунок 3.4). В зависимости от принадлежности к партии резисторных блоков резистивные элементы имеют в пределах одного блока: разнонаправленные тренды (образец №1) ТКС, положительный тренд ТКС (образец №2), отрицательный тренд ТКС (образец №3, за исключением резистора R3). В [90] приводится объяснение этому факту: технологическая операция пайки решетки (420-440°С) при изготовлении резисторных блоков является дестабилизирующим фактором, влияющим на повторяемость параметров. В целом функции ТКС всех трех образцов имеют слабо выраженный нелинейный закон изменения. Наиболее нелинейность выражена у ТКС образца №3, наименьшая нелинейность – у образца №2.

Температурные зависимости сопротивления резисторных блоков Б19К2-100 Ом (рисунок 3.5) классически правильные. В области низких температур наблюдается отрицательный тренд ТКС, в области высоких температур – положительный тренд ТКС. Качественный анализ зависимостей позволяет предположить квадратичный характер функции. Минимум функция ТКС достигает при  $T = -25^{\circ}\text{C}$ . Наиболее нелинейность выражена у ТКС образца №6, наименьшая нелинейность – у образца №4.

Для образцов №2, 3, 4, 5, 6 функции ТКС в пределах одного резисторного блока являются сходственными и подобными. Представим ТКС первого резистивного элемента  $i$ -ого образца как функцию от температуры в виде  $y_{i1} = f(T)$ . Тогда из экспериментальных зависимостей видно, что ТКС всех резистивных элементов  $i$ -ого образца будут:

$$\begin{cases} y_{i1} = f(T); \\ y_{i2} = f(T) + a_2; \\ y_{i3} = f(T) + a_3; \\ \dots \\ y_{in} = f(T) + a_n; \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $n$  – количество резистивных элементов в образце;  $a$  – коэффициент параллельного переноса.

Следовательно, будет достаточно найти параметры нелинейности только для одной функции  $f(T)$  в пределах каждого резисторного блока, а коэффициент  $a$  определять технологическим разбросом сопротивления относительно номинального значения. Аналогично можно поступить с образцом №1, если независимо рассматривать в этом блоке две группы ТКС – с отрицательным и с положительным трендом.

Дальнейший количественный анализ и аппроксимацию экспериментальных данных проведем для образца №6 Б19К2-100 Ом. Экспериментальные значения системы (3.1) для образца №6 преобразуем в усредненный эквивалент (рисунок 3.6):

$$y_{6\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{j=1}^n y_{6j}}{n} = \frac{\sum_{j=1}^8 y_{6j}}{8}.$$

Линейная аппроксимация экспериментальных данных потребуется для ориентировочной оценки ТКС. Квадратичная аппроксимация будет служить для более точного соответствия с экспериментальными данными (рисунок 3.7).

Матричное представление линейной тренда имеет вид:

$$y = \mathbf{X}b + \varepsilon,$$

где  $\mathbf{X}$  – матрица экспериментальных значений;  $\varepsilon$  – случайная ошибка.

Тогда вектор оценок  $\hat{y}$  и вектор остатков  $e$  регрессии соответственно равны:

$$\hat{y} = \mathbf{X}b;$$

$$e = y - \hat{y} = y - \mathbf{X}b.$$

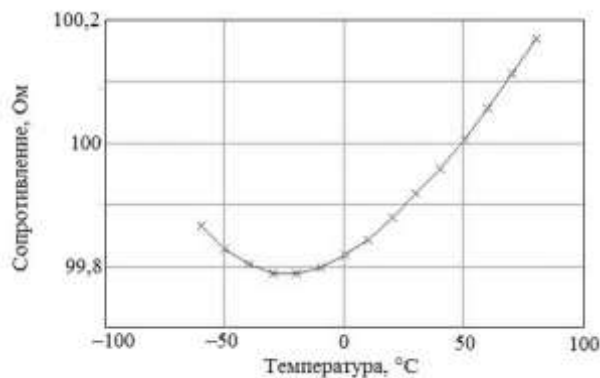
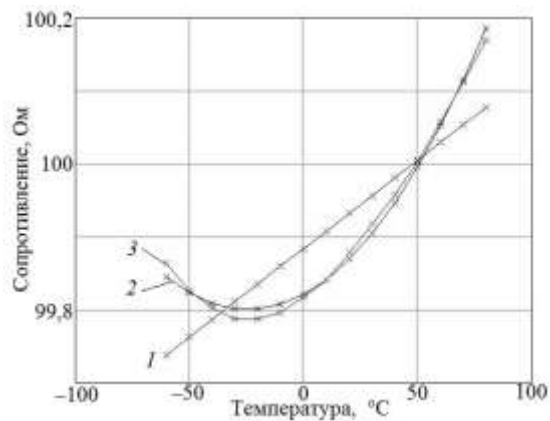


Рисунок 3.6 – Усредненная температурная зависимость сопротивления для образца №6 резисторной сборки Б19К2-100 Ом



1 – линейный полином; 2 – квадратичный полином; 3 – экспериментальная зависимость

Рисунок 3.7 – Аппроксимация температурной зависимости

Сумма квадратов остатков регрессии будет равна:

$$D = e^T e = (y - \mathbf{X}b)^T (y - \mathbf{X}b).$$

Дифференцируя эту функцию по вектору параметров  $b$  и приравняв производные к нулю, получим систему уравнений:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})b = \mathbf{X}^T y.$$

Решение этой системы уравнений позволяет найти коэффициенты линейного полинома  $b_0, b_1$ :

$$b_{\text{лин}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T y = \begin{cases} b_0^{\text{лин}} = 99,884; \\ b_1^{\text{лин}} = 2,43 \cdot 10^{-3}. \end{cases}$$

Аналогичным образом для квадратичного полинома:

$$b_{\text{кв}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T y = \begin{cases} b_0^{\text{кв}} = 99,821; \\ b_1^{\text{кв}} = 1,72 \cdot 10^{-3}; \\ b_2^{\text{кв}} = 3,55 \cdot 10^{-5}. \end{cases}$$

В результате полиномы имеют вид:

$$R(T) = 99,884 + 2,43 \cdot 10^{-3} \cdot T; \quad (3.2)$$

$$R(T) = 99,821 + 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,55 \cdot 10^{-5} \cdot T^2. \quad (3.2)$$

Температурный коэффициент сопротивления, рассчитанный по линейному полиному, составляет:

$$\text{ТКС} = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} = \frac{0,342}{100 \cdot 140} = 2,443 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}.$$

Заметим, что полученный ТКС на порядок меньше заявленного значения в справочной документации [89].

Среднеквадратическое отклонение для квадратичного полинома по сравнению с экспериментальными данными составляет  $\sigma = 0,011$  Ом. Полученное значение  $\sigma$  следует считать приемлемым, поскольку относительная погрешность составляет:

$$\delta = \frac{\sigma}{R} \cdot 100\% = \frac{0,011}{100} \cdot 100 = 0,011\% .$$

Дальнейшее повышение степени полинома аппроксимации не требуется.

Температурная зависимость в SPICE-модели резистора описывается выражением вида [87, 88]:

$$R(T) = R_0(1 + TC1 \cdot (T - T_0) + TC2 \cdot (T - T_0)^2), \quad (3.4)$$

где  $R_0$  – номинальное значение сопротивления;  $TC1, TC2$  – линейный и квадратичный ТКС;  $T_0$  – температура окружающей среды.



Сравнивая уравнения (3.3) и (3.4), получим выражения для вычисления  $TC1$  и  $TC2$ :

$$TC1 = \frac{b_1^{KB}}{b_0^{KB}} = \frac{1,72 \cdot 10^{-3}}{99,821} = 17,229 \cdot 10^{-6} C^{-1};$$

$$TC2 = \frac{b_2^{KB}}{b_0^{KB}} = \frac{3,55 \cdot 10^{-5}}{99,821} = 355,591 \cdot 10^{-9} C^{-1}.$$

Полученная экспериментальная информация позволяет перейти к следующему этапу исследования – схмотехническому моделированию. Для этого воспользуемся программным комплексом OrCAD v.16. Исходное представление резисторного блока Б19К2-100 Ом в программном комплексе OrCAD возможно двумя способами. Первый способ предполагает изображение условного графического обозначения (УГО) резисторного блока (рисунок 3.8, а) вместе со схемой замещения (рисунок 3.8, б). Схема замещения характеризуется как подчиненная (с иерархической точки зрения) по отношению к УГО. Каждый резистивный элемент в схеме замещения помимо номинального значения сопротивления имеет свойства:

-  $TOLERANCE = 5\%$  – технологический разброс параметров согласно справочной информации [89];

-  $TC1 = 17,229 \cdot 10^{-6}$  – линейный ТКС;

-  $TC2 = 355,591 \cdot 10^{-9}$  – квадратичный ТКС.

Второй способ представления состоит в текстовом описании макромодели резисторного блока на языке SPICE (рисунок 3.9, б). Схемы включения резисторного блока на рисунке 3.8, а и на рисунке 3.9, а идентичны. Напряжение 1 В подано на резистивный элемент R1, остальные резистивные элементы соединены между собой.

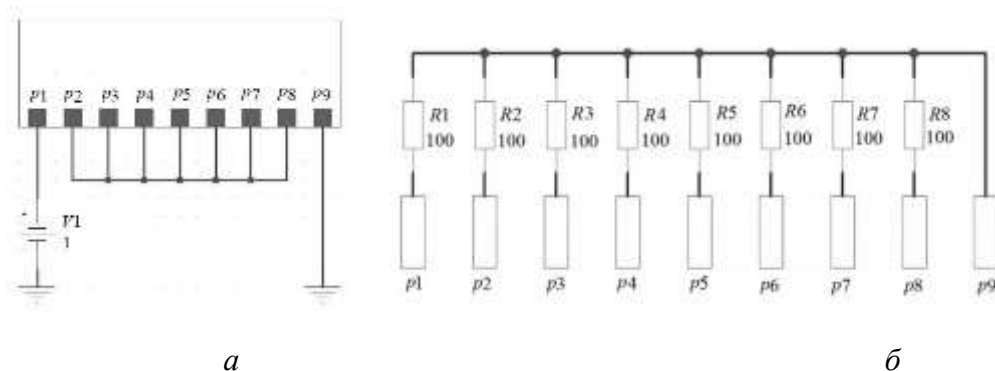


Рисунок 3.8 – Первый способ представления резисторного блока

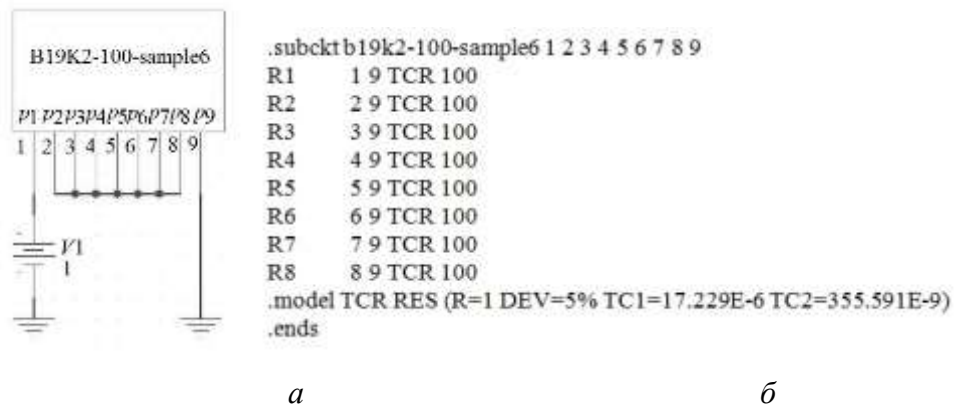


Рисунок 3.9 – Второй способ представления резисторного блока

Условия схемотехнического моделирования в OrCAD:

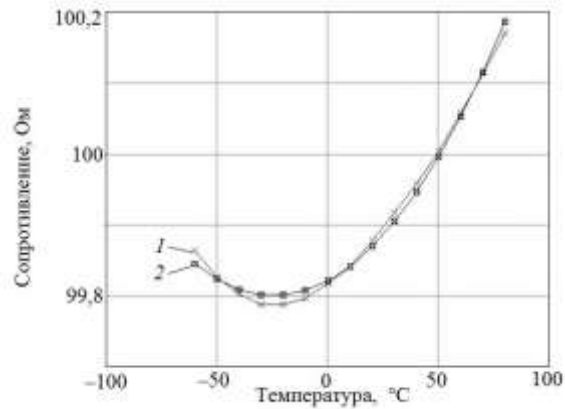
- температура окружающей среды  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;
- диапазон варьирования источника напряжения  $U_{\text{ВХ}} = 0 \dots 10 \text{ В}$ ;
- шаг варьирования источника напряжения  $\Delta U_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$ ;
- диапазон изменения температуры  $T = -60 \dots +80^\circ\text{C}$ ;
- шаг изменения температуры  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ ;
- значение сопротивление резистивного элемента  $R1 = 99,821 \text{ Ом}$ , соответствует найденному значению  $b_0$  в уравнении (3.3).

Графический постпроцессор Probe программного комплекса OrCAD не позволяет в явном виде получать температурную зависимость сопротивления  $R = f(T)$ . Однако на основе многовариантного анализа  $I_{R1} = f(U_{R1}, T)$  имеется возможность построения целевой функции [87]:

$$x/\mathbf{YatX}(y, x), \quad (3.5)$$

где  $\mathbf{YatX}$  – шаблон целевой функции в постпроцессоре Probe, находит значение функции  $y$  при заданном значении  $x$ ;  $y = I_{R1}$ ;  $x = 5 \text{ В}$  (середина диапазона значений  $U_{R1}$ ).

Применение целевой функции (3.5) к семейству характеристик  $I_{R1} = f(U_{R1}, T)$  позволяет представить в графическом виде искомую зависимость  $R_{\text{МОД}} = f(T)$ . Для сравнения на одной координатной плоскости (рисунок 3.10) представлены усредненная экспериментальная зависимость  $R_{\text{ЭКС}} = f(T)$  и импортированная из постпроцессора Probe зависимость  $R_{\text{МОД}} = f(T)$  на основе целевой функции (3.5). Можно видеть, что характеристики 1 и 2 на рисунке 3.10 попарно совпадают с характеристиками 3 и 2 на рисунке 3.7. Следовательно, разработанная SPICE модель резисторного блока Б19К2-100 Ом адекватно отражает поведение образца №6.



1 – усредненная экспериментальная зависимость; 2 – результат моделирования в OrCAD

Рисунок 3.10 – Сравнение температурных зависимостей сопротивления

В схеме замещения (рисунке 3.8, б) присвоим каждому резистивному элементу значение сопротивления, совпадающее с экспериментальными значениями образца №6 при  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ :

$$R1 = 99,792 \text{ Ом}; R2 = 99,812 \text{ Ом}; R3 = 99,752 \text{ Ом};$$

$$R4 = 99,860 \text{ Ом}; R5 = 99,866 \text{ Ом}; R6 = 99,889 \text{ Ом};$$

$$R7 = 99,897 \text{ Ом}; R8 = 99,675 \text{ Ом}.$$

Схемотехническое моделирование с указанными начальными условиями приведет к имитации температурной зависимости образца №6 по всем резистивным элементам (рисунок 3.11). Наблюдается аналогия поведения резисторного блока на рисунке 3.5, в.

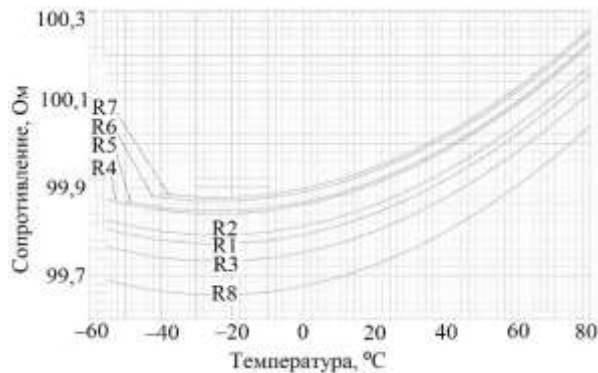


Рисунок 3.11 – Моделирование температурной зависимости всех резистивных элементов образца №6

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К позволяет имитировать температурные зависимости реальных образцов с

высокой точностью. Относительная погрешность результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования ТКС для испытуемого образца №6 составило  $\pm 0,01\%$ .

2. Применение классической методики синтеза SPICE-моделей по справочным данным приводит к завышенным на порядок значениям ТКС. Так для испытуемого образца №6 справочные данные указывают предельное значение ТКС равное  $\pm 350 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [89], в то время как реальное значение линейного ТКС составляет  $24,43 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

3. Наличие в семействе резисторных блоков Б19К тридцати четырех вариантов исполнения приводит к множеству конкретных реализаций SPICE-моделей. В связи с этим перспективным способом усовершенствования предложенной методики является создание программного средства «Генератор SPICE-моделей резисторных блоков Б19К» [5].

4. Недостатком предложенной методики моделирования температурной стабильности резисторных блоков следует признать требовательность к наличию высокопроизводительного измерительного оборудования. Так, для получения экспериментальных данных по образцу №6 потребовалось 120 частных измерений: 8 резистивных элементов при 15 значениях температуры.

5. Предложенная методика может быть распространена на другие семейства резисторных блоков отечественного и зарубежного производства.

### 3.1.2 Синтез термозависимых SPICE-моделей многотерминального дискретного типа

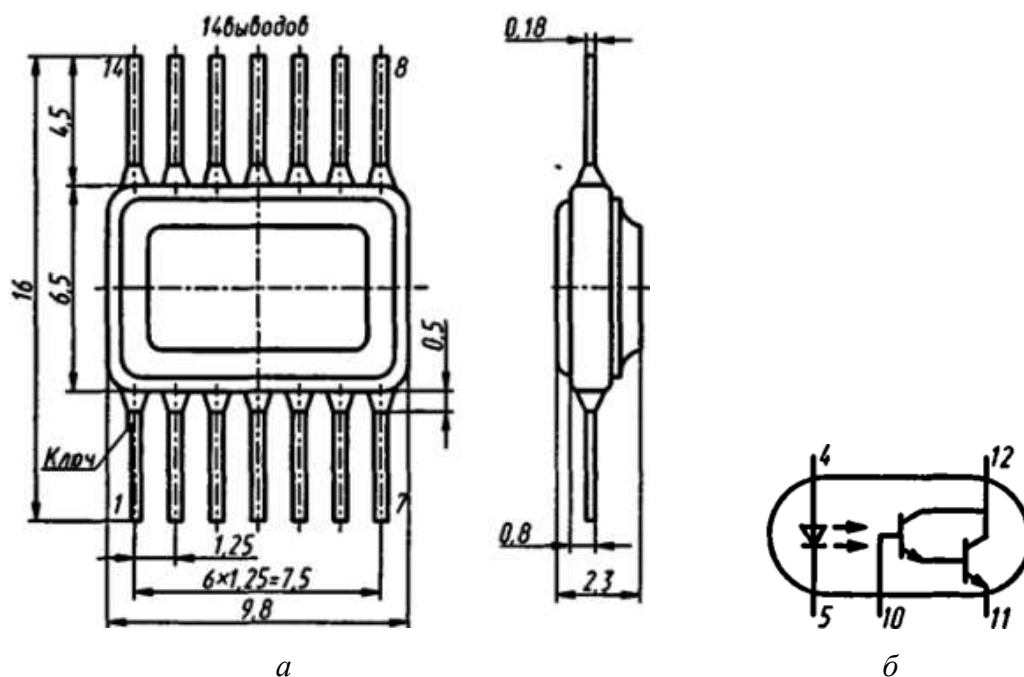
Вопросы моделирования транзисторных оптопар (оптронов) находили отражение в отечественной и зарубежной печати. Так, в работе M.F.Deveney [93] разработаны модели с термозависимыми параметрами для оптронов, изготовленных из дискретных компонентов. В качестве прототипа рассматривались сборка, состоящая из источника фотонов (лазерный диод, либо светоизлучающий диод) и фотодиода на основе соединения Ga-Al-As. В результате автором получена простая SPICE-модель для оптрона дискретного исполнения. Модель может быть использована для точного моделирования работы оптронов, состоящих из разных типов источников и приемников, в температурном диапазоне от  $-55$  до  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Моделирование температурных зависимостей интегральных оптронов в статье не затронуто.

В отечественной работе А.Е.Милешкина [94] рассматриваются методы полиномиальной интерполяции функции зависимости параметров оптронов, а также составления эквивалентной схемы замещения с управляемыми источниками тока. Автор статьи разрабо-

тал модели фоторезисторных оптронов применительно к популярному программному комплексу NI MultiSim. Вопросы моделирования фототранзисторных оптронов в работе не рассматривались.

В номенклатуре ЭКБ, применяемой в отечественной бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены транзисторные оптопары ЗОТ122 (рисунок 3.12). Оптопары выпускаются в металлостеклянном корпусе и предназначены для коммутации цепей постоянного тока. Излучатель оптопары представляет собой мезаэпитаксиальный диод на основе твердого раствора Ga-Al-As; приемником служит кремниевый планарный *n-p-n* составной фототранзистор [95, 96].

Предлагается методика моделирования транзисторных оптопар интегрального исполнения с температурной зависимостью параметров, ориентированная на SPICE-подобные симуляторы [87, 88]. Для исследования была отобрана партия из пяти однотипных транзисторных оптопар ЗОТ122А производства АО «Оptron» [38], изготовленных по аАО.339.200 ТУ.



*a* – конструктивные данные; *б* – электрическая схема

Рисунок 3.12 – Оптопара транзисторная ЗОТ122А

Первая часть методики моделирования направлена на получение экспериментальных зависимостей параметров для образцов-прототипов ЗОТ122А. Для измерений использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 3.13.

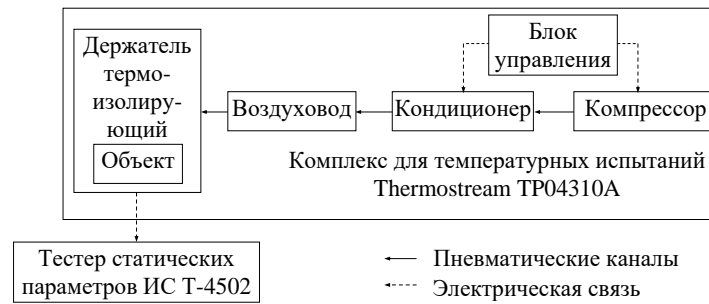
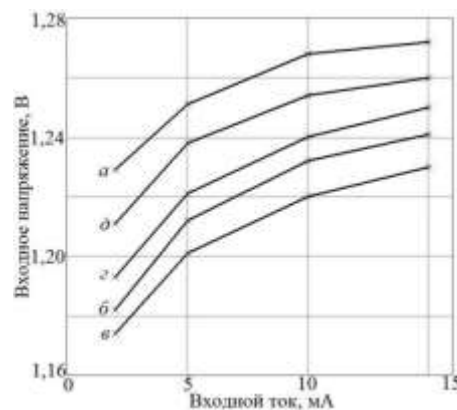


Рисунок 3.13– Структурная схема измерительной установки

Основа экспериментальной установки – комплекс для температурных испытаний ЭРИ Thermostream TP04310A (см. п. 3.1.1). Измерения электрических параметров образцов при разных температурах осуществляется тестером статических параметров интегральных схем Т-4502. Тестер предназначен для контроля, измерения и классификации цифровых интегральных и гибридных схем с количеством выводов до 64, обеспечивает контроль и задание напряжений от 0 до  $\pm 55$  В, контроль токов от 0 до  $\pm 150$  мкА, задание тока до  $\pm 500$  мА.

Результаты измерений представлены в графическом виде (рисунок 3.14 – 3.18). Каждая координатная плоскость соответствует определенному виду измерений и содержит семейство характеристик пяти испытуемых образцов.

Проведем качественный анализ результатов измерения. Входные вольт-амперные характеристики (рисунок 3.14) для оптопар традиционно строятся в системе  $U_{ВХ} = f(I_{ВХ})$ . Для каждого образца взято по четыре экспериментальных значения входного тока. Можно наблюдать ярко выраженную нелинейную зависимость входного напряжения от входного тока. Разброс входного напряжения при неизменном входном токе для различных образцов составляет около 0,05 В.

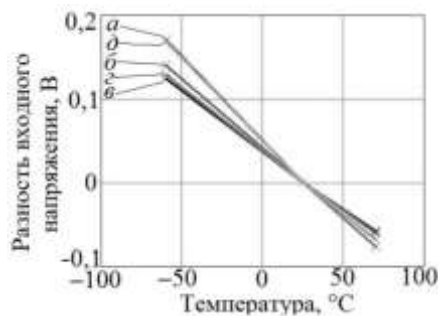


*a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4; *д* – образец 5

Рисунок 3.14 – Семейство входных вольт-амперных характеристик

Для удобства последующего синтеза математической модели транзисторной оптопары предлагается иное, отличающееся от классического, представление температурной зависимости входного напряжения (рисунок 3.15). Пусть исходная рабочая точка каждого испытуемого образца имеет координаты  $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$ ;  $T_{ОКР.0} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ . Взяты три отсчета температуры среды  $T_{ОКР.1} = -60 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $T_{ОКР.0} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $T_{ОКР.2} = 70 \text{ }^\circ\text{С}$ . Разность напряжения вычислена как  $\Delta U_{ВХ.ij} = (U_{ВХ.ij} - U_{ВХ.0j})|_{I_{ВХ}=5\text{мА}}$ , где  $i$  – номер отсчета температуры среды;  $j$  – номер испытуемого образца. В результате можно наблюдать в относительном масштабе слабую нелинейную зависимость входного напряжения от температуры. Семейство характеристик имеет общую точку пересечения при  $T_{ОКР.0j} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $\Delta U_{ВХ.0j} = 0 \text{ В}$ .

Зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока измерена для двух значений входного тока  $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$  и  $I_{ВХ} = 10 \text{ мА}$  (рисунок 3.15). Характеристики выходного остаточного напряжения имеют нелинейный, монотонно возрастающий характер. Для образцов №1 и №5 наблюдается нестабильность выходного остаточного напряжения при малых значениях выходного тока. Образцы №2, №3, №4 обладают хорошей стабильностью выходной характеристики.



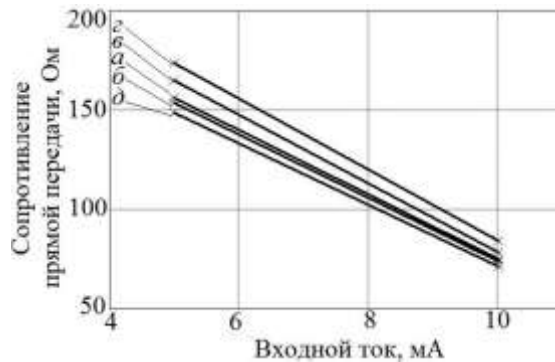
$a$  – образец 1;  $б$  – образец 2;  $в$  – образец 3;  $г$  – образец 4;  $д$  – образец 5

Рисунок 3.15 – Температурная зависимость входного напряжения, построенная относительно базовой рабочей точки  $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$ ;  $T_{ОКР} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$

Основываясь на зависимости выходного остаточного напряжения от выходного тока, построенной при различных значениях входного тока, можно построить иную функциональную зависимость транзисторной оптопары – сопротивление прямой передачи (рисунок 3.16). Если зафиксировать значение выходного тока (пусть  $I_{ВЫХ} = 15 \text{ мА}$ ), то тогда сопротивление прямой передачи будет функция одного аргумента  $R_{пр.п} = f(I_{ВХ}, I_{ВЫХ})|_{I_{ВЫХ}=\text{const}} = F(I_{ВХ})$  и может быть представлена в двумерной системе координат:

$$R_{пр.п} = \left. \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} \right|_{I_{ВЫХ}=\text{const}}$$

Семейство характеристик прямой передачи имеет линейный характер, т.к. построено по двум точкам ( $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$  и  $I_{ВХ} = 10 \text{ мА}$ ).



*a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4; *д* – образец 5

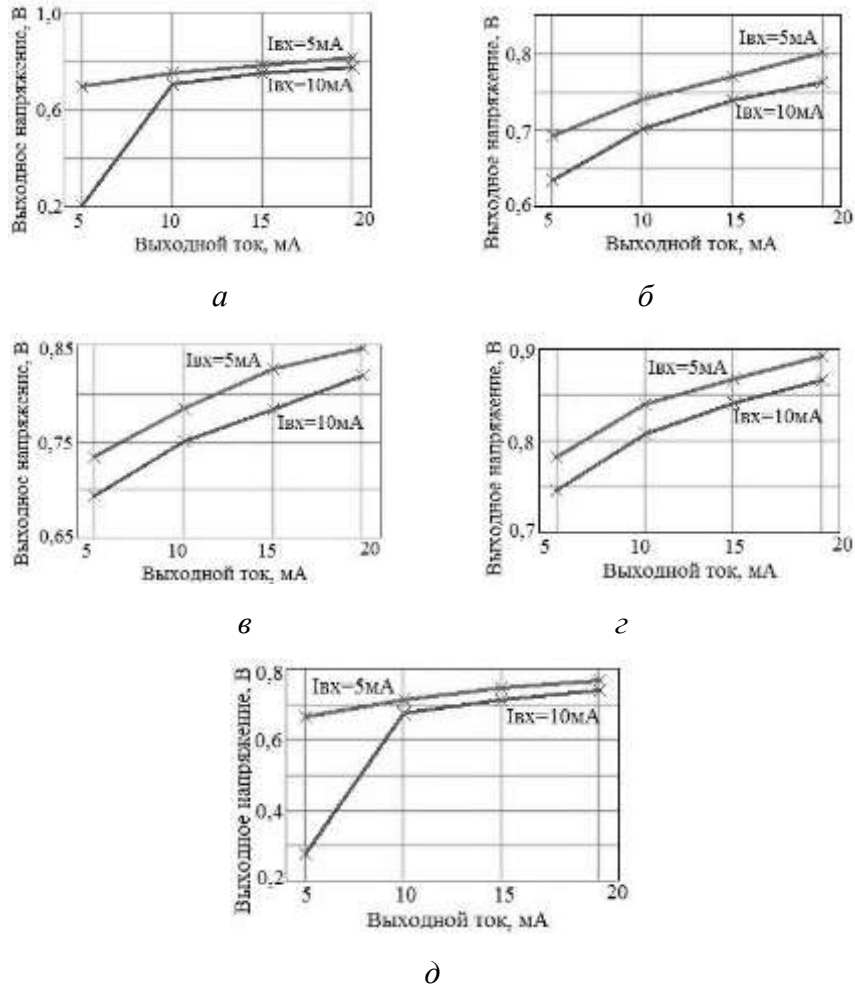
Рисунок 3.16 – Сопротивление прямой передачи

На основе зависимости выходного остаточного напряжения от выходного тока (рисунок 3.17) можно построить новое семейство характеристик – относительно базовой рабочей точки. Такое представление (рисунок 3.18) удобно для последующего синтеза математической модели.

Пусть исходная рабочая точка ( $I_{ВЫХ.0}$ ,  $U_{ВЫХ.0}$ ) каждого испытуемого образца имеет координату  $I_{ВЫХ.0} = 15 \text{ мА}$  при  $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$ . Разность выходного остаточного напряжения вычислена как  $\Delta U_{ВЫХ.ij} = (U_{ВЫХ.ij} - U_{ВЫХ.0j})|_{I_{ВХ}=5\text{мА}}$ , где  $i$  – номер отсчета выходного тока ( $i \in \{5\text{мА}; 10\text{мА}; 15\text{мА}; 20\text{мА}\}$ );  $j$  – номер испытуемого образца. В результате можно наблюдать в относительном масштабе слабую нелинейную зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока. Семейство характеристик имеет общую точку пересечения при  $I_{ВЫХ.0j} = 15 \text{ мА}$ ;  $\Delta U_{ВХ.0j} = 0 \text{ В}$ .

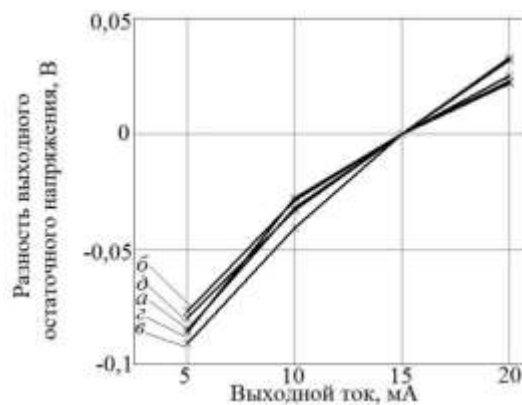
Для очерчивания границ применимости будущей математической модели предлагается структурная схема (рисунок 3.19), состоящая из двух основных блоков: каскад излучателя и каскад фотоприемника. Внутреннее наполнение каскадов соответствует наблюдаемым процессам на предыдущем этапе исследования. Входной сигнал (входной ток  $I_{ВХ}$ ) поступает на датчик тока  $PA1$ , который выделяет его величину и знак. Затем сигнал преобразуется с помощью функционального источника напряжения  $G1$ , управляемого входным током. Закон функционального преобразования определяется экспериментальной зависимостью  $U_{ВХ} = f(I_{ВХ})$  из рисунка 3.14. Суммирующее устройство  $U1$  учитывает характер входной ВАХ, обусловленный как нелинейностью при комнатной температуре  $U'_{ВХ} = f(I_{ВХ})$ , так и аддитивными тепловыми процессами  $\Delta U_{ВХ} = f(T_{СР})$ , наблюдаемыми на рисунке 3.15. Суммарный нелинейный сигнал – входное термозависимое напряжение  $U_{ВХ} = U'_{ВХ} + \Delta U_{ВХ}$ .





образец 1 – а; образец 2 – б; образец 3 – в; образец 4 – г; образец 5 – д

Рисунок 3.17 – Зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока



образец 1 – а; образец 2 – б; образец 3 – в; образец 4 – г; образец 5 – д

Рисунок 3.18 – Семейство выходных вольт-амперных характеристик, построенных относительно базовой рабочей точки  $I_{вх} = 5\text{mA}$ ;  $I_{вых} = 15\text{mA}$

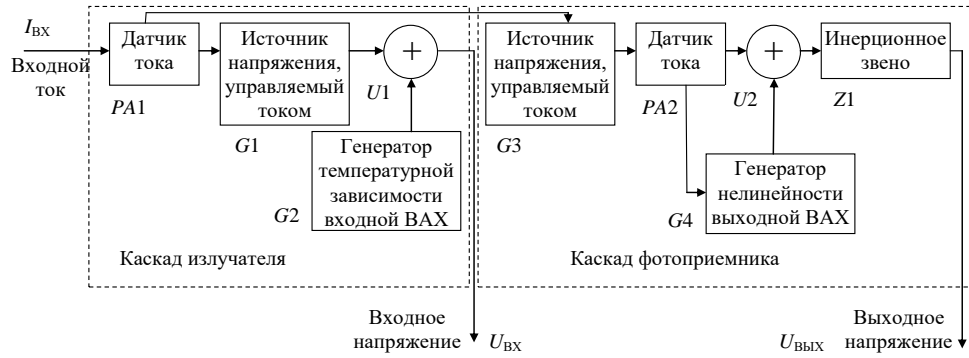


Рисунок 3.19 – Структуризация модели транзисторной оптопары 3OT122A

Датчик тока  $PA1$  каскада излучателя связан с источником напряжения  $G3$ , управляемого током и находящегося в каскаде фотоприемника. Закон функционального преобразования в  $G3$  определяется как произведение сопротивления прямой передачи (рисунок 3.16) на входной ток:  $U'_{ВЫХ} = f(R_{пр.п}) \cdot I_{ВХ}$ . Датчик тока  $PA2$  каскада фотоприемника выделяет величину и знак выходного тока  $I_{ВЫХ}$ . Эта информация служит для работы генератора нелинейности выходной ВАХ  $G4$ . Закон функционального преобразования в  $G4$  определяется по экспериментальной зависимости на рисунке 3.18 и носит аддитивный характер  $\Delta U_{ВЫХ} = f(I_{ВЫХ})$ . Суммирующее устройство  $U2$  учитывает основную и аддитивную (нелинейную) составляющую выходного напряжения:  $U_{ВЫХ} = U'_{ВЫХ} + \Delta U_{ВЫХ}$ . Суммарный нелинейный сигнал поступает в инерционное звено  $Z1$ , которое формирует определенное значение постоянной времени  $\tau$  при работе в импульсном режиме. На выходе инерционного звена – выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  транзисторной оптопары, обладающее совокупными свойствами:

1. Функциональная зависимость от входного тока.
2. Аддитивная составляющая нелинейности выходного каскада.
3. Инерционность выходного каскада во временной области.

Структурная проработка транзисторной оптопары (рисунок 3.19) позволяет предложить компактную математическую модель. Проведенный качественный анализ нелинейностей экспериментальных зависимостей (рисунок 3.14 – 3.18) говорит о том, что математическая модель может базироваться на полиномах второго порядка.

Пусть входное напряжение транзисторной оптопары есть функция двух аргументов – входного тока  $I_{ВХ}$  и температуры окружающей среды  $T$ :

$$U_{ВХ} = f_1(I_{ВХ}, T). \quad (3.6)$$

Произведем декомпозицию функции (3.6) путем фиксации одного из аргументов – температуры – на определенном уровне. Тогда получим частную функцию  $U'_{ВХ} = F_1(I_{ВХ})$ , зависящую только от входного тока и аппроксимируемую полиномом второго порядка:

$$U'_{\text{вх}} = f_1(I_{\text{вх}}, T) \Big|_{T=25^\circ \text{C}} = F_1(I_{\text{вх}}) = a1 \cdot I_{\text{вх}}^2 + a2 \cdot I_{\text{вх}} + a3. \quad (3.7)$$

Аддитивная составляющая нелинейности входной ВАХ  $\Delta U_{\text{вх}}$ , зависящая от температуры окружающей среды, есть разность функций (3.6) и (3.7), вычисленная при фиксированном значении входного тока  $I_{\text{вх}}$ :

$$\Delta U_{\text{вх}} = f_2(T) = f_1(I_{\text{вх}}, T) \Big|_{I_{\text{вх}}=\text{const}} - F_1(I_{\text{вх}}) \Big|_{I_{\text{вх}}=\text{const}} = b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3. \quad (3.8)$$

Суммарный сигнал входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  есть композиция функций (3.7) и (3.8) или сумма двух полиномов:

$$U_{\text{вх}} = U'_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}} = a1 \cdot I_{\text{вх}}^2 + a2 \cdot I_{\text{вх}} + a3 + b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3. \quad (3.9)$$

Сопротивление прямой передачи есть функция двух аргументов – входного тока  $I_{\text{вх}}$  и выходного тока  $I_{\text{вых}}$ :

$$R_{\text{пр.п}} = f_3(I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}). \quad (3.10)$$

Произведем декомпозицию функции (3.10) путем фиксации одного из аргументов – выходного тока – на определенном уровне. Получим частную функцию  $F_3(I_{\text{вх}})$ , зависящую только от входного тока и аппроксимируемую полиномом первого порядка:

$$R_{\text{пр.п}} = f_3(I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}) \Big|_{I_{\text{вых}}=\text{const}} = F_3(I_{\text{вх}}) = c1 \cdot I_{\text{вх}} + c2. \quad (3.11)$$

Линейность полинома обусловлена тем, что семейство характеристик на рисунке 3.17 было построено по двум точкам. В общем случае полином (3.11) может иметь более высокий порядок.

Напряжение прямой передачи есть произведение функции (3.11) на входной ток  $I_{\text{вх}}$ :

$$U_{\text{пр.п}} = R_{\text{пр.п}} \cdot I_{\text{вх}} = F_3(I_{\text{вх}}) \cdot I_{\text{вх}} = (c1 \cdot I_{\text{вх}} + c2) \cdot I_{\text{вх}} = c1 \cdot I_{\text{вх}}^2 + c2 \cdot I_{\text{вх}}. \quad (3.12)$$

Выходное остаточное напряжение  $U_{\text{вых}}$  есть функция двух аргументов – выходного тока  $I_{\text{вых}}$  и входного тока  $I_{\text{вх}}$ :

$$U_{\text{вых}} = f_4(I_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}). \quad (3.13)$$

Произведем декомпозицию функции (3.13) путем фиксации одного из аргументов – входного тока – на определенном уровне. Получим частную функцию  $F_4(I_{\text{вых}})$ , зависящую только от выходного тока:

$$U'_{\text{вых}} = f_4(I_{\text{вых}}, I_{\text{вх}}) \Big|_{I_{\text{вх}}=\text{const}} = F_4(I_{\text{вых}}). \quad (3.14)$$

Аддитивная составляющая нелинейности выходной ВАХ  $\Delta U_{\text{вых}}$ , зависящая от особенностей каскада фотоприемника, есть разность функций (3.14), вычисленных при текущих значениях аргумента  $I_{\text{вых}}$  относительно фиксированного значения ( $I_{\text{вых}} = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{\text{вых}} = f_5(I_{\text{вых}}) = F_4(I_{\text{вых}}) - F_4(I_{\text{вых}}) \Big|_{I_{\text{вых}}=\text{const}} = d1 \cdot I_{\text{вых}}^2 + d2 \cdot I_{\text{вых}} + d3. \quad (3.15)$$

Суммарный сигнал выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  есть композиция функций (3.12) и (3.15) или сумма двух полиномов:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{пр.п}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} = c1 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + c2 \cdot I_{\text{ВХ}} + d1 \cdot I_{\text{ВЫХ}}^2 + d2 \cdot I_{\text{ВЫХ}} + d3. \quad (3.16)$$

Таким образом, уравнения (3.9) и (3.15) отражают два искомых сигнала – входное и выходное напряжение транзисторной оптопары. Многообразие конкретных реализаций математической модели транзисторной оптопары может быть задано вектором  $\mathbf{M}$ , содержащим значения коэффициентов полиномов в уравнения (3.9) и (3.15):

$$\mathbf{M} = \{a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2, d1, d2, d3\}. \quad (3.17)$$

Предположим, что переходный процесс в транзисторной оптопаре заканчивается за время  $t \approx 3 \cdot \tau$ , когда первоначальное значение импульса выходного напряжения изменяется по модулю на порядок. Инерционное звено  $Z1$  на рисунке 3.19 представим в виде апериодического звена первого порядка (в виде  $LR$ -цепи). Роль резистора в такой цепи выполняет активное сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н}}$ . Зная время переходных процессов  $t$  и сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н}}$ , можно определить основные характеристики инерционного звена: постоянную времени  $\tau$  и индуктивность  $L$ :

$$\tau = \frac{t}{3}; \quad L = \tau \cdot R_{\text{Н}}.$$

На основе структурной схемы (рисунок 3.19) и с учетом математической модели (3.9), (3.15) разработана модель (рисунок 3.20), пригодная для SPICE-симуляторов [87, 88]. Номера внешних выводов макромодели соответствуют номерам выводов прототипа: 4, 5 – входы транзисторной оптопары; 12, 11 – выходы транзисторной оптопары. К выходам подключается активное сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н}}$ . Макромодель содержит 6 элементов. Датчик тока представляет собой последовательное соединение универсального источника напряжения  $V1$  с нулевым собственным значением напряжения и резистор  $R1$ . Заметим, что некоторые версии SPICE допускают представление датчика тока лишь из одного резистора. Источник напряжения, управляемый током  $G1$ , зависит от входного тока и от температуры окружающей среды. Функциональная зависимость источника  $G1$  определяется уравнением (3.9). Коэффициенты полиномов записаны как параметры, в виде  $\{ai\}$  и  $\{bi\}$ . Переменная  $T$  воспринимается SPICE-симуляторами как глобальная (резервированная) переменная, обозначающая температуру.



Рисунок 3.20 – Макромодель транзисторной оптопары 3ОТ122А

Источник напряжения, управляемый током  $G2$ , зависит от произведения сопротивления прямой передачи на входной ток, а также от аддитивной нелинейности каскада фотоприемника. Функциональная зависимость источника  $G2$  определяется уравнением (3.16). Коэффициенты полиномов записаны аналогично предыдущему выражению. Датчик тока  $V2$  выделяет величину выходного тока, которая используется в функциональной зависимости источника  $G2$ . Инерционное звено представляет собой  $LR$ -цепь, состоящую из индуктивности  $L1$  и внешнего (по отношению к макромодели) сопротивления нагрузки  $Rн$ .

Тестовое испытание разработанной макромодели проведем на примере образца №1 транзисторной оптопары 3ОТ122А. Экспериментальные зависимости полученных ранее характеристик (рисунки 3.14 – 3.18) аппроксимируются полиномиальной зависимостью второго порядка. Матричное представление имеет вид:

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

где  $X$  – матрица экспериментальных значений;  $\varepsilon$  – случайная ошибка;  $\alpha$  – искомые коэффициенты полинома.

Вектор оценок  $\hat{y}$  и вектор остатков  $e$  регрессии соответственно равны:

$$\hat{y} = X\alpha;$$

$$e = y - \hat{y} = y - X\alpha.$$

Сумма квадратов остатков регрессии будет равна:

$$D = e^T e = (y - X\alpha)^T (y - X\alpha).$$

Дифференцируя эту функцию по вектору параметров  $\alpha$  и приравняв производные к нулю, получим систему уравнений:

$$(X^T X)\alpha = X^T y.$$

Для полинома второго порядка имеем коэффициенты:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (3.18)$$

Подставив в (3.18) экспериментальные значения для образца №1 (рисунки 3.14, 3.15), получим коэффициенты полинома в уравнении (3.9):

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{U}'_{\text{вх}} = \begin{cases} a1 = -339,047; \\ a2 = 8,993; \\ a3 = 1,213. \end{cases}$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \Delta \mathbf{U}_{\text{вх}} = \begin{cases} b1 = 2,313 \cdot 10^{-6}; \\ b2 = -1,931 \cdot 10^{-3}; \\ b3 = 0,047. \end{cases}$$

Итоговое уравнение (3.9) для образца №1 имеет вид:

$$U_{\text{вх}} = -339,047 \cdot I_{\text{вх}}^2 + 8,993 \cdot I_{\text{вх}} + 1,213 + 2,313 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1,931 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,047.$$

Подставив в (3.18) экспериментальные значения для образца №1 (рисунки 3.17, 3.18), получим коэффициенты полинома в уравнении (3.16):

$$\mathbf{C} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{R}_{\text{пр.п}} = \begin{cases} c1 = -16320; \\ c2 = 238. \end{cases}$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{U}_{\text{вых}} = \begin{cases} d1 = -200; \\ d2 = 12,72; \\ d3 = -0,143. \end{cases}$$

Итоговое уравнение (3.16) для образца №1 имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = -16320 \cdot I_{\text{вх}}^2 + 238 \cdot I_{\text{вх}} - 200 \cdot I_{\text{вых}}^2 + 12,72 \cdot I_{\text{вых}} - 0,143.$$

Согласно справочной информации [95, 96], время нарастания импульса выходного тока при  $I_{\text{вх}} = 5 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{ком}} = 10 \text{ В}$ ,  $R_{\text{н}} = 100 \text{ Ом}$  составляет 6 мкс. Тогда постоянная времени:

$$\tau = \frac{t}{3} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мкс}.$$

Величина индуктивности инерционного звена:

$$L = \tau \cdot R_{\text{н}} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}.$$

Дальнейшее моделирование происходит в схемотехническом модуле PSpice A/D, входящем в программный комплекс Cadence OrCAD. На поле чертежа в схемном редакторе OrCAD Capture макромодель транзисторной оптопары представлена в виде условного графического обозначения четырехполюсника  $U1$  (рисунок 3.21). Нагрузкой служит активное сопротивление  $R_{\text{н}} = 100 \text{ Ом}$ . Ко входу четырехполюсника подключен универсальный источник тока  $I1$ , форма сигнала которого и числовые значения представлены на рисунке 3.22. Универсальный источник тока обеспечивает сигнал во всех видах анализа: по постоянному току, в частотной и временной областях.

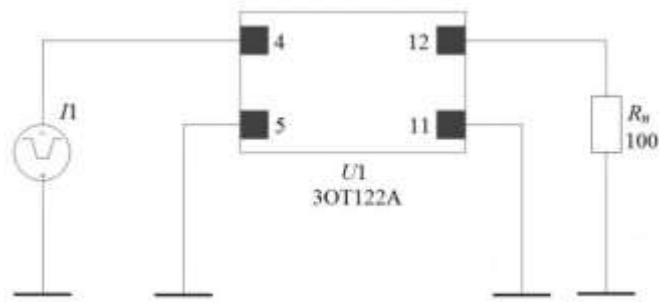
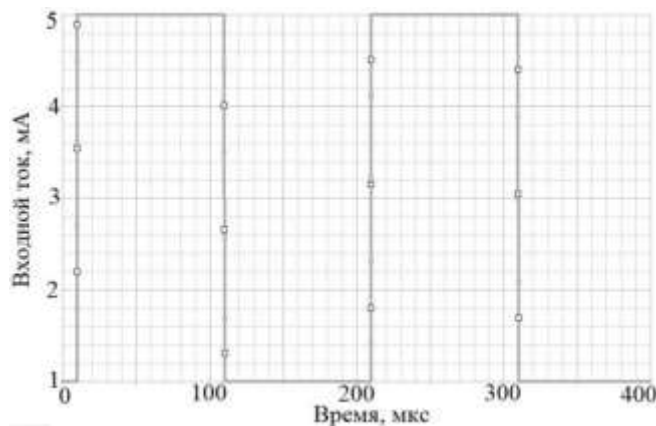


Рисунок 3.21 – Схема включения транзисторной оптопары 3OT122A

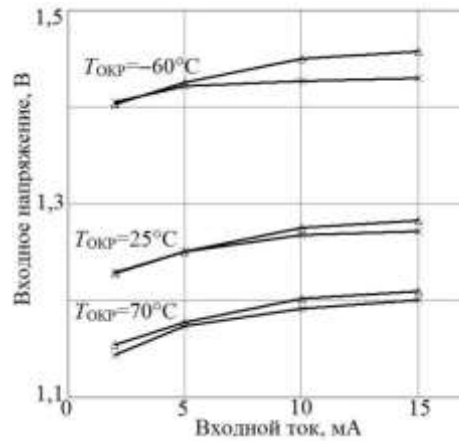
Тестовое схемотехническое моделирование сначала проводится по постоянному току (режим DC Sweep). Источник тока принимает четыре фиксированных значения: 2 мА; 5 мА; 10 мА; 15 мА. При этом температура окружающей среды принимает три фиксированных значения:  $-60^{\circ}\text{C}$ ;  $27^{\circ}\text{C}$ ;  $70^{\circ}\text{C}$ . Набор фиксированных значений подобран так, чтобы быть идентичным условиям ранее проведенных экспериментальных исследований (рисунки 3.14, 3.15).



начальное значение тока  $I1 = 1$  мА; импульсное значение тока  $I2 = 5$  мА;  
 время до начала переднего фронта  $TD = 10$  мкс; время нарастания импульса  $TR = 0,1$  мкс;  
 время спада импульса  $TF = 0,1$  мкс; ширина импульса  $PW = 100$  мкс;  
 период повторения  $PER = 0,2$  мс

Рисунок 3.22 – Входной сигнал

Для удобства восприятия результаты экспериментальных исследований и результаты моделирования сведены на одну общую координатную плоскость (рисунок 3.23). С качественной точки зрения можно видеть хорошее совпадение характеристик при  $T_{\text{окр}} = 27^{\circ}\text{C}$ ;  $70^{\circ}\text{C}$  и удовлетворительное при  $T_{\text{окр}} = -60^{\circ}\text{C}$ . Количественная оценка проведена методом наименьших квадратов (таблица 3.1).



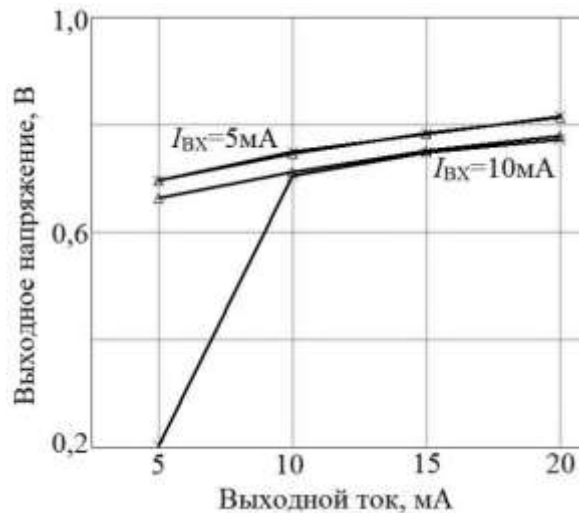
× – экспериментальные данные; Δ – данные моделирования

Рисунок 3.23 – Сравнительный анализ входных ВАХ для образца №1

Моделирование эффекта изменения выходного тока (рисунок 3.24) происходит за счет варьирования масштабным коэффициентом сопротивления нагрузки. Условия схемотехнического моделирования выглядят так:

- диапазон варьирования масштабного коэффициента  $R_H = 0,3 \dots 2$ ;
- шаг варьирования масштабного коэффициента  $R_H = 0,1$ ;
- набор фиксированных значений входного тока  $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}; 10 \text{ мА}$ .

Можно наблюдать практически полное совпадение экспериментальных значений и результатов моделирования, за исключением точки  $I_{ВЫХ} = 5 \text{ мА}$  при  $I_{ВХ} = 10 \text{ мА}$ . Количественная оценка приведена в таблице 3.1.



× – экспериментальные данные; Δ – данные моделирования

Рисунок 3.24 – Сравнительный анализ выходных ВАХ для образца №1



Таблица 3.1 – Невязка экспериментальных значений и результатов моделирования

Невязка входной ВАХ, %			Невязка выходной ВАХ, % *	
$T_{\text{ОКР}} = -60^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ОКР}} = 27^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ОКР}} = 70^{\circ}\text{C}$	$I_{\text{ВХ}} = 5 \text{ мА}$	$I_{\text{ВХ}} = 10 \text{ мА}$
2	0,8	1	0,3	0,7

\* за исключением точки  $I_{\text{ВЫХ}} = 5 \text{ мА}$  при  $I_{\text{ВХ}} = 10 \text{ мА}$

Моделирование во временной области происходит в режиме Time Domain (Transient). Условия моделирования:

- момент начала анализа  $t_{\text{НАЧ}} = 200 \text{ мкс}$ ;
- момент окончания анализа  $t_{\text{КОН}} = 240 \text{ мкс}$ ;
- максимальный шаг приращения времени  $\Delta t_{\text{max}} = 0,02 \text{ мкс}$ .

Результаты моделирования во временной области (рисунок 3.25) показывают, что за время  $t = 6 \text{ мкс}$  (при постоянной времени  $\tau = 2 \text{ мкс}$ ) уровень выходного напряжения достигает  $0,93 \cdot U_{\text{МАХ}}$ . Это хорошо согласуется с классическими представлениями о числовой взаимосвязи параметров переходного процесса в инерционных звеньях.

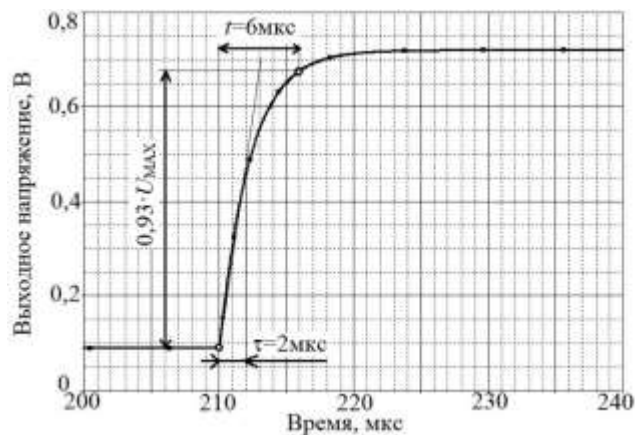


Рисунок 3.25 – Время нарастания импульса выходного напряжения для образца №1

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика моделирования транзисторных оптопар 3ОТ122 с учетом температурной зависимости позволяет имитировать входные и выходные ВАХ с высокой точностью. Невязка результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования для испытуемого образца №1 составляет от  $\pm 0,3$  до  $\pm 2\%$  (таблица 3.1).

2. Применение классической методики синтеза SPICE-моделей [97] – по справочным данным – приводит к неадекватным моделям по отношению к реальным образцам ЭРИ. Для

различных образцов идентичных по наименованию транзисторных оптопар наблюдается технологический разброс параметров, который в справочных данных либо не отражается, либо отражен в усредненном виде.

3. Достоинство представленной методики моделирования транзисторных оптопар ЗОТ122 состоит в том, что окончательный результат – это вектор параметров математической модели (3.17). Следовательно, синтез множества подобных транзисторных оптопар семейства ЗОТ122 будет заключаться в отыскании коэффициентов для вектора (3.17).

4. Упрощение предложенной макромоделю транзисторной оптопары заключается в том, что величины времени нарастания  $t_{НР}$  и времени спада  $t_{СП}$  импульса равны и фиксированы ( $t_{НР} = t_{СП} = \text{const}$ ). Недостатком предложенной макромоделю транзисторной оптопары следует признать отсутствие имитации выходного тока утечки  $I_{УТ.ВЫХ}$  (величина  $I_{УТ.ВЫХ} \approx 100 \text{ нА}$ ).

5. Перспективным способом усовершенствования предложенной макромоделю транзисторной оптопары является введение эффектов: температурной зависимости выходного тока утечки  $I_{УТ.ВЫХ} = f(T_{ОКР})$ , а также зависимости времени спада и времени нарастания импульса от сопротивления резистора «база-эмиттер»  $t_{СП} = f(R_{БЭ})$  и  $t_{НР} = f(R_{БЭ})$ .

6. Предложенная методика моделирования транзисторной оптопары ЗОТ122 может быть распространена на другие семейства транзисторных оптопар отечественного и зарубежного производства.

### 3.1.3 Синтез термозависимых SPICE-моделей многотерминального интегрального типа

Вопросы применения твердотельных реле в интегральном исполнении для БКРА находят отражение в отечественной и зарубежной печати. К обзорным работам можно отнести: статью зарубежного автора Д.Н.Хана [98], в которой рассмотрены современные образцы ЭРИ с гальванической развязкой для военной и космической электроники; статью С.Волошина [99], посвященную анализу проблем производства в России твердотельных реле. Более узкую направленность имеют работы [100-105]. В статьях А.Шитикова [100] и А.Эдгардта [101] рассматриваются зарубежные твердотельные реле компании International Rectifier. Отечественные образцы твердотельных реле производства ЗАО «Протон-Импульс» проанализированы в статье Л.Исламгазиной [102] и Н.Абрамовой [103]. Работа С.А.Авдюшкина и др. [104] посвящена анализу результатов радиационных испытаний

оптоэлектронного коммутатора 249КП5Р на стойкость к дозовым эффектам ионизирующего излучения в различных электрических режимах. Проблема обеспечения оптимальных тепловых режимов для твердотельных реле в течение всего срока эксплуатации рассматривается в статье Л.Исламгазиной [105]. Анализ отечественной и зарубежной научной литературы позволяет сказать следующее. Индустрия производства твердотельных реле стремительно развивается, однако методологические основы синтеза адекватных математических моделей твердотельных реле, пригодных для схемотехнического моделирования на ранних этапах проектирования БКРА, пока проработаны недостаточно.

В номенклатуре ЭРИ, применяемой в отечественных разработках БКРА, имеет распространение МОП-реле 249КП4АТ (рисунок 3.26). МОП-реле представляет собой гибридную интегральную схему с гальванической оптоэлектронной развязкой, где в качестве переключающего элемента используются МОП-транзисторы. МОП-реле предназначены для использования в двухканальных коммутаторах постоянного и переменного токов [106]. Для исследования была отобрана партия из пяти однотипных твердотельных сдвоенных герметичных МОП-реле 249КП4АТ производства АО «Протон», изготовленных по АЕЯР.431160 ТУ.

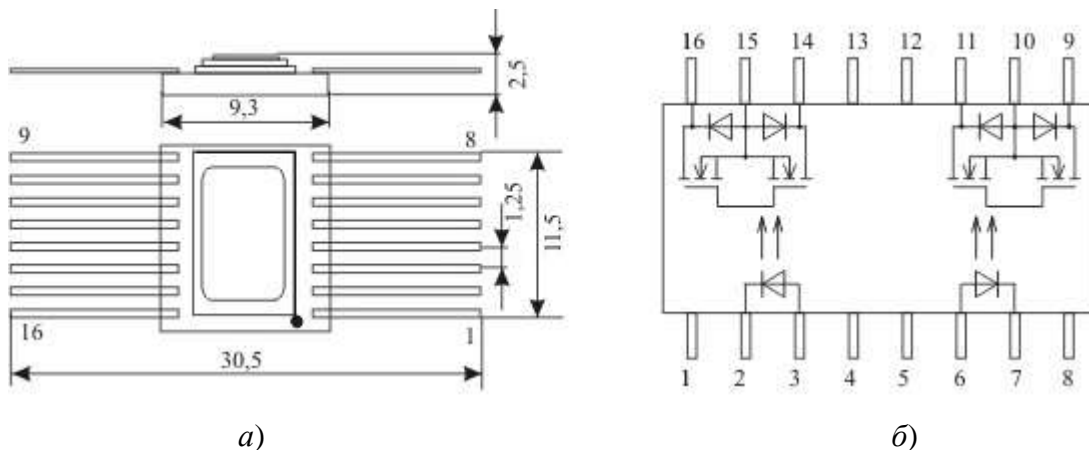


Рисунок 3.26 – Твердотельное сдвоенное герметичное МОП-реле 249КП4АТ

Разработка модели включает следующие задачи [7]:

- получение экспериментальных зависимостей параметров для образцов прототипов МОП-реле;
- разработка обобщенной математической модели МОП-реле;
- экстракция измеренных экспериментальных параметров и их преобразование в параметры SPICE-модели;
- тестовое испытание разработанной SPICE-модели.

Для получения экспериментальных зависимостей параметров использовалась измерительная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 3.27.



Рисунок 3.27 – Структурная схема измерительной установки

Измерительная установка состоит из двух основных частей: комплекса для температурных испытаний ЭРИ Thermostream TP04310A и тестера полупроводниковых приборов Formula TT.

На координатных плоскостях (рисунок 3.28, а, б, в) для трех различных температур окружающей среды ( $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $125^{\circ}\text{C}$ , соответственно) представлены экспериментальные входные ВАХ. Поскольку микросхема 249КП4АТ имеет два независимых канала, то для пяти исследуемых образцов в общей сложности выполнено десять измерений. Конкретная экспериментальная характеристика обозначается на графиках по типу «Образец  $x,y$ », где  $x$  – номер образца;  $y$  – номер канала. Координатная плоскость на рисунок 3.28, г демонстрирует усредненные значения отсчетов ВАХ отдельно для каждого канала (К1 и К2) для определенных выше температур. Усредненные значения получены как среднеарифметические значения входного тока каждого образца при фиксированных значениях входного напряжения:

$$I_{\text{вх}jk} = \frac{\sum_{i=1}^5 I_{\text{вх}i} |_{U_{\text{вх}} = \text{const}}}{5},$$

где  $i$  – номер образца микросхемы;  $j$  – номер канала;  $k$  – номер отсчета температуры.

Усредненные значения входного тока аппроксимированы экспоненциальной зависимостью вида  $a1 \cdot \exp(a2) + a3$  (таблица 3.2).

Температурная зависимость входного напряжения представлена в аддитивном виде (рисунок 3.28, д). Пусть исходная рабочая точка для каждой ВАХ имеет координаты  $I_{\text{вх}} = 1$

мА;  $T_{cp} = 25^{\circ}\text{C}$ . Взяты три отсчета температуры:  $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $125^{\circ}\text{C}$ . Разность входного напряжения вычислена как:

$$\Delta U_{\text{ВХ},jk} = (U_{\text{ВХ},jk} - U_{\text{ВХ},j0})|_{I_{\text{ВХ}}=1\text{мА}},$$

где  $j$  – номер канала;  $k$  – номер отсчета температуры.

Таблица 3.2 – Аппроксимация экспериментальных значений входных ВАХ

Строка	Канал	Температура, °C	Функциональная зависимость
1	K1	-60	$I_{\text{ВХ}} = 1,070 \cdot 10^{-20} e^{27,275 U_{\text{ВХ}}} + 1,216 \cdot 10^{-4}$
2	K1	25	$I_{\text{ВХ}} = 7,099 \cdot 10^{-17} e^{24,65 U_{\text{ВХ}}} - 4,238 \cdot 10^{-6}$
3	K1	125	$I_{\text{ВХ}} = 4,870 \cdot 10^{-8} e^{8,438 U_{\text{ВХ}}} - 5,322 \cdot 10^{-5}$
4	K2	-60	$I_{\text{ВХ}} = 2,314 \cdot 10^{-19} e^{25,216 U_{\text{ВХ}}} - 1,525 \cdot 10^{-5}$
5	K2	25	$I_{\text{ВХ}} = 2,310 \cdot 10^{-19} e^{29,237 U_{\text{ВХ}}} - 1,302 \cdot 10^{-6}$
6	K2	125	$I_{\text{ВХ}} = 4,083 \cdot 10^{-8} e^{9,304 U_{\text{ВХ}}} - 9,187 \cdot 10^{-5}$

Полученные значения разности входного напряжения аппроксимированы полиномом второго порядка:

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = 1,029 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,993 \cdot 10^{-3} T + 0,043 \text{ (K1)}; \quad (3.19)$$

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = 5,113 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,127 \cdot 10^{-3} T + 0,05 \text{ (K2)}. \quad (3.20)$$

Температурные зависимости каналов имеют точку пересечения в координате  $T_{cp,0j} = 25^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta U_{\text{ВХ},j0} = 0 \text{ В}$  (см. рисунок 3.28, д).

Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от температуры среды показана на рисунке 3.29, а. Измерения проведены при входном токе  $I_{\text{ВХ}} = 1 \text{ мА}$  и токе коммутации  $I_{\text{КОМ}} = 30 \text{ мА}$ . Можно видеть, что экспериментальные зависимости выходного сопротивления для всех образцов практически совпадают. Усредненные экспериментальные значения выходного сопротивления нанесены на новую координатную плоскость (рисунок 3.29, б), а затем проведена аппроксимация полиномом второго порядка:

$$R_{\text{ВЫХ}} = 3 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,0834 T + 12,368. \quad (3.21)$$

Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от входного тока измерена при токе коммутации  $I_{\text{КОМ}} = 30 \text{ мА}$  (рисунок 3.30, а). Участок входных токов от 0 до 500 мкА – нестабилен и характеризуется значительным разбросом значений выходного сопротивления. Рабочий участок входных токов от 750 мкА демонстрирует хорошую повторяемость экспериментальных значений для всех образцов, а также линейность и независимость выходного сопротивления от аргумента. Учитывая отмеченные свойства семейства

характеристик, на рисунок 3.30, б путем кусочно-линейной аппроксимации построена упрощенная передаточная характеристика выходного сопротивления от входного тока.

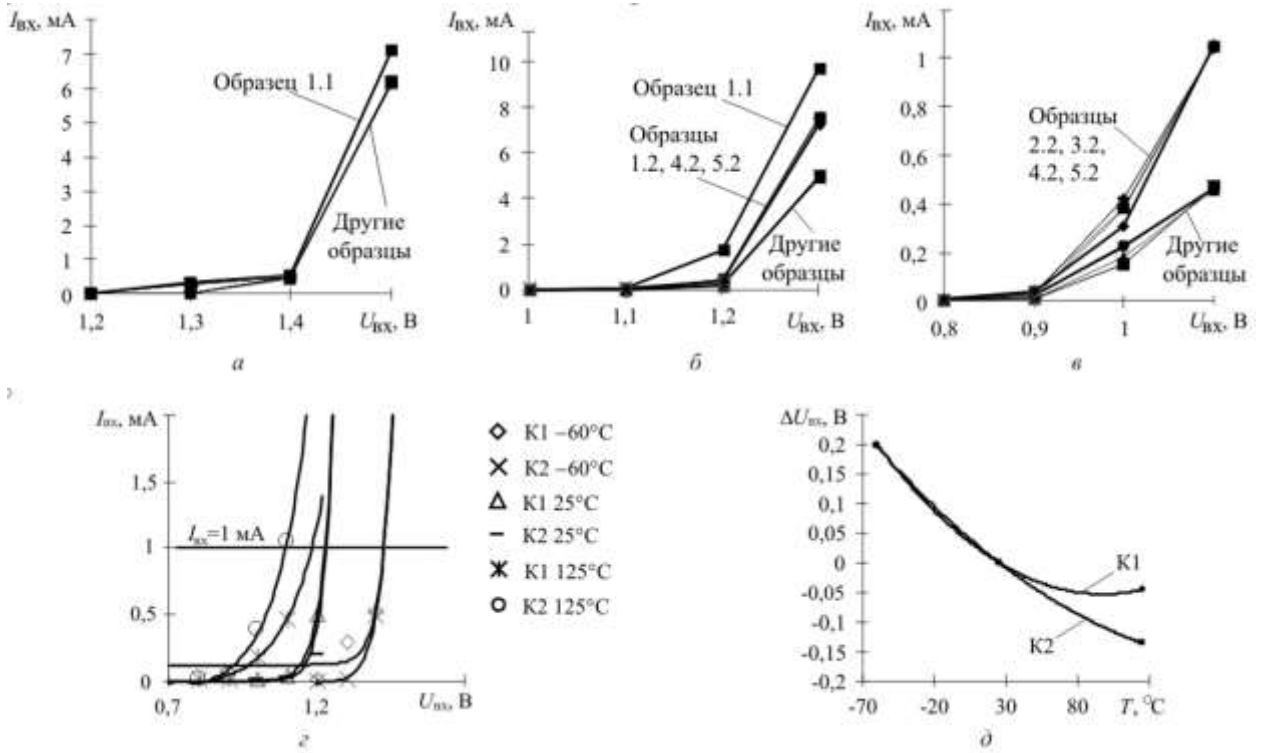


Рисунок 3.28 – Вольт-амперные характеристики

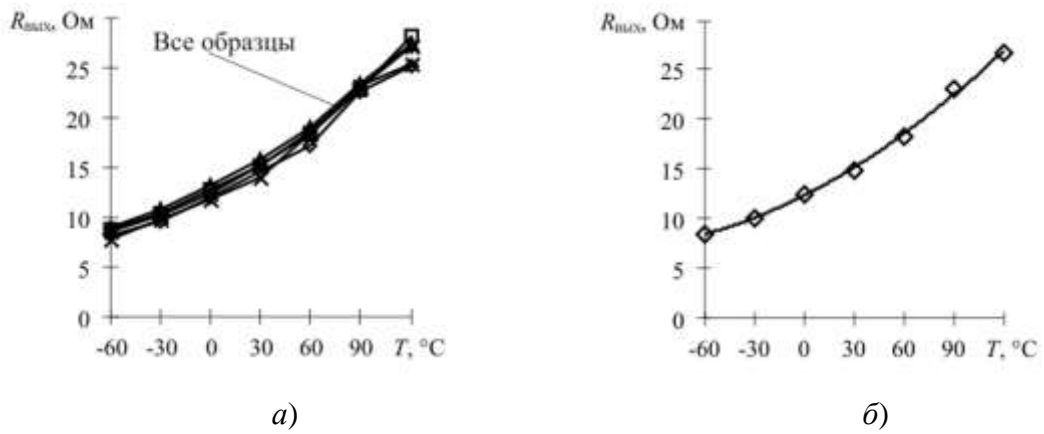


Рисунок 3.29 – Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от температуры

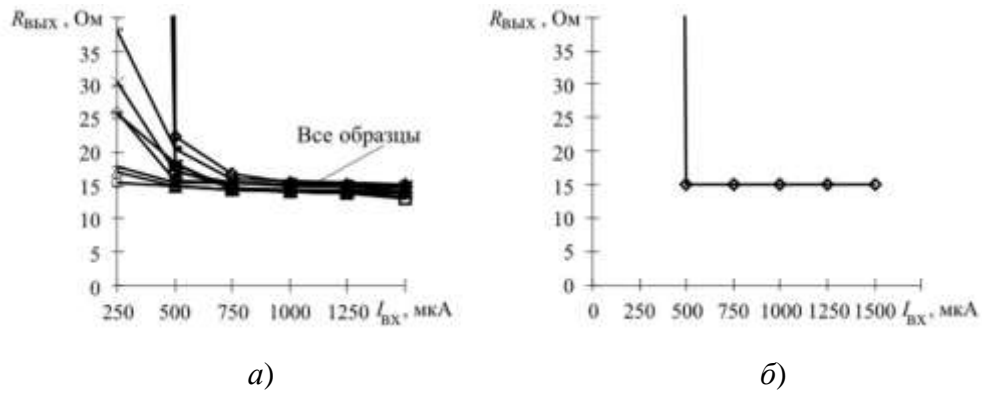


Рисунок 3.30 – Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от входного тока

Частотные характеристики (рисунок 3.31, *a*, *б*) получены с помощью генератора сигналов Agilent 33220A; осциллографа Tektronix TDS2024B; источника питания SPS-606 и измерителя Gwinstek LCR-821. Измерения времени включения/выключения проводилось при входном токе  $I_{вх} = 1$  мА, выходном напряжении  $U_{вых} = 10$  В и сопротивлении нагрузки  $R_{н} = 200$  Ом. Время выключения (рисунок 3.31, *a*) характеризуется хорошей повторяемостью экспериментальных значений и средней величиной  $t_{выкл} = 15,72$  мкс. Время включения имеет значительный разброс экспериментальных значений для пяти образцов со средней величиной  $t_{вкл} = 60,8$  мкс. Выходная емкость (рисунок 3.31, *б*) в выключенном состоянии измерена при выходном напряжении  $U_{вых} = 0$  В. За исключением образца №4 все образцы имеют хорошую повторяемость экспериментальных значений. Средние значения выходной емкости для каналов К1 и К2 соответственно равны  $C_{вых1} = 12,02$  пФ и  $C_{вых2} = 13,26$  пФ.

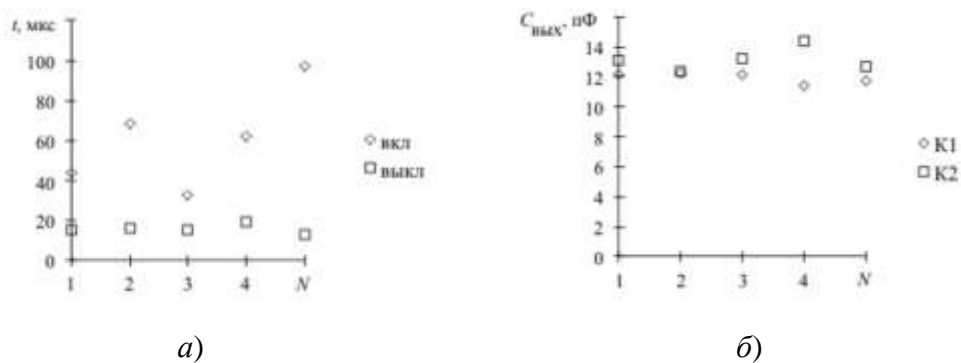


Рисунок 3.31 – Частотные характеристики образцов микросхемы 249КП4АТ

Для синтеза будущей математической модели МОП-реле предлагается структурная схема (рисунок 3.32), состоящая из двух основных блоков: входной каскад и выходной каскад. Внутреннее наполнение каскадов соответствует наблюдаемым процессам на предыдущем этапе исследования. Входной сигнал (входное напряжение  $U_{вх}$ ) поступает на один из

двух входов сумматора напряжения  $U1$ . На другой вход сумматора поступает аддитивный сигнал  $\Delta U_{ВХ} = \varphi_1(T_{СР})$  от термозависимого источника напряжения  $U2$ . Источник  $U2$  в аналитическом виде воспроизводит экспериментальный вид температурной зависимости одного из каналов (см. рисунок 3.28, *д*). Суммарный нелинейный сигнал – входное термозависимое напряжение  $U'_{ВХ} = U_{ВХ} + \Delta U_{ВХ}$  – поступает на вход источника тока  $G1$ , управляемого напряжением. В конечном итоге блок входного каскада формирует функциональную зависимость входной ВАХ  $I_{ВХ} = \varphi_2(U_{ВХ})$  применительно к одному из каналов.

Входной ток  $I_{ВХ}$  от  $G1$  поступает на источник напряжения  $U3$ , расположенный в выходном каскаде и управляемый током. Передаточная характеристика источника  $U3$  воспроизводит функцию с порогом нечувствительности  $I_{ВХ} = I_{ПОР}$  согласно зависимости на рисунке 3.30, *б*. Начиная с порогового значения, передаточная функция линейна  $U3 = k \cdot I_{ВХ}$ . Линия задержки  $DT1$ , последовательно соединенная с источником  $U3$ , обеспечивает инерционные свойства МОП-реле, а именно, конечное время включения/выключения. Сигнал с линии задержки  $DT1$  поступает на нормирующее устройство  $U4$ , которое формирует релейную двухпозиционную передаточную характеристику для управления ключами выходного каскада  $SA1$  и  $SA2$ . Выходы ключей последовательно соединены с термозависимыми резисторами  $RK1$  и  $RK2$ . Их функциональная зависимость  $R = \varphi_3(T_{СР})$  воспроизводит в аналитическом виде характеристику выходного сопротивления (см. рисунок 3.29, *б*). Частотные свойства выходного каскада МОП-реле (рисунок 3.31, *б*) обеспечиваются включением двух конденсаторов  $C1$  и  $C2$ .

Канал  $K2$  на рисунке 3.32 в явном виде не показан, его структурное наполнение полностью идентично каналу  $K1$ . Таким образом, разработана структура МОП-реле, обладающая совокупными свойствами:

1. Функциональная зависимость входного тока от входного напряжения с учетом влияния температуры окружающей среды.
2. Наличие порога нечувствительности выходного каскада ко входным воздействиям.
3. Инерционность выходного каскада во временной области.
4. Температурная зависимость выходного сопротивления.
5. Конечная выходная емкость в выключенном состоянии.





Рисунок 3.32 – Структуризация модели МОП-реле 249КП4АТ

Структурная проработка МОП-реле (см. рисунок 3.32) позволяет предложить компактную математическую модель. Сделаем это для канала К1. Пусть входной ток МОП-реле есть функция двух аргументов – входного напряжения  $U_{ВХ}$  и температуры окружающей среды  $T_{СР}$ :

$$I_{ВХ} = f_1(U_{ВХ}, T). \quad (3.22)$$

Произведем декомпозицию функции (3.22) путем фиксации температуры на определенном уровне. Тогда получим частную функцию  $i_{ВХ} = f'_1(U_{ВХ})$ , зависящую только от входного напряжения и аппроксимируемую экспоненциальной функцией (см. рисунок 3.28, з):

$$i_{ВХ} = f_1(U_{ВХ}, T)|_{T=25^\circ\text{C}} = f'_1(U_{ВХ}) = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot U_{ВХ}) + a_3. \quad (3.23)$$

Аддитивная составляющая нелинейности входной ВАХ  $\Delta U_{ВХ}$ , зависящая от температуры окружающей среды, есть разность аргументов функций (3.22) и (3.23), при фиксированном значении входного тока  $I_{ВХ}$ :

$$\Delta U_{ВХ} = f_2(T) = f_1(U_{ВХ}, T)|_{I_{ВХ}=\text{const}} - f'_1(U_{ВХ})|_{I_{ВХ}=\text{const}} = b_1 \cdot T^2 + b_2 \cdot T + b_3. \quad (3.24)$$

Суммарный сигнал входного тока  $I_{ВХ}$  есть композиция функций (3.23) и (3.24):

$$I_{ВХ} = a_1 \cdot \exp\{a_2 \cdot [U_{ВХ} - (b_1 \cdot T^2 + b_2 \cdot T + b_3)]\} + a_3. \quad (3.25)$$

Сопротивление прямой передачи МОП-реле представляет собой ступенчатую функцию, принимающую постоянное значение после достижения порогового значения  $I_{ПОР}$  входным током  $I_{ВХ}$ :

$$R_{пр.п} = \begin{cases} \infty, & I_{ВХ} < I_{пор}; \\ \text{const}, & I_{ВХ} \geq I_{пор}. \end{cases} \quad (3.26)$$

Введем дополнительный внутренний параметр для разрабатываемой математической модели – напряжение замыкания ключей  $U_{ПОР}$ . Пусть  $U_{ПОР} = 1\text{В}$ . Тогда источник напряжения, управляемый током  $U_3$ , должен иметь передаточную характеристику:

$$U3(I_{ВХ}) = k \cdot I_{ВХ}, \quad (3.27)$$

где  $k = \frac{U_{пор}}{I_{пор}} = \frac{1}{I_{пор}}$ .

Нормирующее устройство  $U4$  ограничивает диапазон управляющих напряжений на входе ключей так, чтобы максимальное значение совпадало с напряжением замыкания ключей:

$$U4 = \begin{cases} U3, & U3 < 1; \\ 1, & U3 \geq 1. \end{cases} \quad (3.28)$$

Сопротивление ключей  $SA1$  и  $SA2$ , управляемых нормирующим устройством, будет:

$$R_{sa1} = R_{sa2} = \begin{cases} R_{выкл}, & U4 < 1; \\ R_{вкл}, & U4 \geq 1, \end{cases} \quad (3.29)$$

где  $R_{выкл}$  и  $R_{вкл}$  – сопротивления ключей в разомкнутом и замкнутом состоянии, соответственно, причем  $R_{выкл} \gg R_{вкл}$ .

Подставим в (3.29) сначала (3.28), а затем в (3.27). В результате получим:

$$R_{sa1} = R_{sa2} = \begin{cases} R_{выкл}, & I_{вх} < I_{пор}; \\ R_{вкл}, & I_{вх} \geq I_{пор}. \end{cases} \quad (3.30)$$

В замкнутом состоянии ключей  $SA1$ ,  $SA2$  и при наличии нагрузки на выходах образуются контуры с токами нагрузки  $I_{н1}$ ,  $I_{н2}$  и выходным напряжением:

$$U_{вых1} = \begin{cases} 0, & I_{вх} < I_{пор}; \\ I_{н1} \cdot (R_{вкл} + R_{вых1} + R_{н1}), & I_{вх} \geq I_{пор}, \end{cases} \quad (3.31)$$

$$U_{вых2} = \begin{cases} 0, & I_{вх} < I_{пор}; \\ I_{н2} \cdot (R_{вкл} + R_{вых2} + R_{н2}), & I_{вх} \geq I_{пор}, \end{cases} \quad (3.32)$$

где  $R_{вых1}$ ,  $R_{вых2}$  – выходные термозависимые сопротивления;  $R_{н1}$ ,  $R_{н2}$  – активные сопротивления нагрузки.

Величины  $R_{вых1}$ ,  $R_{вых2}$  – функции от температуры окружающей среды (см. рисунок 3.29, б); аппроксимируются полиномами второго порядка:

$$R_{вых1} = c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3. \quad (3.33)$$

$$R_{вых2} = c4 \cdot T^2 + c5 \cdot T + c6. \quad (3.34)$$

Подставим в формулы для выходного напряжения (3.31) и (3.32) выражения (3.33), (3.34) и (3.25). В результате получим окончательные выражения для выходного напряжения для канала  $K1$  по постоянному току:

$$U_{\text{вых1}} = \begin{cases} 0, & I_{\text{пор}} > \left( a1 \cdot \exp \left\{ a2 \left[ U_{\text{вх}} - (b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3) \right] \right\} + a3 \right); \\ I_{\text{н1}} \cdot (R_{\text{вкл}} + c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3 + R_{\text{н1}}), & I_{\text{пор}} \leq \left( a1 \cdot \exp \left\{ a2 \left[ U_{\text{вх}} - (b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3) \right] \right\} + a3 \right). \end{cases} \quad (3.35)$$

$$U_{\text{вых2}} = \begin{cases} 0, & I_{\text{пор}} > \left( a1 \cdot \exp \left\{ a2 \left[ U_{\text{вх}} - (b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3) \right] \right\} + a3 \right); \\ I_{\text{н2}} \cdot (R_{\text{вкл}} + c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3 + R_{\text{н2}}), & I_{\text{пор}} \leq \left( a1 \cdot \exp \left\{ a2 \left[ U_{\text{вх}} - (b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3) \right] \right\} + a3 \right). \end{cases} \quad (3.36)$$

Аналогичным образом можно получить выражение  $U_{\text{вых3}}$ ,  $U_{\text{вых4}}$  для выходного напряжения для канала К2 по постоянному току.

Частотные характеристики идеальной линии задержки  $DT1$  получим с помощью соотношения:

$$U_{DT1}(t) = U3(t - t_{31}),$$

где  $t_{31}$  – среднее время включения/выключения МОП-реле для канала К1.

Полагая воздействие на вход линии задержки гармоническим, запишем его в комплексной форме:

$$\dot{U}3(t) = \dot{U}3 \cdot e^{j\omega t},$$

где  $\dot{U}3 = U3 \cdot e^{j\Phi1}$  – комплексная амплитуда колебания.

В результате получим:

$$\dot{U}_{DT1}(t) = \dot{U}3 \cdot e^{j\omega(t-t_{31})} = \dot{U}3(t) \cdot e^{-j\omega t_{31}}.$$

Отсюда комплексный коэффициент передачи идеальной линии задержки  $DT1$  будет иметь вид:

$$\dot{K}_{DT1}(\omega) = \frac{\dot{U}_{DT1}}{\dot{U}3} = 1 \cdot e^{-j\omega t_{31}}, \quad (3.37)$$

где  $|\dot{K}_{DT1}(\omega)| = 1$  – амплитудно-частотная характеристика;  $\Phi1(\omega) = -\omega t_{31}$  – фазо-частотная характеристика.

Две симметричных цепи выходного каскада представляют собой интегрирующие звенья, образованные структурами  $R_{sa1}-RK1-C1$  и  $R_{sa2}-RK2-C2$ , соответственно. Комплексная передаточная функция выходного напряжения (на примере выхода  $U_{\text{вых1}}$ ) будет:

$$\dot{K}1(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых1}}}{\dot{U}_{sa1}} = \frac{1}{(1 + j\omega(R_{sa1} + RK1)C1)}. \quad (3.38)$$

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики примут вид:

$$|\dot{K}1| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}; \quad \Phi2(\omega) = -\arctg(\omega\tau).$$

Аналогичным образом может быть представлена комплексная передаточная функция выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ2}}$ .

Многообразие конкретных реализаций математической модели МОП-реле задано множеством  $\mathbf{M}$ , содержащим значения параметров в уравнениях (3.35), (3.36), (3.37), (3.38):

$$\mathbf{M} = \left\{ a1 \quad a2 \quad a3 \quad b1 \quad b2 \quad b3 \quad I_{\text{пор1}} \quad t_{31} \quad \left\{ \begin{array}{l} c1 \\ c4 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} c2 \\ c5 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} c3 \\ c6 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} C1 \\ C2 \end{array} \right\} \right\}. \quad (3.39)$$

На основе структурной схемы (см. рисунок 3.32) и с учетом математической модели (3.35–3.38) разработана макромодель (рисунок 3.33), пригодная для SPICE-симуляторов. Номера внешних выводов макромодели соответствуют номерам выводов прототипа: 2, 7 – катоды излучающих диодов каналов К1 и К2; 3, 6 – аноды излучающих диодов каналов К1 и К2; 14, 9 – вторые выходы каналов К1 и К2; 16, 11 – первые выходы каналов К1 и К2; 15, 10 – общие выходы каналов К1 и К2. Макромодель содержит два идентичных канала, по 12 элементов в каждом. Рассмотрим канал К1. Во входном каскаде датчик тока представляет собой последовательное соединение универсального источника напряжения  $PV1$  с нулевым собственным значением напряжения и резистор  $R1$ . Управляемый источник тока  $G1$  зависит от входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  и от температуры окружающей среды  $T_{\text{СР}}$ . Функциональная зависимость аппроксимируется выражением (3.25) с коэффициентами  $a1, a2, a3, b1, b2, b3$ .

В выходном каскаде управляемый источник напряжения  $U1$  зависит от произведения порогового коэффициента срабатывания  $k = \frac{1}{I_{\text{пор1}}}$  на входной ток  $I_{\text{ВХ}}$ . Управляемый источник  $U1$  последовательно соединен с линией задержки  $DT1$ , представляющей собой стандартную SPICE-модель линии передач без потерь с временем задержки сигнала  $t_{31}$  и волновым сопротивлением  $Z_0 = 50$  Ом. Сигнал с линии задержки поступает на ограничитель уровня  $U3$ . Элемент  $U3$  – аналоговый функциональный блок на основе источника напряжения с нелинейной таблично заданной передаточной характеристикой. Передаточная характеристика имеет две характерные точки  $(0, 0)$  и  $(1, 1)$ . Промежуточные значения между точками вычисляются с помощью линейной интерполяции. Выход ограничителя соединен с двумя симметричными каскадами:  $SA1-RK1-C1$  и  $SA2-RK2-C2$ . Элементы  $SA1$  и  $SA2$  – идеальные ключи, управляемые напряжением. Напряжение замыкания ключей составляет  $U_{\text{ПОР}} = 1\text{В}$ ; сопротивление включения/выключения  $R_{\text{ВКЛ}}/R_{\text{ВЫКЛ}} = 1/6 \cdot 10^8$  Ом. Температурнозависимые выходные сопротивления представлены стандартными SPICE-моделями резисторов  $RK1$  и  $RK2$ . Температурная зависимость аппроксимируется полиномом второго порядка и задается



(таблица 3.2), а также к (3.19) и (3.20). Взяв коэффициенты в указанных полиномах, запишем в соответствующие ячейки таблицы 3.3. Проведя анализ рисунков 3.28, б и 3.29, а также полинома (3.21), можно заполнить остальные ячейки таблицы.

Таблица 3.3 – Значения параметров для математической модели МОП-реле

Канал	Значения параметра	Текстовое описание
К1	$a1 = 7,099 \cdot 10^{-17}$ ; $a2 = 24,65$ ; $a3 = 4,238 \cdot 10^{-6}$	Коэффициенты экспоненциальной аппроксимации входной ВАХ
К1	$b1 = 1,029 \cdot 10^{-5}$ ; $b2 = -1,993 \cdot 10^{-3}$ ; $b3 = 0,043$	Коэффициенты аддитивной зависимости входного напряжения от температуры
К2	$a4 = 2,314 \cdot 10^{-19}$ ; $a5 = 25,216$ ; $a6 = -1,525 \cdot 10^{-5}$	Коэффициенты экспоненциальной аппроксимации входной ВАХ
К2	$b4 = 5,113 \cdot 10^{-6}$ ; $b5 = -2,127 \cdot 10^{-3}$ ; $b6 = 0,05$	Коэффициенты аддитивной зависимости входного напряжения от температуры
К1, К2	$I_{пор1} = I_{пор2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ А	Пороговое значение тока замыкания ключей
К1, К2	$t_{31} = t_{32} = 38,26 \cdot 10^{-6}$ с	Среднее значение времени включения/выключения
К1, К2	$c1 = c4 = c7 = c10 = 3 \cdot 10^{-4}$ $c2 = c5 = c8 = c11 = 0,0834$ $c3 = c6 = c9 = c12 = 12,368$	Коэффициенты зависимости выходного сопротивления от температуры
К1, К2	$C_{ВЫХ1} = C_{ВЫХ2} = 12,64 \cdot 10^{-12}$ Ф	Значение выходной емкости

Совокупность параметров из таблицы 3.3 количественно определяет параметрическую математическую модель (3.39).

Дальнейшее моделирование происходит в схемотехническом модуле PSpice A/D, входящем в программный комплекс Cadence OrCAD. На поле чертежа в схемном редакторе OrCAD Capture макромодель МОП-реле представлена в виде условного графического обозначения аналоговой микросхемы DA1 (рисунок 3.34). Ко входам микросхемы, в каналы К1 и К2 подключены два импульсных источника напряжения  $E1$  и  $E2$ . Параметры импульсного сигнала заранее не фиксируются, они устанавливаются для каждого вида тестового эксперимента отдельно. Нагрузкой микросхемы служат резисторы  $R_{н1} = R_{н2} = 200$  Ом и последовательно соединенные с ними источники синусоидального напряжения  $E3$  и  $E4$ . Основные параметры источников  $E3$  и  $E4$ : амплитуда 10 В, частота 100 кГц.

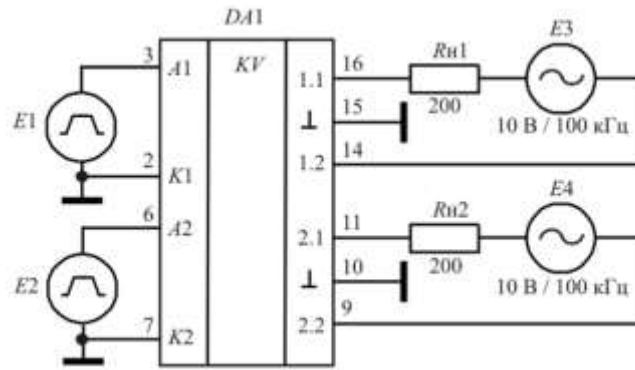


Рисунок 3.34 – Схема включения МОП-реле 249КП4АТ

Сравнительный анализ результатов физического эксперимента проводится путем сопоставления соответствующих функциональных зависимостей с результатами SPICE-моделирования. Для удобства восприятия результаты физического эксперимента и моделирования сведены на общие координатные плоскости: температурная зависимость ухода входного напряжения (рисунок 3.35, а) и температурная зависимость выходного сопротивления (рисунок 3.35, б). На графиках результаты моделирования представлены в виде сплошных линий, результаты физического эксперимента показаны в виде маркеров в координатах, соответствующих измеренным значениям. С качественной точки зрения можно видеть хорошее совпадение экспериментальных и имитационных ВАХ. Количественная оценка проведена как вычисление относительной погрешности результатов моделирования по сравнению с физическим экспериментом относительно экспериментальных точек. Максимальные значения относительной погрешности для указанных температурных зависимостей приведены в таблице 3.4.

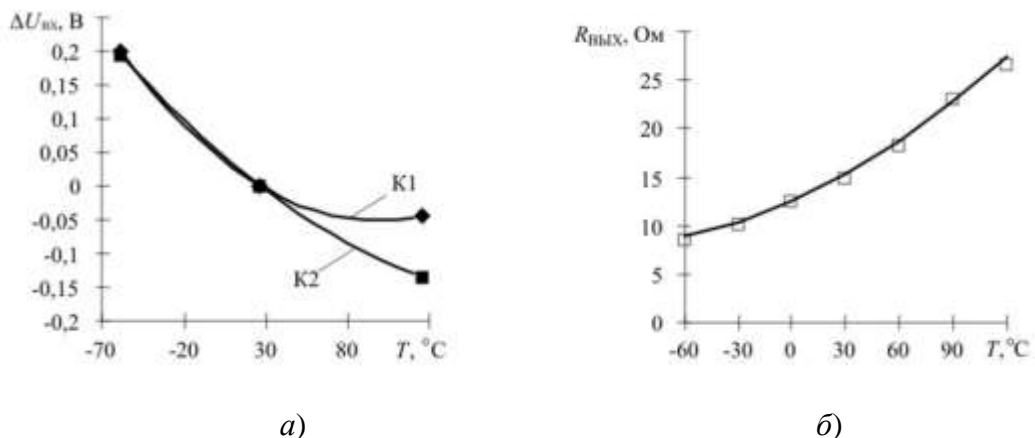


Рисунок 3.35 – Сравнительный анализ результатов физического эксперимента и моделирования

Таблица 3.4 – Максимальные значения относительной погрешности результатов моделирования

Относительная погрешность температурной зависимости ухода входного напряжения, %		Относительная погрешность температурной зависимости выходного сопротивления, %
Канал К1	Канал К2	
6,7	4,4	5,3

Тестирование синтезированной модели МОП-реле проведено в среде OrCAD PSpice (рисунок 3.36). На вход канала К1 подан управляющий сигнал высокого уровня с импульсом тока в 10 мА. На вход канала К2 подается сигнал низкого уровня с импульсом тока в 320 мкА. В качестве нагрузки на выходе МОП-реле имеются активные сопротивления  $R_{Н1} = R_{Н2} = 200$  Ом, а также источники синусоидального напряжения  $E3$  и  $E4$  (см. рисунок 3.34). Для наглядности на этой же координатной плоскости нанесены эпюры коммутируемого напряжения на зажимах  $R_{Н1}$  и  $R_{Н2}$  для каналов К1 и К2, соответственно. Первая эпюра (маркер  $\Delta$ ) демонстрирует запаздывание момента коммутации относительно начала управляющего импульса в 38 мкс. Поскольку управляющий сигнал высокого уровня больше порогового значения ( $I_{ВХ} > I_{ПОР}$ ), то выходное сопротивление МОП-реле мало и амплитуда коммутируемого напряжения на зажимах  $R_{Н1}$  практически равно амплитуде источника  $E3$ . Вторая эпюра (маркер  $\circ$ ) демонстрирует противоположный случай. Управляющий сигнал низкого уровня меньше порогового значения ( $I_{ВХ} < I_{ПОР}$ ), выходное сопротивление МОП-реле высоко, амплитуда коммутируемого напряжения уменьшается в 1250 раз. С качественной точки зрения эпюра этого сигнала – постоянная составляющая на уровне 0 В.

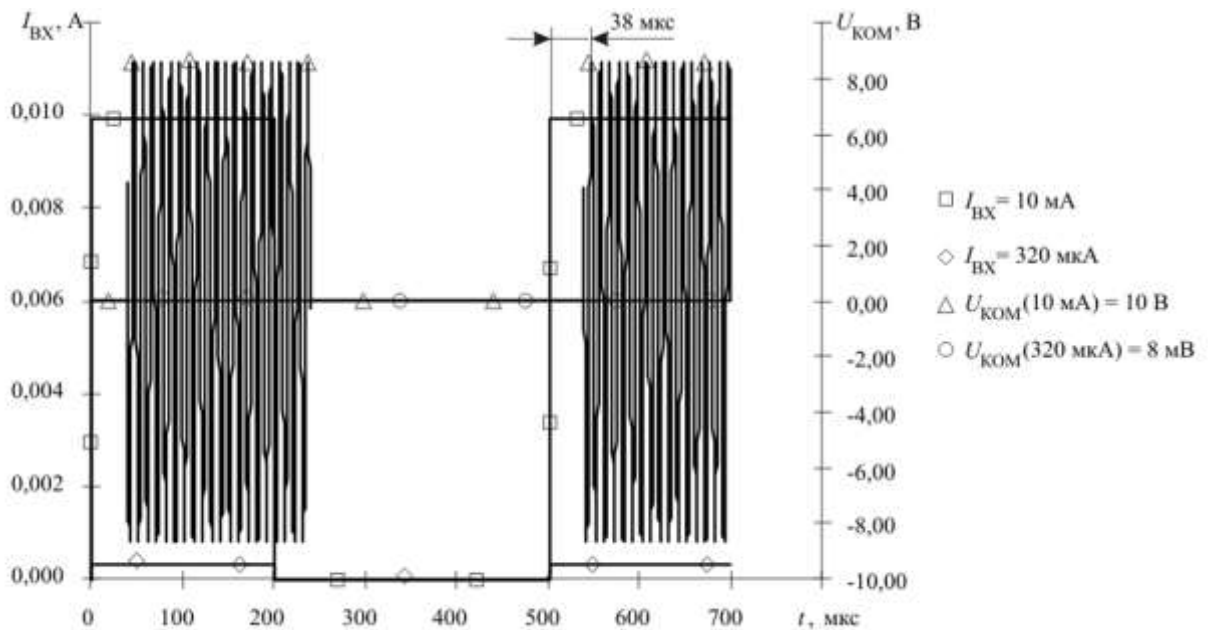


Рисунок 3.36 – Результаты моделирования во временной области



Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложена методика моделирования твердотельных МОП-реле с учетом температурных зависимостей параметров, которая позволяет создавать SPICE-модели конкретных отечественных прототипов.
2. Относительная погрешность моделирования температурных зависимостей входных и выходных характеристик для полученной SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ не превышает  $\pm 7\%$  по сравнению с результатами физического эксперимента.
3. Достоинство предложенной методики моделирования заключается в параметрическом представлении окончательной математической модели МОП-реле. Следовательно, синтез других подобных моделей твердотельных МОП-реле будет сводиться к нахождению числовых значений для множества (3.39).
4. Недостатком представленной SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ является точечная оценка частотных и временных характеристик. Это дает совпадение величин в физическом и имитационном эксперименте лишь в фиксированных точках рабочих режимов.

### 3.2 Обобщенная методика синтеза термозависимых SPICE-моделей

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.

Пусть прототип модели состоит из  $k$  каналов, причем для упрощения разработки все каналы однородны (рисунок 3.37). Установим для каждого канала структурные блоки:

- входной каскад 1, имеющий  $m$  входов, на которых действует либо входное напряжение  $U_{\text{вх}i}$ , либо поступает входной ток  $I_{\text{вх}i}$ . Множество входных воздействий обозначим как  $\alpha_{\text{вх}i} = \{U_{\text{вх}i}, I_{\text{вх}i}\}$ . Требование к входному каскаду заключается в имитации входных ВАХ адекватных соответствующим термозависимым характеристикам прототипа  $\alpha_{\text{вх}i} = f_1(X_i, T)$ , где  $X_i$  – параметр входного каскада;

- промежуточные каскады 2, на вход которых поступает вектор параметров от входного каскада (1-2). Требование к промежуточным каскадам заключается в формировании проходной характеристики канала с наследованием температурных зависимостей от входных параметров  $\beta_{\text{вых}i} = f_2(\alpha_{\text{вх}i}, T)$ ;

- частотно-зависимый каскад 3, на вход которого поступает вектор параметров от промежуточных каскадов (2-3). Назначение частотно-зависимого каскада сводится к имитации поведенческих свойств канала в частотной области  $\dot{U}_{\text{вых}i} = f_3(j\omega)$ ;

- выходной каскад 4, на вход которого поступает частотно-зависимый вектор (3-4) параметров с наследованием свойств предыдущих каскадов  $\dot{U}_{\text{вых}i} = f_1 + f_2 + f_3$ . Выходной каскад должен формировать выходную ВАХ с температурными зависимостями выходного напряжения и/или тока. Эти температурные зависимости должны быть аддитивны по отношению к температурным зависимостям входного каскада  $\dot{U}_{\text{вых}i} = f_4(\alpha_{\text{вх}i}, T + \Delta T, j\omega)$ ;

- каскад обратной связи 5, на вход которого поступает вектор параметров (4-5) с выхода. Каскад обратной связи оказывает влияние на работу входного, промежуточного и частотно-зависимого каскадов. Для того, чтобы несколько упростить разрабатываемую модель сделаем допущение: каскад обратной связи лишён свойства температурной зависимости параметров.

Сделаем по структуре модели на рисунке 3.37 два замечания:

1. Модель имитирует поведенческие свойства прототипа с учетом его температурных зависимостей, однако не имитирует структурный состав прототипа.

2. Для дискретных двухтерминальных и дискретных многотерминальных ЭРИ разработанная структура будет избыточна. Следовательно, в каждом конкретном случае синтеза SPICE-моделей ЭРИ отдельные каскады структуры на рисунке 3.37 могут отсутствовать.

#### *1. Входной каскад.*

а) пусть первичной экспериментальной информацией служит визуализация вариационного ряда измерений  $i$ -ой входной величины  $\alpha_{\text{вх}i}$  в виде функциональной зависимости от температуры  $T$  (рисунок 3.38). Функциональные зависимости  $\alpha_{\text{вх}i} = f(T)$ , как правило, нелинейны и знакопеременны. Особенности измерения функциональной зависимости  $\alpha_{\text{вх}i} = f(T)$  относятся к области метрологии. Предпочтительно использовать высокопроизводительные измерительные комплексы Thermostream TP04310A (см. рисунок 3.3) по сравнению с климатическими камерами. В пользу такого выбора говорят высокая точность измерений (до 0,1 °С) и малое время установления требуемой температуры.

б) функциональная зависимость входных параметров от температуры может быть представлена в неявном виде. Наиболее часто в справочной информации входные ВАХ представлены в виде семейств характеристик (рисунок 3.39), измеренных при разных температурах  $T_j$  окружающей среды в зависимости от аргумента  $X_i$ :

$$\alpha_{\text{вх}ij} = f(X_i, T_j).$$

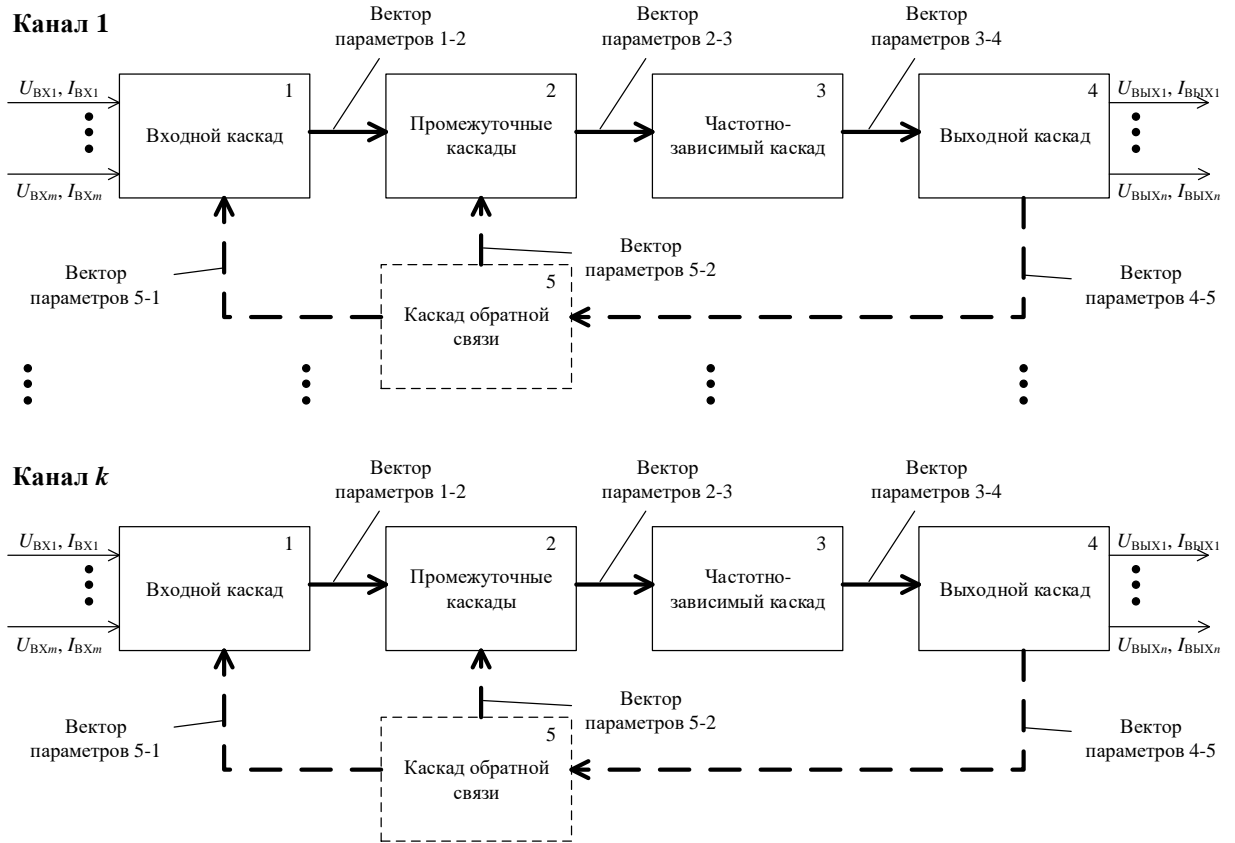


Рисунок 3.37 – Структура многоканальной SPICE-модели

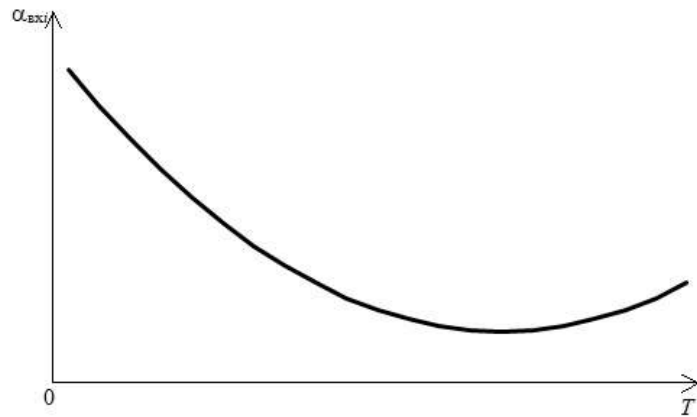


Рисунок 3.38 – Функциональная зависимость  $i$ -ой входной величины от температуры

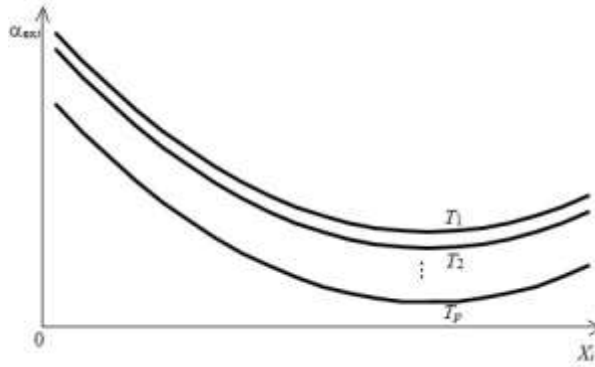


Рисунок 3.39 – Семейство входных ВАХ при различных температурах окружающей среды

В этом случае частная задача экспериментатора – ввести целевую функцию:

$$C(T_j) = \alpha_{вхij} = f(X_i, T_j) \Big|_{X_i = \text{const}},$$

где  $X_i = \text{const}$  – заданный уровень абсциссы для аргумента  $X_i$ .

Взяв ординаты каждой кривой семейства характеристик при  $X_i = \text{const}$  в результате преобразования получим явную зависимость  $\alpha_{вxi} = f(T)$  (рисунок 3.38).

в) известно, что статистические методы широко используются для обработки и графического представления данных. Такой подход реализуется в задачах регрессии. Математически постановка задачи регрессии сводится к следующему. Пусть есть набор точно определенных значений  $X_l$  и соответствующих им неточных значений  $\alpha_{вxl}$ . Допустим, что существует некоторая зависимость  $f(X, a_0, a_1, \dots, a_s)$ , которая может рассматриваться как приближение к зависимости  $\alpha_{вxi}(X)$ , чьи точки представлены как  $\alpha_{вxl}(X_l)$ . Таким образом, можно записать:

$$\alpha_{вxl} = f(X_l, a_0, a_1, \dots, a_s) + s_l.$$

Здесь  $s_l$  – независимые случайные величины с некоторым (чаще всего нормальным) законом распределения, определяющие погрешность задания  $\alpha_{вxl}$ . Обычно их считают следствием ошибок эксперимента. Задача регрессии заключается в том, чтобы найти параметры  $a_0, a_1, \dots, a_s$  такими, при которых представление  $\alpha_{вxi}$  функцией  $f(X_l)$  имело бы наименьшую среднеквадратичную погрешность. Для этого нужно минимизировать функцию  $\Phi(a_0, a_1, \dots, a_s)$ .

Например, в программном комплексе MathCAD введена функция для обеспечения полиномиальной регрессии [107]:

$$\text{regress}(VX, VY, n)$$

при произвольной степени полинома регрессии. Она возвращает вектор  $VS$ , запрашиваемый функцией  $interp(VS, VX, VY, x)$ , содержащий коэффициенты многочлена  $n$ -й степени, который наилучшим образом приближает «облако» точек с координатами, хранящимися в векторах  $VX$  и  $VY$  (рисунок 3.40).



Рисунок 3.40 – Полиномиальная регрессия в MathCAD

На практике не рекомендуется делать степень аппроксимирующего полинома выше 5-6, поскольку погрешности реализации регрессии сильно возрастают. Функция *regress* создает единственный приближающий полином, коэффициенты которого вычисляются по всей совокупности заданных точек, то есть глобально.

Под нелинейной регрессией общего вида подразумевается нахождение вектора  $K$  параметров произвольной функции  $F(x, K_1, K_2, \dots, K_n)$ , при котором обеспечивается минимальная среднеквадратичная погрешность приближения «облака» исходных точек. Для проведения нелинейной регрессии общего вида в программном комплексе MathCAD используется функция *genfit*( $VX, VY, VS, F$ ). Она возвращает вектор  $K$  параметров функции  $F$ , дающий минимальную среднеквадратичную погрешность приближения функцией  $F(x, K_1, K_2, \dots, K_n)$  исходных данных. Функция  $F$  должна быть вектором с символьными элементами, причем они должны содержать уравнение исходной функции и ее производных по всем

параметрам. Вектор  $VS$  должен содержать начальные значения элементов вектора  $K$ , необходимые для решения системы нелинейных уравнений регрессии итерационным методом.

При решении этой задачи возникают две проблемы. Во-первых, надо вычислить значения производных по переменным  $a$  и  $b$ . На рисунке 3.41 это сделано с помощью символьных операций:

$$F(x, a, b) := a \cdot e^{-b \cdot x} + a \cdot b;$$

$$\frac{d}{da} F(x, a, b) \rightarrow e^{-b \cdot x} + b;$$

$$\frac{d}{db} F(x, a, b) \rightarrow -a \cdot x \cdot e^{-b \cdot x} + a.$$

Вторая проблема связана с необходимостью применения функции *genfit* в ее стандартном виде. Поэтому следует заменить параметр  $a$  на  $k_1$ , а параметр  $b$  на  $k_2$ . В остальных операциях на рисунке 3.41 достаточно очевидно.

Анализируя частные результаты создания SPICE-моделей в п. 3.1.1 – 3.1.3, можно заметить – наиболее распространённым и эффективным случаем является аппроксимация экспериментальных данных квадратичным полиномом:

$$F(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2.$$

г) для удобства синтеза SPICE-модели предлагается иное, отличающееся от классического, представление температурной зависимости входной величины  $\alpha_{\text{ВХ}i}$ . Пусть входная величина  $\alpha_{\text{ВХ}i}$  есть функция двух аргументов – аргумента  $X_i$  и температуры окружающей среды  $T$ :

$$\alpha_{\text{ВХ}i} = f_1(X_i, T).$$

Произведем декомпозицию функции  $f_1$  путем фиксации одного из аргументов – температуры – на определенном уровне ( $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Тогда получим частную функцию  $\alpha'_{\text{ВХ}i} = F_1(X_i)$ , зависящую только от аргумента  $X_i$  и аппроксимируемую полиномом  $r$ -ого порядка:

$$\alpha'_{\text{ВХ}i} = f_1(X_i, T) \Big|_{T=25^\circ\text{C}} = F_1(X_i) = a_1 \cdot X_i^r + a_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + a_r.$$

Аддитивная составляющая нелинейности входной ВАХ  $\Delta\alpha_{\text{ВХ}i}$ , зависящая от температуры окружающей среды, есть разность функций  $f_1$  и  $F_1$ , вычисленная при фиксированном значении аргумента  $X_i$ :

$$\Delta\alpha_{\text{ВХ}i} = f_{1-2}(T) = f_1(\alpha_{\text{ВХ}i}, T) \Big|_{\alpha_{\text{ВХ}i}=\text{const}} - F_1(\alpha_{\text{ВХ}i}) \Big|_{\alpha_{\text{ВХ}i}=\text{const}} = b_1 \cdot T^r + b_2 \cdot T^{r-1} + \dots + b_r.$$

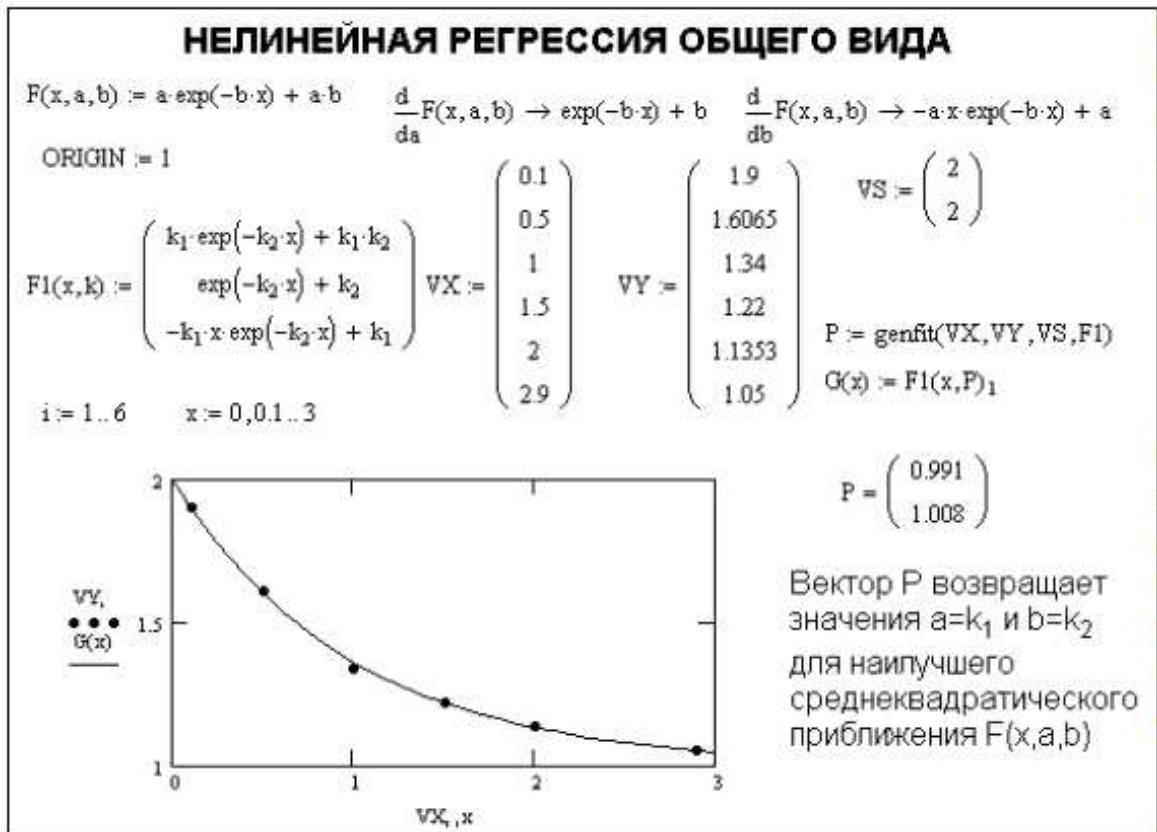


Рисунок 3.41 – Нелинейная регрессия общего вида в MathCAD

Суммарный сигнал входной величины  $\alpha_{\text{вх}i}$  есть композиция функций  $F_1$  и  $f_{1-2}$  или сумма двух полиномов:

$$\alpha_{\text{вх}i} = F_1(X_i) + f_{1-2}(T) = a_1 \cdot X_i^r + a_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + a_r + b_1 \cdot T^r + b_2 \cdot T^{r-1} + \dots + b_r.$$

д) зависимые источники напряжения и тока в языке SPICE-моделирования изначально делятся на 4 типа:

- источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН);
- источник тока, управляемый током (ИТУТ);
- источник тока, управляемый напряжением (ИТУН);
- источник напряжения, управляемый током (ИНУТ).

Кроме этого, перечисленные источники делятся на линейные и нелинейные. В описании нелинейных зависимых источников  $y = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  используется полиномиальная функция вида:

$$\begin{aligned}
 y = & P_0 + P_1 x_1 + P_2 x_2 + \dots + P_n x_n + P_{n+1} x_1^2 + P_{n+2} x_1 x_2 + \dots + P_{2n} x_1 x_2 + \\
 & + P_{2n+1} x_2^2 + P_{2n+2} x_2 x_3 + \dots + P_{3n-1} x_2 x_n + \dots + P_{\frac{n!}{2(n-2)!} + 2n} x_n^2 + \\
 & + P_{\frac{n!}{2(n-2)!} + 2n+1} x_1^3 + P_{\frac{n!}{2(n-2)!} + 2n+2} x_1^2 x_2 + \dots
 \end{aligned}$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  –  $n$  управляющих переменных. При одномерном управлении ( $n = 1$ ) форма полинома приобретает более простой вид:

$$y = P_0 + P_1x_1 + P_2x_2 + \dots$$

При  $n = 2$  полином выглядит:

$$y = P_0 + P_1x_1 + P_2x_2 + P_3x_1^2 + P_4x_1x_2 + P_5x_2^2.$$

Аналоговые функциональные блоки в языке SPICE-моделирования моделируются с помощью источников напряжения (рисунок 3.42, а) или тока (рисунок 3.42, б). В отличие от зависимых источников здесь допустимо использовать параметры и любые функции от узловых потенциалов, токов (через независимые источники напряжения) и времени.

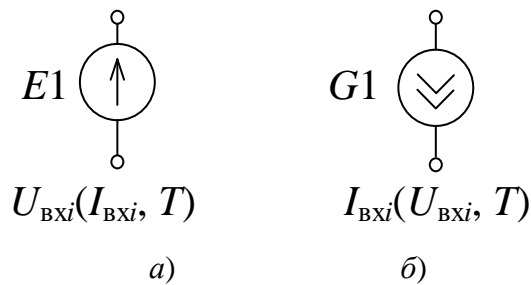


Рисунок 3.42 – Функциональные источники напряжения и тока

Нелинейные передаточные функции задаются по формату:

$$E_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{VALUE} = \{ \langle \text{выражение} \rangle \};$$

$$G_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{VALUE} = \{ \langle \text{выражение} \rangle \}.$$

После ключевого слова *VALUE* в фигурных скобках приводится алгебраическое выражение, зависящее от узловых потенциалов, разности узловых потенциалов, токов через независимые источники напряжения и параметров. Помимо числовых значений в предложениях {...} входного языка SPICE могут использоваться идентификаторы параметров. Например, температура окружающей среды задается стандартным параметром *TEMP*. Громоздкие выражения целесообразно оформлять в виде параметров с помощью директивы *PARAMETERS* (рисунок 3.43).

е) возврат к этапу *Ia* с целью обработки экспериментальной зависимости для  $i + 1$  входного параметра. Этапы *Ia* – *Id* повторяются по мере продвижения от 1 до  $m$ -ого входного параметра.

## II. Промежуточные каскады.

а) распространенный способ получить информацию о поведенческих свойствах промежуточных каскадов – снять экспериментальную зависимость  $i$ -ой производной характеристики:

$$\beta_{\text{вых}i} = f_2(\alpha_{\text{вх}i}).$$



Коэффициенты		PARAMETERS:
Входная ВАХ	Квадратичный	a1 = -339.047
	Линейный	a2 = 8.993
	Свободный	a3 = 1.213
Температурная зависимость входной ВАХ	Квадратичный	b1 = 2.313E-6
	Линейный	b2 = -1.931E-3
	Свободный	b3 = 0.047
Прямая передача при I <sub>ВЫХ</sub> = 15мА	Линейный	c1 = -16320
	Свободный	c2 = 238
Выходная нелинейность	Квадратичный	d1 = -200
	Линейный	d2 = 12.72
	Свободный	d3 = -0.143

$\{a1\} * I(V1) * I(V1) + \{a2\} * I(V1) + \{a3\} + \{b1\} * TEMP * TEMP + \{b2\} * TEMP + \{b3\}$   
 $((\{c1\} * I(V1) + \{c2\}) * I(V1) + \{d1\} * I(V2) * I(V2) + \{d2\} * abs(I(V2)) + \{d3\})$

Рисунок 3.43 – Фрагмент оформления полиномиальных функций в среде OrCAD Capture с помощью директивы *PARAMETERS*

Полнота информации о свойствах промежуточных каскадов может быть достигнута введением в экспериментальные зависимости дополнительного параметра  $Y_i$ , относящегося к выходному каскаду (рисунок 3.44). Таким параметром может быть выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}i}$ , выходной ток  $I_{\text{ВЫХ}i}$ , т.е.  $Y_i = \{U_{\text{ВЫХ}i}, I_{\text{ВЫХ}i}, \dots\}$ .

б) пусть по результатам экспериментальных измерений проходная характеристика есть функция двух аргументов – входной величины  $\alpha_{\text{ВХ}i}$  и выходной величины  $Y_i$ :

$$\beta_{\text{ВЫХ}i} = f_2(\alpha_{\text{ВХ}i}, Y_i).$$

Произведём декомпозицию функции  $f_2$  путём фиксации аргумента  $Y_i$  на определённом уровне. Получим частную функцию  $F_2$ , зависящую только от входной величины  $\alpha_{\text{ВХ}i}$  и аппроксимируемую полиномом степени  $r$ :

$$\beta'_{\text{ВЫХ}i} = f_2(\alpha_{\text{ВХ}i}, Y_i) \Big|_{Y_i = \text{const}} = F_2(\alpha_{\text{ВХ}i}) = c_1 \cdot X_i^r + c_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + c_r.$$

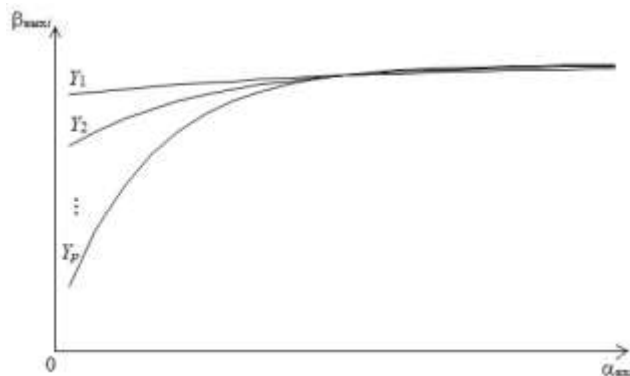


Рисунок 3.44 – Семейство проходных характеристик промежуточных каскадов

в) практическая реализация функциональной зависимости проходной характеристики при разработке SPICE-модели заключается в использовании аналоговых функциональных блоков  $E_{xx}$  и  $G_{xx}$  (п. 1д, рисунок 3.42).

г) возврат к этапу *IIa* с целью исследования  $i + 1$  проходной характеристики. Этапы *IIa* – *IIв* повторяются по количеству проходных характеристик в промежуточных каскадах.

### III. Выходной каскад.

а) пусть множество выходных параметров разрабатываемой SPICE-модели будет обозначено как  $\gamma_{\text{вых}i} = \{U_{\text{вых}i}, I_{\text{вых}i}, \dots\}$ . Экспериментальная зависимость выходного величины  $\gamma_i$  от местного, относящегося к выходному каскаду, аргумента  $Z_i$  позволяет получить графический вид выходной ВАХ SPICE-модели. Для отображения семейства характеристик выходной ВАХ следует задать несколько фиксированных значений входной величины  $\alpha_{\text{вх}i}$  (рисунок 3.45).

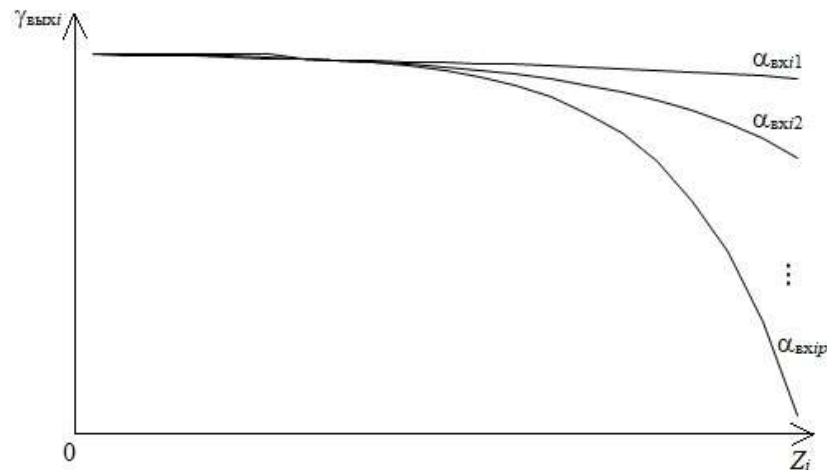


Рисунок 3.45 – Семейство выходных ВАХ при различных значениях местного аргумента  $Z_i$

б) на основе семейства выходных ВАХ можно построить более удобное для синтеза SPICE-модели графическое представление. Суть нового представления семейства ВАХ – в перестраивании исходного семейства относительно базовой рабочей точки. Пусть исходная рабочая точка для каждой характеристики на рисунке 3.45 имеет координату  $(Z_{0ij}, \gamma_{\text{вых}0ij})$ , где  $i$  – порядковый номер выходного параметра в структуре модели;  $j$  – порядковый номер характеристики семейства ВАХ. Разность выходной величины вычисляется как  $\Delta\gamma_{\text{вых}ij} = \left( \gamma_{\text{вых}ij} - \gamma_{\text{вых}0j} \right) \Big|_{\alpha_{\text{вх}i} = \text{const}}$ . В результате можно наблюдать разностный вид семейства ВАХ (рисунок 3.46).

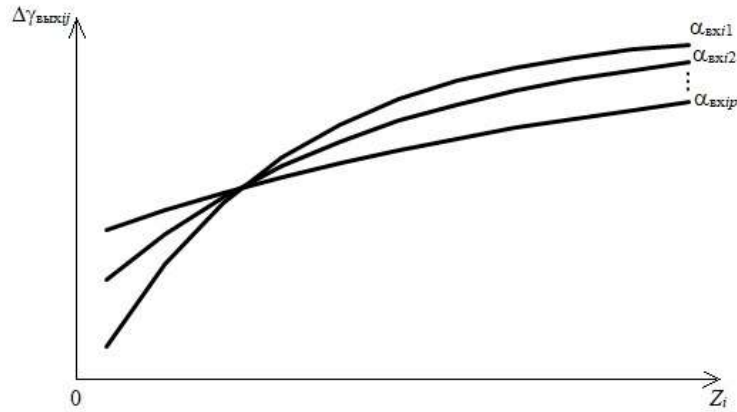


Рисунок 3.46 – Семейство выходных ВАХ, построенных относительно базовой рабочей точки

в) полученные кривые семейства характеристик могут быть аппроксимированы пространёнными вариантами (п. 1б): полиномом степени  $r$

$$\Delta\gamma_{\text{вых}ij} = a_1 \cdot X_i^r + a_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + a_r ;$$

или экспонентой вида:

$$\Delta\gamma_{\text{вых}ij} = a \cdot e^{-b \cdot x} + a \cdot b .$$

г) пусть функциональная зависимость выходного каскада  $\gamma_{\text{вых}i}$  есть функция двух аргументов: местного аргумента  $Z_i$  и величины входного каскада  $\alpha_{\text{вх}i}$ :

$$\gamma_{\text{вых}i} = f_4(\alpha_{\text{вх}i}, Z_i).$$

Произведём декомпозицию функции  $\gamma_{\text{вых}i}$  путём фиксации входной величины  $\alpha_{\text{вх}i}$  на определенном уровне. Получим частную функцию  $F_4$ , зависящую только от местного аргумента  $Z_i$ :

$$\gamma'_{\text{вых}i} = f_4(\alpha_{\text{вх}i}, Z_i) \Big|_{\alpha_{\text{вх}i} = \text{const}} = F_4(Z_i).$$

Аддитивная составляющая нелинейности выходной ВАХ  $\Delta\gamma_{\text{вых}i}$ , зависящая от особенностей выходного каскада, есть разность функции  $F_4$ , вычисленной при текущих значениях местного аргумента  $Z_i$  и относительно фиксированного значения ( $Z_i = \text{const}$ ):

$$\Delta\gamma_{\text{вых}i} = F_4(Z_i) - F_4(Z_i) \Big|_{Z_i = \text{const}} = d_1 \cdot X_i^r + d_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + d_r .$$

Суммарный сигнал выходной величины  $\gamma_{\text{вых}i}$  есть композиция функций  $F_2$  и  $\Delta\gamma_{\text{вых}i}$  или сумма двух полиномов:

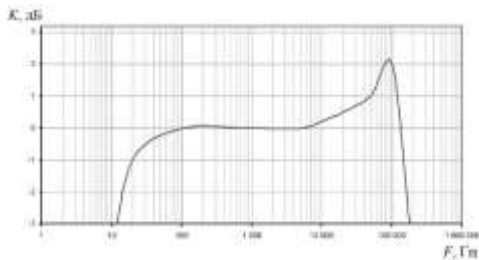
$$\gamma_{\text{вых}i} = F_2 + \Delta\gamma_{\text{вых}i} = c_1 \cdot X_i^r + c_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + c_r + d_1 \cdot X_i^r + d_2 \cdot X_i^{r-1} + \dots + d_r .$$

г) практическая реализация функциональной зависимости проходной характеристики при разработке SPICE-модели заключается в использовании аналоговых функциональных блоков  $E_{\text{ххх}}$  и  $G_{\text{ххх}}$  (п. 1д, рисунок 3.42).

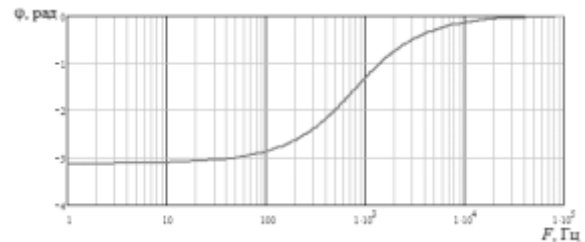
д) возврат к этапу *IIIa* с целью обработки экспериментальной зависимости для  $i + 1$  выходного параметра. Этапы *IIIa – IIIг* повторяются по мере продвижения от 1 до  $n$ -ого выходного параметра.

#### IV. Частотно-зависимый каскад.

а) первичной экспериментальной информацией служат экспериментальные частотные зависимости  $i$ -ой величины  $\delta_i = f(j\omega)$  частотно-зависимого каскада в виде АЧХ (рисунок 3.47, а) и ФЧХ (рисунок 3.47, б). Особенности измерения функциональной зависимости  $\delta_i = f(j\omega)$  относятся к области метрологии. Предпочтительно использовать современные измерительные комплексы.



а)



б)

Рисунок 3.47 – Экспериментальные зависимости частотных характеристик

б) по результатам экспериментальных исследований прототипа SPICE-модели следует отыскать аналитический вид  $i$ -ой частотной характеристики для частотно-зависимого каскада:

$$W = f(s),$$

где  $s = j\omega$  – комплексная частота.

Сущность излагаемого ниже метода определения аналитического выражения передаточной функции по амплитудной и фазовой частотным характеристикам, графически заданным в некотором интервале частот, заключается в следующем [108].

По одной из заданных частотных характеристик, например логарифмической амплитудной характеристике, вначале ориентировочно определяют положение полюсов и нулей передаточной функции, которое затем, в результате введения соответствующих поправок, постепенно уточняется.

Если передаточная функция характеризуется значительным количеством нулей и полюсов, то подбор поправок, или, другими словами, определение эффекта передвижения этих нулей и полюсов на комплексной плоскости, может оказаться очень сложным. В этом случае поправки можно вносить аналитическим методом. Часто достаточно ограничиться подбором поправок, не прибегая к более сложному аналитическому способу.

Предположим, что необходимо найти передаточную функцию, соответствующую графически заданным логарифмической амплитудной и фазовой частотным характеристикам. В первом приближении эта функция определяется по формуле:

$$W(s) = \frac{K(\tau s + 1)(\tau_d^2 s^2 + 2\xi_d \tau_d s + 1)}{s(Ts + 1)(T_k^2 s^2 + 2\xi_k T_k s + 1)}, \quad (3.40)$$

где  $K$  – коэффициент передачи;  $\tau$  – постоянная времени; индекс  $d$  – дифференциальное звено;  $\xi$  – коэффициент демпфирования;  $T$  – время переходного процесса; индекс  $k$  – колебательное звено.

Преобразуем выражение (3.40) следующим образом:

$$W(s) = \frac{K\tau\tau_d^2}{TT_k^2} \cdot \frac{(s - \gamma)(s - \gamma_d)(s - \gamma_d^*)}{s(s - \lambda)(s - \lambda_k)(s - \lambda_k^*)},$$

где

$$\gamma = -\frac{1}{\tau} = \omega_\tau;$$

$$\gamma_d = -\frac{\xi_d}{T_d} + j \frac{\sqrt{1 - \xi_d^2}}{T_d} = \alpha_d + j\beta_d;$$

$$\lambda = -\frac{1}{T} = \omega_T;$$

$$\lambda_k = -\frac{\xi_k}{T_k} + j \frac{\sqrt{1 - \xi_k^2}}{T_k} = \alpha_k + j\beta_k;$$

$\gamma_d^*$ ,  $\lambda_k^*$  – величины, комплексно сопряженные величинам  $\gamma_d$ ,  $\lambda_k$ .

Пользуясь принятыми обозначениями, можно написать:

$$W(s) = \frac{K \left( \frac{s}{\omega_\tau} + 1 \right) \left( \frac{s}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} - j \right) \left( \frac{s}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} + j \right)}{s \left( \frac{s}{\omega_T} + 1 \right) \left( \frac{s}{\beta_k} - \frac{\alpha_k}{\beta_k} - j \right) \left( \frac{s}{\beta_k} - \frac{\alpha_k}{\beta_k} + j \right)}. \quad (3.41)$$

Таким образом, задача состоит в том, чтобы путем изменения положения нулей  $\gamma$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_d^*$  и полюсов  $\lambda$ ,  $\lambda_k$ ,  $\lambda_k^*$  повысить точность приближения функции  $W(s)$  к графически заданным частотным характеристикам.

Найдем выражения для логарифмической амплитудной и фазовой частотных характеристик, соответствующих формуле (3.41):

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg K - 20 \lg \omega + 20 \lg \left| \frac{j\omega}{\omega_\tau} + 1 \right| - \\ - 20 \lg \left| \frac{j\omega}{\omega_T} + 1 \right| + 20 \lg \left| j \frac{\omega}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} - j \right| \left| j \frac{\omega}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} + j \right| - \\ - 20 \lg \left| j \frac{\omega}{\beta_k} - \frac{\alpha_k}{\beta_k} - j \right| \left| j \frac{\omega}{\beta_k} - \frac{\alpha_k}{\beta_k} + j \right|$$

и

$$\theta(\omega) = \arg [W(j\omega)] = -\frac{\pi}{2} + \arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{\omega_\tau} - \arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{\omega_T} + \\ + \arg \operatorname{tg} \frac{2\alpha_d \omega}{\alpha_d^2 + \beta_d^2 - \omega^2} - \arg \operatorname{tg} \frac{2\alpha_k \omega}{\alpha_k^2 + \beta_k^2 - \omega^2}.$$

Перепишем эти выражения в виде:

$$L(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg \omega + L_\tau(\omega) - L_T(\omega) + L_d(\omega) - L_k(\omega)$$

и

$$\theta(\omega) = -\frac{\pi}{2} + \theta_\tau(\omega) - \theta_T(\omega) + \theta_d(\omega) - \theta_k(\omega),$$

где

$$L_\tau(\omega) = 20 \lg \left| \frac{j\omega}{\omega_\tau} + 1 \right|;$$

$$L_d(\omega) = 20 \lg \left| j \frac{\omega}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} - j \right| \left| j \frac{\omega}{\beta_d} - \frac{\alpha_d}{\beta_d} + j \right|;$$

$$\theta_\tau(\omega) = \arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{\omega_\tau};$$

$$\theta_d(\omega) = \arg \operatorname{tg} \frac{2\alpha_d \omega}{\alpha_d^2 + \beta_d^2 - \omega^2}.$$

Аналогичные выражения можно записать и для  $L_T(\omega)$ ,  $L_k(\omega)$ ,  $\theta_T(\omega)$ ,  $\theta_k(\omega)$ . Полученные выражения удобны тем, что они дают возможность анализировать влияние каждого из полюсов и нулей системы в отдельности на ее частотные характеристики. Выражения состоят из членов двух типов: соответствующих комплексно-сопряженным полюсам и нулям, вещественным полюсам и нулям.

в) найденное аналитическое выражение частотной характеристики  $W = f(s)$  для целей SPICE-моделирования представляется с помощью линейных функциональных блоков *LAPLACE*. Линейные функциональные блоки моделируются в терминах соотношения между

выходными и входными переменными в частотной области. Передаточная функция управляемого источника напряжения (рисунок 3.48, а) или тока (рисунок 3.48, б) задается с помощью преобразования Лапласа:

$E_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{LAPLACE} \{ \langle \text{выражение} \rangle \} = \{ \langle \text{передаточная функция в } s\text{-области} \rangle \};$

$G_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{LAPLACE} \{ \langle \text{выражение} \rangle \} = \{ \langle \text{передаточная функция в } s\text{-области} \rangle \}.$

Табличное описание комплексной передаточной функции в частотной области задается с помощью функциональных блоков напряжения (рисунок 3.48, а) и тока (рисунок 3.48, б) по формату:

$E_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{FREQ} \{ \langle \text{выражение} \rangle \} [\text{KEYWORD}]$   
 $+ \langle \langle \text{частота} \rangle, \langle \text{модуль} \rangle, \langle \text{фаза} \rangle \rangle * [\text{DELAY}] = \langle \text{задержка} \rangle$

и

$G_{xxx} \langle +\text{узел} \rangle \langle -\text{узел} \rangle \text{FREQ} \{ \langle \text{выражение} \rangle \} [\text{KEYWORD}]$   
 $+ \langle \langle \text{частота} \rangle, \langle \text{модуль} \rangle, \langle \text{фаза} \rangle \rangle * [\text{DELAY}] = \langle \text{задержка} \rangle.$

Здесь частота задается в Герцах, модуль передаточной функции – в децибелах, фаза передаточной функции – в градусах. Значения опорных точек указываются в порядке возрастания частоты. Максимальное количество точек – 2048. С помощью ключевого слова *KEYWORD* изменяется способ задания таблицы передаточной функции. Оно может принимать следующие значения:

*MAG* – задание абсолютных значений передаточной функции;

*DB* – задание значений передаточной функции в децибелах (принимается по умолчанию);

*RAD* – задание фазы в радианах;

*DEG* – задание фазы в градусах (принимается по умолчанию);

*R\_I* – задание действительной и мнимой части передаточной функции вместо ее модуля и фазы.

Ключевое слово *DELAY* задает дополнительную задержку, которая принимается во внимание при расчете фазой характеристики фильтра.

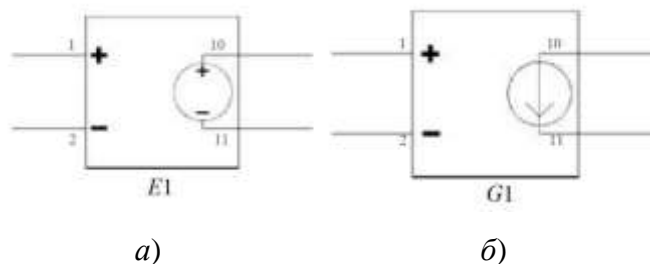


Рисунок 3.48 – Функциональные блоки для задания передаточной характеристики в частотной области

г) возврат к этапу *IVa* для поиска аналитической зависимости для  $i + 1$  параметра частотно-зависимого каскада. Этапы *IVa – IVв* повторяются по количеству частотных зависимостей прототипа SPICE-модели.

*V. Каскад обратной связи.*

а) в отличие от электрических схем, состоящих из дискретных ЭРИ, многотерминальные интегральные ЭРИ не позволяют в процессе экспериментальных измерений отдельно исследовать каскады обратной связи, размыкать/замыкать их по отношению к каскадам прямой передачи. Задача экспериментатора – на основе массива экспериментальных данных в частотной, временной области и по постоянному току установить аналитический вид передаточной характеристики каскада обратной связи.

Составление дифференциальных уравнений объектов регулирования, а также исполнительных и усилительных элементов представляет собой сложную задачу, решаемую лишь с существенными допущениями, т.е. весьма приближенно. В этих случаях оказывается целесообразным составлять математическое описание элемента на основании эксперимента.

Экспериментально определяют частотные характеристики элемента или его переходную характеристику (при неединичном входном воздействии характеристику называют кривой разгона). Чаще всего определяют переходную характеристику, что несколько проще. По переходной характеристике может быть составлена передаточная функция и определена амплитудно-фазовая характеристика. Естественно, что неизбежны погрешности как при снятии экспериментальной характеристики, так и при ее аппроксимации. Однако погрешности оказываются допустимыми для инженерных расчетов.

Процесс экспериментального исследования промышленного объекта состоит из трех этапов: планирования и подготовки эксперимента, проведения эксперимента и обработки результатов. Обработка экспериментальной переходной характеристики заключается в ее сглаживании и аппроксимации. Сглаживание оказывается необходимым для устранения разброса измерений, т.е. для приближения их к истинным значениям. Этот разброс создается различными причинами и прежде всего помехами, действующими на процесс.

Для сглаживания используют ряд методов:

- метод скользящего среднего;
- метод четвертых разностей;
- аппроксимация переходной характеристики;
- метод площадей;
- интерполяционный метод.



Рассмотрим суть последнего из перечисленных – интерполяционного метода [109]. По нормированной переходной характеристике устойчивого элемента определяют постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  аппроксимирующей передаточной функции:

$$W = \frac{ke^{-0s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}. \quad (3.42)$$

Сначала по рассматриваемой характеристике находят время  $t_7$ , при котором ордината  $h(t_7) = 0,7$ . Затем вычисляют время  $t_4 = \frac{1}{3}t_7$ , находят значение переходной характеристики  $h(t_4) = h_4$  и по номограмме (рисунок 3.49) определяют значения  $z^2$ ,  $h_8$  и  $h_{20}$ , соответствующие найденному значению  $h_4$ . Теперь можно определить искомые постоянные времени по формулам:

$$T_1 = \frac{t_7}{2,4}(1+z) \text{ и } T_2 = \frac{t_7}{2,4}(1-z).$$

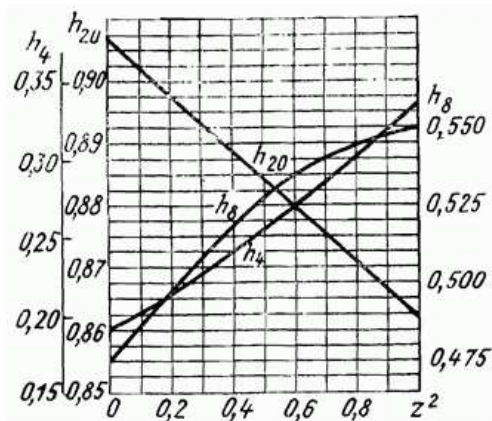


Рисунок 3.49– Номограмма интерполяционного метода аппроксимации переходных характеристик

Величины  $h_8$  и  $h_{20}$  используют для проверки точности аппроксимации путем их сравнения с ординатами переходной характеристики соответственно при  $t_8 = 2t_4$  и  $t_{20} = 5t_4$ . Допустимая погрешность 3...6%.

Может оказаться, что  $h_4$  меньше того минимального значения, которое имеется на номограмме рисунка 3.49. Это означает, что рассматриваемая переходная характеристика не может быть аппроксимирована передаточной функцией (3.42). Тогда следует обратиться, например, к методу площадей.

б) найденное аналитическое выражение каскада обратной связи  $W = f(s)$  для целей SPICE-моделирования представляется с помощью блоков:

- *GAIN* – усилительное звено с коэффициентом передачи  $k$  (рисунок 3.50);

- *LAPLACE* – линейный функциональный блок с передаточной функцией в  $s$ -области (см. п. IV6);

- *FTABLE* – линейный функциональный блок с табличным описанием комплексной передаточной функции (см. п. IV6).

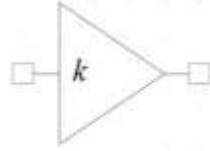


Рисунок 3.50 – Усилительное звено

Усилительное звено *GAIN* представляет собой источник напряжения, управляемый напряжением и характеризуется в языке SPICE-моделирования следующим шаблоном:

$$E_{xxx} \%OUT\ 0\ VALUE\ \{\ @GAIN*V(\%IN)\},$$

где *%OUT*, *%IN* – имена выходного и входного терминалов;  $GAIN = k$  – коэффициент передачи усилительного звена.

г) совмещение передаточной функции по постоянному току и в частотной области. Найденные передаточные функции в п.  $I \dots V$  для  $i$ -ого канала SPICE-модели объединяются в итоговое выражение вида:

$$W = K(T) \frac{W(s)}{1 \pm W(s) \cdot W_{oc}(s)},$$

где  $K(T)$  – передаточная функция каскадов прямой передачи по постоянному току с зависимостью от температуры;  $W(s)$  – передаточная функция прямой передачи в частотной области;  $W_{oc}(s)$  – передаточная функция каскада обратной связи в частотной области.

VI. Возврат к этапу I для анализа  $i + 1$  канала. Этапы  $I \dots V$  повторяются по количеству каналов прототипа SPICE-модели.

### 3.3 Основные результаты исследования

1. Разработана методика синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров практически пригодная для схемотехнического анализа в современных SPICE-симуляторах с целью последующего нахождения коэффициентов влияния  $a_i$  в уравнении температурной погрешности (2.18), (2.23), (2.24).

2. В результате предложена обобщенная методика синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с различной степенью интеграции, отличающаяся структуризацией разрабатываемой модели и подбором эмпирических формул функциональных зависимостей с помощью методов нелинейной аппроксимации, позволяет достичь значений относительной погрешности в диапазоне  $(0,1 \dots 7) \%$  для моделируемых термозависимых характеристик по сравнению с результатами физического эксперимента. Методика использована в современных компьютерных SPICE-симуляторах с целью нахождения коэффициента влияния в математическом описании температурной стабильности ЭС.

## ГЛАВА 4. МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Цель данной главы – разработка 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.

### 4.1 Исходные предпосылки

Аналитические методы расчета температурного поля позволяют реализовать лишь простейшие одномерные модели. По существу, удается получить аналитические выражения обозримого вида лишь для решений отдельных линейных уравнений [110]:

1. Уравнение для одномерного температурного поля стержня;
2. Уравнение для плоской стенки, сплошных или полых цилиндров и шаров с температурным полем, изменяющимся только по толщине;
3. Уравнение для одномерного потока теплоносителя.

При переходе к системам таких уравнений круг задач, для которых возможно эффективно использовать аналитические методы, еще более сужается.

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.

За основу рассматриваемой ниже математической модели распределения температурного поля приняты известные численные методы [111-115] 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.

Эта задача сводится к анализу обобщенной теплофизической модели твердотельной системы, созданной по объемной многослойной технологии [116]. Графическое представление указанной задачи представлено на рисунке 4.1. Структура параллелепипеда из  $r$  слоев имеет размер

$l_x$  и  $l_y$  по осям абсцисс и ординат, соответственно. По оси аппликат отмечены слои твердотельной системы размерностью  $h_1, h_2, \dots, h_i, h_r$ . Общая толщина твердотельной системы будет  $H = \sum h_i$ . В каждом слое  $h_i$  твердотельной системы может находиться источник тепловыделения с плотностью тепловыделения  $q_f(x, y)$ , причем координаты расположения источника по оси абсцисс и ординат могут быть произвольными, а по оси аппликат – фиксированы.

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

$$c\rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{f=1}^F q_f(x, y), \quad (4.1)$$

где  $c$  – коэффициент теплоемкости материала  $i$ -ого слоя твердотельной системы;  $\rho$  – плотность материала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала.

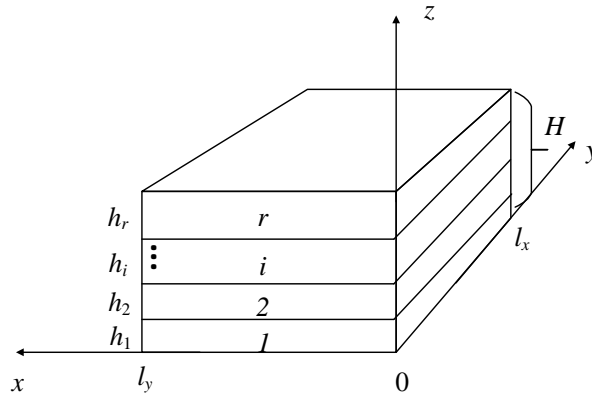


Рисунок 4.1 – Графическое представление теплофизической модели твердотельной системы

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

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z=0} = \alpha_H (T_{CP} - T_1); \quad (4.2)$$

$$\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial z_r} \Big|_{z=H} = \alpha_B (T_{CP} - T_r); \quad (4.3)$$

$$T_i \Big|_{z=h_i} = T_{i+1} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad (4.4)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z_i} \Big|_{z=h_i} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z_{i+1}} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad (4.5)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = \alpha_{Б1} (T_{CP} - T_i); \quad (4.6)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = \alpha_{\text{Б2}} (T_{\text{CP}} - T_i); \quad (4.7)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} = \alpha_{\text{Б3}} (T_{\text{CP}} - T_i); \quad (4.8)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} = \alpha_{\text{Б4}} (T_{\text{CP}} - T_i), \quad (4.9)$$

где  $T_{\text{CP}}$  – температура окружающей среды.

Начальное условие имеет вид:

$$T|_{\tau=0} = T_{\text{CP}}(x, y, z). \quad (4.10)$$

Искомой в задаче (4.1)...(4.10) является функция  $T(x, y, z, \tau)$ , заданная в непрерывной области:

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

Известны два основных численных метода решения уравнения (4.1) в частных производных [110, 117]:

- метод конечных разностей (МКР);
- метод конечных элементов (МКЭ).

## 4.2 Метод конечных разностей для решения задач распределения температурного поля

В связи с наличием в нестационарном уравнении теплопроводности (4.1) двух дифференциальных операторов – по временной и пространственной переменным – МКР делится, в свою очередь, на два вида конечно-разностных схем [110, 118, 119]: явные и неявные.

В таблице 4.1 приведены характерные особенности двух разновидностей метода конечных разностей, выявленные в результате решения ряда тестовых задач. Наиболее приемлема для расчетов тепловых режимов плоской конструкции локально-одномерная схема [118, 119], отличительной особенностью которой является сочетание сильных сторон явных схем (малые затраты машинного времени на один шаг по времени) и неявных схем (безусловная устойчивость).

Процедуру численного расчета уравнения теплопроводности (4.1) по локально-одномерной схеме разделим на следующие этапы:

1. Замена исходной области непрерывного изменения переменных пространственно-временной сеткой.
2. Построение разностной схемы.
3. Решение системы разностных уравнений.

4. Многократный повтор решения системы разностных уравнений вдоль координат  $x, y, z$ .

Таблица 4.1 – Разновидности метода конечных разностей

Разновидность	Достоинства	Недостатки
Явный способ	1. Удобство использования для анализа быстропротекающих процессов. 2. Удобство использования при реализации на ЭВМ с несколькими параллельными процессорами.	1. Устойчивость только при определенном ограничении на величину шага по времени. Увеличение числа пространственных узлов приводит к неприемлемым затратам машинного времени. 2. Возможно проявление погрешности округления при большом числе временных шагов.
Неявный способ	Безусловная устойчивость, явление неустойчивости не возникает при любых величинах $\Delta t$ .	Требует на каждом шаге по времени решения систем $N$ уравнений, что приводит к увеличению времени расчета

*Пространственно-временная сетка.* При расщеплении уравнения теплопроводности (4.1) точное решение в конце малого промежутка времени  $[\tau_{j-1}, \tau_j]$  трансформируем в приближенное решение  $\omega(x, y, \tau_j)$ . Решение  $\omega(x, y, \tau_j)$  на данном промежутке времени получаем из следующей системы:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\sum_{i=1}^s q_i(x, y)}{c\rho}; \quad \tau_{j-1} \leq \tau \leq \tau_j; \quad (4.11)$$

$$\vartheta(x, y, \tau_{j-1}) = T(x, y, \tau_{j-1}); \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}; \quad \tau_{j-1} \leq \tau \leq \tau_j; \quad (4.13)$$

$$\theta(x, y, \tau_{j-1}) = \vartheta(x, y, \tau_j); \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}; \quad \tau_{j-1} \leq \tau \leq \tau_j; \quad (4.15)$$

$$\omega(x, y, \tau_{j-1}) = \theta(x, y, \tau_j), \quad (4.16)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент температуропроводности материала  $i$ -ого слоя твердотельной системы.

Заметим, что при расщеплении уравнения теплопроводности (4.1) интенсивность тепловыделений ЭРИ  $q_i$  отнесена только к одному направлению  $x$ . Приближенное решение начинается с точного распределения  $T(x, y, \tau_{j-1})$ , которое представляет собой начальное условие (4.10) исходного уравнения теплопроводности. Сначала решается уравнение (4.11) с начальным условием

(4.12), а затем уравнение (4.13), в котором в качестве начального условия принимается полученное к концу временного интервала распределение  $\mathfrak{G}(x, y, \tau_j)$ . Граничные условия для уравнений (4.11), (4.13), (4.15) соответствуют граничным условиям (4.6)...(4.7), (4.8)...(4.9), (4.2)...(4.5) исходной задачи по направлениям  $x, y, z$ .

*Разностная схема.* Перед построением локально-одномерной схемы для  $i$ -ого слоя твердотельной системы примем, что пространственная  $\chi_x, \chi_y, \chi_z$  и временная  $\Delta\tau$  сетки – эквидистантные, после чего проведем дискретизацию задачи (4.11), (4.13), (4.15) по пространственным переменным с использованием неявных схем [110, 118, 119]. В результате получим систему конечно-разностных уравнений:

$$\frac{\mathfrak{G}_{n,m,k}^j - \mathfrak{G}_{n,m,k}^{j-1}}{\Delta\tau} = \frac{a}{\chi_x^2} (\mathfrak{G}_{n+1,m,k}^j - 2\mathfrak{G}_{n,m,k}^j + \mathfrak{G}_{n-1,m,k}^j) + \frac{q_f(x, y)}{cp}; \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} \mathfrak{G}_{n,m,k}^0 = T_{0n,m,k}, & j = 1; \\ \mathfrak{G}_{n,m,k}^{j-1} = \omega_{n,m,k}^{j-1}, & j > 1; \end{cases} \quad (4.18)$$

$$-\lambda \frac{\mathfrak{G}_{1,m,k}^j - \mathfrak{G}_{0,m,k}^j}{\chi_x} = \alpha_{Б1} (T_{CP} - \mathfrak{G}_{0,m,k}^j); \quad \lambda \frac{\mathfrak{G}_{N,m,k}^j - \mathfrak{G}_{N-1,m,k}^j}{\chi_x} = \alpha_{Б2} (T_{CP} - \mathfrak{G}_{N,m,k}^j); \quad (4.19)$$

$$\frac{\theta_{n,m,k}^j - \theta_{n,m,k}^{j-1}}{\Delta\tau} = \frac{a}{\chi_y^2} (\theta_{n,m+1,k}^j - 2\theta_{n,m,k}^j + \theta_{n,m-1,k}^j); \quad (4.20)$$

$$\theta_{n,m,k}^{j-1} = \mathfrak{G}_{n,m,k}^j; \quad (4.21)$$

$$-\lambda \frac{\theta_{n,1,k}^j - \theta_{n,0,k}^j}{\chi_y} = \alpha_{Б3} (T_{CP} - \theta_{n,0,k}^j); \quad \lambda \frac{\theta_{n,M,k}^j - \theta_{n,M-1,k}^j}{\chi_y} = \alpha_{Б4} (T_{CP} - \theta_{n,M,k}^j); \quad (4.22)$$

$$\frac{\omega_{n,m,k}^j - \omega_{n,m,k}^{j-1}}{\Delta\tau} = \frac{a}{\chi_z^2} (\omega_{n,m,k+1}^j - 2\omega_{n,m,k}^j + \omega_{n,m,k-1}^j); \quad (4.23)$$

$$\omega_{n,m,k}^{j-1} = \theta_{n,m,k}^j; \quad (4.24)$$

$$-\lambda_i \left( \frac{\omega_{n,m,K}^j - \omega_{n,m,K-1}^j}{\chi_z} \right)_i = -\lambda_{i+1} \left( \frac{\omega_{n,m,1}^j - \omega_{n,m,0}^j}{\chi_z} \right)_{i+1}; \quad (4.25)$$

$$-\lambda_l \frac{\omega_{n,m,1}^j - \omega_{n,m,0}^j}{\chi_z} \Big|_{z=0} = \alpha_H (T_{CP} - \omega_{n,m,0}^j); \quad \lambda_r \frac{\omega_{n,m,K}^j - \omega_{n,m,K-1}^j}{\chi_z} \Big|_{z=H} = \alpha_B (T_{CP} - \omega_{n,m,K}^j), \quad (4.26)$$

где  $n, m, k$  – индексы пространственной сетки дискретизации по координатам  $x, y, z$ ;  $j$  – индекс временной сетки дискретизации;  $N, M, K$  – крайние номера индексов пространственной сетки дискретизации по координатам  $x, y, z$ ;  $i$  – индекс номера слоя твердотельной системы;  $r$  – крайний индекс слоя твердотельной системы.

Искомое решение имеет вид:



$$\omega_{n,m,k}^j = T(x, y, z, \tau_j) + O(\Delta\tau^2), \tag{4.27}$$

где  $O(\Delta\tau^2)$  – погрешность численного расчета (погрешность конечно-разностной математической модели).

*Решение системы разностных уравнений.* Рассмотрим способ решения частной одномерной задачи в направлении координаты  $x$  в  $j$ -ый момент времени на примере уравнения (4.17).

Выполним преобразование (4.17) с целью выделения температур пространственно-временной сетки  $\vartheta_{n-1}^j, \vartheta_n^j, \vartheta_{n+1}^j, \vartheta_n^{j-1}$ :

$$\vartheta_{n-1}^j - \vartheta_n^j \left( 2 + \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \right) + \vartheta_{n+1}^j = -\frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \vartheta_n^{j-1} - \frac{q_i \chi_x^2}{\lambda}. \tag{4.28}$$

Запишем уравнение (4.28) в следующем каноническом виде:

- для внутренних узлов  $n = 1, 2, \dots, (N - 1)$  (рисунок 4.2):

$$A_n \vartheta_{n-1} - C_n \vartheta_n + B_n \vartheta_{n+1} = -F_n, \tag{4.29}$$

причем  $A_n \neq 0, B_n \neq 0$  для всех узлов  $n = 1, 2, \dots, (N - 1)$ ;

- для граничного узла  $n = 0$  (рисунок 4.2):

$$\vartheta_0 = \xi_1 \vartheta_1 + \mu_1; \tag{4.30}$$

- для граничного узла  $n = N$  (рисунок 4.2):

$$\vartheta_N = \xi_2 \vartheta_{N-1} + \mu_2. \tag{4.31}$$

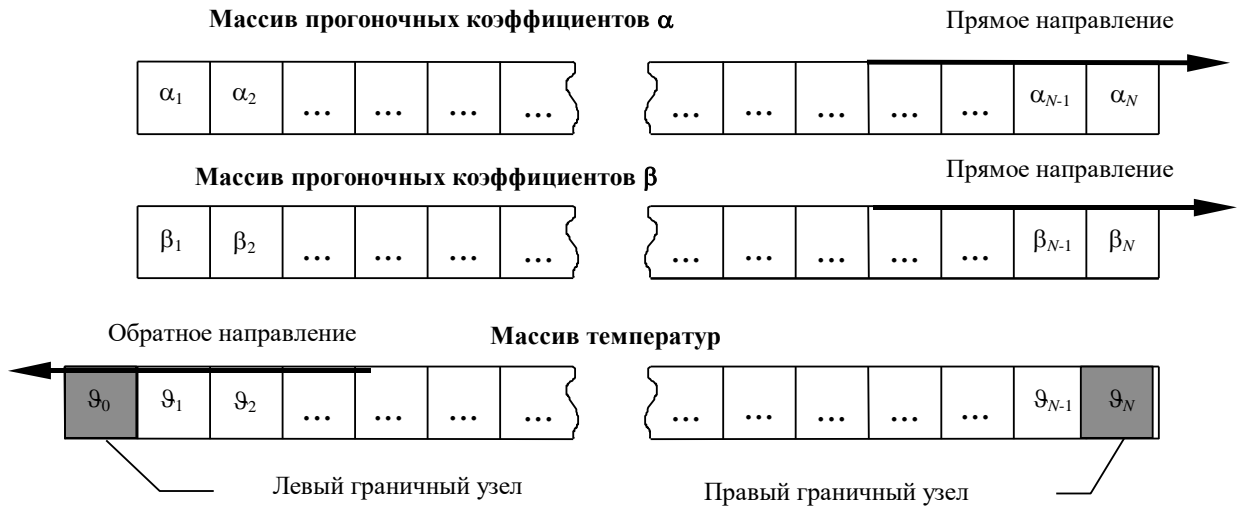


Рисунок 4.2 – Массивы данных, используемых в методе прогонки

Сравнивая (4.28) и (4.29) находим:

$$A_n = B_n = 1;$$

$$C_n = \left( 2 + \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \right);$$

$$F_n = \begin{cases} \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \vartheta_n^{j-1} + \frac{q_i \chi_x^2}{\lambda}, & \text{в области источников тепла;} \\ \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \vartheta_n^{j-1}, & \text{вне областей источников тепла.} \end{cases}$$

В [112, 117] показано, что решение задачи (4.29)...(4.31) можно получить методом правой прогонки с помощью рекуррентных формул для прогоночных коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  и для значений температур  $\vartheta$ :

$$\alpha_{n+1} = \frac{B_n}{C_n - \alpha_n A_n}; \quad n = 1, 2, \dots, (N-1); \quad (4.32)$$

$$\beta_{n+1} = \frac{A_n \beta_n + F_n}{C_n - \alpha_n A_n}; \quad n = 1, 2, \dots, (N-1); \quad (4.33)$$

$$\vartheta_n = \alpha_{n+1} \vartheta_{n+1} + \beta_{n+1}; \quad n = (N-1), (N-2), \dots, 1, 0. \quad (4.34)$$

В [117] также показано, что граничные значения прогоночных коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  и температуры  $\vartheta_N$ , соответственно, равны:

$$\alpha_1 = \xi_1; \quad (4.35)$$

$$\beta_1 = \mu_1; \quad (4.36)$$

$$\vartheta_N = \frac{\mu_2 + \xi_2 \beta_N}{1 - \alpha_N \xi_2}. \quad (4.37)$$

Найдем выражения для коэффициентов  $\xi_1, \mu_1, \xi_2, \mu_2$ . После преобразования разностного аналога граничных условий 3 рода (4.19), например для точки  $n = N$ , получим:

$$\vartheta_N \left( 1 + \frac{\alpha \chi_x}{\lambda} \right) = \frac{\alpha_{\text{Б2}} \chi_x T_{\text{CP}}}{\lambda} + \vartheta_{N-1}.$$

Введя обозначение  $\frac{\alpha_{\text{Б2}} \chi_x}{\lambda} = P$  (критерий Био) и выполнив преобразование, имеем:

$$\vartheta_N = \frac{\vartheta_{N-1}}{1+P} + \frac{PT_{\text{CP}}}{1+P}. \quad (4.38)$$

Сравним (4.38) и (4.31):

$$\vartheta_N = \frac{1}{1+P} \vartheta_{N-1} + \frac{PT_{\text{CP}}}{1+P};$$

$$\vartheta_N = \xi_2 \vartheta_{N-1} + \mu_2.$$

Отсюда:

$$\xi_2 = \frac{1}{1+P}; \quad \mu_2 = \frac{PT_{\text{CP}}}{1+P}. \quad (4.39)$$

Аналогично находятся выражения для  $\xi_1$  и  $\mu_1$ .

Составим алгоритм решения одномерной задачи (4.17) методом правой прогонки, используя (4.32)...(4.34), (4.37), (4.39) (рисунок 4.2):

1. Установка начальных условий для  $j$ -ого момента времени:

$$\begin{cases} \vartheta_n^0 = T_{0n}, & j = 1; \\ \vartheta_n^{j-1} = \omega_n^{j-1}, & j > 1. \end{cases}$$

Прямое направление.

2. Левый граничный узел:

$$\alpha_1 = \xi_1 = \frac{1}{1+P}; \quad \beta_1 = \mu_1 = \frac{PT_{CP}}{1+P}; \quad P = \frac{\alpha_{B1}\chi_x}{\lambda}.$$

3. Внутренние узлы:

$$\alpha_{n+1} = \frac{B_n}{C_n - \alpha_n A_n}; \quad n = 1, 2, \dots, (N-1);$$

$$\beta_{n+1} = \frac{A_n \beta_n + F_n}{C_n - \alpha_n A_n}; \quad n = 1, 2, \dots, (N-1);$$

$$A_n = B_n = 1; \quad C_n = \left( 2 + \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \right);$$

$$F_n = \begin{cases} \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \vartheta_n^{j-1} + \frac{q_i \chi_x^2}{\lambda}, & \text{в области источников тепла;} \\ \frac{\chi_x^2}{a \cdot \Delta\tau} \vartheta_n^{j-1}, & \text{вне областей источников тепла.} \end{cases}$$

4. Правый граничный узел:

$$\alpha_N = \xi_2 = \frac{1}{1+P}; \quad \beta_N = \mu_2 = \frac{PT_{CP}}{1+P}; \quad P = \frac{\alpha_{B2}\chi_x}{\lambda}.$$

Обратное направление.

5. Правый граничный узел:

$$\vartheta_N = \frac{\mu_2 + \xi_2 \beta_N}{1 - \alpha_N \xi_2}.$$

6. Внутренние узлы и левый граничный узел:

$$\vartheta_n = \alpha_{n+1} \vartheta_{n+1} + \beta_{n+1}; \quad n = (N-1), (N-2), \dots, 1, 0.$$

Данный алгоритм аналогичен для решения одномерной задачи в направлении координаты  $y$  (4.20), за исключением того, что начальное условие для  $j$ -ого момента времени равно:

$$\theta_m^{j-1} = \vartheta_m^j,$$

а коэффициент  $F_n$  равен:

$$F_n = \frac{\chi_y^2}{a \cdot \Delta\tau} \theta_m^{j-1}.$$

Решение одномерной задачи в направлении  $z$  (4.23) отличается начальным условием:

$$\omega_k^{j-1} = \theta_k^j$$

и граничными условиями:

$$F_n = \frac{\chi_z^2}{a \cdot \Delta\tau} \omega_k^{j-1}.$$

*Множественный повтор решения системы разностных уравнений вдоль координат  $x, y, z$ .*

Уравнение по координате  $x$  (4.17) для  $\vartheta_{n,m,k}^j$  фактически распадается на несвязанные между собой подсистемы, в каждую из которых входят неизвестные, принадлежащие какой-либо из прямых, параллельных оси  $x$ . Эти подсистемы также решаются путем метода правой прогонки в направлении оси  $x$ , причем на каждом шаге по времени такие прогонки выполняются  $M$  раз. Аналогично уравнения (4.20) и (4.23) распадается на «поперечные» и «вертикальные» подсистемы, которые решаются прогонками в направлении координат  $y$  и  $z$ , выполняемые  $N$  и  $K$  раз, соответственно. Таким образом, для определения значений температуры  $\omega_{n,m,k}^j$  на новом временном слое  $j$  сначала на основе распределения  $\vartheta_{n,m,k}^{j-1}$  и  $\theta_{n,m,k}^{j-1}$  прогонками в направлении  $x$  и  $y$  находятся промежуточные распределения  $\vartheta_{n,m,k}^j$  и  $\theta_{n,m,k}^j$ , не имеющие самостоятельного значения, а затем на основе этих распределения с помощью прогонок в направлении координаты  $z$  вычисляется окончательное распределение  $\omega_{n,m,k}^j$  на новом временном слое  $j$ .

Процедуре составления системы конечно-разностных уравнений (4.17)...(4.26) можно дать физическую интерпретацию. Сначала непрерывная пространственная область расчета температурного поля заменяется набором теплоизолированных между собой горизонтальных стержней (рисунок 4.3, *a*), для каждого из которых записывается соответствующая неявная разностная схема, учитывающая (4.19) на границах  $x = 0$  и  $x = l_x$  как граничные условия для торцов стержней. Заметим, что для крайних горизонтальных стержней их боковой теплообмен со средой не учитывается. Следовательно, система уравнений для первого и последнего горизонтальных рядов ( $m = 1$  и  $m = M$ ) идентична системе уравнений для внутренних рядов, не содержащих источники тепла. Затем по аналогии составляются разностные уравнения для «поперечных» (рисунок 4.3, *b*) и «вертикальных» стержней.

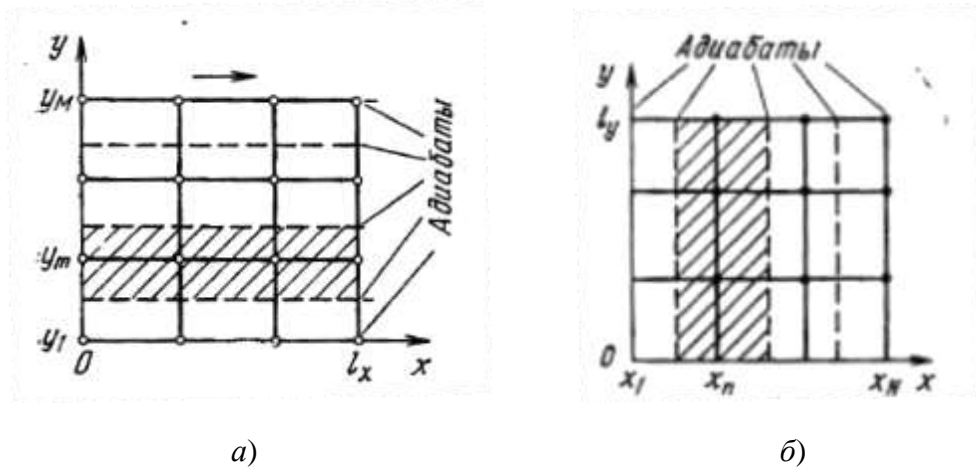


Рисунок 4.3 – Физическая интерпретация процедуры реализации локально-одномерной схемы по координатам  $x$  и  $y$

На рисунке 4.4 представлен алгоритм расчета температурного поля плоской конструкции по локально-одномерной схеме. Решение системы разностных уравнений (4.17)...(4.27) сводится к расчету на каждом шаге по времени набора одномерных задач методом правой прогонки.

Предложенная математическая модель температурного поля плоской конструкции (4.1)...(4.10) содержит следующие допущения:

1. Источники тепла (ЭРИ) расположены внутри  $i, r$ -ого слоя твердотельной системы и распределены по всей толщине.
2. Геометрическая форма всех ЭРИ – прямоугольная.
3. Коэффициент теплоотдачи выражает суммарный вклад конвективной и радиационной составляющей теплообмена плоской конструкции с внешней средой.
4. Градиент температуры по толщине плоской конструкции пренебрежимо мал.
5. Интенсивность тепловыделения источников тепла (ЭРИ) равномерно распределена по площади, занимаемой ЭРИ.
6. Теплофизические параметры источников тепла равны соответствующим теплофизическим параметрам плоской конструкции (источники тепла по своей структуре однородны с материалом подложки).

Практическая реализация алгоритма расчета температурного поля по локально-одномерной схеме предъявляет повышенные требования к аппаратным ресурсам вычислительной техники. Нетрудно заметить из рисунка 4.4, что полный расчет температурного поля твердотельной системы в нестационарном режиме потребует число проходов циклов равное:

$$M \times N \times K \times J,$$

где  $M, N, K$  – количество узлов пространственной дискретизации по координатам  $x, y, z$ , соответственно;  $J$  – число временных слоев.

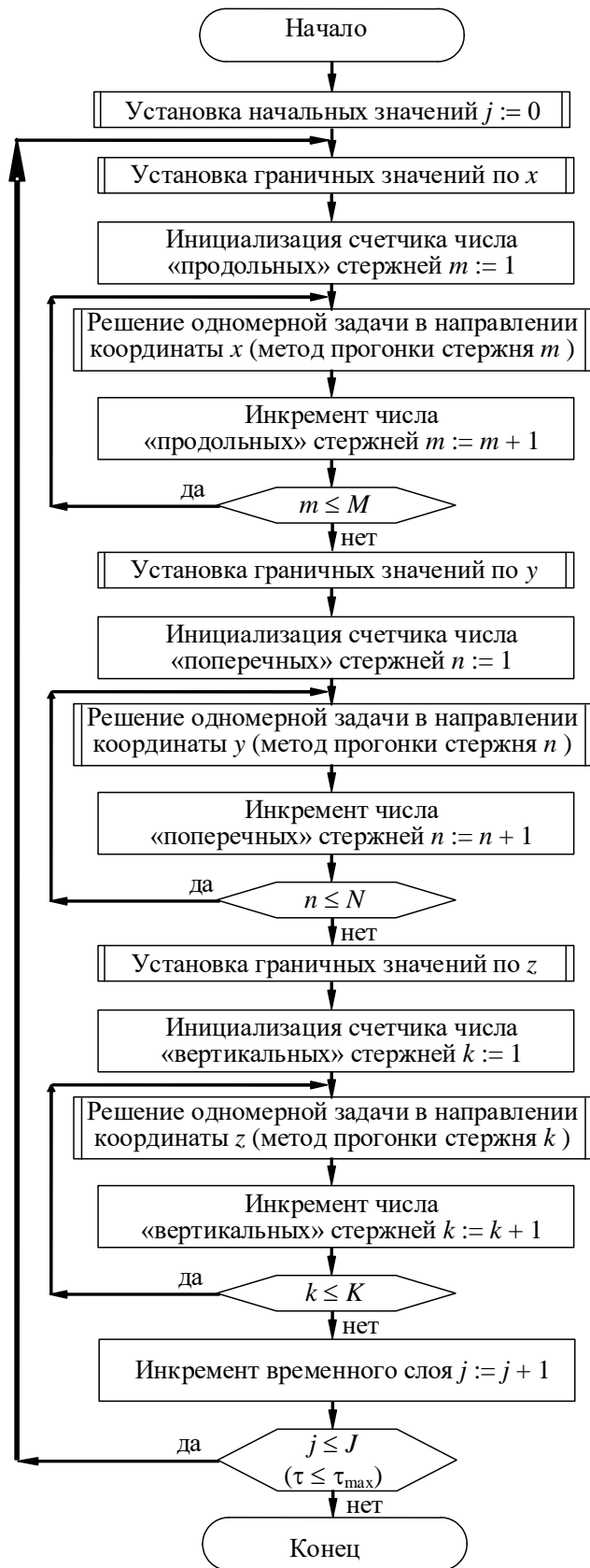


Рисунок 4.4 – Обобщенный алгоритм расчета температурного поля по локально-одномерной схеме

Помимо быстродействия в проходе  $M \times N \times K \times J$  циклов, потребуется также аппаратная память для хранения данных массива ячеек:

$$3M \times 3N \times 3K \times J = 9M \times N \times K \times J,$$

где коэффициент 3 учитывает два вспомогательных массива ячеек  $\alpha$  и  $\beta$  для прямого хода и один массив ячеек температур  $T$  для обратного хода.

Если предположить, что пространственно-временная дискретизация задачи (4.1)...(4.10) привела к параметрам  $N = M = 100$ ;  $K = 10$ ;  $J = 10$ , то общее количество проходов циклов составит  $10^6$  раз, а потребное количество ячеек для хранения данных будет  $9 \cdot 10^6$ .

Известно [114, 115, 119], что теплофизические параметры материалов плат/подложек ЭС в различной степени зависят от температуры. Расположим теплофизические параметры в порядке убывания значимости их зависимостей от температуры [114]:

- коэффициент теплоотдачи  $\alpha(T)$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda(T)$ ;
- коэффициент теплоемкости  $c(T)$ ;
- плотность  $\rho(T)$ .

Безусловная значимость коэффициента теплоотдачи является следствием того, что функция  $\alpha(T)$  – сложная и зависит помимо температуры среды и температуры тела еще от 9 аргументов [111]. Величины теплофизических параметров  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  можно принять постоянными для диапазона температур окружающей среды, характерного для функционирования ЭС.

Модифицируем уравнения (4.19), (4.22), (4.26) неявной разностной схемы. Поскольку  $\alpha$  зависит от температуры, а  $T = T(x, y, \tau)$ , то этот параметр также изменяется в пространстве и во времени.

Модификация (4.19), (4.22), (4.26) имеет вид, соответственно:

$$-\lambda \frac{\vartheta_{1,m,k}^j - \vartheta_{0,m,k}^j}{\chi_x} = \alpha_{Б1}^S (T_{CP} - \vartheta_{0,m,k}^j); \quad \lambda \frac{\vartheta_{N,m,k}^j - \vartheta_{N-1,m,k}^j}{\chi_x} = \alpha_{Б2}^S (T_{CP} - \vartheta_{N,m,k}^j); \quad (4.40)$$

$$-\lambda \frac{\theta_{n,1,k}^j - \theta_{n,0,k}^j}{\chi_y} = \alpha_{Б3}^S (T_{CP} - \theta_{n,0,k}^j); \quad \lambda \frac{\theta_{n,M,k}^j - \theta_{n,M-1,k}^j}{\chi_y} = \alpha_{Б4}^S (T_{CP} - \theta_{n,M,k}^j); \quad (4.41)$$

$$-\lambda \frac{\omega_{n,m,1}^j - \omega_{n,m,0}^j}{\chi_z} = \alpha_{Б5}^S (T_{CP} - \omega_{n,m,0}^j); \quad \lambda \frac{\omega_{n,m,K}^j - \omega_{n,m,K-1}^j}{\chi_z} = \alpha_{Б6}^S (T_{CP} - \omega_{n,m,K}^j); \quad (4.42)$$

$$\alpha_{Б1}^S = \alpha_{Б1}^S(\vartheta_{0,m,k}^S); \quad \alpha_{Б2}^S = \alpha_{Б2}^S(\vartheta_{N,m,k}^S);$$

$$\alpha_{Б3}^S = \alpha_{Б3}^S(\theta_{n,0,k}^S); \quad \alpha_{Б4}^S = \alpha_{Б4}^S(\theta_{n,M,k}^S);$$

$$\alpha_{Б5}^S = \alpha_{Б5}^S(\omega_{n,m,0}^S); \quad \alpha_{Б6}^S = \alpha_{Б6}^S(\omega_{n,m,K}^S),$$

где  $S$  – номер временного слоя.

Эти сеточные функции определяются как значения соответствующей непрерывной функции при:

$$T = \begin{cases} \vartheta_{n,m,k}^S, & \text{направление } x; \\ \theta_{n,m,k}^S, & \text{направление } y; \\ \omega_{n,m,k}^S, & \text{направление } z. \end{cases}$$

Существует несколько вариантов разностной схемы, отличающихся выбором временного слоя  $S$  [117, 119], по температурам которого рассчитываются коэффициенты теплоотдачи в уравнениях (4.40)...(4.42). Используем наиболее простую разностную схему – квазилинейную, где коэффициент теплоотдачи вычисляется по температурам предыдущего временного слоя, то есть  $S = j - 1$ . Модификация предложенной выше математической модели заключается в том, что на каждом временном шаге необходимо вычислять новые значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Очевидно, что для уменьшения погрешности квазилинейной схемы следует уменьшать величину шага  $\Delta t$ .

Составим алгоритм нахождения интегрального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для некоторого граничного узла на  $j$ -ом временном слое по формулам, предложенным в [111]. Предполагаем, что теплообмен подчиняется закону  $\frac{1}{4}$ , плата (подложка) ориентирована горизонтально, нагретой стороной вверх.

Конвективная составляющая  $\alpha_k$ .

1. Вычисление средней арифметической температуры граничного узла и среды:

$$T_m = 0,5(T^{j-1} + T_{CP}).$$

2. Нахождение табулированной функции  $A = f(T_m)$  по [111]. Следует отметить, что аналитическое вычисление функции  $A$  ведет к значительным затратам машинного времени.

3. Вычисление конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_k = 1,30 \cdot A \left( \frac{T^{j-1} - T_{CP}}{l_y} \right)^{1/4},$$

где  $l_y$  – ширина платы.

Радиационная составляющая  $\alpha_{л}$

4. Нахождение табулированной функции  $f(T^{j-1}, T_{CP})$  по [111]. Аналитическое вычисление функции  $f$  также приводит к значительным затратам машинного времени.

5. Вычисление радиационной составляющей коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{л} = \varepsilon_{п} \cdot \varphi \cdot f(T^{j-1}, T_{CP}),$$

где  $\varepsilon_{п} = \text{const}$ ,  $\varphi = \text{const}$  – приведенная степень черноты и коэффициент облученности, соответственно.

6. Вычисление интегрального значения коэффициента теплоотдачи:



$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l.$$

### 4.3 Метод конечных элементов для решения задач распределения температурного поля

Рассмотрим фрагмент многослойной твердотельной системы со срезом по оси аппликат (рисунок 4.5, а). Фрагмент представляет собой непрерывную область  $\Omega$  с границами  $\Gamma$ . Проведем разбиение пространства  $\eta$ -ого слоя твердотельной системы на конечные элементы – тетраэдры (рисунок 4.5, б). Каждый элементарный тетраэдр имеет порядковый номер  $\mu$  и узлы (вершины):  $i, j, k, l$ . Объем конечного элемента обозначим как  $V^e$ . Тогда непрерывная область  $\Omega$  с границами  $\Gamma$  разбивается на множество единичных областей  $\Omega^e$ . Точки соприкосновения вершин конечных элементов образуют нумерованные узлы сетки ( $^{\circ}$ ).

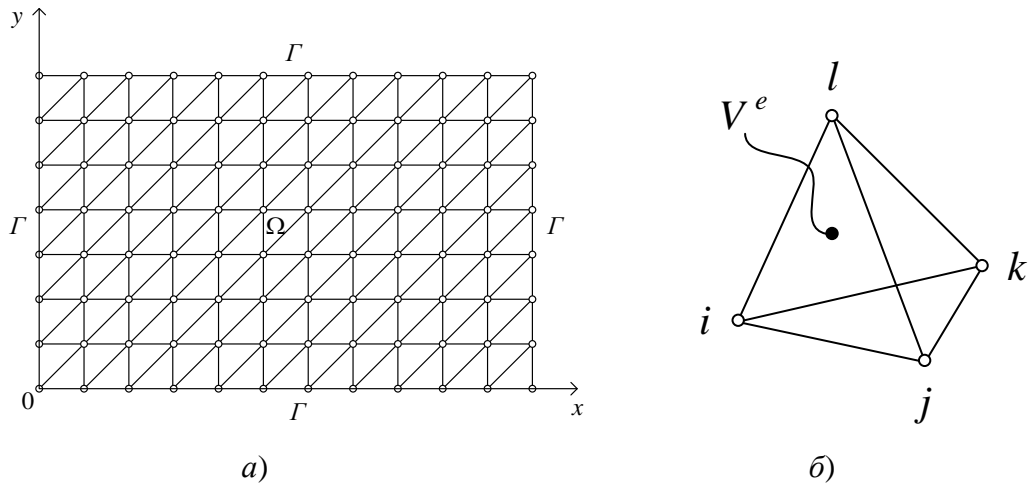


Рисунок 4.5 – Дискретизация пространства конечными элементами

Полагаем, что текущая температура  $T$  в каждом конечном элементе  $\mu$  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. При линейной аппроксимации имеем:

$$T^{\mu} = \alpha_1 + \alpha_2x + \alpha_3y + \alpha_4z. \quad (4.43)$$

Подставим в (4.43) координаты узлов  $i, j, k, l$ :

$$\begin{cases} T_i^\mu = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i, \\ T_j^\mu = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j, \\ T_k^\mu = \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k + \alpha_4 z_k, \\ T_l^\mu = \alpha_1 + \alpha_2 x_l + \alpha_3 y_l + \alpha_4 z_l. \end{cases} \quad (4.44)$$

При таком представлении любой неизвестный коэффициент  $\alpha_i$  в разложении (4.44) равен приближенному значению температуры  $T^\mu$  в  $\mu$ -ой узловой точке. Из (4.44) по методу Крамера определим неизвестные величины системы линейных алгебраических уравнений:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \alpha_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \alpha_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad \alpha_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta} \quad (4.45)$$

или

$$\alpha_1 = \frac{6\Delta_1}{V^e}; \quad \alpha_2 = \frac{6\Delta_2}{V^e}; \quad \alpha_3 = \frac{6\Delta_3}{V^e}; \quad \alpha_4 = \frac{6\Delta_4}{V^e}, \quad (4.46)$$

где определитель основной матрицы системы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} = \frac{1}{6} V^e,$$

остальные матрицы системы:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} T_i^\mu & x_i & y_i & z_i \\ T_j^\mu & x_j & y_j & z_j \\ T_k^\mu & x_k & y_k & z_k \\ T_l^\mu & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & T_i^\mu & y_i & z_i \\ 1 & T_j^\mu & y_j & z_j \\ 1 & T_k^\mu & y_k & z_k \\ 1 & T_l^\mu & y_l & z_l \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_i & T_i^\mu & z_i \\ 1 & x_j & T_j^\mu & z_j \\ 1 & x_k & T_k^\mu & z_k \\ 1 & x_l & T_l^\mu & z_l \end{vmatrix}; \quad \Delta_4 = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & T_i^\mu \\ 1 & x_j & y_j & T_j^\mu \\ 1 & x_k & y_k & T_k^\mu \\ 1 & x_l & y_l & T_l^\mu \end{vmatrix}.$$

Подставим найденные величины (4.46) в (4.44) и сгруппируем слагаемые с  $T_i^\mu$ ,  $T_j^\mu$ ,  $T_k^\mu$ ,

$T_l^\mu$ :

$$T^\mu = N_i T_i^\mu + N_j T_j^\mu + N_k T_k^\mu + N_l T_l^\mu, \quad (4.47)$$

где

$$N_i = \frac{6}{V^e} \left[ x_j y_k z_l - x_j y_l z_k - x_k y_j z_l + x_k y_l z_j + x_l y_j z_k - x_l y_k z_j + \right. \\ \left. + y_k z_j - y_j z_k + y_j z_l - y_l z_j - y_k z_l + y_l z_k + \right. \\ \left. + x_j z_k - x_k z_j - x_j z_l + x_l z_j + x_k z_l - x_l z_k + \right. \\ \left. + x_k y_j - x_j y_k + x_j y_l - x_l y_j - x_k y_l + x_l y_k \right],$$

$$N_j = \frac{6}{V^e} \left[ x_i y_l z_k - x_i y_k z_l + x_k y_i z_l - x_k y_l z_i - x_l y_i z_k + x_l y_k z_i + \right. \\ \left. + y_i z_k - y_k z_i - y_i z_l + y_l z_i + y_k z_l - y_l z_k + \right. \\ \left. + x_k z_i - x_i z_k + x_i z_l - x_l z_i - x_k z_l + x_l z_k + \right. \\ \left. + x_i y_k - x_k y_i - x_i y_l + x_l y_i + x_k y_l - x_l y_k \right],$$

$$N_k = \frac{6}{V^e} \left[ x_i y_j z_l - x_i y_l z_j - x_j y_i z_l + x_j y_l z_i + x_l y_i z_j - x_l y_j z_i + \right. \\ \left. + y_j z_i - y_i z_j + y_i z_l - y_l z_i + y_j z_l + y_l z_j + \right. \\ \left. + x_i z_j - x_j z_i - x_i z_l + x_l z_i + x_j z_l - x_l z_j + \right. \\ \left. + x_j y_i - x_i y_j + x_i y_l - x_l y_i - x_j y_l + x_l y_j \right],$$

$$N_l = \frac{6}{V^e} \left[ x_i y_j z_k + x_i y_k z_j + x_j y_i z_k - x_j y_k z_i - x_k y_i z_j + x_k y_j z_i + \right. \\ \left. + y_i z_j - y_j z_i - y_i z_k + y_k z_i + y_j z_k - y_k z_j + \right. \\ \left. + x_j z_i - x_i z_j + x_i z_k - x_k z_i - x_j z_k + x_k z_j + \right. \\ \left. + x_i y_j - x_j y_i - x_i y_k + x_k y_i + x_j y_k - x_k y_j \right].$$

Коэффициенты  $N_i$ ,  $N_j$ ,  $N_k$ ,  $N_l$  представляют собой функции формы. Каждая из функций формы конечного элемента равна единице в одной узловой точке, принадлежащей данному элементу, и нулю в остальных узлах этого элемента. Далее воспользуемся векторно-матричной формой записи. Обозначим вектор температур в узлах конечного элемента как:

$$[T^\mu] = [T_i^\mu \quad T_j^\mu \quad T_k^\mu \quad T_l^\mu]^\top;$$

вектор неизвестных величин системы линейных алгебраических уравнений как:

$$[\alpha] = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4]^\top;$$

матрицу коэффициентов как:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix};$$

вектор базисных функций как:

$$[N] = [N_i \quad N_j \quad N_k \quad N_l]^\top;$$

и вектор степеней свободы как:

$$[R] = [1 \quad x \quad y \quad z].$$

Тогда вместо (4.44) будет матричное уравнение:

$$[T^\mu] = [C][\alpha],$$

из которого вектор неизвестных величин выражается следующим образом:

$$[\alpha] = [C]^{-1}[T^\mu].$$

Запишем уравнение (4.47) в матричном виде:

$$T^\mu = [N][T^\mu] = \frac{6}{V^e}[R][C]^{-1}[T^\mu]. \quad (4.48)$$

Разделив левую и правую части (4.48) на  $[T^\mu]$ , получим:

$$[N] = \frac{6}{V^e}[R][C]^{-1}.$$

Применим вариационный подход к решению уравнения (4.1). Известно [120], что задача решения уравнения (4.1) эквивалентна задаче определения функции  $T(x, y, z, \tau)$ , минимизирующей функционал  $I[T(x, y, z, \tau)]$ . Чтобы функционал  $I$  принимал минимальное значение, его подинтегральная функция должна в соответствии с методом Ритца [120] удовлетворять уравнению:

$$I[T(x, y, z, \tau)] = 0$$

или

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} \left( c\rho \frac{\partial T_\eta}{\partial \tau} - \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial z^2} \right) - \sum_{f=1}^F q_f(x, y) \right) dx dy dz + \\ + \int_{\Gamma} \left( \mp \lambda \frac{\partial T_\eta}{\partial n} - \alpha (T_{cp} - T_\eta) \right) d\Gamma = 0, \end{aligned} \quad (4.49)$$

где  $n$  – внешняя нормаль к поверхностям твердотельной многослойной системы.

Таким образом, нахождение  $T(x, y, z, \tau)$ , исходя из минимизации функционала  $I[T(x, y, z, \tau)]$ , эквивалентно решению уравнения (4.1) для области  $G$  при заданных граничных условиях для  $I[T(x, y, z, \tau)]$ .

Если решение  $T(x, y, z, \tau)$  подставить в исходное уравнение (4.1), то получится некоторая невязка:

- по области  $\Omega$  будет:

$$R_\Omega = c\rho \frac{\partial T_\eta}{\partial \tau} - \lambda_\eta \left( \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial z^2} \right) - \sum_{f=1}^F q_f(x, y);$$

- по области  $\Gamma$  будет:

$$R_\Gamma = \lambda \frac{\partial T_\eta}{\partial n} \Big|_{\Gamma}.$$

Применим метод подбора весовых функций для невязок, изложенный в [121]. Пусть  $W_\Omega(x, y, z)$  – весовая функция для невязки  $R_\Omega$ , а  $W_\Gamma(x, y, z)$  – весовая функция для невязки  $R_\Gamma$ . Согласно этому методу потребуем:

$$\left(\vec{R}_\Omega \cdot \vec{W}_\Omega\right) = 0 \text{ и } \left(\vec{R}_\Gamma \cdot \vec{W}_\Gamma\right) = 0,$$

т.е. скалярные произведения весовых функций и невязок равны нулю, значит они ортогональны.

Вернемся к исходной вариационной задаче (4.49) и получаем:

$$\left(\vec{R}_\Omega \cdot \vec{W}_\Omega\right) + \left(\vec{R}_\Gamma \cdot \vec{W}_\Gamma\right) = 0$$

или

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} \left( c\rho \frac{\partial T_\eta}{\partial \tau} - \lambda_\eta \left( \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_\eta(x, y, z)}{\partial z^2} \right) - \sum_{f=1}^F q_f(x, y) \right) \cdot W(x, y, z) dx dy dz + \\ + \int_{\Gamma} \left( \lambda \frac{\partial T_\eta}{\partial n} \Big|_{\Gamma} \right) \cdot W_\Gamma d\Gamma = 0. \end{aligned} \quad (4.50)$$

Учтем следующие замечания:

1. Согласно методу Галеркина [121] весовые функции равны базисным функциям:

$$W_\Omega = N_\Omega; \quad W_\Gamma = N_\Gamma.$$

2. Граничные условия при интегрировании обращаются в ноль.

3. Первая формула Грина позволяет преобразовать тройной интеграл по области в интеграл по объему.

С учетом этих замечаний произведем подстановку в уравнение (4.50) приближенное решение (4.47):

$$\begin{aligned} \sum_{\mu=1}^M T^\mu \left\{ \int_V c\rho \frac{\partial T_\eta}{\partial \tau} N_\Omega N dV - \int_V \left( \frac{\partial N_\Omega}{\partial x} \left( \lambda_\eta \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_\Omega}{\partial y} \left( \lambda_\eta \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_\Omega}{\partial z} \left( \lambda_\eta \frac{\partial N}{\partial z} \right) \right) dV \right\} = \\ = \int_V \sum_{f=1}^F q_f(x, y) N_\Omega dV. \end{aligned} \quad (4.51)$$

После интегрирования и суммирования (4.51) будет представлять систему алгебраических уравнений относительно температуры всех  $\mu$  узлов. Представим уравнение (4.51) в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{F}, \quad (4.52)$$

где  $\mathbf{C}$  – матрица демпфирования, физический смысл которой – зависимость температуры от времени;  $\mathbf{A}$  – матрица жесткости, физический смысл которой – количественное описание характеристик материала  $\eta$ -ого слоя твердотельной системы;  $\mathbf{F}$  – вектор нагрузки, физический смысл которой – получаемое количество теплоты от внутренних источников тепловыделения.

Аналогично можно записать систему линейных алгебраических уравнений для отдельного конечного элемента  $\mu$ :

$$\mathbf{C}^\mu \frac{\partial \mathbf{T}^\mu}{\partial t} - \mathbf{\Lambda}^\mu \cdot \mathbf{T}^\mu = \mathbf{F}^\mu, \quad (4.53)$$

В уравнении (4.53) приняты следующие обозначения:

- матрица демпфирования конечного элемента  $\mu$ :

$$\mathbf{C}^\mu = c\rho \int_V [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dV;$$

- матрица жесткости конечного элемента  $\mu$ :

$$\mathbf{\Lambda}^\mu = \lambda \int_V [\mathbf{H}]^T [\mathbf{H}] dV;$$

- вектор частных производных базисных функций по координатам:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix};$$

- вектор нагрузки конечного элемента  $\mu$ :

$$\mathbf{F}^\mu = q(x, y) \int_V N dV.$$

Первую производную по времени  $\frac{\partial T}{\partial t}$  аппроксимируем с помощью правой разности первого порядка точности [115]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta t} + O(\Delta t); \quad p = 1, 2, \dots, \quad (4.54)$$

где  $p$  – временной слой;  $T^{p+1}$  – температура на новом временном слое;  $T^p$  – температура на старом временном слое;  $\Delta t$  – малый шаг по времени;  $O(\Delta t)$  – порядок погрешности расщепления по времени.

Подставим (4.54) в уравнение (4.52):

$$\mathbf{C} \frac{\mathbf{T}^{p+1} - \mathbf{T}^p}{\Delta t} - \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{T}^{p+1} = \mathbf{F}. \quad (4.55)$$

Для получения явной расчетной схемы выразим из (4.55) температуру  $T^{p+1}$  на новом временном слое:

$$\mathbf{T}^{p+1} = \frac{\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \mathbf{T}^p + \mathbf{F}}{\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} - \mathbf{\Lambda}}. \quad (4.56)$$

Рассмотрим отдельно подинтегральное выражение во втором слагаемом в (4.49). Поток тепла вдоль границы  $\Gamma$  соответствует тепловым потерям, вызванным конвективным теплообменом, и представляется следующим образом:

$$\mp \lambda \frac{\partial T_{\eta}}{\partial n} - \alpha (T_{\text{CP}} - T_{\eta})$$

или

$$\frac{\partial T_{\eta}}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{\eta} \pm T_{\text{CP}}), \quad (4.57)$$

где  $T_{\eta}$  – температура границы тела для  $\eta$ -ого слоя твердотельной системы.

Аналогично всем остальным  $\mu$  узлам температура граничного узла в (4.57) дается соотношением (4.47):

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k + N_l T_l,$$

откуда имеем для точек поверхности  $i$ -ого слоя твердотельной системы:

$$T = 0T_i + N_j T_j + N_k T_k + N_l T_l.$$

Тогда для теплового потока получаем выражение:

$$\frac{\partial T_{\eta}}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{\eta} \pm T_{\text{CP}}) = \frac{\alpha}{\lambda} \begin{bmatrix} 0 & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \end{bmatrix} \pm \frac{\alpha}{\lambda} T_{\text{CP}}. \quad (4.58)$$

Выражение (4.58) существует также в трех других формах записи. Нулевой коэффициент будет находиться в том ряду, который соответствует узлу вне рассматриваемой поверхности.

С учетом граничных условий 3 рода вектор нагрузки  $\mathbf{F}$  в (4.56) представляет собой алгебраическую сумму внутренних источников тепла и конвективных составляющих (4.58).

#### 4.4 Программные средства реализации численных методов расчета температурного поля

*Программный комплекс MathCAD* – это компьютерное программное обеспечение, предназначенное в первую очередь для верификации, валидации, документирования и повторного использования инженерных расчетов [107]. Разработанный в 1986 году для операционной системы DOS, программный комплекс MathCAD впервые реализовал максимально приближенную к классической математике возможность наборной математической нотации с последующим редактированием и автоматическими вычислениями. Концепция работы с программным комплексом

MathCAD ориентирована на рабочий лист, в котором уравнения и выражения создаются и обрабатываются в том же графическом формате, как они были представлены изначально (WYSIWYG «What You See Is What You Get»).

Для описания сложных итерационных и рекуррентных математических операций в программном комплексе MathCAD имеется функциональная возможность составлять программные блоки. Программные блоки поддерживают основные операторы программирования для построения линейных, ветвящихся и циклических программ. Для вставки программного кода в документы MathCAD имеется специальная панель инструментов Programming. Большинство кнопок этой панели выполнено в виде текстового представления операторов программирования, поэтому их смысл легко понятен. Программный модуль обозначается в MathCAD вертикальной чертой, справа от которой последовательно записываются операторы языка программирования.

Ниже приведены простые программные блоки линейного (рисунок 4.6, а) и циклического программирования (рисунок 4.6, б).

$$\begin{array}{ll}
 f(x) := \left| \begin{array}{l} z \leftarrow 4 \\ z + x \end{array} \right. & x := \left| \begin{array}{l} z \leftarrow 0 \\ \text{while } z < 10 \\ z \leftarrow z + 1 \end{array} \right. \\
 f(1) = 5 & x = 10 \\
 a) & б)
 \end{array}$$

Рисунок 4.6 – Простые программные блоки MathCAD

Используя функциональные возможности MathCAD по программированию, становится возможным разработать программный блок, реализующий конечно-разностный метод расчета температурного поля на основе математической модели (4.32)...(4.39). Рассмотрим подробнее листинг программной реализации конечно-разностного метода, а точнее – метода правой прогонки (рисунок 4.7). Разработанный нами программный блок учитывает граничные условия 3 рода с независимым заданием условий на левой и правой границах пространственной сетки. Реализация программного блока происходит по локально-одномерной схеме, т.е. вдоль одной из координат. Для упрощения предполагается, что внутри пространственной сетки расположен единственный источник тепловыделения (одно тепловыделяющее ЭРИ). Условия теплообмена – нестационарные. Предварительно должны быть заданы исходные данные. К ним относятся:

- количество узлов пространственной сетки  $N$ ;
- коэффициент температуропроводности  $a$  [ $\text{м}^2/\text{с}$ ];
- коэффициент теплопроводности  $\lambda$  [ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ];
- объемная плотность мощности от источника теплоты (от ЭРИ)  $Q$  [ $\text{Вт}/\text{м}^3$ ];
- шаг временной сетки  $\Delta\tau$  [ $\text{с}$ ];



- начальная температура тела  $T_0$  [°C];
- температура окружающей среды на левой границе пространственной сетки  $T_{SR,LEFT}$  [°C];
- температура окружающей среды на правой границе пространственной сетки  $T_{SR,RIGHT}$  [°C];
- коэффициент теплоотдачи на левой границе пространственной сетки  $\alpha_{LEFT}$  [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)];
- коэффициент теплоотдачи на правой границе пространственной сетки  $\alpha_{RIGHT}$  [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)];
- длина тела  $l_x$  [м];
- конечное время  $\tau_{фин}$  [с];
- координата левой границы источника тепла (ЭРИ)  $x_1$  [м];
- координата правой границы источника тепла (ЭРИ)  $x_2$  [м].

Еще три параметра вычисляются до программного блока:

- шаг пространственной сетки  $\chi_x = \frac{l_x}{N-1}$  [м];

- критерий Био для левой границы пространственной сетки  $Bi_{LEFT} = \frac{\alpha_{LEFT} \cdot \chi_x}{\lambda}$ ;

- критерий Био для правой границы пространственной сетки  $Bi_{RIGHT} = \frac{\alpha_{RIGHT} \cdot \chi_x}{\lambda}$ .

В начале программного блока (строка 1) происходит присваивание начального момента времени  $\tau = 0$ . Первый программный цикл (строки 2-5) предназначен для инициализации трех одномерных массивов: массив температур, массив прогоночных коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ . Цикл повторяется по количеству узлов пространственной сетки ( $N$ ). При этом ячейкам массива температур присваивается начальная температура тела  $T_i = T_0$ , а ячейкам массивов прогоночных коэффициентов присваиваются нулевые значения  $\alpha = \beta = 0$ . Второй программный цикл (строки 6-22) представляет собой внешний цикл, внутри которого имеется также внутренний, вложенный цикл (строки 10-17). Внешний цикл – цикл с предусловием, он повторяется до тех пор, пока текущее время меньше, либо равно конечному времени расчета  $\tau \leq \tau_{фин}$ . Внутренний вложенный цикл повторяется по количеству внутренних узлов пространственной сетки, т.е.  $(N - 2)$  раз. В начале внешнего цикла происходит приращение временного шага (строка 7), а также вычисление значений первых прогоночных коэффициентов (строки 8, 9)  $\alpha_1 = \xi_1$  и  $\beta_1 = \mu_1$  по формулам (4.39). Значение критерия Био для левой и правой пространственной границ было вычислено на этапе задания исходных данных. Внутри вложенного цикла (строки 11-17) происходит вычисление вспомогательных коэффициентов  $A_n, B_n, C_n, F_n$ . Расчетные формулы для вспомогательных коэффициентов аналогичны выведенным в п. 4.2:

$$A_n = B_n = 1;$$

$$C_n = \left( 2 + \frac{h^2}{a \cdot \Delta\tau} \right);$$

$$F_n = \begin{cases} \frac{h^2}{a \cdot \Delta\tau} T_n^{j-1} + \frac{Qh^2}{\lambda}, & \text{в области источников тепла;} \\ \frac{h^2}{a \cdot \Delta\tau} T_n^{j-1}, & \text{вне областей источников тепла.} \end{cases}$$

```

1  Tmax := τ ← 0   Начальный момент времени
2  for i ∈ 0..N   Цикл инициализации для температуры узлов и для прогоночных коэффициентов
3  | Ti ← T0   Начальная температура тела
4  | αi ← 0   Нулевые значения прогоночного коэффициента α
5  | βi ← 0   Нулевые значения прогоночного коэффициента β
6  while τ ≤ τfin   Цикл временных приращений
7  | τ ← τ + Δτ   Приращение по времени
8  | α1 ← 1 / (1 + BiLeft)   Вычисление первого прогоночного коэффициента α
9  | β1 ← (BiLeft · TsrLeft) / (1 + BiLeft)   Вычисление первого прогоночного коэффициента β
10 | for i ∈ 1..N - 1   Цикл прохода внутренних узлов
11 | | C ← 2 + (X2 / (Δτ · a))   Вычисление коэффициента Cn
12 | | A ← 1   Инициализация коэффициента An
13 | | B ← 1   Инициализация коэффициента Bn
14 | | F ← (X2 · Ti / (Δτ · a)) if [Xx(i - 1) < X1] + [Xx(i - 1) > X2]   Вычисление коэффициента Fn вне зоны нахождения ЭРИ
15 | | F ← (X2 · Ti / (Δτ · a) + (Q · X2 / λ)) if [Xx(i - 1) ≥ X1] · [Xx(i - 1) ≤ X2]   Вычисление коэффициента Fn в зоне нахождения ЭРИ
16 | | αi+1 ← B / (C - αi · A)   Вычисление внутренних прогоночных коэффициентов α
17 | | βi+1 ← (A · βi + F) / (C - αi · A)   Вычисление внутренних прогоночных коэффициентов β
18 | | ξ2 ← 1 / (1 + BiRight)   Вычисление крайнего правого прогоночного коэффициента α
19 | | μ2 ← (BiRight · TsrRight) / (1 + BiRight)   Вычисление крайнего правого прогоночного коэффициента β
20 | | TN ← (μ2 + ξ2 · βN) / (1 - αN · ξ2)   Вычисление температуры крайнего правого узла
21 | for i ∈ (N - 1)..0   Цикл обратного хода
22 | | Ti ← αi+1 · Ti+1 + βi+1   Вычисление температуры узлов
23 | T   Вектор значений температур в узлах сетки

```

Рисунок 4.7 – Листинг программной реализации метода правой прогонки

Заметим, что в строках 14, 15 для вычисления коэффициента  $F_n$  введены составные условные операторы if. В частности, в строке 14 имеется условный составной оператор, реализующий логическое сложение условий: вычисление коэффициента  $F_n$  либо левее, либо правее ячеек с источником тепла. В строке 15 находится условный составной оператор с логическим умножением условий: вычисление коэффициента  $F_n$  в ячейках с наличием источника тепла.

Завершает внутренний цикл (строки 16-17) вычисление прогоночных коэффициентов  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  для внутренних узлов пространственной сетки по формулам (4.32) и (4.33). После выхода из внутреннего цикла управление передается во внешний цикл (строки 18-22). Здесь происходит вычисление крайних правых прогоночных коэффициентов  $\alpha_N = \xi_2$  и  $\beta_N = \mu_2$  по формулам (4.39). Затем в строке 20 вычисляется температура крайнего правого узла пространственной сетки  $T_N$  по формуле (4.37). После этого в обратном цикле (строки 21-22), повторяющемся  $(N - 1)$  раз по рекуррентной формуле (4.34) вычисляются остальные температуры пространственной сетки.

Последняя строка программного цикла (строка 23) формирует вектор значений температур  $T$  пространственной сетки вдоль одной из координат. Имея массив температур  $T$ , в зависимости от дальнейших задач исследования можно представить в MathCAD температурный профиль в трех видах: в векторном, в табличном и в графическом.

Практическое применение разработанного программного блока продемонстрируем на примере решения нестационарной задачи теплопроводности в одномерной постановке.

Задача №1. Требуется найти распределение температуры вдоль стержня длиной  $l_x = 0,05$  м в течение времени  $t_{\text{фин}} = 100$  с. Материал стержня – стеклотекстолит. Теплофизические параметры стеклотекстолита  $c = 840$  Дж/(кг·°С);  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,3$  Вт/(м·°С). Внутри стержня в пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$  находится источник тепла с интенсивностью тепловыделения  $Q = 1 \cdot 10^5$  Вт/м, где  $x_1 = 0,0197$  м;  $x_2 = 0,0297$  м. Начальная температура стержня  $T_0 = 20$  °С. Температура окружающей среды на левом и правом торцах стержня  $T_{\text{СР.ЛЕВ}} = T_{\text{СР.ПР}} = 120$  °С. На торцах стержня заданы граничные условия 3 рода с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\text{К.ЛЕВ}} = \alpha_{\text{К.ПР}} = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Количество узлов пространственной сетки  $N = 100$ . Шаг временной сетки  $\Delta t = 1$  с.

Решение.

Коэффициент температуропроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0,3}{840 \cdot 1800} = 1,984 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

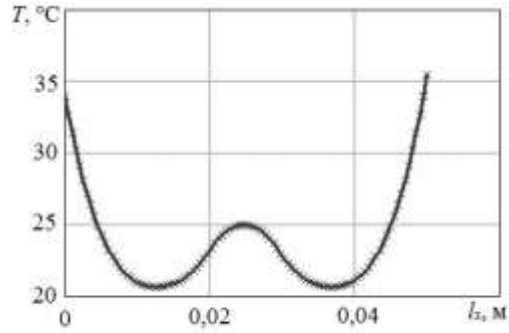
Шаг пространственной сетки будет:

$$\chi_x = \frac{l_x}{N-1} = \frac{0,05}{100-1} = 5,051 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Критерий Био для левого и правого торцов будет:

$$Bi_{\text{ЛЕВ}} = Bi_{\text{ПР}} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot \chi_x}{\lambda} = \frac{10 \cdot 5,051 \cdot 10^{-4}}{0,3} = 0,017.$$

Результаты численного решения задачи представлены в виде температурного профиля вдоль координат  $x$  в момент времени  $\tau = 100$  с (рисунок 4.8, а) и в виде вектора температур пространственных узлов (рисунок 4.8, б).



а)

$T^T =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	0	35.43	34.006	32.666	31.41	30.239	29.152	28.147	27.223	26.378	25.608	24.911	24.284	...

б)

Рисунок 4.8 – Результаты решения задачи №1

Нетрудно заметить, что модификация представленного программного блока позволяет реализовать расчет температурного поля по локально-одномерной схеме для двухмерного и для трехмерного случаев. Учитывая формулы (4.20)...(4.26), отличительными особенностями применения программного блока для решения многомерных задач будут:

- инициализация двух- или трехмерного массива температур начальными значениями  $T_0$  посредством вложенных циклов (вместо строк 2...3);

- наличие вложенных циклов для перебора всех «продольных», «поперечных» и «вертикальных» стержней (вместо строк 8...22);

- отсутствие строки 15 при движении по координатам  $u$  и  $z$ , т.е. отсутствие учета источника тепла;

- наличие граничных условий 4 рода (4.25) при движении по координате  $z$ .

Видоизменим условие задачи №1 с целью нахождения распределения температурного поля в нестационарном режиме для двухмерной области.

Задача №2. Требуется найти распределение температуры по двухмерной пластине длиной и шириной  $l_x = l_y = 0,05$  м в течение времени  $\tau_{\text{фин}} = 100$  с. Материал пластины – стеклотекстолит. Теплофизические параметры стеклотекстолита  $c = 840$  Дж/(кг·°C);  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,3$

Вт/(м·°С). Внутри пластины в пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$  и  $y_1 \leq y \leq y_2$  находится источник тепла с интенсивностью тепловыделения  $Q = 1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, где  $x_1 = 0,02$  м;  $x_2 = 0,03$  м;  $y_1 = 0,02$  м;  $y_2 = 0,03$  м. Начальная температура пластины  $T_0 = 20$  °С. Температура окружающей среды на торцах пластины  $T_{\text{СР}} = 20$  °С. На торцах пластины заданы граничные условия 3 рода с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\text{к}} = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Количество узлов пространственной сетки  $N = M = 100$ . Шаг временной сетки  $\Delta\tau = 1$  с.

Решение.

Коэффициент температуропроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0,3}{840 \cdot 1800} = 1,984 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Шаг пространственной сетки будет:

$$\chi_x = \chi_y = \frac{l_x}{N-1} = \frac{l_y}{M-1} = \frac{0,05}{100-1} = 5,051 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Критерий Био для торцов пластины будет:

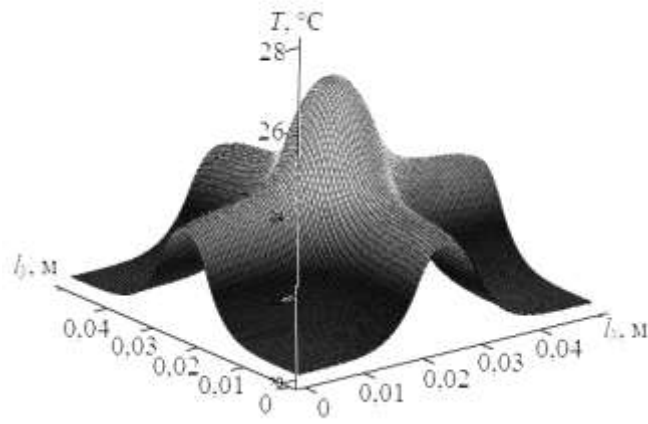
$$Bi = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot \chi_x}{\lambda} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot \chi_y}{\lambda} = \frac{10 \cdot 5,051 \cdot 10^{-4}}{0,3} = 0,017.$$

Результаты численного решения задачи представлены в виде поверхности – температурного поля – в момент времени  $\tau = 100$  с (рисунок 4.9, а) и в виде матрицы температур пространственных узлов двумерной области решения (рисунок 4.9, б).

*Программный комплекс SolidWorks* – это компьютерная программа для твердотельного моделирования и автоматизированного проектирования, которая работает под управлением операционной системы Microsoft Windows [122]. SolidWorks использует в своей работе параметрический подход на основе объектов, который изначально был разработан компанией PTC (Creo/Pro-Engineer) для создания моделей и сборок. Программное обеспечение написано на Parasolid-ядре. Параметры создаваемых твердотельных моделей относятся к ограничениям, значения которых определяют форму или геометрию модели/ сборки. Параметры могут быть либо числовыми, такими как длина линии или диаметр окружности, либо геометрическими, такими как касательная, параллель, концентрическая, горизонтальная или вертикальная и т.д. Числовые параметры могут быть связаны друг с другом с помощью отношений, что позволяет им фиксировать замысел проекта.

Построение твердотельной модели детали в SolidWorks обычно начинается с 2D-эскиза. Эскиз детали состоит из геометрических элементов, таких как точки, линии, дуги, сплайны и т.д. Размеры детали добавляются в эскиз для определения размера и расположения геометрии. Отно-

шения используются для определения таких атрибутов, как касательность, параллельность, перпендикулярность и концентричность. Параметрическая природа SolidWorks означает, что геометрию детали определяют размеры и соотношения, а не наоборот. Размеры детали в эскизе могут управляться независимо или с помощью связей с другими параметрами внутри или снаружи эскиза.



а)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	20.001	20.001	20.001	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.004	20.004	20.005
1	20.001	20.001	20.001	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.004	20.004	20.006
2	20.001	20.001	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.003	20.004	20.005	20.006
3	20.002	20.002	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.003	20.004	20.005	20.006
4	20.002	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.003	20.003	20.004	20.005	20.006
5	20.002	20.002	20.002	20.002	20.003	20.003	20.003	20.004	20.004	20.005	20.007
6	20.002	20.002	20.003	20.003	20.003	20.003	20.004	20.004	20.005	20.006	20.007
7	20.003	20.003	20.003	20.003	20.003	20.004	20.004	20.005	20.005	20.006	20.008
8	20.004	20.004	20.004	20.004	20.004	20.004	20.005	20.005	20.006	20.007	20.008
9	20.004	20.004	20.005	20.005	20.005	20.005	20.006	20.006	20.007	20.008	20.009
10	20.005	20.006	20.006	20.006	20.006	20.007	20.007	20.008	20.008	20.009	20.01
11	20.007	20.007	20.007	20.007	20.008	20.008	20.008	20.009	20.01	20.011	20.012
12	20.008	20.009	20.009	20.009	20.009	20.01	20.01	20.011	20.012	20.013	20.014
13	20.011	20.011	20.011	20.011	20.012	20.012	20.013	20.013	20.014	20.015	20.016
14	20.013	20.013	20.014	20.014	20.014	20.015	20.015	20.016	20.017	20.018	20.019
15	20.016	20.017	20.017	20.017	20.018	20.018	20.019	20.02	20.021	20.022	...

б)

Рисунок 4.9 – Результаты решения задачи №2

В сборке аналогом отношений для эскиза детали являются сопряжения. Точно так же, как отношения для эскиза детали определяют такие условия, как касательность, параллельность и концентричность по отношению к геометрии эскиза, сопряжения сборки определяют эквивалентные отношения по отношению к отдельным деталям или компонентам, что позволяет легко строить сборки.

На заключительном этапе работы с твердотельной моделью могут быть созданы чертежи из деталей или из сборок. Чертежные виды автоматически генерируются из твердотельной модели, а примечания, размеры и допуски затем могут быть легко добавлены к чертежу по мере необходимости.

Программный комплекс SolidWorks содержит в своем составе различные дополнительные надстройки, в том числе – надстройку Simulation. SolidWorks Simulation – это простой в использовании набор программных средств структурного анализа, использующих метод конечных элементов для прогнозирования реального физического поведения объекта путем виртуального тестирования CAD-моделей. Набор программных средств предоставляет возможности линейного, нелинейного статического и динамического анализа. В свою очередь, в состав надстройки SolidWorks Simulation входит модуль расчета тепловых режимов твердотельных объектов Thermal Analysis. Модуль охватывает теплопередачу за счет кондукции, конвекции и излучения, а также позволяет учитывать термически напряженные состояния и термически индуцированные процессы.

На рисунке 4.10 представлена блок-схема алгоритма обобщенного алгоритма расчета температурного поля по методу конечных элементов.

Практическое применение модуля SolidWorks Simulation Thermal Analysis продемонстрируем на примере решения задачи теплопроводности в трехмерной постановке для стационарного и нестационарного режима, а также для случая температурной зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$ .

**Задача №3.** Требуется найти распределение температуры в течение времени  $\tau_{\text{фин}} = 100$  с **в стационарном режиме** в подложке с источником тепловыделения (кристаллом). Габаритные размеры подложки:  $l_x = l_y = 0,01$  м;  $l_z = 0,001$  м. Материал подложки – кремний. Теплофизические параметры кремния  $c = 648$  Дж/(кг·°C);  $\rho = 2330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 150$  Вт/(м·°C). В пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$ ,  $y_1 \leq y \leq y_2$ ,  $z_1 \leq z \leq z_2$  находится кристалл с мощностью тепловыделения  $P = 0,1$  Вт, где  $x_1 = 0,0045$  м;  $x_2 = 0,0055$  м;  $y_1 = 0,0045$  м;  $y_2 = 0,0055$  м;  $z_1 = 0$  м;  $z_2 = 0,001$  м. Тепловая мощность кристалла увеличивается от нуля во время  $\tau = 0$  и достигнет максимального значения (0,1 Вт) через 100 с. Габаритные размеры кристалла:  $0,001 \times 0,001 \times 0,001$  м. Материал кристалла – кремний. Начальная температура подложки  $T_0 = 20$  °C. Температура окружающей среды  $T_{\text{ср}} = 20$  °C. На поверхностях подложки заданы граничные условия 3 рода с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $\alpha_k = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

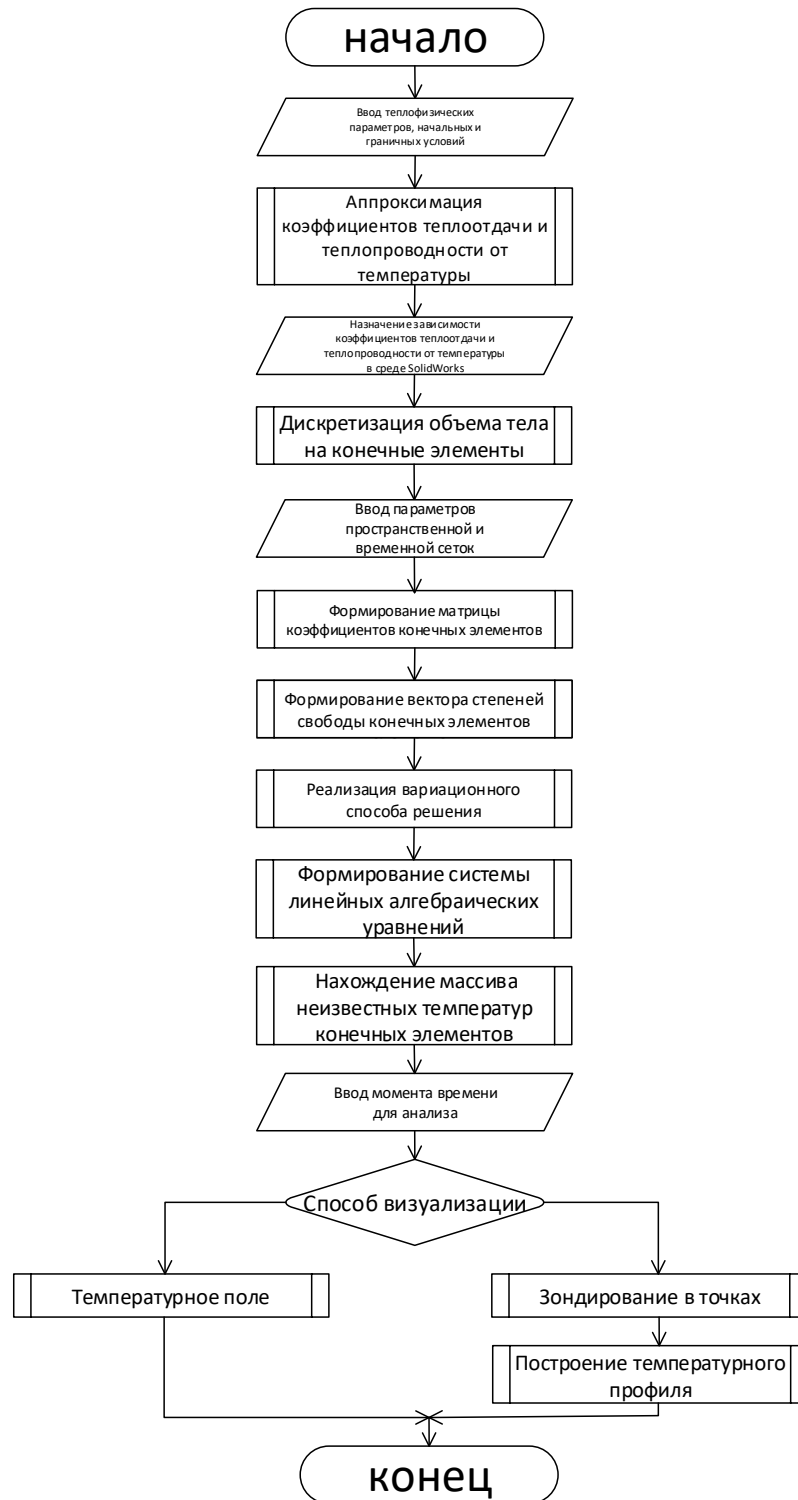


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма обобщенного алгоритма расчета температурного поля по методу конечных элементов

Решение.

Коэффициент температуропроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{150}{648 \cdot 2330} = 9,935 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$



Далее, используя функциональные возможности SolidWorks Simulation Thermal Analysis, приведем методику расчета температурного поля подложки. Подложка в терминах SolidWorks представляет собой сборку (рисунок 4.11), состоящую из собственно подложки и одного кристалла. Кристалл размещен симметрично относительно продольной и поперечной оси подложки.

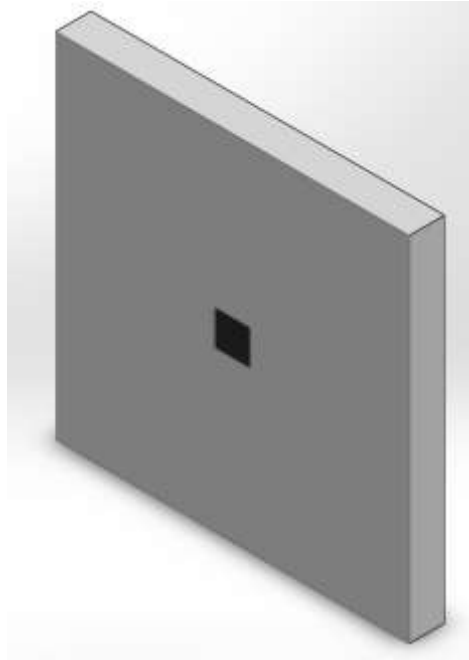











Рисунок 4.11 – Подложка с кристаллом для теплофизического моделирования в среде SolidWorks Simulation Thermal Analysis










Находясь в надстройке SolidWorks Simulation нажмем на графическую кнопку  *Новое исследование*. В появившейся панели *Исследование* дадим в поле *Имя* наименование новому исследованию – *Стационарный режим*. В группе *Simulation – расширенные параметры* нажмем на графическую кнопку  *Термическая*. Закроем панель *Исследование* с помощью кнопки  *ОК*. В дереве исследования *Simulation* нажмем правой клавишей мыши на заголовок анализа  *Стационарный режим*. В появившемся контекстном меню выберем пункт *Свойства*. В диалоговом окне *Термическая* на вкладке *Параметры* в группе *Тип решения* проверим установку *Устойчивое состояние*. Закроем диалоговое окно *Термическая* с помощью кнопки *ОК*.








В дереве конструирования  *FeatureManager* раскроем подробнее детали сборки  (ф) Подложка<1> (По умолчанию) Подложка и  Кристалл<1> (Default<<Default>\_P Кристалл. В раскрытом пункте *Подложка* выберем пункт  *Применить/редактировать материал*. Правой



клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Редактировать материал*. В диалоговом окне *Материал* в левой группе выберем пункт  *Настроенный пользователем материал*, затем пункт  *Мои материалы*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Новый материал*. Присвоим новому материалу имя – *Кремний*. В правой части диалогового окна на вкладке *Свойства* введем теплофизические параметры для кремния:







- массовая плотность = 2330 кг/м<sup>3</sup>;
- теплопроводность = 150 Вт/(м·°С);
- удельная теплоемкость = 648 Дж/(кг·°С).

Последовательно нажмем в диалоговом окне на кнопки *Применить* и *Заккрыть*. Аналогичным образом назначим материал кремния для детали сборки *Кристалл*.

В дереве конструирования  *FeatureManager* выберем пункт  *Термические нагрузки*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Тепловая мощность*. Раскроем дерево конструирования  *Сборка подложки* *Сборка подложки* в основном окне построения сборки. Выберем в дереве конструирования деталь сборки *Кристалл*. При этом в появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе  *Выбранные объекты* появится название выбранной детали. В группе *Тепловая мощность* удостоверимся, что в строке  *Единица измерения* находится вариант *SI*. В строке  *Тепловая мощность* установим значение *0,1* Вт. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *OK*.

В дереве конструирования  *FeatureManager* выберем пункт  *Термические нагрузки*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Конвекция*. В основном окне построения сборки с помощью приемов группового выделения выберем все грани (включая боковые) данной конструкции. В при этом в появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе  *Выбранные объекты* появятся названия выбранных граней (8 граней). В группе *Единицы* удостоверимся, что в строке  *Единица измерения* находится вариант *SI*. В строке  *Коэффициент конвективной теплоотдачи* установим

значение  $25 \text{ Вт}/(\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . В строке  *Массовая температура окружающей среды* установим значение  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *OK*.

В дереве конструирования  *FeatureManager* выберем пункт  *Сетка*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Создать сетку*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе  *Плотность сетки* убедимся, что движок находится в среднем положении, между значениями *Грубое* и *Высокое*. В выбранной группе *Параметры сетки* можно увидеть параметры стандартной сетки пространственной дискретизации: *Глобальный размер 0,464 мм* и *Допуск 0,023 мм*. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *OK*. При этом в основном окне построения сборки можно наблюдать пространственную сетку дискретизации (рисунок 4.12).

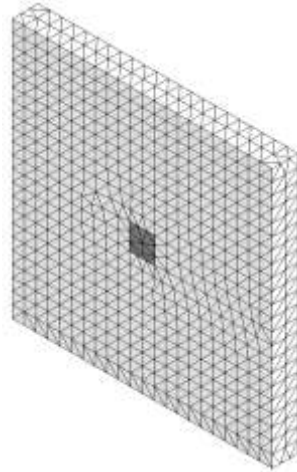










Рисунок 4.12 – Пространственная сетка дискретизации

В дереве конструирования  *FeatureManager* раскроем выберем пункт  *Стационарный режим*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Выполнить*. В результате в основном окне построения сборки отобразится температурное поле конструкции в виде термограммы – цветового представления распределения температур (рисунок 4.13, а). В правой части основного окна выводится легенда температур.

Раскроем в дереве конструирования пункт  *Результаты* и выберем пункт  *Термический*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Зондирование*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Параметры* установим вариант *В местоположении*. В основном окне построения сборки щелчком

мыши укажем 7 точек, расположенных примерно на равном расстоянии на воображаемой диагонали верхней грани сборки. При этом в менеджере свойств в группе *Результаты* появятся числовые значения температур выбранных точек с указанием номеров узлов пространственной сетки и геометрических координат. В группе *Отчет* появятся статистические сведения о средней, максимальной, минимальной температурах. В группе *Параметры отчета* нажмем на графическую кнопку  *Этюра*. В результате на экране появится график в декартовой системе координат – зависимость температуры ранее выбранных узлов от номеров этих узлов (рисунок 4.13, б).

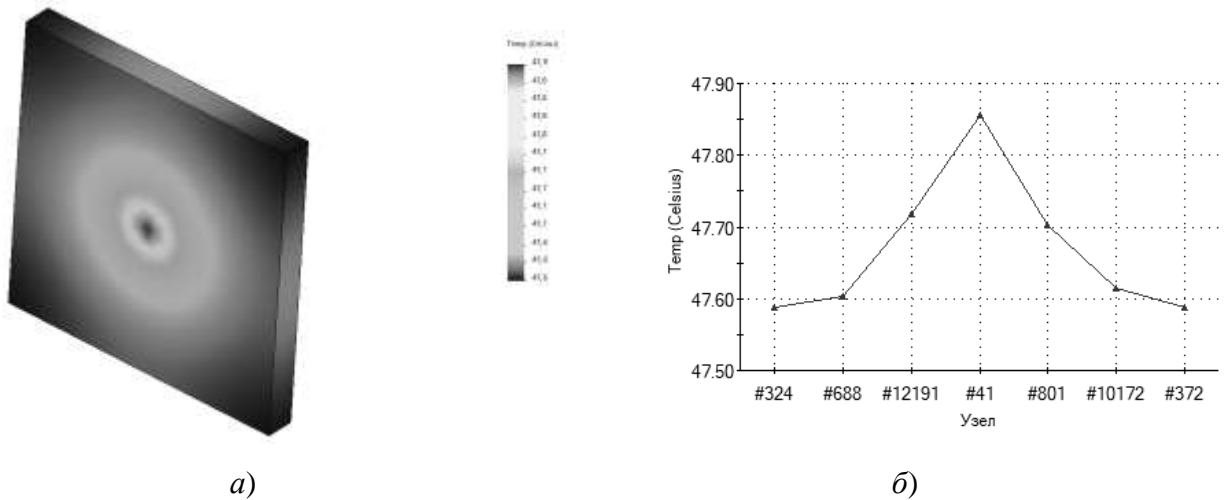














Рисунок 4.13 – Результаты расчета температурного поля в стационарном режиме


**Задача №4.** Требуется найти распределение температуры в течение времени  $\tau_{\text{фин}} = 100$  с для **нестационарного режима** в подложке с источником тепловыделения (кристаллом). Габаритные размеры подложки:  $l_x = l_y = 0,01$  м;  $l_z = 0,001$  м. Материал подложки – кремний. Теплофизические параметры кремния  $c = 648$  Дж/(кг·°C);  $\rho = 2330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 150$  Вт/(м·°C). В пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$ ,  $y_1 \leq y \leq y_2$ ,  $z_1 \leq z \leq z_2$  находится кристалл с мощностью тепловыделения  $P = 0,1$  Вт, где  $x_1 = 0,0045$  м;  $x_2 = 0,0055$  м;  $y_1 = 0,0045$  м;  $y_2 = 0,0055$  м;  $z_1 = 0$  м;  $z_2 = 0,001$  м. Тепловая мощность кристалла увеличивается от нуля во время  $\tau = 0$  и достигнет максимального значения (0,1 Вт) через 100 с. Габаритные размеры кристалла:  $0,001 \times 0,001 \times 0,001$  м. Материал кристалла – кремний. Начальная температура подложки  $T_0 = 20$  °C. Температура окружающей среды  $T_{\text{ср}} = 20$  °C. На поверхностях подложки заданы граничные условия 3 рода с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $\alpha_k = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).







Решение.

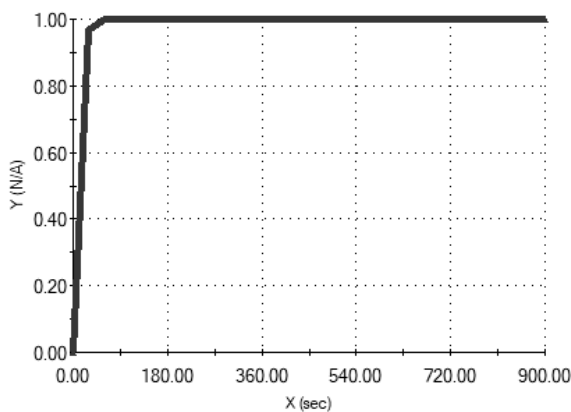
Находясь в надстройке SolidWorks Simulation нажмем на графическую кнопку  *Новое исследование*. В появившейся панели *Исследование* дадим в поле *Имя* наименование новому исследованию – *Нестационарный режим*. В группе *Simulation – расширенные параметры* нажмем на графическую кнопку  *Термическая*. Закроем панель *Исследование* с помощью кнопки  *ОК*. В дереве исследования *Simulation* нажмем правой клавишей мыши на заголовок анализа  *Нестационарный режим*. В появившемся контекстном меню выберем пункт *Свойства*. В диалоговом окне *Термическая* на вкладке *Параметры* в группе *Тип решения* выберем вариант *Переходный процесс*. Установим ниже параметры: *Общее время 100 с* и *Временной инкремент 10 с*. Закроем диалоговое окно *Термическая* с помощью кнопки *ОК*.

Перейдем на вкладку предыдущего исследования *Стационарный режим*. Выберем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* группу *Детали*. Используя прием перемещения с помощи мыши, скопируем группу *Детали* путем перетаскивания ее на заголовок вкладки *Нестационарный режим*. При этом в дереве конструирования нового исследования появятся детали сборки из предыдущего исследования *Подложка* и *Кристалл*.

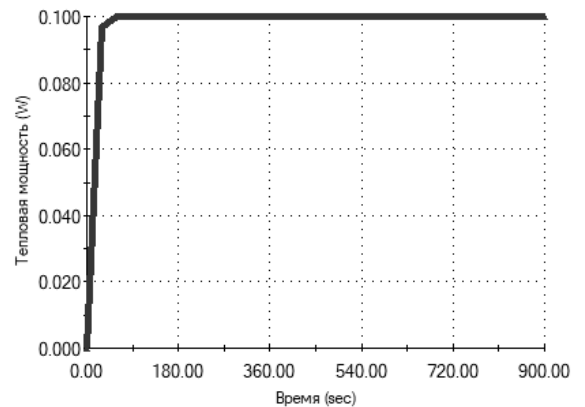
В дереве конструирования  *FeatureManager* выберем пункт  *Термические нагрузки*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Температура*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Тип* установим вариант *Начальная температура*. Ниже выберем окно  *Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для Температуры*. В основном окне построения сборки выберем значок всей сборки  *Сборка подложки*. При этом в окне  *Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для Температуры* менеджера свойств появится выбранная сборка. Ниже в группе *Температура* в строке  *Температура* установим значение *20 °С*. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *ОК*.

Перейдем на вкладку предыдущего исследования *Стационарный режим*. Выберем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* группу *Термические нагрузки*. Используя прием перемещения с помощи мыши, скопируем группу *Термические нагрузки* путем перетаскивания ее на заголовок вкладки *Нестационарный режим*. При этом в дереве конструирования нового исследования появятся термические нагрузки из предыдущего исследования *Тепловой поток* и *Конвекция*.

В дереве исследования *Simulation* нажмем правой клавишей мыши на разделе  *Тепловой поток (Тепловая мощность)*. В появившемся контекстном меню выберем пункт  *Редактировать определение*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Тепловая мощность* нажмем графическую кнопку  *Использовать кривую времени*, затем кнопку *Изменить*. В диалоговом окне *Кривая времени* нажмем кнопку *Получить кривую*. В стандартном диалоговом окне операционной системы Windows найдем путь к файлу `\SolidWorks\Samples\Simulation Samples\Thermal\heatpower_time_curve.cwcur`. С помощью кнопки *Открыть* загрузим указанный файл в диалоговое окно *Кривая времени*. В появившемся диалоговом окне *Кривые функций* в группе *Библиотека кривых* выберем заголовок пусковой кривой *Time curve - 1*. При этом в правой части диалогового окна отобразится график пусковой характеристики, а ниже – табулированные данные, на основе которых построена пусковая характеристика. По оси *X* указаны моменты времени в секундах, по оси *Y* указаны нормированные значения мощности, где *1* соответствует 100% мощности источника тепловыделения (рисунок 4.14, а). Закроем диалоговое окно *Кривые функций* с помощью кнопки *ОК*. Закроем диалоговое окно *Кривая времени* с помощью кнопки *ОК*. Проконтролировать вид пусковой характеристики (в абсолютных единицах) можно путем нажатия на кнопку *Вид* в менеджере свойств  *PropertyManager* (рисунок 4.14, б). Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *ОК*.









а)













б)

Рисунок 4.14 – Пусковая характеристика

В дереве исследования *Simulation* нажмем правой клавишей мыши на разделе  *Сетка* и выберем пункт  *Создать сетку*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Плотность сетки* проконтролируем положение движка в среднем положении. При этом

в группе *Параметры сетки* при выбранном варианте *Стандартная сетка* отобразятся числовые значения сетки пространственной дискретизации:  *Глобальный размер* 0,464 мм;  *Допуск* 0,023 мм. В группе *Параметры* выберем установку *Запуск (решение) анализа*. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *ОК*. В результате в основном окне построения сборки отобразится температурное поле конструкции в виде термограммы – цветового представления распределения температур, подобное представленному на рисунок 4.12, а. В правой части основного окна выводится легенда температур. В верхней части основного окна построения сборки приводится служебная информация: *Временной шаг: 10; Время: 100 секунд*. Здесь число 10 обозначает количество временных слоев.

В дереве исследования *Simulation* нажмем дважды пункт *Термический* раздела *Результаты*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* на вкладке *Определение* в группе *Отображение* выберем в строке  *Единицы* значение *Celsius*. В группе *Шаг эюры* в строке  *Шаг эюры* укажем пятый временный слой 5. При этом в строке ввода  *Время* автоматически изменится момент времени на 50 с. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *ОК*. В результате в основном окне построения сборки отобразится температурное поле конструкции в виде термограммы в момент времени 50 с (рисунок 4.15, а). Об этом свидетельствует служебная надпись в верхней части основного окна построения сборки *Временной шаг: 5; Время: 50 секунд*. Значения температур на легенде справа также изменили свои пределы.

Раскроем в дереве конструирования пункт  *Результаты* и выберем пункт  *Термический*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Зондирование*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Параметры* установим вариант *В местоположении*. В основном окне построения сборки щелчком мыши укажем точку, соответствующую центру для поверхности, обращенной к наблюдателю. При этом в менеджере свойств в группе *Результаты* для момента времени  $t = 50$  с появится числовое значение температуры (**35,5 °C**) выбранной точки с указанием номера узла (№41) пространственной сетки и геометрических координат (5; -5; 1 мм). В группе *Параметры отчета* нажмем на графическую кнопку  *Реакция*. В результате на экране появится график в декартовой системе координат – зависимость температуры выбранного пространственного узла от времени (рисунок 4.15, б).

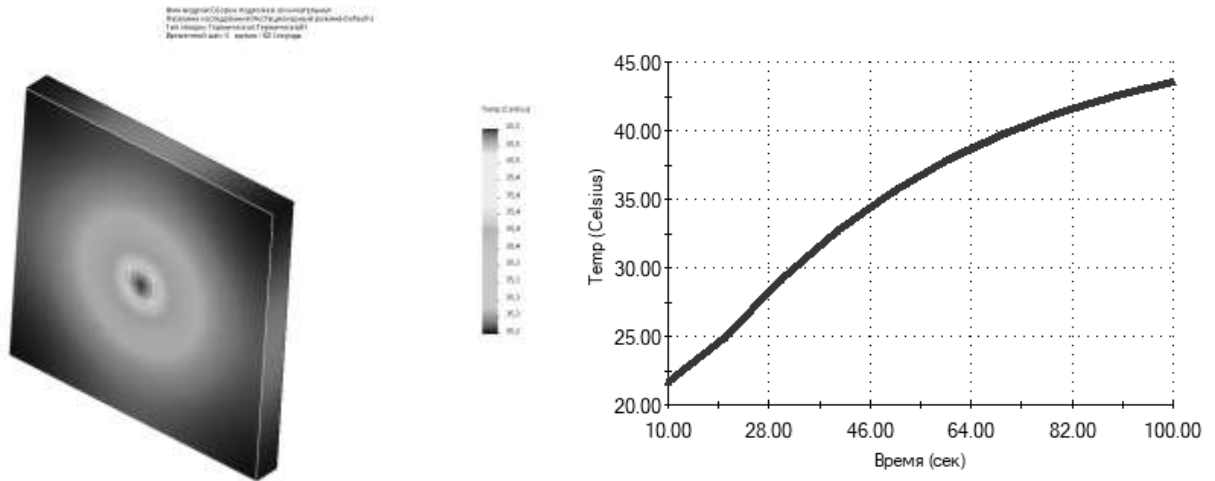





Рисунок 4.15 – Результаты расчета температурного поля в нестационарном режиме


**Задача №5.** Требуется найти распределение температуры в течение времени  $\tau_{\text{фин}} = 100$  с для нестационарного режима с температурной зависимостью коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности в подложке с источником тепловыделения (кристаллом). Габаритные размеры подложки:  $l_x = l_y = 0,01$  м;  $l_z = 0,001$  м. Материал подложки – кремний. Теплофизические параметры кремния  $c = 648$  Дж/(кг·°C);  $\rho = 2330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 150$  Вт/(м·°C). В пределах  $x_1 \leq x \leq x_2$ ,  $y_1 \leq y \leq y_2$ ,  $z_1 \leq z \leq z_2$  находится кристалл с мощностью тепловыделения  $P = 0,1$  Вт, где  $x_1 = 0,0045$  м;  $x_2 = 0,0055$  м;  $y_1 = 0,0045$  м;  $y_2 = 0,0055$  м;  $z_1 = 0$  м;  $z_2 = 0,001$  м. Тепловая мощность кристалла увеличивается от нуля во время  $\tau = 0$  и достигнет максимального значения (0,1 Вт) через 100 с. Габаритные размеры кристалла:  $0,001 \times 0,001 \times 0,001$  м. Материал кристалла – кремний. Начальная температура подложки  $T_0 = 20$  °C. Температура окружающей среды  $T_{\text{ср}} = 20$  °C. На поверхностях подложки заданы граничные условия 3 рода с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $\alpha_k = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).


Решение.






Находясь в надстройке SolidWorks Simulation нажмем на графическую кнопку  *Новое исследование*. В появившейся панели *Исследование* дадим в поле *Имя* наименование новому исследованию – *Температурная зависимость коэффициентов*. В группе *Simulation – расширенные параметры* нажмем на графическую кнопку  *Термическая*. Закроем панель *Исследование* с помощью кнопки  *ОК*. В дереве исследования *Simulation* нажмем правой клавишей мыши на заголовок анализа  *Температурная зависимость коэффициентов*. В появившемся



контекстном меню выберем пункт *Свойства*. В диалоговом окне *Термическая* на вкладке *Параметры* в группе *Тип решения* выберем вариант *Переходный процесс*. Установим ниже параметры: *Общее время 100 с* и *Временной инкремент 10 с*. Закроем диалоговое окно *Термическая* с помощью кнопки *ОК*.

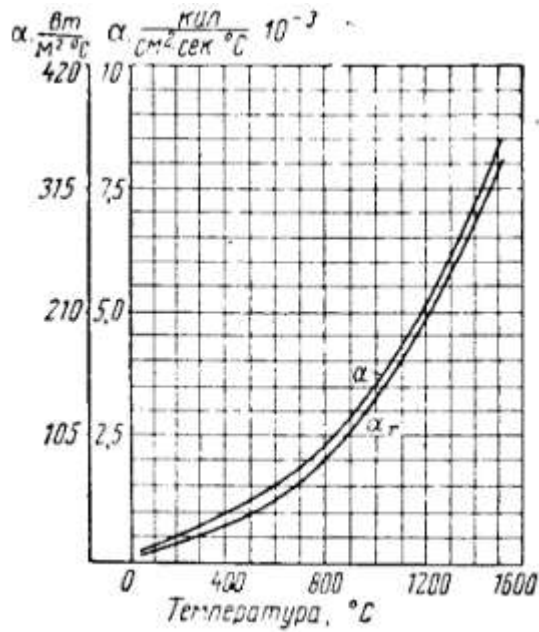
Перейдем на вкладку предыдущего исследования *Нестационарный режим*. Выберем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* группу *Детали*. Используя прием перемещения с помощи мыши, скопируем группу *Детали* путем перетаскивания ее на заголовок вкладки *Температурная зависимость коэффициентов*. При этом в дереве конструирования нового исследования появятся детали сборки из предыдущего исследования *Подложка* и *Кристалл*.

Перейдем на вкладку предыдущего исследования *Нестационарный режим*. Выберем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* группу *Термические нагрузки*. Используя прием перемещения с помощи мыши, скопируем группу *Термические нагрузки* путем перетаскивания ее на заголовок вкладки *Температурная зависимость коэффициентов*. При этом в дереве конструирования нового исследования появятся разделы *Температура*, *Тепловой поток* и *Конвекция* из предыдущего исследования.

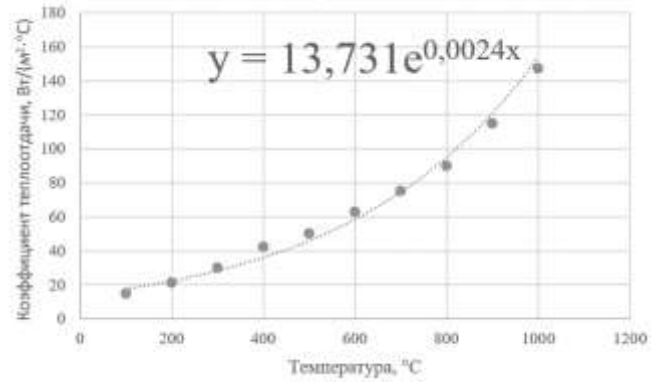
Выберем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* пункт  *Конвекция*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию  *Редактировать определение*. В появившемся менеджере свойств  *PropertyManager* в группе *Коэффициент конвективной теплоотдачи* нажмем графическую кнопку  *Использовать кривую температуры*, затем кнопку *Изменить*. Воспользуемся температурной зависимостью коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  из [123]. В этом источнике приведена зависимость коэффициента полной теплоотдачи в зависимости от температуры при условии вертикальности плоских листов, коэффициенте черноты  $\varepsilon = 0,9$  и спокойном воздухе (рисунок 4.16, а). Проведем аппроксимацию экспериментальной зависимости  $\alpha = f(T)$  в диапазоне от 100 до 1000 °С (рисунок 4.16, б). С помощью найденной аппроксимирующей функции  $y = 13,371e^{0,0024x}$  вычислим табулированные значения в диапазоне от 10 до 100 °С (таблица 4.2, второй столбец). В третий столбец таблицы запишем нормированные значения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{НОРМ}} = \frac{\alpha_0}{\alpha(T)},$$

где  $\alpha_0 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  – номинальное значение коэффициента теплоотдачи;  $\alpha(T)$  – значение коэффициента теплоотдачи при температуре  $T$ .



а)



б)

Рисунок 4.16 – Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи

Таблица 4.2 – Табулированные значения коэффициента теплоотдачи

Температура, °C	Коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$	Нормированный коэффициент теплоотдачи
10	14,06	0,94
20	14,41	0,96
30	14,76	0,98
40	15,11	1,01
50	15,48	1,03
60	15,86	1,06
70	16,24	1,08
80	16,64	1,11
90	17,04	1,14
100	17,46	1,16

В диалоговом окне *Кривая температуры* в группе *Данные кривой* из выпадающего списка *Един* выберем *Celsius*. Последовательно заполним столбцы *X* и *Y* числовыми значениями из таблицы 4.2, где *X* соответствует температуре, а *Y* соответствует нормированному коэффициенту теплоотдачи из третьего столбца. Новая строка в таблице появляется путем двойного щелчка на предыдущем номере строки. После ввода всех значений нажмем на кнопку *Сохранить кривую*. В стандартном диалоговом окне операционной системы Windows выберем путь для сохранения

и дадим имя файлу с данными кривой *alfa\_temp*. Нормированный вид функциональной зависимости  $\alpha_{\text{НОРМ}}(T)$  можно проконтролировать путем нажатия на кнопку *Вид* (рисунок 4.17, а). Закроем диалоговое окно *Кривая температуры* с помощью кнопки *ОК*. Функциональную зависимость в абсолютных единицах  $\alpha(T)$  можно проконтролировать путем нажатия на кнопку *График* в менеджере свойств (рисунок 4.17, б). Закроем менеджер свойств с помощью кнопки  *ОК*.

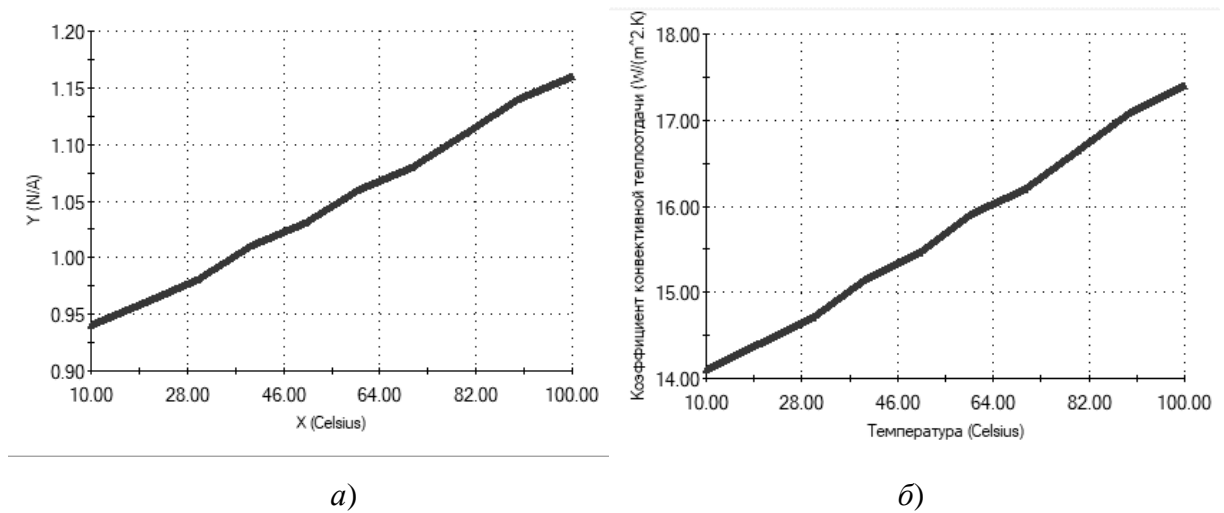


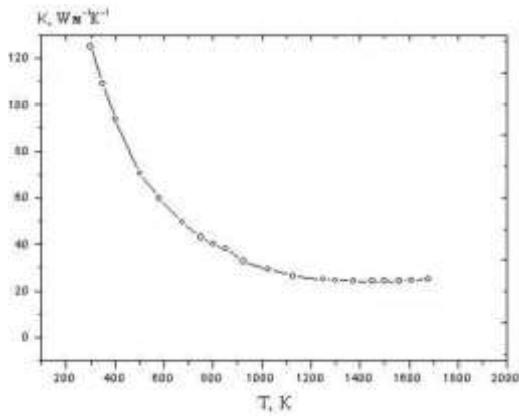


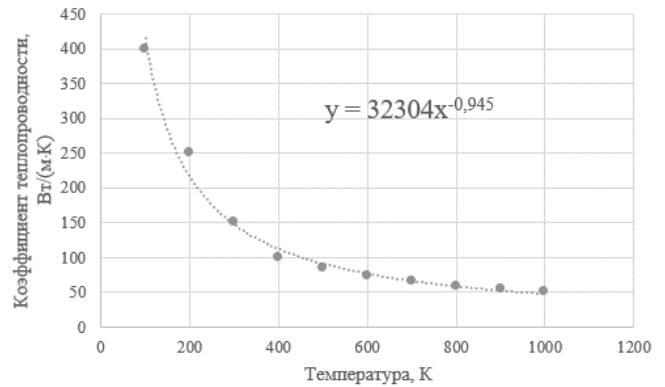
Рисунок 4.17 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры, назначенная в SolidWorks Simulation

Раскроем в дереве конструирования  *FeatureManager* в разделе *Simulation* пункт 

*Детали* и выберем любую из деталей сборки, например  *Кристалл*. Правой клавишей мыши на выбранной детали выберем в контекстном меню позицию  *Применить/редактировать материал*. В диалоговом окне *Материал* убедимся, что в левой части окна выбран ранее присвоенный кристаллу (см. задачу №3) материал *Кремний*. В правой части диалогового окна перейдем на вкладку *Таблицы и кривые*. Воспользуемся температурной зависимостью коэффициента теплопроводности кремния  $\lambda$  из [124]. В этом источнике приведена искомая зависимость для поликристаллических образцов (рисунок 4.18, а). Проведем аппроксимацию экспериментальной зависимости  $\lambda = f(T)$  в диапазоне от 300 до 1000 К (рисунок 4.18, б). С помощью найденной аппроксимирующей функции  $y = 32304x^{-0,945}$  вычислим табулированные значения в диапазоне от 10 до 100 °С (таблица 4.3).



а)



б)

Рисунок 4.18 – Температурная зависимость коэффициента теплопроводности кремния

Таблица 4.3 – Табулированные значения коэффициента теплопроводности кремния

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
10	161,10
20	155,71
30	150,68
40	145,98
50	141,57
60	137,42
70	133,52
80	129,84
90	123,07
100	119,95

В диалоговом окне *Материал* в группе *Тип* из выпадающего списка выберем интересующий нас параметр – *Теплопроводность в X в сравнении с температурой*. В группе *Данные таблицы* из выпадающего списка *Единицы измерения* выберем *°С*. Убедимся, что в соседнем выпадающем списке присутствует единица измерения *Вт/(м·К)*. Последовательно заполним столбцы *A* и *B* числовыми значениями из таблицы 4.3, где *A* соответствует температуре, а *B* соответствует коэффициенту теплопроводности при данной температуре. Новая строка в таблице появляется путем двойного щелчка на предыдущем номере строки. После ввода всех значений нажмем на кнопку *Сохранить*. В стандартном диалоговом окне операционной системы Windows выберем путь для сохранения и дадим имя файлу с данными кривой *lambda\_temp*. Функциональную зависимость  $\lambda(T)$  можно проконтролировать путем нажатия на кнопку *Вид* (рисунок 4.19). Завершим работу с диалоговым окном *Материал* с помощью кнопок *Применить* и *Заккрыть*.

### Теплопроводность в X в сравнении с температурой

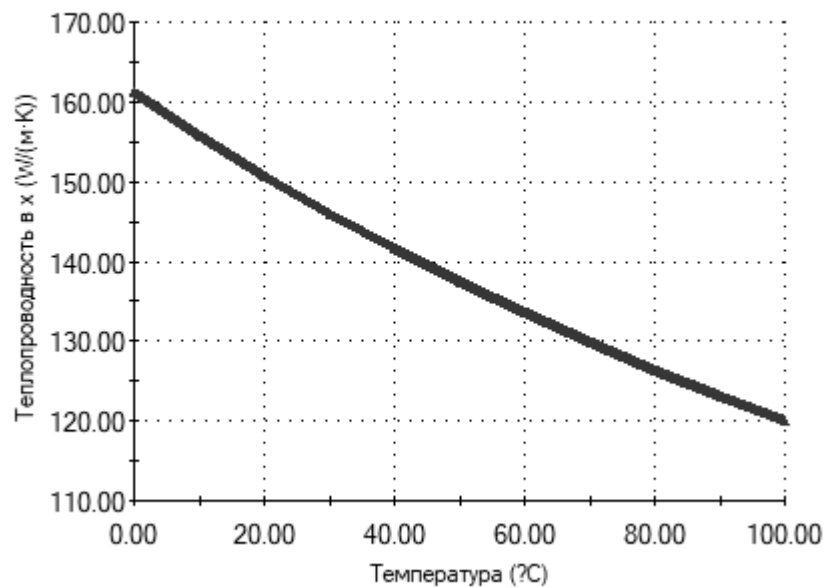



Рисунок 4.19 – Температурная зависимость коэффициента теплопроводности кремния, назначенная в SolidWorks Simulation

Поскольку вторая деталь сборки – подложка – тоже изготовлена из кремния, то температурная зависимость коэффициента теплопроводности этого материала автоматически распространяется на все детали сборки (кристалл и подложка).

В дереве исследования *Simulation* нажмем дважды пункт *Термический* раздела *Результаты*. В появившемся менеджере свойств *PropertyManager* на вкладке *Определение* в группе *Отображение* выберем в строке *Единицы* значение *Celsius*. В группе *Шаг эюры* в строке *Шаг эюры* укажем пятый временный слой *10*. При этом в строке ввода *Время* автоматически изменится момент времени на *100* с. Закроем менеджер свойств с помощью кнопки *ОК*. В результате в основном окне построения сборки отобразится температурное поле конструкции в виде термограммы в момент времени 100 с (рисунок 4.20, а). Об этом свидетельствует служебная надпись в верхней части основного окна построения сборки *Временной шаг: 10; Время: 100 секунд*.

Раскроем в дереве конструирования пункт *Результаты* и выберем пункт *Термический*. Правой клавишей мыши на выбранном пункте выберем в контекстном меню позицию *Зондирование*. В появившемся менеджере свойств *PropertyManager* в группе *Параметры* установим вариант *В местоположении*. В основном окне построения сборки щелчком мыши укажем точку, соответствующую центру для поверхности, обращенной к наблюдателю.

При этом в менеджере свойств в группе *Результаты* для момента времени  $t = 50$  с появится числовое значение температуры (**35,7 °C**) выбранной точки с указанием номера узла (№41) пространственной сетки и геометрических координат (5; -5; 1 мм). В группе *Параметры отчета* нажмем на графическую кнопку  *Реакция*. В результате на экране появится график в декартовой системе координат – зависимость температуры выбранного пространственного узла от времени (рисунок 4.20, б). Таким образом, разница в значениях температур для одного и того же пространственного узла № 41 в задачах № 4 и №5 составляет  $\Delta T = 0,2$  °C. Разница обусловлена введением в задаче №5 температурных зависимостей коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности для материалов сборки.

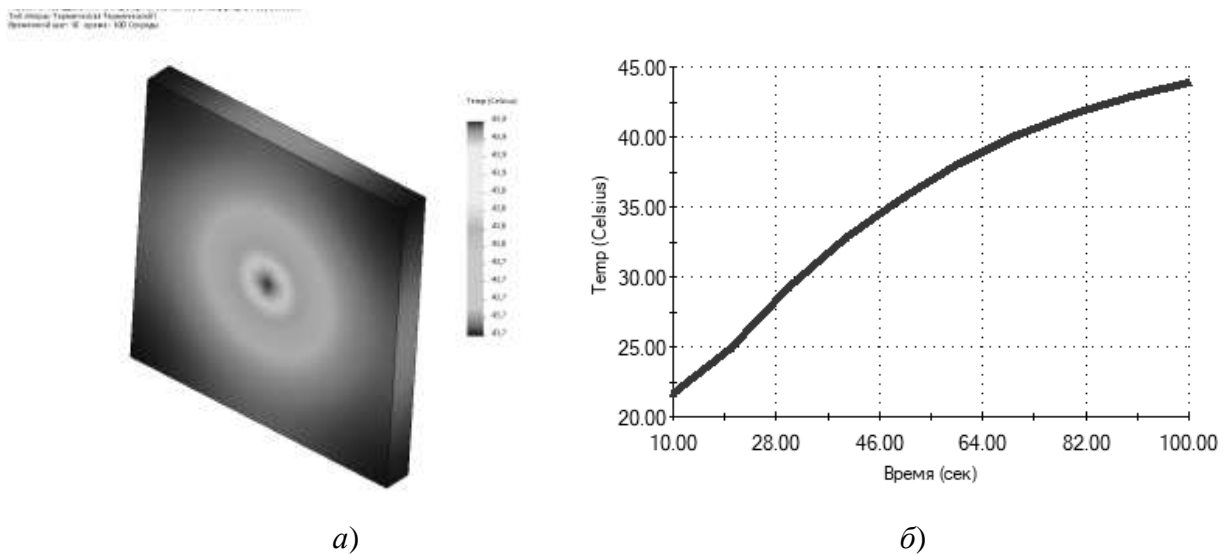


Рисунок 4.20 – Результаты расчета температурного поля в нестационарном режиме с температурной зависимостью коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности

#### 4.5 Оценка погрешности расчета температурного поля

Для оценки погрешности расчета температурного поля воспользуемся решением тестовой задачи тремя способами:

1. Аналитический способ.
2. Численный способ с помощью программного комплекса MathCAD.
3. Численный способ с помощью программного комплекса SolidWorks.

В качестве тестовой задачи воспользуемся задачей № 26 из источника [125]. Условие задачи:

Начальная температура одинакова. Около одной поверхности задана постоянная температура среды, на другой поверхности тепловой поток равен нулю (рисунок 4.21). Коэффициент температуропроводности твердого тела  $a = 5,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; длина тела  $l = 0,05 \text{ м}$ ; начальная температура тела  $T_0 = 200 \text{ К}$ ; температура окружающей среды  $T_{\text{CP}} = 400 \text{ К}$ .

Требуется определить температуру поверхностей.

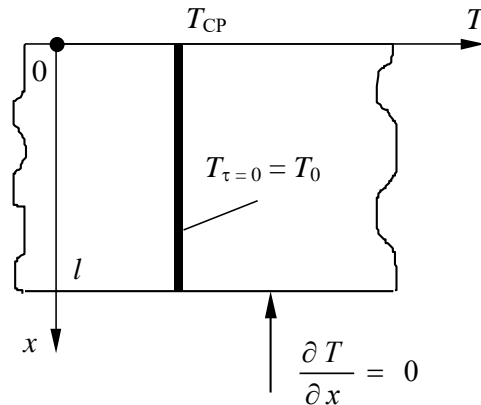


Рисунок 4.21 – Тепловая схема тестовой задачи

Аналитический способ.

Аналитический способ заключается в определении температур поверхностей с использованием расчетных графиков (номограмм).

Начальное условие:

$$T|_{\tau=0} = T_0.$$

Граничные условия:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha(T_{\text{CP}} - T_{x=0}); \quad T_{\text{CP}} = \text{const}; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0.$$

Аргументы:

1. Критерий Фурье:

$$Fo \equiv \frac{a\tau}{l^2}, \quad (4.59)$$

где  $\tau$  – время.

2. Критерий Био:

$$Bi \equiv \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (4.60)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

3. Относительная безразмерная пространственная координата:

$$\eta \equiv \frac{x}{l},$$

где  $x$  – текущая пространственная координата, м.

Расчетная формула для определения температуры на поверхностях тела из [125]:

$$T = T_0 + \theta(T_{\text{CP}} - T_0), \quad (4.61)$$

где  $\theta$  – относительная безразмерная температура.

**Определим температуры поверхности при  $\eta = 0$ .** На графике, представленном на рисунке 4.22 из [125], произвольно выберем одну из функций безразмерной температуры и соответствующий ей аргумент – критерий Фурье. Выбираем функцию безразмерной температуры со значением критерия  $Bi = 2$  и аргумент – критерий Фурье  $Fo = 0,3$ . При этом значение функции безразмерной температуры равно  $\theta = 0,6$ .

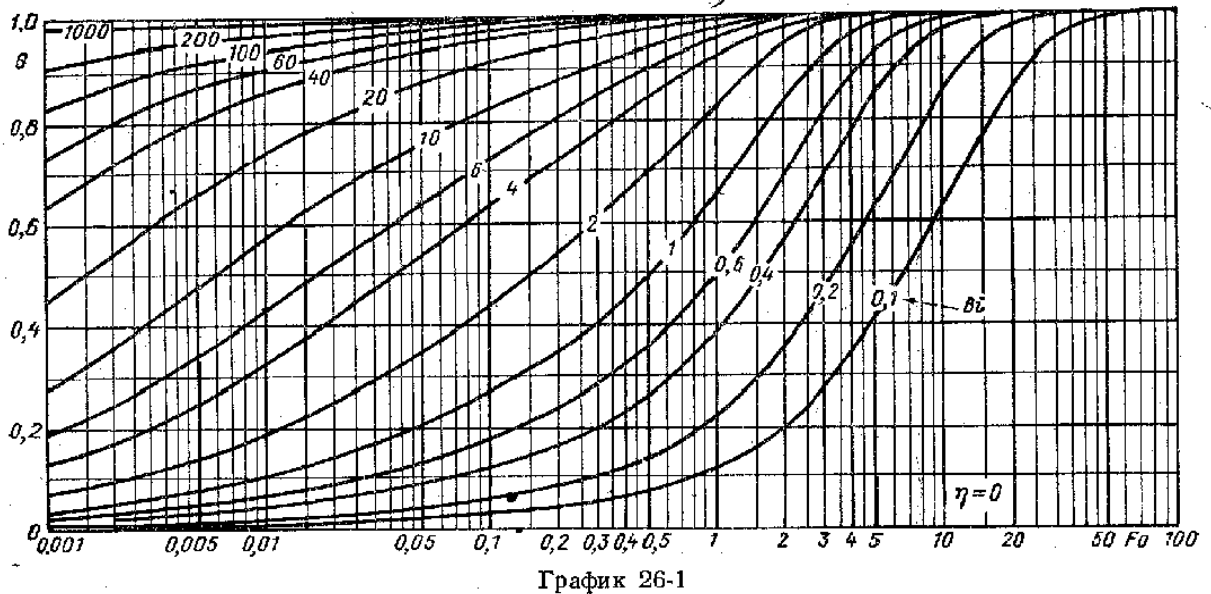


Рисунок 4.22 – Номограмма определения температуры поверхности при  $\eta = 0$

Из (4.59) найдем время, необходимое для достижения искомой температуры поверхности при  $\eta = 0$ :

$$\tau = \frac{Fo \cdot l^2}{a} = \frac{0,3 \cdot 0,05^2}{5,72 \cdot 10^{-6}} = 131 \text{ с.}$$

Из (4.60) найдем коэффициент теплоотдачи для критерия Био  $Bi = 2$ :

$$\alpha = \frac{Bi \cdot \lambda}{l} = \frac{2 \cdot 20}{0,05} = 800 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

По формуле (4.61) определим температуру на поверхности при  $\eta = 0$ :

$$T = 200 + 0,6 \cdot (400 - 200) = 320 \text{ К.}$$



Определим температуры поверхности при  $\eta = 1$ . На графике, представленном на рисунке 4.23 из [125], выбираем аналогичные значения функции безразмерной температуры и соответствующего ей аргумента:  $Bi = 2$  и  $Fo = 0,3$ . При этом значение функции безразмерной температуры равно  $\theta = 0,18$ .

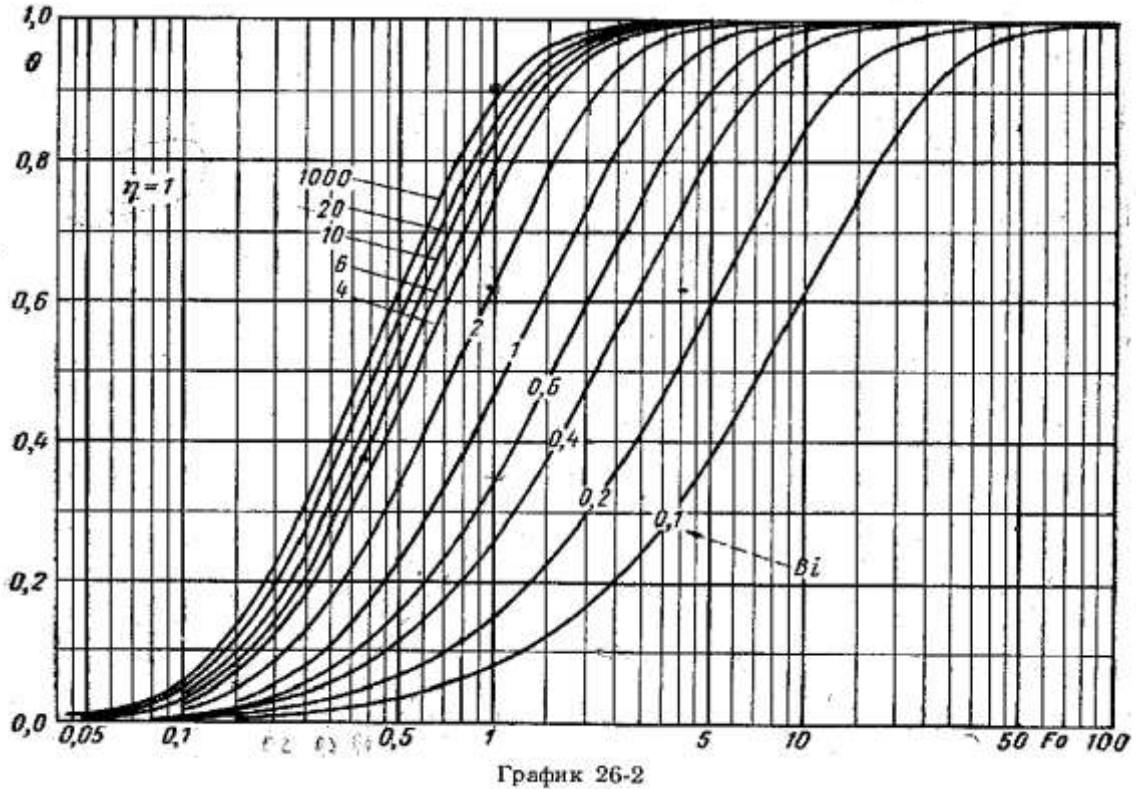


Рисунок 4.23 – Номограмма определения температуры поверхности при  $\eta = 1$

По формуле (4.61) определим температуру на поверхности при  $\eta = 1$ :

$$T = 200 + 0,18 \cdot (400 - 200) = 236 \text{ К.}$$

Численный способ в программном комплексе MathCAD.

Применим для решения тестовой задачи в MathCAD программный блок по методу правой прогонки, рассмотренный нами ранее (рисунок 4.7). Предварительно зададим исходные данные:

- количество узлов пространственной сетки  $N = 100$ ;
- коэффициент теплопроводности  $a = 5,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- шаг временной сетки  $\Delta\tau = 1 \text{ с}$ ;
- начальная температура тела  $T_0 = 200 \text{ К}$ ;
- температура окружающей среды на левой границе пространственной сетки  $T_{\text{SR.LEFT}} = 400$

К;

- температура окружающей среды на правой границе пространственной сетки  $T_{SR,RIGHT} = 200$  К;

- коэффициент теплоотдачи на левой границе пространственной сетки  $\alpha_{LEFT} = 800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

- коэффициент теплоотдачи на правой границе пространственной сетки  $\alpha_{RIGHT} = 0$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

- длина тела  $l_x = 0,05$  м;

- конечное время  $\tau_{фин} = 131$  с.

Еще три параметра вычислим до программного блока:

- шаг пространственной сетки  $\chi_x = \frac{l_x}{N-1} = 5,051 \cdot 10^{-4}$  м;

- критерий Био для левой границы пространственной сетки  $Bi_{LEFT} = \frac{\alpha_{LEFT} \cdot \chi_x}{\lambda} = 0,02$ ;

- критерий Био для правой границы пространственной сетки  $Bi_{RIGHT} = \frac{\alpha_{RIGHT} \cdot \chi_x}{\lambda} = 0$ .

Результаты численного решения тестовой задачи представлены в виде температурного профиля вдоль координат  $x$  в момент времени  $\tau = 131$  с (рисунок 4.24). Определим в MathCAD значения температур на поверхностях твердого тела (температуры узлов №1 и №100):

$$T_{№1} = 320,7 \text{ К};$$

$$T_{№100} = 234,583 \text{ К}.$$

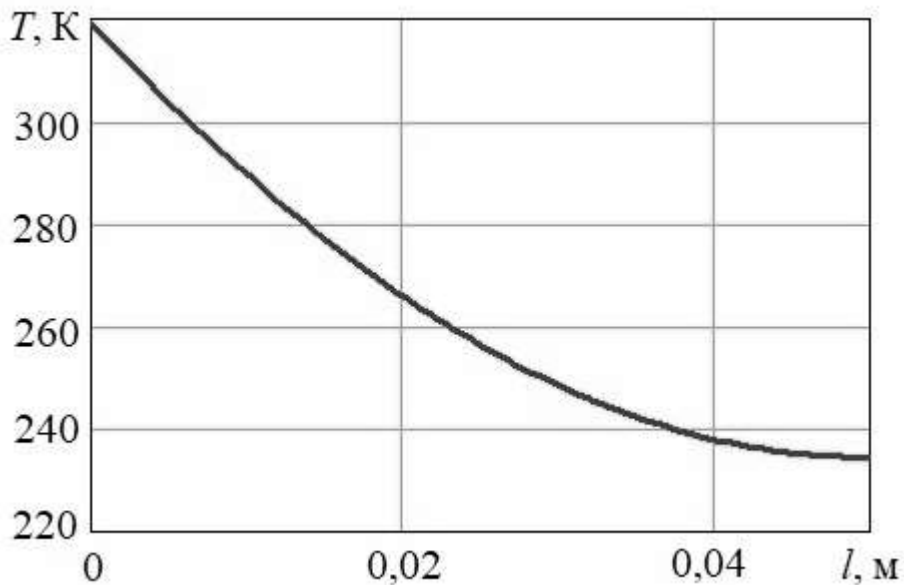


Рисунок 4.24 – Результаты решения тестовой задачи в MathCAD

Проведем вычисление тестовой задачи в MathCAD для более мелкой пространственной сетки дискретизации (при  $N = 500$  и при  $N = 1000$ ). В результате имеем температуры на поверхности твердого тела для  $N = 500$ :

$$T_{\text{№1}} = 320,494 \text{ К};$$

$$T_{\text{№500}} = 234,744 \text{ К};$$

для  $N = 1000$ :

$$T_{\text{№1}} = 320,468 \text{ К};$$

$$T_{\text{№1000}} = 234,765 \text{ К}.$$

Численный способ в программном комплексе SolidWorks.

Применим для решения тестовой задачи в программном комплексе SolidWorks ранее рассмотренную методику решения задач для нестационарного теплового режима (см. п. 4.4, задача №4).

Твердое тело для тестовой задачи представляет собой стержень размером  $0,05 \times 0,001 \times 0,001$  м (рисунок 4.25). Такие пропорции позволяют нам считать твердое тело условно одномерное, т.к.  $l_x \gg l_y; l_x \gg l_z$ . Принято, что помимо коэффициента теплопроводности  $\lambda = 20$  Вт/(м·К), заданы также плотность  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплоемкости  $c = 1748$

Дж/(кг·К), так чтобы  $a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{20}{1748 \cdot 2000} = 5,72 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Важное замечание: для дальнейшего корректного решения тестовой задачи необходимо представить твердое тело (рисунок 4.24) в среде SolidWorks как сборку, а не как деталь. В противном случае будет невозможно назначить правильное значение начальной температуры всему массиву твердого тела.

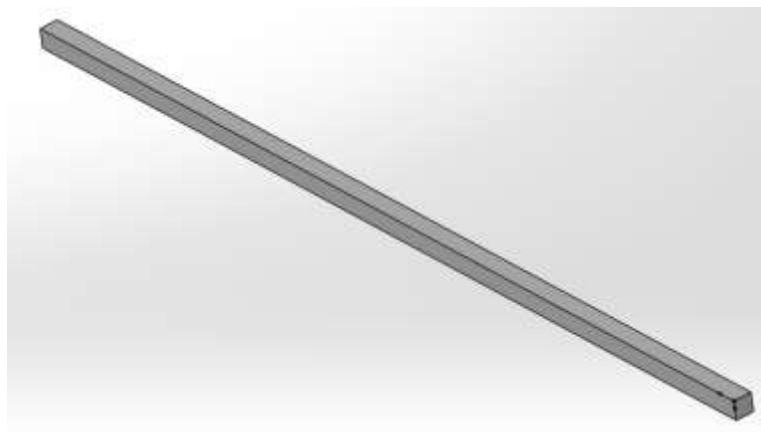


Рисунок 4.25 – Условно одномерное твердое тело для тестовой задачи

Находясь в надстройке SolidWorks Simulation начнем новое термическое исследование под названием *Тестовая задача*. Зададим тип решения *Переходной процесс*, общее время *131 с* и временной инкремент *10 с*.

В менеджере свойств зададим начальную температуру для твердого тела в *200 К*. В менеджере свойств зададим для правой торцевой грани коэффициент конвективной теплоотдачи *800 Вт/(м<sup>2</sup>·К)*. Все остальные грани твердого тела по умолчанию остаются теплоизолированными ( $\alpha = 0$ ). Здесь же зададим температуру окружающей среды в *400 К*.

В менеджере свойств зададим параметры сетки пространственной дискретизации. Пусть ползунок плотности сетки будет в среднем положении, что в числовом выражении дает глобальный размер конечного элемента *0,41 мм*. В результате запуска решения задачи в основном окне построения сборки отобразится температурное поле конструкции в виде термограммы в момент времени *131 с* (рисунок 4.26, а). С помощью инструмента *Зондирование* щелкнем в 10 точках вдоль длины твердого тела, причем первая и десятая точки соответствуют правому и левому торцу твердого тела, соответственно. В результате на экране появится график температурного профиля – зависимость температуры от пространственной координаты *x* (рисунок 4.26, б).

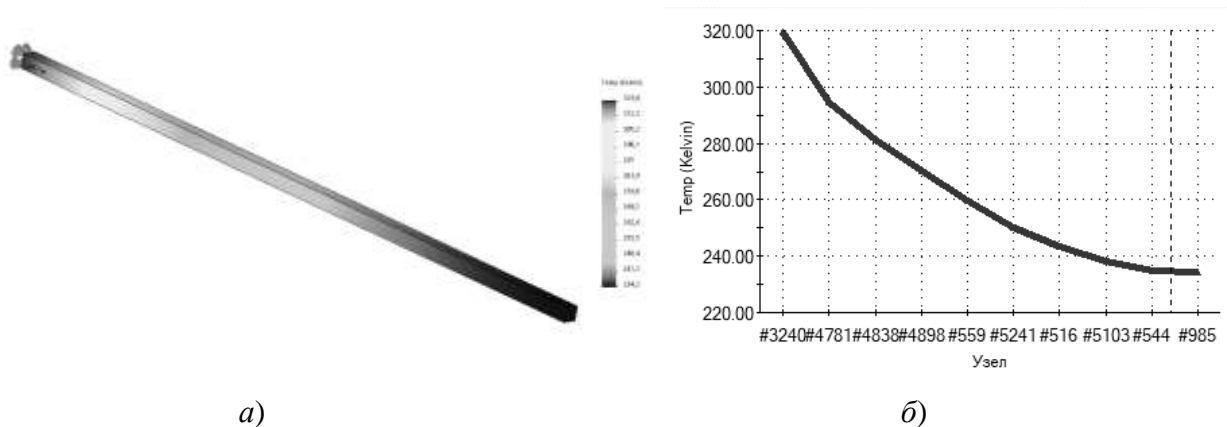


Рисунок 4.26 – Результаты решения тестовой задачи в среде SolidWorks Simulation

Определим в SolidWorks Simulation точные значения температур на поверхностях твердого тела (температуры узлов №3240 и №985):

$$T_{\text{№3240}} = 319,4 \text{ К};$$

$$T_{\text{№985}} = 234,2 \text{ К}.$$

Проведем вычисление тестовой задачи в SolidWorks Simulation для других значений пространственной сетки дискретизации (глобальный размер конечного элемента  $\Delta = 0,74$  мм и  $\Delta = 0,18$  мм). Эти значения соответствуют крайним положениям ползунка плотности сетки. В результате имеем температуры на торцах твердого тела для  $\Delta = 0,74$  мм:

$$T_{\text{№932}} = 319,4 \text{ К};$$

$$T_{\text{№599}} = 234,2 \text{ К};$$

для  $\Delta = 0,18 \text{ мм}$ :

$$T_{\text{№42627}} = 319,4 \text{ К};$$

$$T_{\text{№42738}} = 234,2 \text{ К}.$$

Для удобства результаты всех рассмотренных выше способов решения тестовой задачи сведены в таблицу 4.4. Можно видеть, что в среде MathCAD понижение шага дискретизации пространственной сетки в 10 раз приводит к уменьшению относительной погрешности нахождения температуры на 0,04...0,1 %. Вариация размеров конечного элемента в среде SolidWorks дает стабильные результаты нахождения температуры. Так, уменьшение размеров конечного элемента в 4 раза не приводит к сколько-нибудь заметным изменениям в результатах нахождения температуры поверхностей. Численные способы решения тестовой задачи в средах MathCAD и SolidWorks дают относительную погрешность нахождения температуры в диапазоне от 0,5 до 0,8 %.

Таблица 4.4 – Результаты решения тестовой задачи

№ п/п	Способ решения	Шаг пространственной сетки дискретизации, мм	Температура левой поверхности, К	Относительная погрешность, %	Температура правой поверхности, К	Относительная погрешность, %
1	Аналитический	---	320	---	236	---
2	Численный в среде MathCAD	0,5	320,7	0,2	234,6	0,6
		0,1	320,5	0,16	234,7	0,55
		0,05	320,5	0,16	234,8	0,5
3	Численный в среде SolidWorks	0,74	319,4	0,2	234,2	0,8
		0,41	319,4	0,2	234,2	0,8
		0,18	319,4	0,2	234,2	0,8

#### 4.6 Основные результаты исследования

1. Разработаны методика, практическая пригодная для нахождения значений абсолютных и относительных рабочих температур конструкций ЭС в уравнении температурной погрешности (2.18), (2.23), (2.24).

2. Показано, что аналитический способ решения уравнения теплопроводности (4.1) для решения современных задач теплопроводности в двух- и трехмерной постановке в нестационарном режиме является чрезвычайно сложной задачей, решение которой практически невозможно представить в обозримом виде.

3. Доказано, что эффективным способом решения уравнения теплопроводности (4.1) в различных постановках и в различных режимах являются численные методы, реализуемые с помощью современных программных комплексов, таких как MathCAD и SolidWorks.

4. Показано, что современные программные средства 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 %.

5. Разработаны программные блоки по решению уравнения теплопроводности в одно-, двух- и трехмерной постановке в среде MathCAD, которые целесообразно применять для случаев конструкций ЭС в форме параллелепипедов. Разработан программный блок по решению уравнения теплопроводности в трехмерной постановке в среде SolidWorks для случаев конструкций ЭС сложной криволинейной формы.

В главе 4 показано, что уравнение теплопроводности в постановках различной геометрической размерности, отличающееся численными методами решения, реализованными в современных САЕ-системах, позволяет находить значения температурного поля в произвольных точках несущей конструкции электронных средств 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.

## ГЛАВА 5. МИНИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ

Цель данной главы – исследование эффекта анизотропности теплового поля несущих конструкций, обладающих значительными собственными тепловыделениями, на температурную стабильность выходных параметров электронных средств.

### 5.1 Несущие конструкции электронных средств

Современные электронные средства с позиций системного анализа подразделяются на 3 иерархических уровня [126]: элементная база (I уровень); частные конструкции (II уровень); законченные конструкции (III уровень). Второй иерархический уровень объединяет частные конструкции, которые не имеют самостоятельного применения, так как и схемотехнически, и конструктивно являются частями третьего, более высокого уровня законченных конструкций ЭС. Наиболее распространенным случаем частных конструкций II уровня является печатный узел. Согласно ГОСТ Р 53386-2009 [127] печатная плата – это изделие, состоящее из одного или двух проводящих рисунков, расположенных на поверхности основания, или из системы проводящих рисунков, расположенных в объеме и на поверхности основания, соединенных между собой в соответствии с электрической схемой печатного узла, предназначенное для электрического соединения и механического крепления устанавливаемых на нем изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий.

Существующее многообразие частных конструкций II уровня конструкторской иерархии ЭС, а именно печатных плат, регламентируется нормативно-технической документацией (рисунок 5.1).

Центральным компонентом приведенной на рисунке 5.1 структуры есть технические требования к печатным платам. Все остальные элементы подчинены центральному компоненту, т.е. техническим требованиям. Печатные платы в зависимости от классификационных признаков можно подразделять по:

- по размерам и допускам (ГОСТ Р 51040-97, ГОСТ 11284-75, ГОСТ 9.301-86, ГОСТ Р 25347-2013);
- по основным параметрам конструкции (ГОСТ Р 53249-2009);
- по базовым материалам для печатных плат (ГОСТ 10316-78, ГОСТ 26246.1-89...ГОСТ 26246.14-89);

- по технологическим требованиям к производству (ГОСТ Р 53432-2009, ГОСТ Р ИСО 9001-2015);
- по требованиям к применяемой паяльной маске (ГОСТ Р 54849-2011).

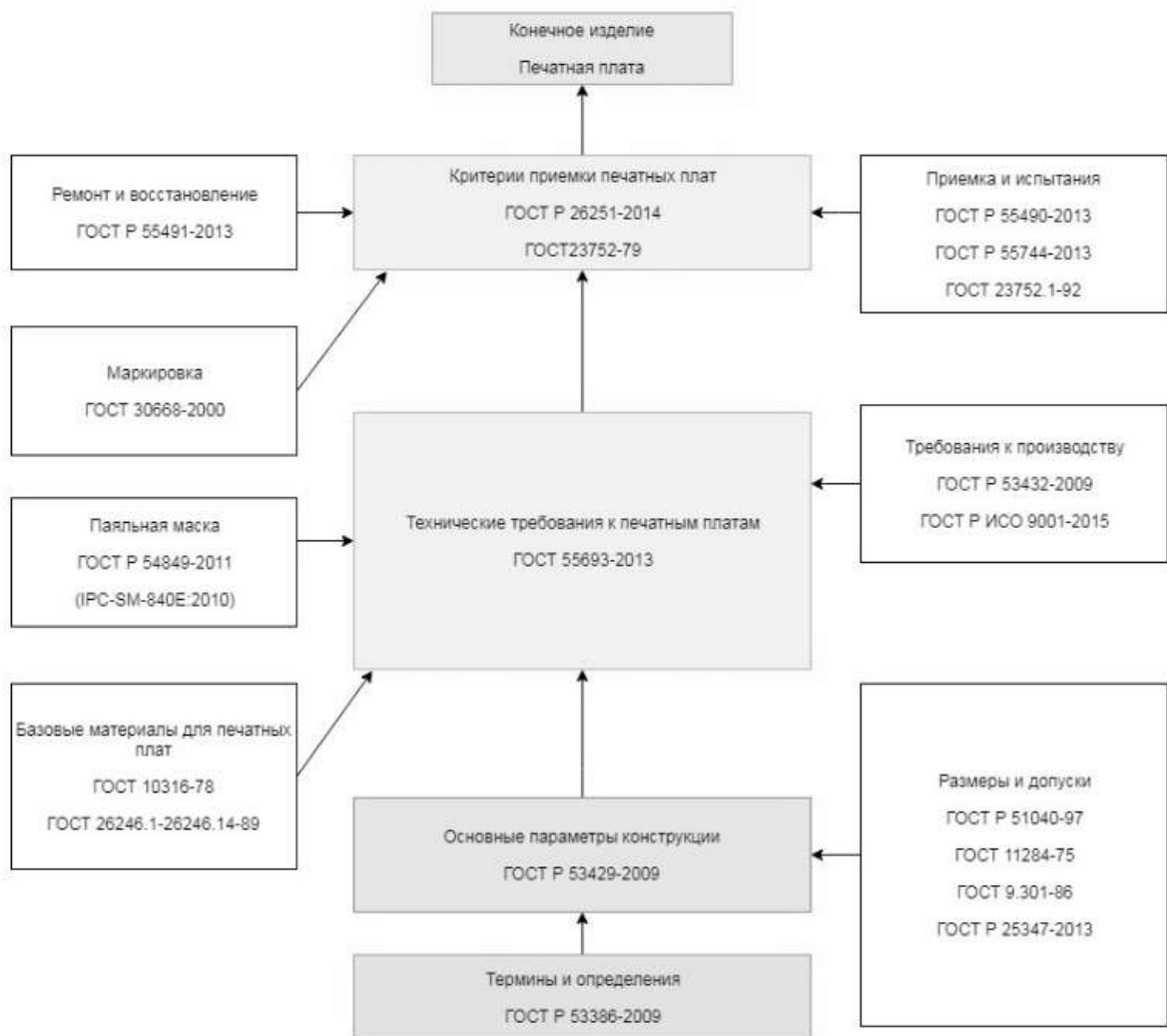


Рисунок 5.1 – Нормативно-техническая документация II уровня конструкторской иерархии ЭС

Тенденция к микроминиатюризации ЭС привела к выделению в отдельную отрасль микроэлектроники раздела электроники, связанного с изучением и производством электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов порядка нескольких микрометров и меньше. Несмотря на значительно меньшие характерные размеры, применяемые в микроэлектронике, по-прежнему сохраняется смысл применения несущей конструкции для монтажа и соединения элементов микроэлектронной структуры. Для современной микроэлектроники наиболее распространены два вида несущих конструкций: подложка интегральной микросхемы



и кристалл интегральной схемы. Согласно ГОСТ 17021-88 [128], подложка интегральной микросхемы – это заготовка из диэлектрического материала, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных интегральных микросхем, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок. Там же [128] дается определение кристалла интегральной микросхемы – это часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности, которой сформированы элементы полупроводниковой интегральной микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки.

В работах современных авторов понятие «подложка интегральной схемы» трактуется шире и объединяет приведенные два выше частных определения. Так в [129] говорится, что подложка интегральной схемы – это несущая часть интегральной схемы, *на* или *в* которой формируются слои, элементы и компоненты интегральной схемы. Исходя из этого определения подложки интегральных схем первично подразделяются в зависимости от материала изготовления на три категории (рисунок 5.2): полупроводниковые, диэлектрические монокристаллические и диэлектрические поликристаллические. Затем происходит подчиненная классификация по технологии изготовления: подложки для полупроводниковых ИС и подложки для гибридно-пленочных ИС.



Рисунок 5.2 – Классификация подложек интегральных схем

Проблема обеспечения заданной температурной стабильности, рассматриваемая в настоящей работе, неразрывно связана с расчетом температурного поля несущих конструкций ЭС. В главе 4 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 (рисунок 5.3):

- условно одномерные (рисунок 5.3, а);
- условно двухмерные (рисунок 5.3, б);
- трехмерные (рисунок 5.3, в).

Приведенная классификация предполагает следующие определения. *Условное одномерные* несущие конструкции (УОНК) – несущие конструкции, в которых один из габаритных показателей на порядок и более превышает два других показателя. Типичный представитель УОНК – подложка светодиодного филамента в светодиодных лампах и светильниках [130]. *Условно двумерные* несущие конструкции (УДНК) – это несущие конструкции, в которых два габаритных показателя на порядок и более превышают третий показатель. Типичный представитель УДНК – двухсторонняя печатная плата для электрического и механического соединения различных электронных компонентов [131]. *Трехмерные* несущие конструкции (ТНК) – это несущие конструкции, в которых габаритные показатели имеют размерность одного порядка. Представитель ТНК – стек объемных интегральных микросхем [132].

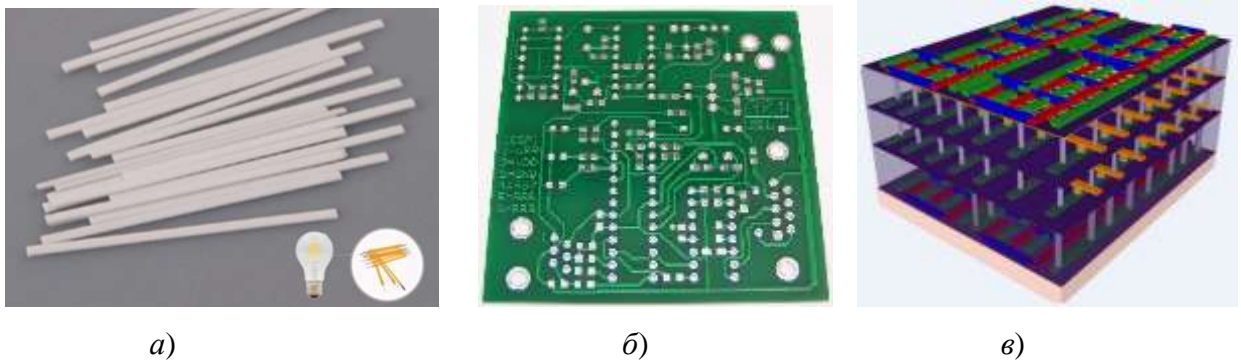


Рисунок 5.3 – Классификация несущих конструкций ЭС с позиций исследования анизотропности их теплового поля

## 5.2 Методики и эвристические алгоритмы метода топологической термокомпенсации

Одним из перспективных вариантов реализации светодиодных линейных модулей в filamentных 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. В свою очередь, температурный градиент обуславливает эффект возникновения различных рабочих температур светодиодных кристаллов в зависимости от линейных координат [133].

В работах отечественных и зарубежных исследователей показано, что различные рабочие температуры светодиодных кристаллов оказывают непосредственное влияние на стабильность

световых характеристик. Так в [134] установлено влияние температуры полупроводникового источника света на цветовую температуру его излучения. Зависимость светового потока от температуры кристалла без люминофора выражается формулой [135]:

$$I(T) = I(300K) \exp\left(\frac{T-300}{T_c}\right),$$

где  $I(300 K)$  – световой поток при температуре кристалла 300 К;  $T_c$  – характеристическая температура кристалла.

В свою очередь, зависимость выхода излучения из люминофора от температуры характеризуется формулой Мотта [136]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)},$$

где  $A$  – константа тушения;  $E_a$  – кажущаяся энергия активации тушения люминесценции;  $\eta_0$  – квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

В итоге, температурная зависимость светового потока для сборочной единицы (кристалл и люминофор) будет выглядеть как [134]:

$$I(T) \approx I(300K) \exp\left(\frac{T-300}{T_c}\right) \times \left[ \exp(-\mu d) \times \exp(-\nu d) \left( \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \right) \right],$$

где  $\mu$  – коэффициент рассеяния люминофора;  $d$  – толщина слоя люминофора;  $\nu$  – коэффициент поглощения люминофора.

К настоящему времени экспериментально дана количественная оценка влияния рабочей температуры светодиодных кристаллов на световой выход. Например, в [137] показано, что при типовых температурах  $p$ - $n$ -перехода кристалла в готовой конструкции (+70...+100 °С) световой выход составляет 85–90% от значения при температуре +25 °С.

В связи с вышеизложенным, можно сформулировать следующую задачу. Для увеличения стабильности светотехнических параметров ФСЛ следует стремиться к равенству рабочих температур светодиодных кристаллов. Для выравнивания температурного профиля по длине подложки необходимо найти такое пространственное расположение светодиодных кристаллов, чтобы кривизна линии температурного профиля  $K$  стремилась к минимуму. Тогда задача о плоском температурном профиле сводится к нахождению функции локализации кристаллов на подложке с целью минимизации кривизны  $K$  для характерной точки профиля  $x$ :

$$\left( \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right) = \min. \quad (5.1)$$

Объект исследования представляет собой сборочную единицу (рисунок 5.4), состоящую из подложки 1 и массива светодиодных кристаллов 2. Подложка характеризуется размерами  $l \times k \times m$ . Структура подложки – изотропная. Источниками тепла являются  $N$  светодиодных кристаллов, расположенных на верхней стороне подложки в областях:

$$x_{i1} \leq x_i \leq x_{i2}; y_{i1} \leq y_i \leq y_{i2}; m \leq z_i \leq (m + h_{кр}),$$

где  $x_{i1}, x_{i2}$  – габаритные координаты по оси абсцисс;  $y_{i1}, y_{i2}$  – габаритные координаты по оси ординат;  $h_{кр}$  – высота кристалла.

Условия теплопередачи – конвективный теплообмен. Процесс теплопередачи можно записать в виде уравнения теплопроводности в частных производных [113]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{i=1}^F q_i(x, y), \quad (5.2)$$

где  $c$  – коэффициент теплоемкости;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\tau$  – время;  $q_i$  – тепловой поток  $i$ -ого кристалла.

Для анализа стационарного теплового режима (основной рабочий режим ФСЛ) необходимо решить более простую задачу:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{i=1}^F q_i(x, y) = 0.$$

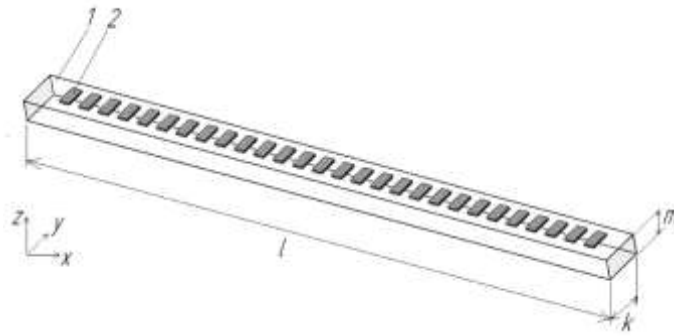


Рисунок 5.4 – Объект исследования

Распределение плотности теплового потока в сборочной единице неравномерно и подчиняется закону [112]:

$$q_i(x_i, y_i) = \begin{cases} \frac{P_i}{(x_{i2} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1})}, \\ 0, \text{вне кристалла,} \end{cases} \quad (5.3)$$

где  $P_i$  – мощность тепловыделения  $i$ -ого кристалла.

На поверхностях подложки действуют граничные условия третьего рода, физический смысл которых заключается в описании процесса теплообмена на поверхности грани с окружающей средой:

$$\left[ \mp \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{x=0,l} ; \left[ \mp \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{y=0,k} ; \left[ \mp \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{z=0,m} ,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $T_{\text{CP}}$  – температура окружающей среды.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией характеризует мощность, которую рассеивает единица поверхности подложки путем конвекции при разности температур между телом и средой в 1 К. Математический образ коэффициента теплоотдачи конвекцией – это функция девяти параметров, влияющих на процесс теплообмена [111]:

$$\alpha = \alpha(T, T_{\text{CP}}, \beta, \lambda_{\text{Г}}, c_{\text{Г}}, \nu, a, g, \Phi),$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения газа;  $\lambda_{\text{Г}}$  – коэффициент теплопроводности газа;  $c_{\text{Г}}$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\Phi$  – символическое обозначение совокупности параметров, характеризующих форму, строение поверхности подложки и ее размеры.

Начальное условие процесса теплопередачи:

$$T|_{\tau=0} = T_0(x, y, z).$$

Обозначим температуру, соответствующую геометрическому центру посадочного места кристалла на подложке как  $\upsilon_i$ , причем как следует из [134 – 137]:

$$\upsilon_1 \neq \upsilon_2 \neq \dots \neq \upsilon_i \neq \dots \neq \upsilon_N.$$

Предположим, что размещение светодиодных кристаллов происходит на одном уровне по координате  $y$ :

$$y_1 = y_2 = \dots = y_i = \dots = y_N.$$

Тогда неизвестная функция (5.1) будет зависеть только от координаты  $x$ :

$$Loc(x_i, y_i) = Loc(x_i, y |_{\text{const}}) = Loc(x_i).$$

Как было отмечено выше, наличие температурного профиля по длине подложки обусловлено конечным значением коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и условиями конвективного теплообмена.

Представим температурный профиль по длине подложки  $\upsilon(x)$  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  $x$  [138]:

$$K = \frac{\left| \frac{d^2\varphi}{dx^2} \right|}{\left( 1 + \left( \frac{d\varphi}{dx} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5.4)$$

Кривизна плоской линии  $K$  – это вторая производная уравнения переходной кривой. Распространенным видом этого уравнения выступает кубическая парабола вида [138]:

$$\varphi(x) = \frac{x^3}{6LR},$$

где  $L$  – общая длина дуги траектории;  $R$  – круговой радиус.

Для отыскания неизвестной функции локализации  $Loc(x_i)$  воспользуемся методом дихотомии [139]. Первый шаг дихотомии – деление длины подложки на две равные части, поскольку температурный профиль для изотропного тела с эквидистантно расположенными источниками тепла имеет симметричный вид. Центральная точка имеет координату

$$x_c = \frac{l}{2},$$

где  $l$  – длина подложки.

Рассмотрим сначала вариант с *четным* количеством кристаллов. Дальнейшие рассуждения будем вести для правой половины подложки. Новое начало координат совпадает с точкой  $x_c$ :

$x'_0 = x_c$ . На отрезке  $[x'_0; l]$  будет располагаться  $N' = \frac{N}{2}$  кристаллов. Пусть для дальнейших шагов коэффициент дихотомии  $Coeff$  будет величиной из диапазона значений  $[1, 1 \dots 2, 0]$ , т.е. от 10 % до 100 %.

Цикличность метода дихотомии (рисунок 5.5) предполагает, что можно составить рекуррентную формулу процесса локализации кристаллов.

Приращение шага для локализации очередного кристалла  $i$  есть величина:

$$h'_i = Coeff \cdot \frac{l - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}.$$

Локализация очередного кристалла  $i$  будет в координате:

$$x_i = x_{i-1} + Coeff \cdot \frac{l - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (5.5)$$

Полученный результат можно охарактеризовать как функцию локализации, зависящую от аргумента  $i$  и от параметра  $Coeff$ :

$$x_i = Loc(i, Coeff),$$

где  $i$  – номер кристалла;  $i \in [2; N']$ ;  $Coeff \in [1, 1 \dots 2, 0]$  – коэффициент дихотомии.



Рисунок 5.5 – Алгоритм процесса дихотомии для случая с четным числом кристаллов

Проведем анализ функции (5.5). Обозначим константы, входящие в (5.5), как:

$$C_1 = x_{i-1}; C_2 = x_i; C_3 = N' + 1.$$

Тогда функция локализации (5.5) может быть представлена в виде:

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

Полученный вид свидетельствует о том, что данная функция принадлежит к классу гипербола вида (рисунок 5.6):

$$Y = A + \frac{B}{C - X}.$$

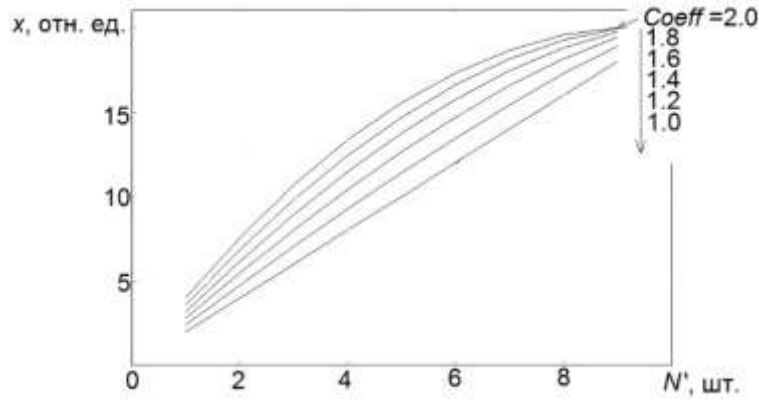


Рисунок 5.6 – Семейство функций локализации

В случае *нечетного* количества кристаллов установочный шаг процесса дихотомии – это фиксация в координате  $x_c$  кристалла с номером  $i = \frac{N+1}{2}$ , т.е. фиксация центрального кристалла на середине подложки. Тогда на отрезке  $[x'_0; l]$  будет располагаться  $N' = \frac{N-1}{2}$  кристаллов. Далее процесс дихотомии происходит по (5.5).

Подставим в количественный критерий (5.4) последовательно полученные функциональные зависимости. По-прежнему рассматриваем только правую половину подложки. После подстановки имеем:

$$K = \frac{\left| \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} \right|}{\left( 1 + \left( \frac{d\phi(x)}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}} = \frac{\left| \frac{d^2\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left( 1 + \left( \frac{d\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{3/2}}. \quad (5.6)$$

Анализ (5.6) позволяет утверждать: существует некоторое значение параметра  $\text{Coeff}$ , при котором для характерной точки  $x$  профиля кривизна  $K \rightarrow \min$ . Отыскание этого значения параметра  $\text{Coeff}$  в общем виде представим так:

$$\frac{\partial K}{\partial \text{Coeff}} = 0. \quad (5.7)$$

Решение (5.7) целесообразно свести к численному дифференцированию функции:



$$\frac{\partial \left| \frac{d^2 \phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left( 1 + \left( \frac{d\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{3/2}} \approx \frac{K(\text{Coeff} + \Delta \text{Coeff}) - K(\text{Coeff})}{\Delta \text{Coeff}} = 0.$$

Таким образом, в математической модели процесса теплопередачи для подложки с  $N$  точечными источниками тепловыделения (5.2) введено понятие функции локализации (5.5) для одномерного случая неравномерного распределения кристаллов вдоль длины подложки. Семейство функций локализации, отличающихся коэффициентом дихотомии, принадлежит к классу гиперболических функций. Физический смысл коэффициентов гиперболической функции (5.5) – это параметры сборочной единицы светодиодного линейного модуля (длина подложки, количество размещаемых кристаллов, коэффициент дихотомии), влияющие на локализацию кристалла на подложке.

Термокомпенсация на **двухмерных несущих конструкциях ЭС**, как метод повышения температурной стабильности, основана на взаимном влиянии параметров ЭРИ на выходной параметр электронного средства ЭС. Пусть  $a_1 = f_{ij}(T)$  и  $a_2 = f_{pk}(T)$  – законы изменения  $j$ -ого параметра для  $i$ -ого ЭРИ и  $k$ -ого параметра для  $p$ -ого ЭРИ от температуры, соответственно. Тогда для осуществления термокомпенсации должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} |f_{ij}(T)| = |f_{pk}(T)|; \\ |T_i - T_p| \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (5.8)$$

С расширением диапазона рабочих температур  $\Delta T$ , как отмечается в [42], термокомпенсация затруднена, поскольку мала вероятность полного совпадения законов изменения термозависимых параметров ЭРИ  $a_1 = f_{ij}(T)$  и  $a_2 = f_{pk}(T)$ . Условия (5.8) справедливы только для случая изначального равенства рабочих температур ЭРИ, т.е. равномерности температурного поля. Однако условия (5.8) не учитывают особенности реального конструктивного исполнения ЭС, следовательно (5.8) – это случай схемотехнической термокомпенсации параметров ЭРИ. Иначе говоря, схемотехническая термокомпенсация подразумевает такую абстрактную несущую конструкцию ЭС (плата, подложка и т.п.), свойства которой не влияют на параметры ЭРИ. В большинстве практических случаев, наоборот, свойства несущей конструкции ЭС оказывают непосредственное влияние на размещенные ЭРИ и при некотором условии приводят к эффекту топологической термокомпенсации. Для обеспечения топологического аспекта термокомпенсации необходимо, чтобы помимо (5.8) выполнялось условие:

$$|f_{ij}(T, x_i, y_i)| = |f_{pk}(T, x_p, y_p)|, \quad (5.9)$$

где  $x_i, y_i$  и  $x_p, y_p$  – координаты точек привязки  $i$ -ого и  $p$ -ого ЭРИ на несущей конструкции ЭС.

Анализ работ [42-49], проведенный в главе 1, позволяет утверждать:

- отечественные и зарубежные авторы отмечают зависимость пространственного расположения термочувствительных ЭРИ на температурную стабильность выходных параметров ЭС;
- проблема топологической термокомпенсации параметров ЭРИ, являясь актуальной, еще не исследована в должной степени;
- термокомпенсация наиболее эффективна в относительно узком температурном диапазоне.

Требования к заданной температурной стабильности выходного параметра  $N$  для электронных средств количественно определяет уравнение температурной погрешности (2.24).

Сформулируем цель исследования для данного раздела: требуется найти координаты  $(x_i, y_i)$  места расположения ЭРИ на несущей поверхности ЭС так, чтобы относительная погрешность выходного параметра стремилась к минимуму:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\Delta T_i}{T_i}(x_i, y_i) \Rightarrow \min. \quad (5.10)$$

Для достижения цели (5.10) требуется решение следующих основных задач:

1. Анализ пространственного расположения ЭРИ на несущей поверхности ЭС с позиции температурной стабильности.
2. Разработка алгоритмов размещения ЭРИ с целью топологической термокомпенсации.

Границы интервалов варьирования (рисунок 5.7)  $T(-)$  и  $T(+)$  в вычислительном эксперименте [8], при значениях которых были найдены коэффициенты влияния  $a_i$  уравнения температурной погрешности (2.24), задают область определения для функции  $h(T, \tau)$ . Под  $h(T, \tau)$  будем понимать функцию, суммарно описывающую изменение температуры ЭРИ во времени в зависимости от собственного режима работы  $f(T_{РАБ}, \tau)$  и условий окружающей среды  $g(T_{СР}, \tau)$ :

$$h(T, \tau) = f(T_{РАБ}, \tau) + g(T_{СР}, \tau). \quad (5.11)$$

Геометрически, область определения функции  $h(T, \tau)$  равна площади прямоугольника, ограниченного линиями верхнего и нижнего интервалов варьирования, а также начальным и конечным временем функционирования ЭРИ:

$$\begin{cases} h(T) = f(T_{РАБ}) + g(T_{СР}); \\ S = (T(+)-T(-)) \cdot (\tau_{кон} - \tau_{н}); \\ \forall H(T) \in S. \end{cases}$$

Относительное изменение температуры ЭРИ  $\frac{\Delta T_i}{T_i}$  можно рассчитать как отношение максимальной разности рабочей температуры ЭРИ к среднему значению рабочей температуры:

симптоматическая разность рабочей температуры ЭРИ к среднему значению рабочей температуры:

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} = \frac{\max[T_i(\tau)] - \min[T_i(\tau)]}{[T_i(\tau_1) + T_i(\tau_2) + \dots + T_i(\tau_n)]/n}. \quad (5.12)$$

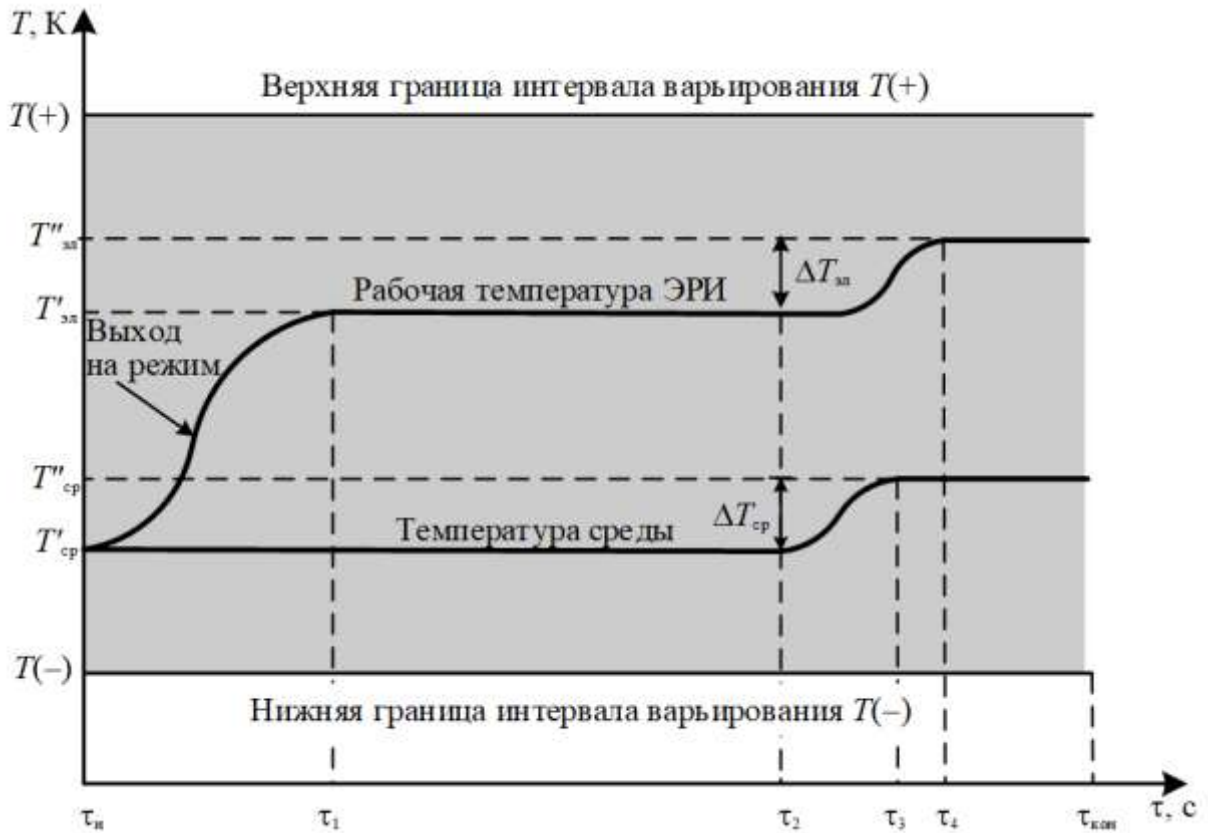


Рисунок 5.7 – Характер изменения рабочей температуры ЭРИ

В простейшем случае для вычисления суммарной температурной погрешности по (2.24) достаточно двух значений рабочей температуры для каждого ЭРИ, соответствующих двум граничным значениям температуры среды (см. рисунок 5.11):

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} = \frac{|T_i(\tau_1) - T_i(\tau_4)|}{[T_i(\tau_1) + T_i(\tau_4)]/2}. \quad (5.13)$$

Дальнейшие рассуждения будут справедливы с учетом замечаний:

1. Отрезок времени  $[0, \tau_1]$  не учитывается. Данный участок характеризуется выходом на рабочий режим ЭРИ. По продолжительности этот интервал занимает незначительное время относительно общего времени функционирования ЭРИ. Как правило, в техническом задании стабильность параметров ЭС на данном участке не нормируется.

2. Известно [111], что следствием линейности и однородности уравнения теплопроводности для относительно узкого температурного интервала является свойство суперпозиции температурных возмущений. Поэтому предполагаем, что изменение температуры окружающей среды равно изменению рабочей температуры ЭРИ:

$$\Delta T_{\text{CP}} = \Delta T_{\text{ЭРИ}} \quad (5.14)$$

Предлагается к рассмотрению понятие «локальная группа» (ЛГ). Локальная группа – это группа смежных ЭРИ, расположенных на изотермической линии (изотермической поверхности) (рисунок 5.8).

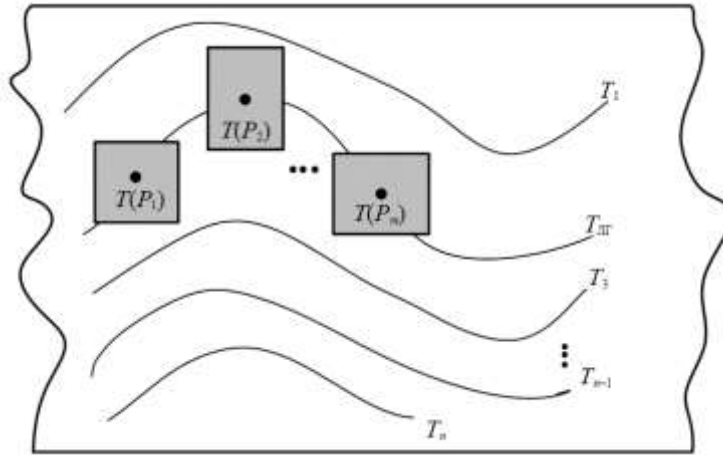


Рисунок 5.8 – Локальная группа ЭРИ

Свойства локальной группы ЭРИ могут быть выведены из основного уравнения теплопроводности (4.1):

1. Свойство ассоциативности. Смежные ЭРИ с одинаковым порядком величины тепловыделения вносят суммарный вклад в установление температуры локальной группы:

$$P_1 \approx P_2 \Rightarrow T_{\text{ЛГ}} = T(P_1) + T(P_2). \quad (5.15)$$

2. Свойство доминирования. ЭРИ с бóльшим порядком величины тепловыделения определяет температуру локальной группы:

$$P_1 \gg P_2 \Rightarrow T_{\text{ЛГ}} = T(P_1). \quad (5.16)$$

3. Свойство изоповерхности. Рабочая температура всех ЭРИ локальной группы примерно одинакова:

$$\{T_1, T_2, \dots, T_n\} \in \mathbf{L} \Rightarrow T_1 \approx T_2 \approx \dots \approx T_n, \quad (5.17)$$

где  $\mathbf{L}$  – множество точек изоповерхности.

Сформулируем следствие из (5.15)...(5.17). Известно [111], что теплообмен кондукцией происходит согласно закону Фурье: плотность теплового потока  $q$  прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \nabla T = -\lambda n_0 \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (5.18)$$

Если предположить, что температурное поле изменяется только в направлении осей  $x$  и  $y$ , а также градиент температуры является постоянной величиной, то, используя (5.18), запишем выражение для коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{S\tau} \cdot \frac{l_{1,2}}{(T_1 - T_2)}, \quad (5.19)$$

где  $Q$  – количество тепла, протекающего за время  $\tau$  через изотермическую поверхность, площадь которой  $S$ ;  $l_{1,2}$  – расстояние между изотермическими поверхностями 1 и 2;  $T_1, T_2$  – значения температуры на изоповерхностях 1 и 2 (причем  $T_1 > T_2$ ).

Заметим, что величины коэффициентов теплопроводности для материалов плат (подложек), применяемых в ЭС относительно малы и лежат в диапазоне от  $0,2 \div 0,3$  Вт/(м·К) для стеклотекстолита и гетинакса до  $25 \div 30$  Вт/(м·К) для керамики [140]. При фиксированном расстоянии  $l_{1,2}$  и наличии мощных тепловыделяющих ЭРИ согласно (5.19) получим значительный градиент температуры:

$$\begin{cases} \lambda \in [0, 2 \dots 30] \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \\ l_{1,2} = \text{const}; \\ (T_1 - T_2) \rightarrow \text{max.} \end{cases}$$

Исходя из этого, сформулируем свойство обратное (5.17): если каждая изотермическая линия на поверхности платы (подложки) уникальна, а рабочие температуры нескольких ЭРИ примерно равны, то такие ЭРЭ принадлежат к одной локальной группе:

$$T_1 \approx T_2 \approx \dots \approx T_n \Rightarrow \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \in \mathbf{L}. \quad (5.20)$$

Таким образом, для обеспечения топологической термокомпенсации ЭС требуется соблюдение следующих условий:

- наличие источников значительного тепловыделения, формирующих градиент температуры на несущей конструкции ЭС;
- малый коэффициент теплопроводности материала несущей конструкции ЭС, что также способствует возникновению градиента температуры;
- наличие ЭРИ в составе ЭС, обладающих примерно равными по модулю коэффициентами температурной регрессии с противоположными знаками и обеспечивающих потенциальную возможность формирования локальных групп.

Термостабилизация ЭС методом топологической термокомпенсации с применением регрессионного анализа ставит перед разработчиком две основные задачи:

1. Синтез адекватных SPICE-моделей по отношению к реальным прототипам ЭРИ (см. главу 3).

2. Анализ температурных полей конструкций ЭС методами физического эксперимента, либо методами САЕ-моделирования (см. главу 4).

В известных алгоритмах размещения ЭРИ [141...147], содержащих надежность-тепловые показатели, основная цель состоит в рассредоточение теплонагруженных ЭРИ или в равномерном распределении мощностей источников энергии, например:

$$\min D(W) = \min \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (\bar{W}_i - \bar{W})^2,$$

где  $\bar{W}$  – средняя мощность всех размещаемых ЭРЭ;  $\bar{W}_i$  – средняя мощность  $i$ -ой группы ЭРИ (число  $n$  таких групп и количество ЭРИ в каждой группе выбирается при решении конкретных задач).

В решаемой нами задаче пространственного расположения ЭРИ иная постановка, поскольку главный показатель качества размещения заключается в обеспечении заданной температурной стабильности:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} \leq \left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_{\text{Зад}}. \quad (5.21)$$

При этом анализ допустимых тепловых режимов ЭРИ и соответствующая оптимизация начального размещения производится на следующем этапе - при расчете температурного поля платы (подложки):

$$T_{i \min} \leq \sum_{j=1}^r W_j \hat{F}_{ji} - \sum_{k=1}^m W_k \hat{F}_{ki} - T_{\text{CP}} \leq T_{i \max}, \quad (5.22)$$

где  $W_j, W_k$  – мощности источников и стоков энергии, соответственно;  $\hat{F}_{ji}, \hat{F}_{ki}$  – тепловые коэффициенты для  $W_j, W_k$ ;  $r, m$  – число источников и стоков, соответственно.

Для выполнения (5.21) необходимо, чтобы для множества ЭРИ, обладающих коэффициентами влияния  $a_i$  отличными от нуля, имело место следующее:

$$\left| a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + a_j \frac{\Delta T_j}{T_j} \right| \rightarrow 0, \text{ при условии } \begin{cases} a_i \neq 0; \\ a_j \neq 0; \\ i \neq j, \end{cases}$$

или

$$a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} \approx -a_j \frac{\Delta T_j}{T_j}. \quad (5.23)$$

В частности, выражение (5.23) справедливо, когда абсолютные величины коэффициентов влияния  $i$ -ого и  $j$ -ого ЭРИ равны, а также равно их относительное изменение температуры:

$$\begin{cases} |a_i| \approx |a_j|; \\ \frac{\Delta T_i}{T_i} \approx \frac{\Delta T_j}{T_j}. \end{cases} \quad (5.24)$$

В процессе размещения относительное изменение температуры  $\frac{\Delta T_i}{T_i}$  и  $\frac{\Delta T_j}{T_j}$  для  $i$ -ого и  $j$ -ого ЭРИ может быть неизвестно, например, в случае использования эвристических последовательных алгоритмов [117, 118, 119, 141, 142]. Однако, согласно (5.15...5.17) и (5.20), пары ЭРИ с минимальным расстоянием друг относительно друга обладают примерно одинаковой рабочей температурой и принадлежат одной локальной группе. Следовательно, для обеспечения заданной температурной стабильности (5.21) необходимо сформировать локальные группы ЭРИ, то есть минимизировать функционал:

$$\min Y = \min \sum_{j=1}^k \left[ \sum_{i=1}^l |a_i| \right]_j, \quad (5.25)$$

где  $l$  – число ЭРИ в  $j$ -ой локальной группе;  $k$  – число локальных групп.

Анализ литературных источников по обеспечению температурной стабильности [42...49] показывает, что для всего множества ЭРИ, входящих в ЭС пока не существует глобально-оптимизирующего показателя размещения для (5.21), что не позволяет применять вектор-функцию с взвешенными частными показателями [141]. Эффективным способом решения многоцелевой задачи размещения ЭРИ может служить метод иерархической многоуровневой композиции макромоделей [117], который заключается в многошаговом наращивании схемы путем ее укрупнения с одновременным размещением ЭРИ (подсхем). Основная процедура метода – это композиция результатов собственного размещения  $S_1(P_{i1}), \dots, S_1(P_{iN})$  подсхем  $P_{i1}, \dots, P_{iN}$ , образованных на  $i$ -ом шаге (уровне) в одном размещении  $S_2(P_{i+1})$  подсхемы  $P_{i+1}$  следующего уровня.

Рассмотрим особенности реализации указанным методом задачи размещения ЭРИ, часть которых имеет ненулевые коэффициенты влияния  $a_i$ :

1. Разбиение исходного множества ЭРИ  $R$  на подмножество  $R'$  с ненулевыми коэффициентами  $a_i$  и подмножество  $R''$  с нулевыми коэффициентами  $a_i$ :

$$R = R' \cup R'';$$

$$R' \cap R'' = \emptyset;$$

$$R' = \{r_1, r_2, \dots, r_n\};$$

$$\forall a_i(r_i) \neq 0;$$

$$R'' = \{r_{n+1}, r_{n+2}, \dots, r_m\};$$

$$\forall a_i(r_i) = 0;$$

$$n + m = |R|.$$

2. Реализация множества частных размещений  $\{S_1(P_{11}), S_1(P_{12}) \dots, S_1(P_{1N})\}$  первого уровня иерархии. ЭРИ из подмножества  $R'$  образуют локальные группы  $P_{1j}$  с целью минимизации алгебраической суммы коэффициентов влияния  $a_i$  (5.25). Каждый ЭРИ из подмножества  $R''$  образует отдельную квазилокальную группу с целью повышения уровня иерархии с нулевого  $P_{0j}$  (уровень ЭРИ) до первого уровня  $P_{1j}$ :

$$\begin{cases} f_1[S_1(P_{1j})] = \min \sum_{i=1}^l |a_i|, & \text{если } P_{1j} = \{r_1, r_2, \dots, r_l\} \in R'; \\ f_1[S_1(P_{1j})] = P_{0j}, & \text{если } P_{1j} = \{r_1\} \in R'', \end{cases} \quad (5.26)$$

$$j = 1 \dots N;$$

$$N = k + |R''|,$$

где  $k$  – число сформированных локальных групп;  $|R''|$  – число квазилокальных групп (мощность множества  $R''$ ).

3. Композиция результатов множества частных размещений  $S_2(P_2) = S_1(P_{11}) \cup S_1(P_{12}) \cup \dots \cup S_1(P_{1n})$  на втором уровне иерархии. Среди многочисленных критериев, используемых в универсальных алгоритмах размещения, наибольшее распространение получило условие минимизации суммарной взвешенной длины соединений [110, 118, 119, 141, 142]. Задача размещения в этом случае состоит в минимизации функционала  $Z$ :

$$f_2[S_2(P_2)] = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{ij}, \quad (5.27)$$

где  $c_{ij}$  – коэффициент взвешенной связности (весовой коэффициент) локальных и квазилокальных групп;  $d_{ij} = \sqrt{(x_t - x_v)^2 + (y_t - y_v)^2}$  – расстояние между позициями установки локальных и квазилокальных групп;  $(x_t, y_t)$  и  $(x_v, y_v)$  – координаты  $t$ -ой и  $v$ -ой установочных позиций.

Коэффициент взвешенной связности  $c_i$  может быть определен по одному из правил, приведенных в [110], например, по правилу Важенина. Выбор очередного ЭРИ (группы ЭРИ)  $r_i \in \bar{R}_k$  основывается на оценке числа связей как с размещенными, так и с неразмещенными ЭРИ (группой ЭРИ). При этом выбирается ЭРИ (группа ЭРИ) с максимальным значением  $c_i$ :

$$c_i = \max \left( \sum_{r_j \in R_k} x_{ij} - \sum_{r_j \in \bar{R}_k} x_{ij} \right), \quad (5.28)$$

где  $x_{ij}$  – вес  $i$ -ого и  $j$ -ого соединения;  $R_k$  – ЭРИ, размещенные до  $k$ -ого шага.



На рисунке 5.9 представлен эвристический последовательный алгоритм размещения ЭРИ с целью достижения топологической термокомпенсации. Если очередной размещаемый ЭРИ принадлежит к предварительно сформированной локальной группе, то происходит размещение всех ЭРИ, входящих в эту группу. При этом выбор ЭРИ с максимальным коэффициентом связности по электрическим и прочим связям игнорируется. Процедура **X1** вводится для рационального размещения ЭРИ внутри локальной группы. Процедура **X2** служит для создания «буферной зоны» с целью устранения нежелательного теплового взаимодействия соседних локальных групп. Эффективность предложенного алгоритма размещения во многом зависит от конструктивных особенностей платы (подложки). В частности, малые габаритные размеры платы (подложки) не всегда позволяют реализовать процедуру **X2**. По этой причине применение процедур **X1** и **X2** в предложенном алгоритме размещения является опциональным.

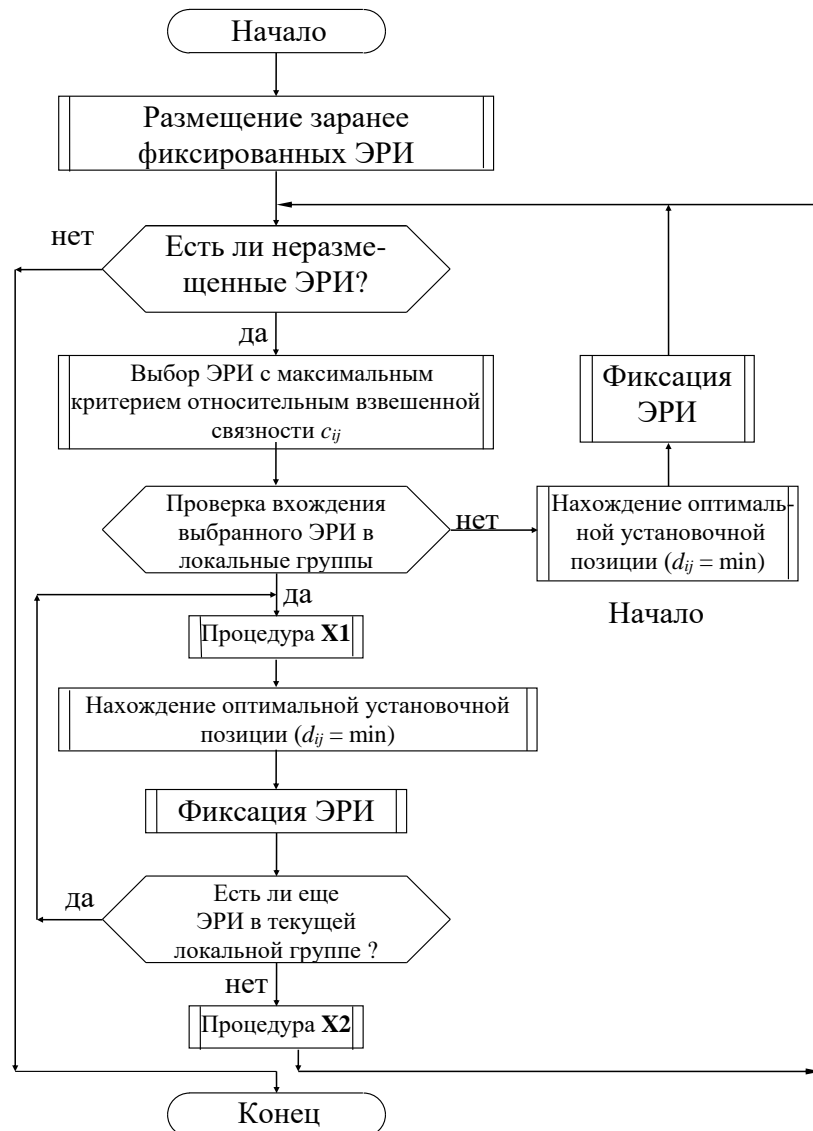


Рисунок 5.9 – Алгоритм размещения ЭРИ с целью достижения топологической термокомпенсации

В зависимости от количества ЭРИ с ненулевыми коэффициентами влияния  $a_i$  и их величины по модулю возможны три основных варианта комплектации локальных групп:

1. *Парная термокомпенсация ЭРИ.* Эффективна для четного количества ЭРИ, обладающих ярко выраженными парными комбинациями коэффициентов влияния:

$$\begin{cases} |a_i| \approx |a_j|; \\ a_i \approx -a_j; \end{cases}$$

2. *Термокомпенсация одного ЭРИ несколькими другими.* Эффективна при наличии одиночного ЭРИ со значительным коэффициентом влияния:

$$\begin{cases} a_i \approx -\sum_{k=1}^K a_k; \\ a_i \gg a_k; \end{cases}$$

3. *Взаимная термокомпенсация группы ЭРИ.* Эффективна при наличии некоторого количества ЭРИ с коэффициентами влияния одного порядка, но не обладающих ярко выраженными парными комбинациями:

$$\begin{cases} \left| \sum_{i=1}^n a_i \right| \approx \left| \sum_{j=1}^m a_j \right|; \\ \sum_{i=1}^n a_i \approx -\sum_{j=1}^m a_j. \end{cases}$$

На рисунке 5.10 представлен алгоритм парной (частичной) комплектации локальных групп. Сущность алгоритма комплектации заключается в формировании пар термокомпенсированных ЭРИ, что соответствует первому варианту комплектации. В случае применения этого алгоритма для ЭРИ, не обладающих ярко выраженными парными комбинациями коэффициентов влияния  $a_i$ , возникает некомпенсированная остаточная величина  $\Delta a_i$ .

На рисунке 5.11 представлен алгоритм полной комплектации локальных групп. Сущность алгоритма заключается в минимизации некомпенсированной остаточной величины  $\Delta a_i$ . Применение этого алгоритма возможно для второго и третьего варианта комплектации, поскольку число ЭРИ, входящих в локальную группу может быть произвольным. Поясним особенности комплектации отдельной локальной группы по данному алгоритму:

1. Нахождение ЭРИ с максимальным абсолютным значением коэффициента влияния:  $\max(|a|)$ .

2. Последовательный перебор всех неуконкомпектованных ЭРИ, с целью нахождения такого ЭРИ, чтобы:  $\sum_i |a_i| = \min$ .

3. Присвоение значению  $|a|$  найденного значения  $\sum_i |a_i|$ :

$$|a| := \sum_i |a_i|.$$

4. Возврат к пункту 2, пока не закончатся неуккомплектованные ЭРИ.

5. Возврат к пункту 1 с целью формирования следующей локальной группы.

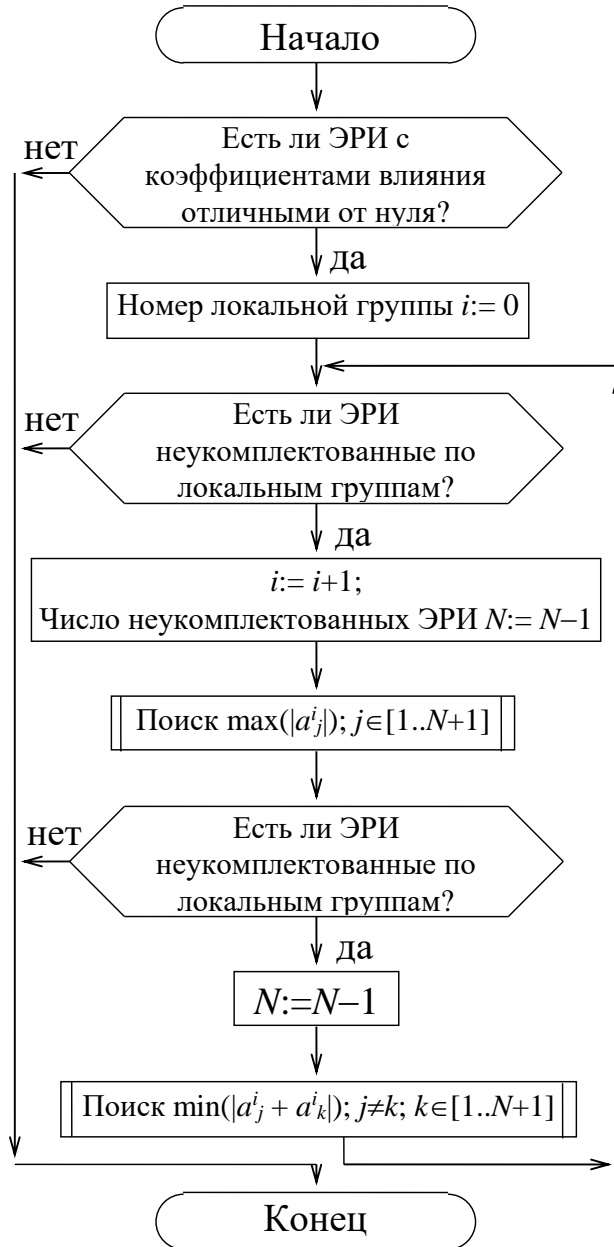


Рисунок 5.10 – Алгоритм частичной (парной) комплектации локальных групп

Предложенный алгоритм позволяет более точно осуществлять компенсацию ЭРИ по значениям коэффициентов влияния  $a_i$ . Недостаток алгоритма проявляется в избытке количества ЭРИ

в первой укомплектованной локальной группе. Для устранения указанного недостатка целесообразно ввести либо ограничение на максимальное число ЭРИ в локальной группе, либо округление значений коэффициентов влияния  $a_i$ .

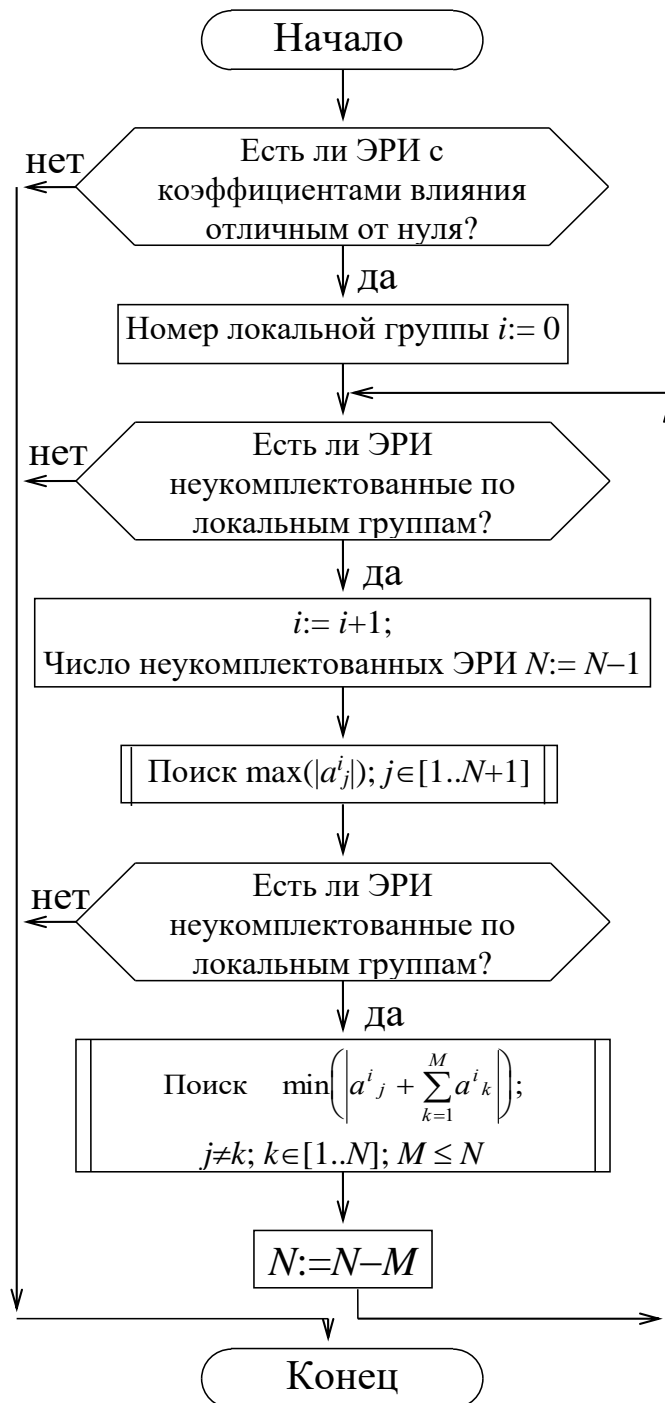


Рисунок 5.11 – Алгоритм полной комплектации локальных групп

Размещение ЭРИ с целью топологической термокомпенсации, а именно формирование локальных групп, позволяет прогнозировать качественное улучшение температурной стабильности. Однако на основании только косвенных предположений достижение заданной температур-

ной стабильности не гарантируется. Логическим продолжением задачи синтеза термостабильного РТУ является расчет температурного поля конструктивного варианта (см. главу 4). Расчет температурного поля необходим по следующим причинам:

1. Для количественной оценки температурной стабильности полученного конструктивного варианта ЭС.
2. Для анализа предельно допустимого теплового режима ЭС.
3. Для оптимизации первоначально полученного конструктивного варианта с позиции температурной стабильности.
4. Для использования совместно со специальными алгоритмами размещения [110, 117, 118, 141, 142] (итерационные, динамические, случайного поиска и др.), для которых требуется вычисление температурного поля на каждом шаге размещения ЭРИ.

Исторически сложилось, что при производстве интегральных микросхем (ИС) используется топологический уровень проектирования в виде планарных однослойных конструкций. Известно, что планарная технология – совокупность технологических операций, используемых при изготовлении планарных интегральных микросхем. Процесс включает в себя формирование отдельных компонентов транзисторов, а также объединение их в единую структуру [148]. Непрерывный процесс микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры ставит перед разработчиками частную задачу увеличения плотности упаковки элементов ИС. Эффективным способом решения этой задачи является применение объемных топологических уровней проектирования и, как следствие, переход к конструктивному исполнению в виде объемных (многослойных) ИС (ОИС).

В настоящее время технологии производства ОИС можно разделить на следующие категории [132]:

- технология «этажерочный микромодуль». Конструкция этажерочного микромодуля формируется из тонких подложек в столбик высотой от 5 до 25 мм. Затем происходит заливка герметизирующим полимерным компаундом. Электрическую коммутацию этажерочных конструкций осуществляют с помощью либо контактных стоек, либо гибких печатных кабелей.

- технология «многокристальный модуль». В общем случае многокристальный модуль (МКМ) представляет собой от 2 до 400 монолитных ИС любой степени интеграции, помещенных на многослойной подложке в общий корпус и соединенные между собой с помощью многоуровневой системы межсоединений. Для изготовления МКМ большой сложности используются конструкции 4 типов модулей ( $L$ ,  $C$ ,  $D$  и  $Si$ ), а именно: МКМ- $L$  – с подложкой, представляющей собой многослойную печатную плату; МКМ- $C$  – с подложкой, изготовленной на основе многослойной

керамики; МКМ-*D* – с многослойной тонкопленочной структурой, сформированной на керамической или эмалированной металлической подложке; МКМ-*Si* – с многослойной тонкопленочной структурой на пластине кремния;

- технология «корпус на корпусе». Представляет собой технологию монтажа микросхем, при которой компоненты с матричным расположением выводов устанавливаются друг на друга штабелем. При этом все корпуса, кроме верхнего, имеют контактные площадки на верхней стороне для установки следующего компонента. Обычно компоненты нижнего уровня имеют более высокую плотность выводов. Выводы компонентов второго и следующих уровней обычно располагаются по периметру в несколько рядов. Обычно применяются сборки до трех уровней;

- технология «3D Plus». Оригинальная технология основана на наложении электронных компонентов на пленку (обычно шириной 35 мм). Такое решение позволяет тестировать элементы перед наложением их друг на друга. Все слои модуля закреплены друг относительно друга с помощью специальных отверстий. Расстояние между слоями калибруется распорным устройством. Затем полости между слоями заполняются эпоксидной смолой. В конечном итоге слои соединяются посредством металлизации и лазерной обработки – проточки соединений.

Анализ рассмотренных отечественных и зарубежных научных работ позволяет сделать вывод, что тепловое проектирование ОИС сводится в основном либо к равномерному распределению тепловой энергии по объему микросхемы, либо направлено на снижение средних или пиковых рабочих температур элементов. Однако, вопрос температурной стабильности выходных электрических параметров ОИС в должной мере еще не рассмотрен. В связи с этим поставим перед собой цель: исследование влияния неравномерности температурного поля пространственной структуры ОИС на стабильность электрических выходных параметров.

В качестве отправной точки обратимся к современной работе японских исследователей [149], посвященной технологии трехмерной интеграции на основе соединения полупроводниковых пластин. Особенностью этой работы является полнота представленных сведений о структуре ОИС, а именно: характерные размеры, применяемые материалы, их взаимное расположение. Все это позволяет провести теоретические исследования обеспечения температурной стабильности ОИС.

В статье рассмотрена технология трехмерной интеграции для изготовления нового трехмерного тестового чипа (рисунок 5.12). Трехмерная технология основана на методе соединения и утонения пластин. Авторским коллективом разработаны пять частных технологий для трехмерной интеграции, а именно: формирование вертикальных скрытых межсоединений (TSV – through silicon vias), образование металлических микроконтактов, утонение многослойных пластин, совмещение пластин и соединение пластин. Вертикальные межсоединения (сквозные переходные отверстия) диаметром 2 мкм и глубиной до 100 мкм (по всей толщине ОИС) были сформированы

в кремниевой подложке с использованием травления индуктивно связанной плазмой. Затем сквозные переходные отверстия были окислены и заполнены поликристаллическим кремнием  $n+$  или вольфрамом. Трехмерные тестовые чипы с трехуровневыми слоями были изготовлены путем соединения пластин со сквозными переходными отверстиями после утонения. Авторы доказывают, что в таких трехмерных трехслойных структурах могут быть успешно реализованы запоминающие устройства и устройства передачи сигналов.

Можно видеть, что структура ОИС состоит из трех слоев полупроводниковых пластин на основе кремния толщиной  $h_{Si} = 30$  мкм. На верхней и нижней сторонах каждой из полупроводниковых пластин сформирован проводящий слой на основе алюминия толщиной  $h_{Al} = 0,5$  мкм. Гальваническую развязку между проводящими слоями обеспечивает диэлектрический слой на основе оксида кремния толщиной  $h_{SiO_2} = 1$  мкм. Надежное соединение между слоями происходит за счет адгезионного слоя на основе титана толщиной около  $h_{Ti} = 8$  мкм. Электрический контакт между слоями обеспечивается сквозными переходными отверстиями. На верхней поверхности трехслойной структуры располагается источник тепла – кристалл с мощностью тепловыделения  $P = 1$  Вт и размерами  $1 \times 1 \times 0,1$  мкм<sup>3</sup>. Общая площадь кристалла ОИС составляет  $9 \times 9$  мм<sup>2</sup>.



Рисунок 5.12 – Структура тестовой ОИС

Обратимся к справочным материалам [150] и сведем теплофизические параметры применяемых в ОИС материалов сведены в таблицу 5.1. Наибольшим коэффициентом теплопроводности обладает проводящий слой на основе алюминия ( $\lambda_{Al} = 209$  Вт/(м·°С)), наименьшим коэффициентом теплопроводности – диэлектрической слой на основе оксида кремния ( $\lambda_{SiO_2} = 1,38$  Вт/(м·°С)). При этом разница в теплопроводности этих слоев составляет 150 раз. Заметим также,

что разница в коэффициентах теплопроводности проводящего слоя и сквозных переходных отверстий составляет всего 1,3 раза.

Таблица 5.1 – Теплофизические параметры слоев структуры ОИС

№ п/п	Название слоя	Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)
1	Диэлектрический слой	Оксид кремния SiO <sub>2</sub>	1,38	750
2	Адгезионный слой	Титан Ti	21	523
3	Подложка	Кремний Si	150	648
4	Проводящий слой	Алюминий Al	209	880
5	Сквозное переходное отверстие	Вольфрам W	162	130

Отмеченные выше факты позволяют нам сформулировать гипотезы:

1. Теплообмен между слоями в представленной структуре ОИС происходит в основном за счет кондукции.

2. Значительная разница (в 150 раз) в численных значениях теплофизических параметров слоев ОИС способствует формированию локальных групп в объеме по аналогии с локальными группами на условно двумерных структурах.

3. Сквозные переходные отверстия (TSV), являющиеся неотъемлемой частью ОИС могут выступать не только для электрического соединения между слоями, но и в качестве кондуктивных теплостоков (рисунок 5.13, б) по аналогии с конструкцией печатных узлов условно двумерных структур (рисунок 5.13, а).

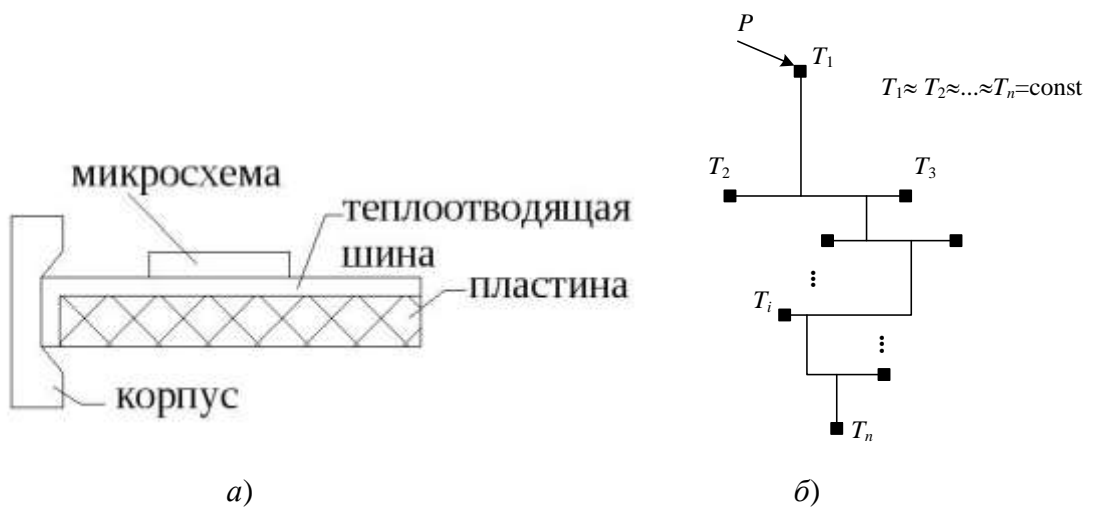


Рисунок 5.13 – Способ отвода тепла с помощью кондуктивного теплостока



Анализ особенностей теплообмена трехмерной трехслойной структуры ОИС (см. рисунок 5.12) целесообразно провести сначала на основе математической модели с сосредоточенными параметрами. В отличие от классической математической модели на основе уравнения теплопроводности (4.1)...(4.10), модель с сосредоточенными параметрами не предъявляет специальных требований к аппаратному и программному обеспечению, а, следовательно, позволяет оперативно подтвердить или опровергнуть выдвинутые выше гипотезы.

Широко известным способом анализа математической модели с сосредоточенными параметрами в теплофизике является метод электротепловой аналогии [151]. Используя теорию электрического подобия можно сводить задачу моделирования теплообмена к составлению эквивалентной электрической схемы рассматриваемого процесса и с помощью программных комплексов схемотехнического моделирования анализировать этот процесс, используя масштабные коэффициенты подобия.

В электротепловом подобии:

$$t_i = k_t U_i;$$

$$P_i = k_P I_i;$$

$$C_{Ti} = k_C C_{Эл i};$$

$$R_{Ti} = k_R R_{Эл i},$$

где  $t_i$ ,  $P_i$ ,  $C_{Ti}$ ,  $R_{Ti}$  – температура, мощность, теплоемкость, тепловое сопротивление  $i$ -ого элемента, соответственно;  $U_i$ ,  $I_i$ ,  $C_{Эл i}$ ,  $R_{Эл i}$  – напряжение, ток, электрическая емкость и электрическое сопротивление  $i$ -ого элемента замены, соответственно.

В простейшей резисторной модели с сосредоточенными параметрами (рисунок 5.14) каждое физическое тело (слой ОИС) считается эквипотенциальным и соответствует узлу электрической схемы. Выделение тепла происходит на переходах между телами, а именно:

-  $R_{вн}$  – внутреннее тепловое сопротивление кристалла за счет кондукции;

-  $R_{ад-ср}^{луч}$  – тепловое сопротивление между поверхностью адгезионного слоя и окружающей средой за счет радиации;

-  $R_{ад-ср}^{конв}$  – тепловое сопротивление между поверхностью адгезионного слоя и окружающей средой за счет конвекции;

-  $R_{ад-из}$  – тепловое сопротивление между адгезионным и изоляционным слоем за счет кондукции;

-  $R_{TSV1}$  – тепловое сопротивление 1 участка межслойного перехода «кристалл-проводящий слой верхней стороны 1 слоя» за счет кондукции;

-  $R_{из-пр}$  – тепловое сопротивление между изоляционным и проводящим слоем за счет кондукции;

- $R_{\text{пр-под}}$  – тепловое сопротивление между проводящим слоем и подложкой за счет кондукции;
- $R_{\text{TSV2}}$  – тепловое сопротивление 2 участка межслойного перехода «проводящий слой верхней стороны 1 слоя-проводящий слой нижней стороны 1 слоя» за счет кондукции;
- $R_{\text{под-пр}}$  – тепловое сопротивление между подложкой и проводящим слоем за счет кондукции;
- $R_{\text{пр-из}}$  – тепловое сопротивление между проводящим и изоляционным слоем за счет кондукции;
- $R_{\text{из-ад}}$  – тепловое сопротивление между изоляционным и адгезионным слоем за счет кондукции;
- $R_{\text{TSV3}}$  – тепловое сопротивление 3 участка межслойного перехода «проводящий слой нижней стороны 1 слоя-проводящий слой верхней стороны 2 слоя» за счет кондукции;
- $R_{\text{кор-ср}}^{\text{луч}}$  - тепловое сопротивление между корпусом ОИС и окружающей средой за счет радиации;
- $R_{\text{кор-ср}}^{\text{конв}}$  – тепловое сопротивление между корпусом ОИС и окружающей средой за счет конвекции.

В качестве источника тепловой энергии выступает кристалл с мощностью тепловыделения  $P = 1$  Вт, показан условно в виде стрелки на рисунке 5.14. Стоками тепла служит окружающая среда, по аналогии с электрической подсистемой показана в виде символов общего проводника.

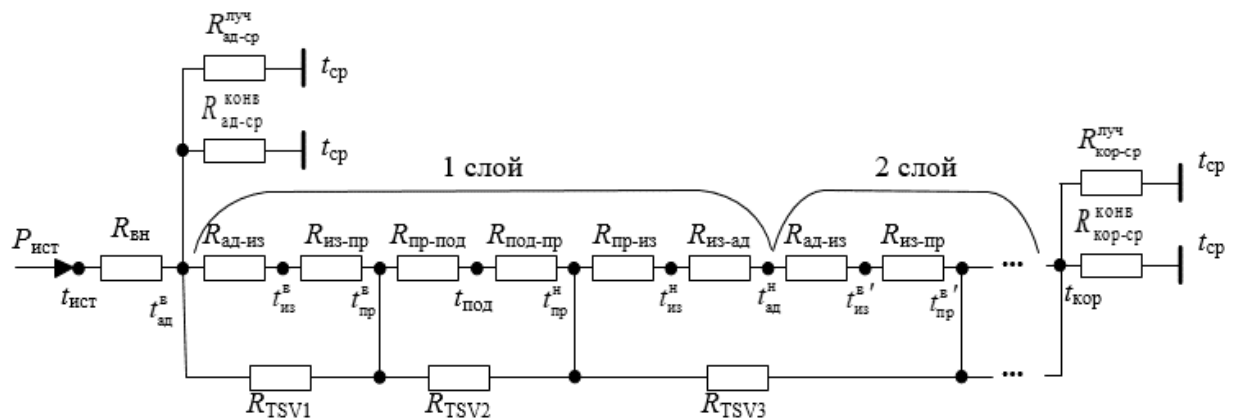


Рисунок 5.14 – Эквивалентная схема процесса теплообмена в ОИС с сосредоточенными параметрами

Основная расчетная формула стационарного теплового режима для модели с сосредоточенными параметрами связывает величины толщины слоев, площади поперечного сечения и коэффициента теплопроводности:

$$R_T = \frac{h}{\lambda \cdot S}, \quad (5.31)$$

где  $R_T$  – тепловое сопротивление – способность тела препятствовать распространению теплового движения молекул;  $h$  – толщина участка тепловой цепи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $S$  – площадь поперечного сечения участка.

Нетрудно заметить, что толщина соответствующих слоев (изоляционный, адгезионный, проводящий) в структуре ОИС идентичная:

$$R_{\text{ад-из}} = R_{\text{из-ад}};$$

$$R_{\text{из-пр}} = R_{\text{пр-из}};$$

$$R_{\text{пр-под}} = R_{\text{под-пр}}.$$

Если дополнить эквивалентную схему на рисунке 5.14 тепловыми емкостями между составными объектами ОИС, то можно получить сосредоточенную модель для нестационарного теплового режима.

Зная тепловое сопротивление последовательно-параллельной структуры ОИС, можно оценить перепад температур между источником тепла (поверхностью кристалла тепловыделения) и каким-либо узлом эквивалентной схемы (поверхностью слоя ОИС):

$$\Delta T = R_T \cdot P = \frac{h \cdot P}{\lambda \cdot S}. \quad (5.32)$$

Для целей нашего исследования представляет интерес определения перепадов на проводящих слоях:

- проводящий слой верхней стороны 1 слоя (узел  $t_{\text{пр}}^{\text{B}}$ );
- проводящий слой нижней стороны 1 слоя (узел  $t_{\text{пр}}^{\text{H}}$ );
- проводящий слой верхней стороны 2 слоя (узел  $t_{\text{пр}}^{\text{B}'}$ ).

Пусть температура корпуса кристалла – источника тепла – известна (узел  $t_{\text{ад}}^{\text{B}}$ ). Экспериментально температуру  $t_{\text{ад}}^{\text{B}}$  можно измерить любым контактным или бесконтактным методом. На основе (5.31) и эквивалентной схемы на рисунке 5.14 выведем расчетные формулы для определения перепадов температур в узлах  $t_{\text{пр}}^{\text{B}}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\text{H}}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\text{B}'}$ . Рассмотрим участок  $I$  – от узла  $t_{\text{ад}}^{\text{B}}$  до узла  $t_{\text{пр}}^{\text{B}}$ . Участок состоит из последовательного соединения тепловых сопротивлений  $R_{\text{ад-из}}$ ,  $R_{\text{из-пр}}$  и параллельного соединения по отношению к ним теплового сопротивления  $R_{\text{TSV1}}$ . Общее тепловое сопротивление участка  $I$  с учетом (5.31) будет:

$$R_1 = \frac{(R_{\text{ад-из}} + R_{\text{из-пр}})R_{\text{TSV1}}}{R_{\text{ад-из}} + R_{\text{из-пр}} + R_{\text{TSV1}}} = \frac{\left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}} \cdot S} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}} \cdot S}\right) \frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}}{\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}} \cdot S} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}} \cdot S} + \frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}} =$$

$$= \frac{\frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S \cdot S_{\text{TSV}}} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right)}{\frac{1}{S} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right) + \frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}},$$

где  $h_{\text{ад}}$ ,  $h_{\text{из}}$ ,  $h_{\text{TSV1}}$  – толщина адгезионного, изоляционного слоев и переходного отверстия на 1 участке;  $\lambda_{\text{Ti}}$ ,  $\lambda_{\text{SiO2}}$ ,  $\lambda_{\text{W}}$  – коэффициенты теплопроводности титана, оксида кремния и вольфрама;  $S$ ,  $S_{\text{TSV}}$  – общая площадь кристалла ОИС и площадь переходного отверстия.

Аналогичным образом находятся тепловые сопротивления участка 2 и участка 3:

$$R_2 = \frac{(R_{\text{пр-под}} + R_{\text{под-пр}})R_{\text{TSV2}}}{R_{\text{пр-под}} + R_{\text{под-пр}} + R_{\text{TSV2}}} = \frac{\left(\frac{h_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot S_{\text{пр}}} + \frac{h_{\text{под}}}{\lambda_{\text{Si}} \cdot S}\right) \frac{h_{\text{TSV2}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}}{\frac{h_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot S_{\text{пр}}} + \frac{h_{\text{под}}}{\lambda_{\text{Si}} \cdot S} + \frac{h_{\text{TSV2}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}};$$

$$R_3 = \frac{(R_{\text{пр-из}} + R_{\text{из-ад}} + R_{\text{ад-из}} + R_{\text{из-пр}})R_{\text{TSV3}}}{R_{\text{пр-из}} + R_{\text{из-ад}} + R_{\text{ад-из}} + R_{\text{из-пр}} + R_{\text{TSV3}}} = \frac{(2R_{\text{пр-из}} + 2R_{\text{из-ад}})R_{\text{TSV3}}}{2R_{\text{пр-из}} + 2R_{\text{из-ад}} + R_{\text{TSV3}}} =$$

$$= \frac{2h_{\text{TSV3}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S \cdot S_{\text{TSV}}} \left(\frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}} + \frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}}\right),$$

$$= \frac{2}{S} \left(\frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}} + \frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}}\right) + \frac{h_{\text{TSV3}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}},$$

где  $h_{\text{пр}}$ ,  $h_{\text{под}}$ ,  $h_{\text{TSV2}}$ ,  $h_{\text{TSV3}}$  – толщина проводящего слоя, подложки и переходных отверстий на 2, 3 участках;  $\lambda_{\text{Al}}$ ,  $\lambda_{\text{Si}}$  – коэффициенты теплопроводности алюминия и кремния;  $S_{\text{пр}}$  – суммарная площадь проводников на проводящем слое.

Общее тепловое сопротивление для 1 слоя ОИС будет:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Тогда с учетом (5.32) перепад температур на проводящих слоях в узлах  $t_{\text{пр}}^{\text{B}}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\text{H}}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\text{B}'}$  равен:

$$\Delta T_1 = R_1 P = P \frac{\frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S \cdot S_{\text{TSV}}} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right)}{\frac{1}{S} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right) + \frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}}; \quad (5.32)$$

$$\Delta T_2 = (R_1 + R_2) P = P \left( \frac{\frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S \cdot S_{\text{TSV}}} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right)}{\frac{1}{S} \left(\frac{h_{\text{ад}}}{\lambda_{\text{Ti}}} + \frac{h_{\text{из}}}{\lambda_{\text{SiO2}}}\right) + \frac{h_{\text{TSV1}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}} + \frac{\frac{h_{\text{TSV2}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}} \left(\frac{h_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot S_{\text{пр}}} + \frac{h_{\text{под}}}{\lambda_{\text{Si}} \cdot S}\right)}{\frac{h_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{Al}} \cdot S_{\text{пр}}} + \frac{h_{\text{под}}}{\lambda_{\text{Si}} \cdot S} + \frac{h_{\text{TSV2}}}{\lambda_{\text{W}} \cdot S_{\text{TSV}}}} \right); \quad (5.33)$$

$$\Delta T_3 = (R_1 + R_2 + R_3)P =$$

$$= P \left( \frac{h_{TSV1}}{\lambda_w \cdot S \cdot S_{TSV}} \left( \frac{h_{ад}}{\lambda_{Ti}} + \frac{h_{из}}{\lambda_{SiO2}} \right) + \frac{h_{TSV2}}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} \left( \frac{h_{пр}}{\lambda_{Al} \cdot S_{пр}} + \frac{h_{под}}{\lambda_{Si} \cdot S} \right) + \frac{2h_{TSV3}}{\lambda_w \cdot S \cdot S_{TSV}} \left( \frac{h_{из}}{\lambda_{SiO2}} + \frac{h_{ад}}{\lambda_{Ti}} \right) \right) \quad (5.34)$$

$$\left[ \frac{1}{S} \left( \frac{h_{ад}}{\lambda_{Ti}} + \frac{h_{из}}{\lambda_{SiO2}} \right) + \frac{h_{TSV1}}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} + \frac{h_{пр}}{\lambda_{Al} \cdot S_{пр}} + \frac{h_{под}}{\lambda_{Si} \cdot S} + \frac{h_{TSV2}}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} + \frac{2}{S} \left( \frac{h_{из}}{\lambda_{SiO2}} + \frac{h_{ад}}{\lambda_{Ti}} \right) + \frac{h_{TSV3}}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} \right]$$

Рассуждая подобным образом можно вывести выражения для тепловых сопротивлений и перепадов температур на 2 и 3 слоях ОИС.

Проведем анализ выражений (5.32)...(5.34). Пусть в этих выражениях аргументом выступает площадь поперечного сечения ОИС  $S$ . Номинальное значение  $S = 9 \times 9 \text{ мм}^2 = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ . Диапазон значений аргумента примем от  $0,5 \cdot S$  до  $1,5 \cdot S$ . Полученное семейство функций (рисунок 5.15, а) имеет нелинейный монотонно убывающий характер. Можно видеть, что максимальный перепад температуры  $\Delta T_3$  менее  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $\Delta T_3(4 \cdot 10^{-5}) = 0,094 \text{ }^\circ\text{C}$ . При номинальном значении аргумента  $\Delta T_3(4 \cdot 10^{-5}) = 0,046 \text{ }^\circ\text{C}$ . Эти результаты свидетельствуют о том, что по вертикальной оси ОИС относительно источника тепловыделения перепады температуры незначительны. Следовательно, по оси аппликат формируется изотермическая линия с разницей менее  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и с возможностью организации локальной группы ЭРИ на разных слоях ОИС.

Рассмотрим теперь вклад сквозного переходного отверстия в процесс теплопередачи сквозь структуру ОИС. Для этого из выражений (5.32)...(5.34) исключим тепловые сопротивления  $R_{ад-из}$ ,  $R_{из-пр}$ ,  $R_{пр-под}$ ,  $R_{под-пр}$ ,  $R_{пр-из}$ ,  $R_{из-ад}$  и оставим только  $R_{TSV1}$ ,  $R_{TSV2}$ ,  $R_{TSV3}$ . В результате получим выражения для перепадов температур на участках 1, 2, 3:

$$\Delta T_1 = \frac{P \cdot h_{TSV1}}{\lambda_w \cdot S_{TSV}}; \quad (5.35)$$

$$\Delta T_2 = \frac{P}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} (h_{TSV1} + h_{TSV2}); \quad (5.36)$$

$$\Delta T_3 = \frac{P}{\lambda_w \cdot S_{TSV}} (h_{TSV1} + h_{TSV2} + h_{TSV3}) \quad (5.37)$$

Номинальное значение площади поперечного сечения переходного отверстия  $S = \pi R^2 = \pi \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2 = 3,142 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Диапазон значений аргумента от  $0,5 \cdot S$  до  $1,5 \cdot S$ . Полученное семейство характеристик (рисунок 5.15, б) качественно повторяет характер семейства на рисунке 5.15, а. Однако в количественном отношении все иначе. Гипотетический максимальный перепад температуры  $\Delta T_3$  составляет  $2,336 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $\Delta T_3(1 \cdot 10^{-12}) = 2,336 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При номинальном значении аргумента  $\Delta T_3(3,142 \cdot 10^{-12}) = 1,13 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученные значения говорят о том, что микронные размеры сквозных переходных отверстий в структуре ОИС физически не могут служить эффек-

тивным каналом отвода тепла, несмотря на относительно высокое значение коэффициента теплопроводности материала. Из (5.37) нетрудно видеть: чтобы обеспечить перепад температуры в  $0,1\text{ }^\circ\text{C}$  площадь сквозного переходного отверстия должна быть порядка  $1\text{ мм}$ . Идея кондуктивных теплопроводов на основе сквозных переходных отверстий при микронных размерах характерных частей ОИС несостоятельна.

Вернемся к выражениям (5.32)...(5.34) и выберем в качестве аргумента мощность тепловыделения  $P$ . Номинальное значение аргумента  $P = 1\text{ Вт}$ . Диапазон значений аргумента примем от  $0,5\cdot P$  до  $1,5\cdot P$ . Прежний аргумент  $S$  в данном случае остается постоянной величиной  $S = 8,1\cdot 10^{-5}\text{ м}^2$ . Полученное семейство функций (рисунок 5.15, в) имеет линейно-возрастающий характер. Максимальный перепад температуры составляет  $\Delta T_3 = 0,07\text{ }^\circ\text{C}$ . При номинальном значении аргумента  $\Delta T_3(1) = 0,046\text{ }^\circ\text{C}$ . Как и в случае варьирования площадью поперечного сечения  $S$  по вертикальной оси ОИС относительно источника тепловыделения перепады температуры незначительны. Следовательно, по оси аппликат формируется изотермическая линия с разницей менее  $0,1\text{ }^\circ\text{C}$  и с возможностью организации локальной группы ЭРИ на разных слоях ОИС.

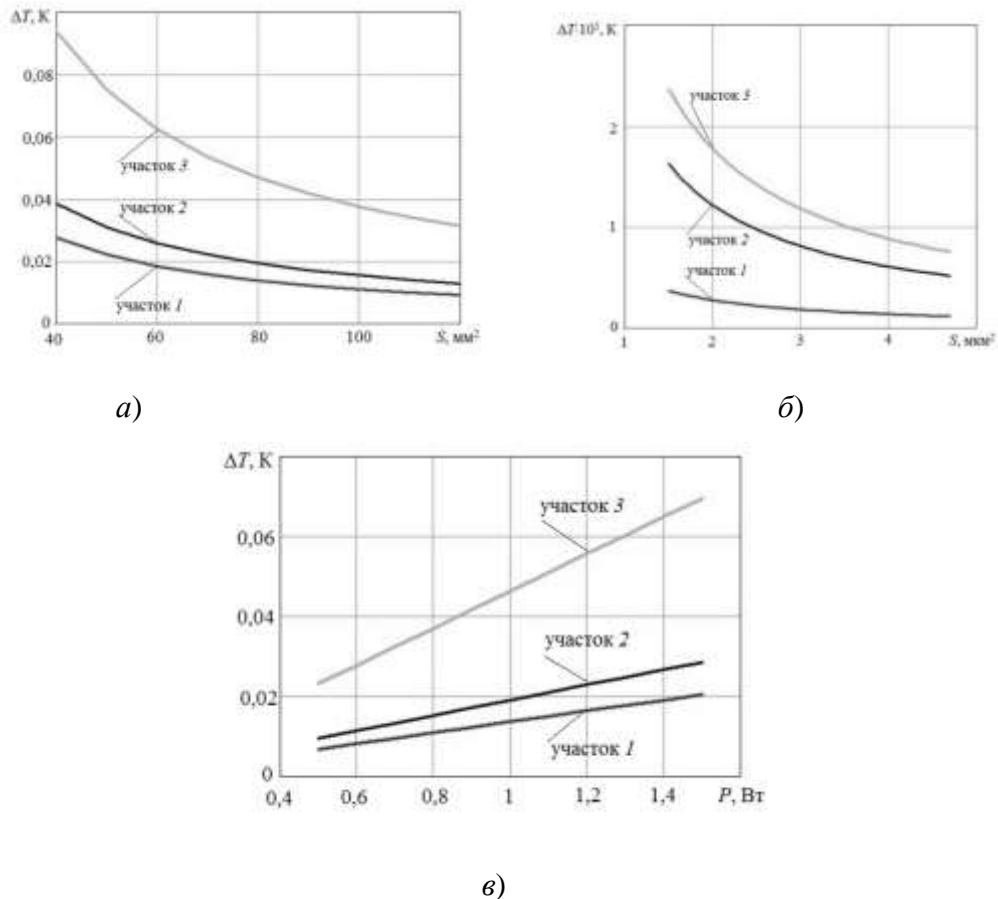


Рисунок 5.15 – Функциональные зависимости перепада температур от площади поперечного сечения и мощности

По аналогии с условно двухмерными несущими конструкциями и связанным с ними понятием локальной группы введем понятие «объемная локальная группа». Объемная локальная

группа (ОЛГ) – группа смежных ЭРИ, размещаемых после предварительных расчетов температурного поля на изотермической линии (изотермической оболочке). Изотермические линии в ОИС, как следует приведенных выше расчетов, могут располагаться не только в горизонтальной, но и вертикальной плоскости. Свойства ОЛГ ЭРИ наследуют свойства локальных групп условно двухмерных несущих конструкций:

1. Свойство ассоциативности (5.15).
2. Свойство доминирования (5.16).
3. Свойство изоповерхности (5.17).
4. Обратное свойство (5.20).

Недостатком рассмотренной математической модели на основе сосредоточенных параметров (5.32)...(5.34) является отсутствие достоверной информации о распределении тепла по толщине ОИС при отклонении от нормали по отношению к источнику тепловыделения. Интуитивно можно предположить, что при достаточном отклонении от нормали температура внутренних слоев будет стремиться к начальной температуре твердого тела. Графическая постановка задачи по пространственной локализации ОЛГ ОИС показана на рисунке 5.16. На одном из проводящих слоев (необязательно верхнем) расположен источник тепловыделения  $P$ . Как было показано выше, источник тепловыделения  $P$  формирует изотермическую линию по толщине  $H$  структуры ОИС температурой  $T \pm 0,1$  °С. Удаленные боковые грани ОИС имеют температуры среды  $T_0$ . Требуется найти критическое расстояние  $x$ , на котором температура  $T_{гр}$  слоистой структуры по-прежнему удовлетворяет свойству изоповерхности (5.17). В общем случае расстояние  $x$  может быть различным для каждого конкретного слоя ОИС и форма изоповерхности будет отличаться от параллелепипеда.

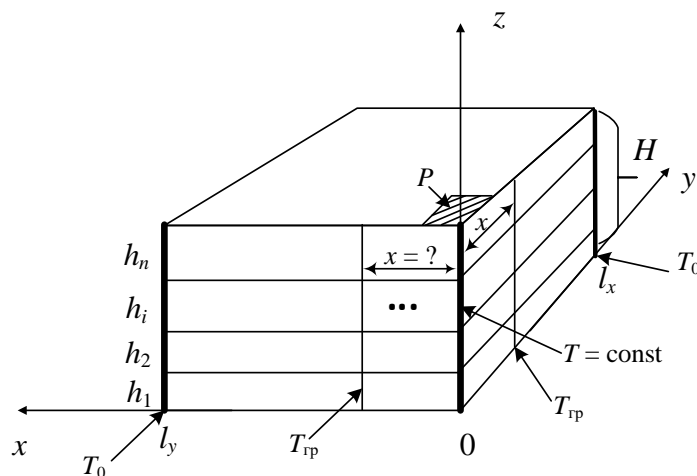


Рисунок 5.16 – Графическая постановка задачи пространственного нахождения ОЛГ

Для качественного и количественного ответа на задачу рисунка 5.16 следует от упрощенной модели с сосредоточенными параметрами (5.32)...(5.34) перейти к математической модели на основе уравнения теплопроводности, рассмотренной в главе 4:

$$\begin{aligned} \text{ср} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} &= \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, z)}{\partial z^2} \right) + \sum_{j=1}^m q_j(x, y). \\ & -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z=0} + \alpha_H (T_1 - T_{\text{CP}}) + q_H(x, y) = 0; \\ T_i \Big|_{z=h_i} &= T_{i+1} \Big|_{z=h_{i+1}}; \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z_i} \Big|_{z=h_i} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z_{i+1}} \Big|_{z=h_{i+1}}; \\ & -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z_n} \Big|_{z=h_n} + \alpha_B (T_n - T_{\text{CP}}) + q_B(x, y) = 0; \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=0} &= q_{i,x=0}(y); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=l_x} = -q_{i,x=l_x}(y); \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0} &= q_{i,y=0}(x); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{x=l_y} = -q_{i,x=l_y}(x). \\ T \Big|_{\tau=0} &= T_{\text{CP}}(x, y, z). \end{aligned}$$

Также в главе 4 рассмотрена методика решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных на основе метода конечных элементов, где в качестве средства реализации выступает программный комплекс SolidWorks Simulation Thermal Analysis.

### 5.3 Результаты топологической термокомпенсации для условно одномерных несущих конструкций электронных средств

Для проведения экспериментальной части исследования использовалась измерительная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 5.17. Основа измерительной установки – герметичная, оптически прозрачная камера. Камера имитирует условия функционирования, приближенные к реальным условиям эксплуатации светодиодного линейного модуля в ФСЛ внутри стеклянной колбы. Для улучшения конвективного теплообмена между светодиодным линейным модулем и окружающей средой предусмотрено заполнение камеры гелием. Подача гелия из резервуара в камеру регулируется редуктором. Температура гелия в камере равна 23°C. Испытуемые образцы светодиодных линейных модулей через коммутационное устройство (мультиплексор) электрически связаны с импульсным источником тока Mastech NY6003E-3 и с



мультиметром Mastech MAS838. Коммутационное устройство позволяет подключать один измерительный канал мультиметра к нескольким образцам светодиодных линейных модулей. Такое решение позволяет увеличить производительность выполняемых измерений. Применение импульсного источника тока позволяет уменьшить массогабаритные показатели измерительной установки и расширить диапазон значений испытательных токов. Цифровой мультиметр может совершать до 3 измерений тока в секунду. Рабочая температура светодиодных кристаллов измеряется бесконтактным методом – с помощью тепловизора FLIR SC7000.

Сборочная единица светодиодного линейного модуля представлена на рисунке 5.18. Основа модуля – подложка из никелированной стали. Металлическая подложка используется как общий контакт для светодиодных кристаллов. Одним из контактов крайний светодиодный кристалл приваривается к подложке (к общему проводнику). Все светодиодные кристаллы (28 шт.) монтируются на подложку с помощью клея, обладающего высокой теплопроводностью и электрической прочностью, и электрически соединяются последовательно друг с другом. Измерения проводились для серии сборочных единиц, отличающихся коэффициентом дихотомии  $Coeff$  в расположении кристаллов, причем  $Coeff \in [1.1 \dots 2.0]$ .



Рисунок 5.17 – Структурная схема измерительной установки

Применяемые светодиодные кристаллы Epistar ES-CEBHV10F рассчитаны на прямой ток 20 мА; обладают излучением с длиной волны 465...475 нм. Габаритные размеры составляют 0,585×0,29×0,09 мм. Максимальная температура  $p$ - $n$ -перехода таких кристаллов – 115 °С.

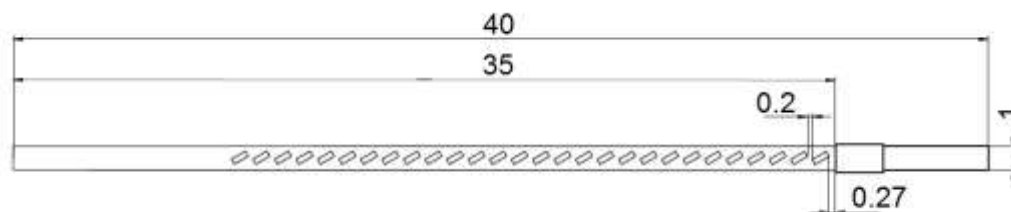


Рисунок 5.18 – Габаритные и установочные размеры светодиодного линейного модуля

Рассмотрим методику проведения измерений. Из герметичной камеры (рисунок 5.17) предварительно откачивается атмосферный воздух. Затем в камеру из резервуара поступает технический гелий (99.8%). Давление газа в камере поддерживается на уровне 1 атм. Источник тока обеспечивает подачу фиксированных значений тока в диапазоне от 1 мА до 20 мА. Контроль протекания тока через светодиодные линейные модули обеспечивается мультиметром. Коммутирующее устройство поочередно подключает испытуемые светодиодные модули к источнику тока.

В стационарном тепловом режиме, спустя 5 мин после подключения источника через коммутирующее устройство к испытуемому образцу, происходит регистрация температурного профиля светодиодного линейного модуля с помощью тепловизора. В режиме реального времени с частотой 380 Гц в полнокадровом режиме ведется съемка термографической картины. Поток радиометрических изображений разрядностью 14 бит по технологии Gigabit Ethernet передается на персональный компьютер.

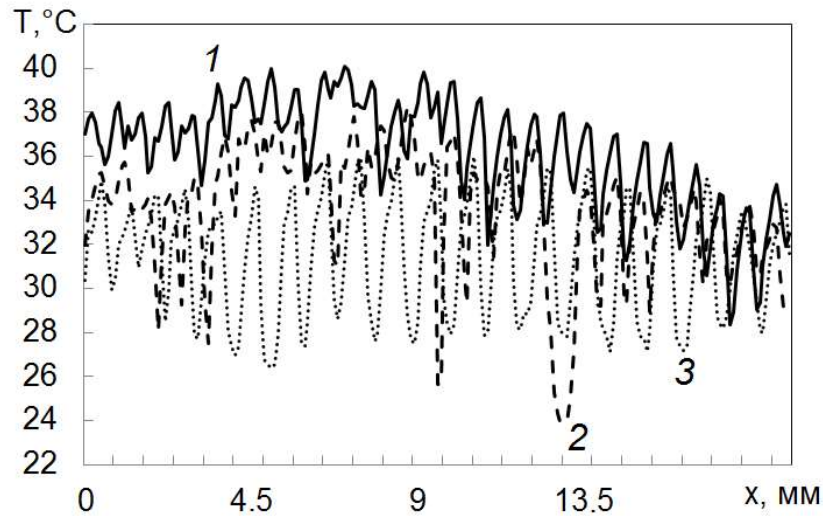
Выделим из серии измеренных образцов светодиодных линейных модулей три образца, в которых наиболее сильно выражена разница в температурном профиле:

- образец 1: прямой ток  $I = 5$  мА, эквидистантное расположение кристаллов, «ручное» позиционирование,  $Coeff = 1,0$ ;
- образец 2: прямой ток  $I = 5$  мА, эквидистантное расположение кристаллов, автоматизированное позиционирование,  $Coeff = 1,0$ ;
- образец 3: прямой ток  $I = 5$  мА, локализация кристаллов, «ручное» позиционирование,  $Coeff = 1,5$ .

Высокая разрешающая способность тепловизора позволяет наблюдать отклонения температур относительно постоянной составляющей температурного профиля (рисунок 5.19). Количество отклонений на каждом температурном профиле ( $N = 28$ ) и их пространственное расположение соответствует количеству и локализации светодиодных кристаллов, размещенных на подложке.

Наибольшие среднеквадратические отклонения температуры для образца №3 вызваны неравномерным расположением светодиодных кристаллов (коэффициент дихотомии  $Coeff = 1,5$ ).

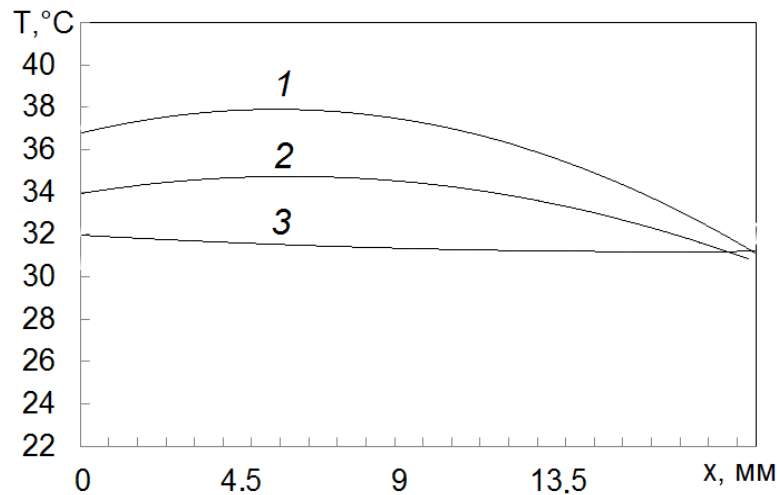
Можно видеть (рисунок 5.19, кривая 3), что на среднем пространственном участке, соответствующем разреженному расположению кристаллов на подложке, среднеквадратическое отклонение больше, чем на периферии.



1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

Рисунок 5.19 – Температурные профили образцов светодиодных линейных модулей ФСЛ

Для более наглядного анализа выполнения (5.1) первичная картина распределения температуры по длине подложки для трех исследуемых образцов (рисунок 5.19) преобразована с помощью аппроксимации полиномами второго порядка (рисунок 5.20). Методика обработки первичных экспериментальных данных – автоматизированная и основана на применении распространенной программы Microsoft Excel. Первичные экспериментальные данные, полученные с измерительной установки, представляют в табличном виде (формат xls). Затем табличное представление преобразуется в графический вид (тип диаграммы Excel «График»). На основе полученного графика в Excel применяется стандартное программное средство «Добавить линию тренда». Среди шести предлагаемых программой видов аппроксимации наилучшие результаты (по методу наименьших квадратов) показывает вариант полиномиальной аппроксимации. Физический смысл полученного в результате полинома – это постоянная составляющая температурного профиля подложки. Постоянная составляющая температурного профиля показывает идеализированное распределение температуры по длине подложки с точечными источниками тепла, интегрированными в подложку без учета тепловых сопротивлений. Амплитуда отклонений вычисляется как модуль разности экстремума и постоянной составляющей температурного профиля.



1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

Рисунок 5.20 – Аппроксимация температурных профилей полиномами второго порядка  $\phi(x)$

С качественной точки зрения наименьшую кривизну имеет образец №3, обладающий неравномерным расположением кристаллов (коэффициент дихотомии  $Coeff = 1,5$ ). Оптимальное значение  $Coeff = 1,5$  по критерию (5.7) получено эмпирическим путем после серии предварительных установочных экспериментов. Помимо наименьшей кривизны кривая 3 обладает также наименьшей постоянной составляющей температурного профиля  $T_{п.с} = 32$  °C. Для количественного анализа представляем температурный профиль как траекторию движения материальной точки  $\phi(x)$  вдоль оси  $x$  и оцениваем кривизну в  $\text{мм}^{-1}$ . Количественный анализ испытуемых образцов сведен в таблицу. Для характерной пространственной точки  $x = 9$  мм, соответствующей середине рабочего участка светодиодного линейного модуля, получены численные значения кривизны (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Количественный анализ образцов светодиодных линейных модулей ФСЛ

Номер образца	Описание образца	Аппроксимация полиномом второго порядка	Кривизна $K$ , $\text{мм}^{-1}$ для точки $x = 9$ мм
1	Ток 5 мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,0$	$\phi(x) = -3 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,037x + 36,754$	$5,991 \cdot 10^{-4}$
2	Ток 5 мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,0$	$\phi(x) = -2 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0248x + 33,913$	$3,997 \cdot 10^{-4}$
3	Ток 5 мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,5$	$\phi(x) = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0085x + 31,968$	$4,000 \cdot 10^{-5}$

Применение неравномерного расположения светодиодных кристаллов для образца №3 позволило уменьшить кривизну профиля с  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  мм<sup>-1</sup>. Следовательно, для образца №3 экспериментально решена поставленная задача (5.1) – найден способ расположения кристаллов на подложке с целью минимизации кривизны температурного профиля для характерной точки  $x = 9$  мм.

На основе анализа экспериментальных данных показано, что в стационарном тепловом режиме в светодиодных линейных модулях ФСЛ возникает градиент температуры вдоль длины подложки – температурный профиль. Доказано, что функция локализации кристаллов на подложке зависит от порядкового номера размещаемого кристалла и от коэффициента дихотомии. Введена целевая функция, достигаемая в процессе дихотомии – минимизация кривизны  $K$  профиля для характерной точки  $x$ . Проведено экспериментальное исследование трех образцов светодиодных линейных модулей, из которых два образца имеют эквидистантное расположение кристаллов, а третий образец обладает локализацией кристаллов с эмпирически установленным коэффициентом дихотомии  $Coeff = 1,5$ . Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать: применение локализации кристаллов с коэффициентом дихотомии  $Coeff = 1,5$  для образца №3 позволило уменьшить кривизну профиля с  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  мм<sup>-1</sup> по сравнению с образцами №1 и №2.

#### 5.4 Результаты топологической термокомпенсации для условно двухмерных несущих конструкций электронных средств

Рассмотрим теперь экспериментальную часть исследования температурной стабильности методом термокомпенсации на примере прецизионного источника опорного напряжения, выполненного на условно двухмерной несущей конструкции. Прецизионные источники опорного напряжения (ПИОН) часто являются функциональными узлами, входящими в состав бортовой космической радиоаппаратуры (БКРА). При этом стабильность ПИОН в значительной степени определяет стабильность БКРА в целом. ПИОН, как объект исследования температурной стабильности, обычно представляет собой законченный функциональный узел, а также обладает всеми перечисленными выше условиями, необходимыми для обеспечения топологической термокомпенсации.

В качестве прототипа объекта исследования выбран ПИОН из [52]. Модифицированная схема ПИОН представлена на рисунке 5.21 и обладает следующими основными характеристиками:

- входное напряжение  $U_{\text{ВХ}} = 13 \dots 20 \text{ В}$ ;
- выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}} = 10 \text{ В}$ ;
- номинальный ток нагрузки  $I_{\text{Н}} = 50 \text{ мА}$ ;
- ток срабатывания схемы защиты от перегрузки  $I_{\text{ЗАЩ}} = 200 \text{ мА}$ .

Входной сигнал ПИОН поступает на регулирующий элемент, представляющий собой составной транзистор  $VT3-VT4$ . Усилитель рассогласования, выполненный на операционном усилителе  $DA1$ , анализирует разницу между сигналом с датчика тока (делитель  $R7-R8$ ) и сигналом с источника опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$  (стабилитрон  $VD1$ ). По цепи обратной связи сигнал рассогласования подается на базу составного регулирующего элемента  $VT3-VT4$ . Схема защиты от превышения допустимого тока нагрузки выполнена на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VT5$ . Если через резистор  $R6$ , служащем датчиком тока перегрузки, протекает ток более 200 мА, то падение напряжения база–эмиттер на транзисторе  $VT5$  достигает 0,6 В, в результате чего он открывается. Это приводит к тому, что транзисторы  $VT2$  и  $VT1$  также открываются и выключают питание операционного усилителя  $DA1$ . При этом схема ПИОН переходит в аварийный режим работы. После установления допустимого тока нагрузки схема ПИОН автоматически возвращается в нормальный режим работы.

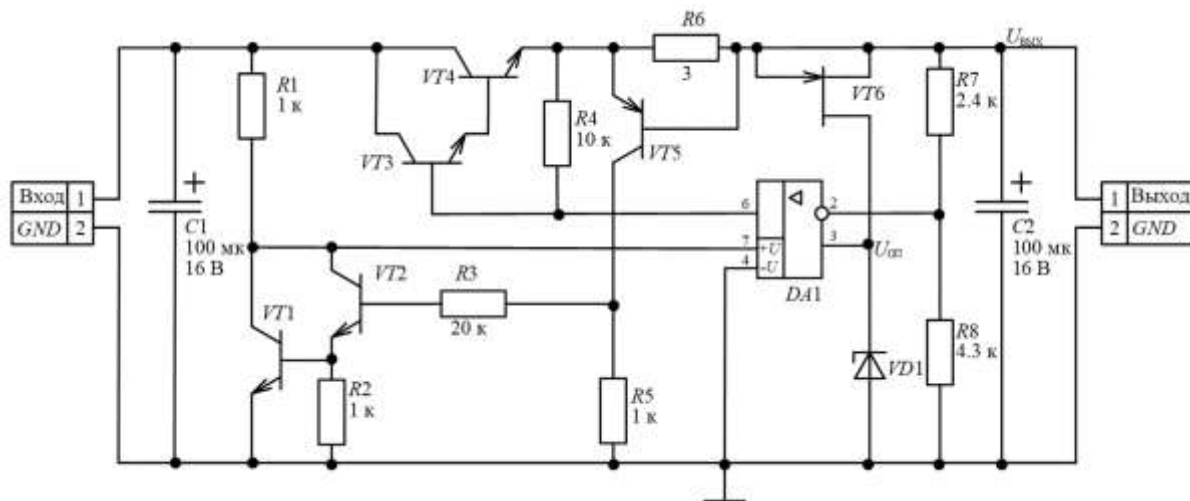


Рисунок 5.21 – Схема электрическая принципиальная ПИОН

*Натурный эксперимент.* Первый конструктивный вариант ПИОН (исполнение №1) представлен на рисунке 5.22. Материал основания платы – стеклотекстолит FR4-35/35-1,5 (двухсторонний, толщина металлизации 35 мкм, толщина основания 1,5 мм) [140]. Печатный рисунок выполнен по 3 классу точности. Размер печатной платы 30×24 мм. Технология изготовления пе-

чатной платы – комбинированный позитивный метод. Размещение ЭРИ на печатной плате в конструктивном варианте №1 ПИОН (рисунок 5.25, б) проводилось по критерию минимизации суммарной длины электрических связей. Критерий температурной стабильности выходного напряжения специально не учитывался.

Тестовая работоспособность конструктивного варианта №1 оценена с помощью амплитудной передаточной характеристики (рисунок 5.23).

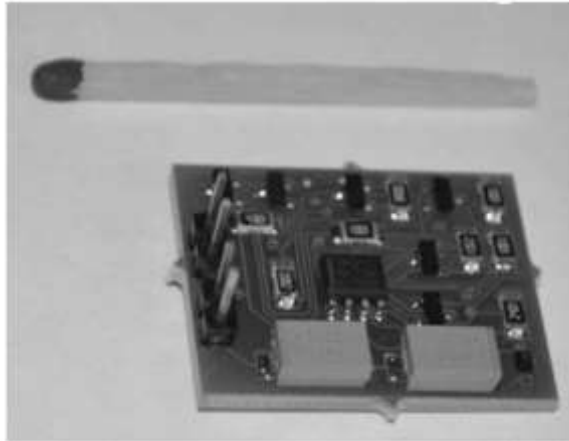


Рисунок 5.22 – Первый конструктивный варианта ПИОН

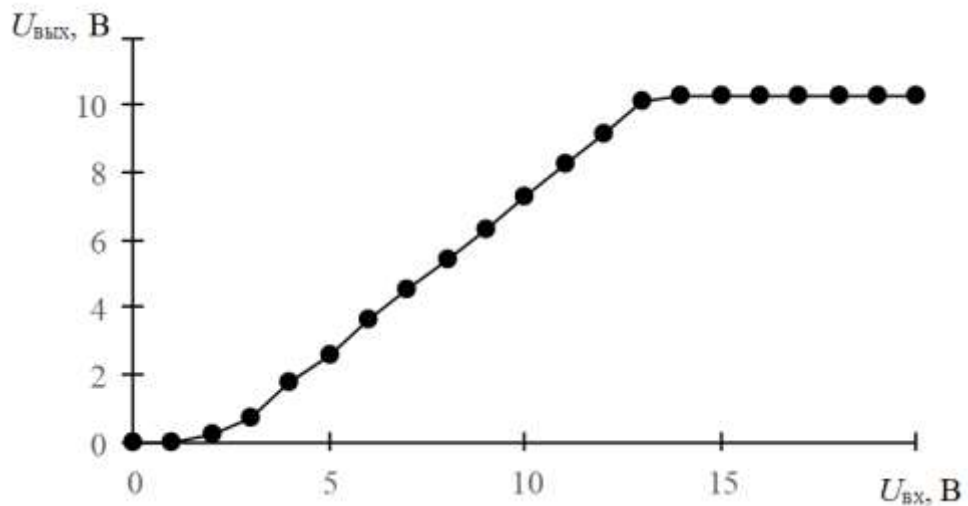


Рисунок 5.23 – Амплитудная передаточная характеристика

Анализ температурного поля несущей конструкции ПИОН исполнения №1 проведен с помощью измерительной установки. Схема измерительной установки представлена на рисунке 5.24. Основа измерительной установки – оптически прозрачная камера. Испытуемый образец ПИОН через разъемное соединение электрически связан с блоком питания Matrix MPS-3003LK-3. К выходу ПИОН подключен резистор нагрузки ( $R_H = 200 \text{ Ом}$ ), а также мультиметр Mastech

MAS838. Блок питания позволяет плавно регулировать входное напряжение в диапазоне от 0 до 20 В. Мультиметр регистрирует выходное напряжение ПИОН. Температурное поле несущей конструкции ПИОН анализируется бесконтактным методом – с помощью тепловизора FLIR SC7000.

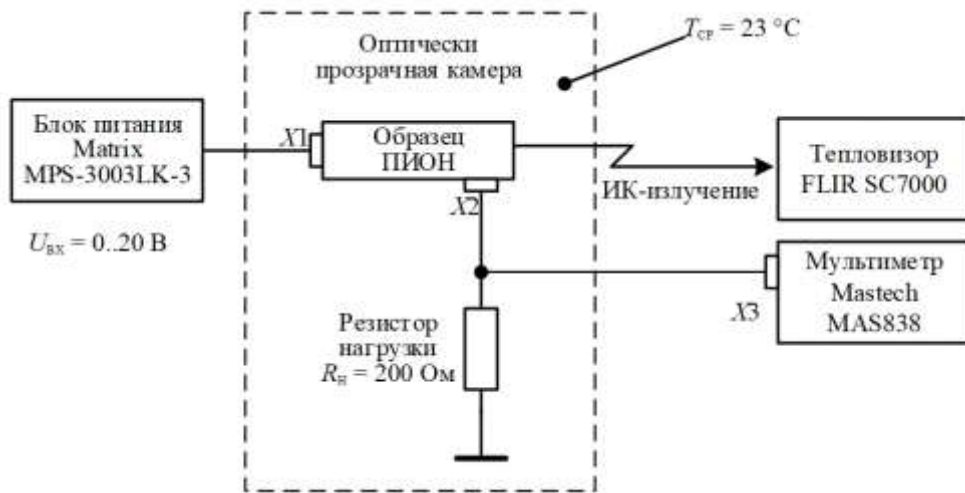


Рисунок 5.24 – Схема измерительной установки

Рассмотрим лабораторные условия, устанавливаемые для съемки термографической картины печатной платы ПИОН. Температура окружающей среды внутри измерительной камеры равна 23 °С. Стационарный тепловой режим печатной платы ПИОН спустя 5 мин после включения блока питания поддерживается при входном напряжении  $U_{\text{ВХ}} = 16$  В. Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}} = 10,137$  В, ток нагрузки  $I_{\text{Н}} = 50$  мА. В стационарном тепловом режиме у транзистора VT4 рассеиваемая мощность  $P_{\text{VT4}} = 300$  мВт, у стабилитрона VD1 мощность тепловыделения  $P_{\text{VD1}} = 63$  мВт; остальные ЭРИ имеют незначительную рассеиваемую мощность. Заметим, что максимальная рассеиваемая мощность применяемых в схеме транзисторов BC847B.215  $P_{\text{МАХ}} = 330$  мВт. В режиме реального времени с частотой 380 Гц в полнокадровом режиме ведется съемка термографической картины. Поток радиометрических изображений разрядностью 14 бит по технологии Gigabit Ethernet передается на персональный компьютер. Кадр такого изображения представлен на рисунке 5.25, а.

На термограмме видны два температурных экстремума: глобальный, формируемый тепловыделением транзистора VT4 и локальный, формируемый тепловыделением стабилитрона VD1. При указанных выше лабораторных условиях транзистор VT4 имеет рабочую температуру 80 °С, а стабилитрон VD1 – температуру 53 °С. Мощный тепловыделяющий элемент VT4 создает на несущей конструкции ПИОН градиент температуры и, тем самым, определяет потенциальные возможности для топологической термокомпенсации. Заметим, что тепловое «пятно» в окрест-



ности транзистора  $VT4$  имеет форму эллипса, вытянутого вдоль оси  $x$  (по горизонтали). Очевидно, что этот эффект вызван тем, что длинная сторона корпуса транзистора  $VT4$  ориентирована по нормали к оси  $x$  (см. рисунок 5.25, б). Ориентировочный размер большой и малой осей для эллипса теплового «пятна» по уровню  $60\text{ }^\circ\text{C}$  составляет соответственно 10 и 6 мм. Тепловыделяющий элемент  $VD1$  обладает меньшей мощностью тепловыделения и меньшим градиентом температуры.

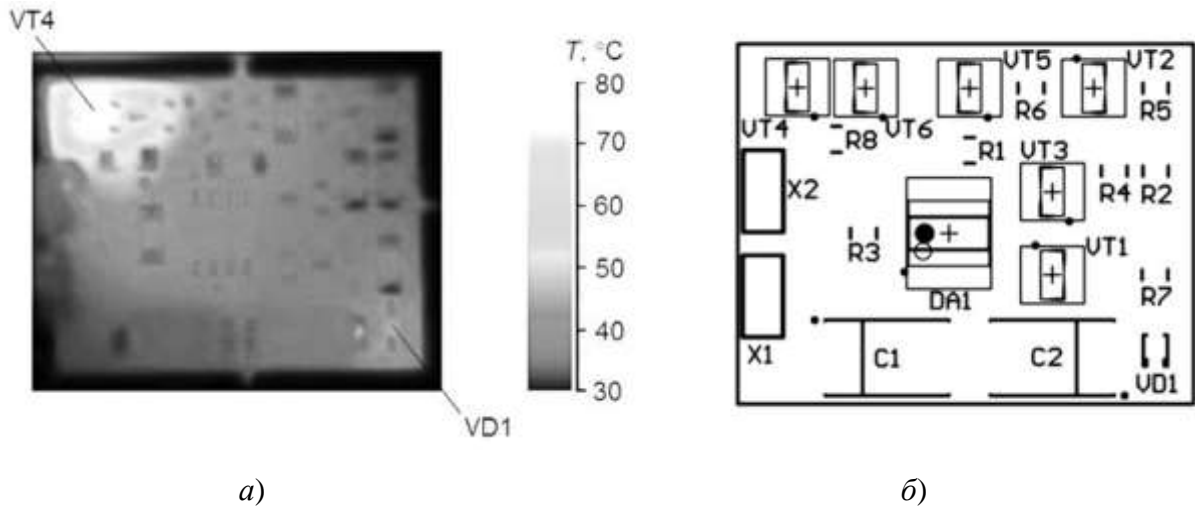


Рисунок 5.25 – Первый конструктивный вариант ПИОН

*Модельный эксперимент.* Как было отмечено выше (см. главу 3), для целей регрессионного анализа электрической схемы необходимы адекватные SPICE-модели по отношению к реальным прототипам ЭРИ. Применение отечественной элементной базы для схемы ПИОН могло значительно усложнить настоящее исследование – потребовалась бы разработка SPICE-моделей практически всех ЭРИ. Использование зарубежной элементной базы снимает эту проблему, поскольку иностранные производители ЭРИ, как правило, размещают в открытом доступе текстовые описания SPICE-моделей на выпускаемую ими продукцию. Для целей моделирования были использованы:

- SPICE-модель чип-конденсатора TAJD107K016RNJ (C1, C2);
- SPICE-модель операционного усилителя OP-07C (DA1);
- SPICE-модель чип-резистора RC1206FR (R1-R8);
- SPICE-модель стабилитрона DDZ6V8ASF-7 (VD1);
- SPICE-модель транзистора BC847B.215 (VT1-VT4);
- SPICE-модель транзистора BC857A.215 (VT5);
- SPICE-модель транзистора MMBFJ177LT1G (VT6).

В качестве схемотехнического симулятора при проведении вычислительной части эксперимента выбран продукт MicroCAP разработчика Spectrum Software. В среде MicroCAP реализована электрическая схема ПИОН по рисунку 5.21. Цель моделирования – нахождение уравнения температурной погрешности (2.23) для электрической схемы ПИОН методом полного факторного эксперимента. Критерий оптимизации – минимизация относительной погрешности выходного напряжения ПИОН, как функции относительных изменений рабочих температур ЭРИ:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = f\left(\frac{\Delta T_i}{T_i}\right).$$

Независимые переменные (факторы) – это рабочие температуры ЭРИ, входящих в электрическую схему. На предварительных этапах моделирования выявлено четыре ЭРИ, температурная зависимость которых значительно влияет на выходное напряжение ПИОН:

1. Резистор  $R7$ .
2. Резистор  $R8$ .
3. Стабилитрон  $VD1$ .
4. Транзистор  $VT6$ .

Число опытов в матрице планирования  $N = 2^4 = 16$ . Номинальные значения независимых переменных:  $T_{\text{ЭРИ}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Интервалы варьирования:  $\Delta T_{\text{ЭРИ}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Основные характеристики плана эксперимента приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	Значение фактора $z_i$	Кодовое значение фактора $x_i$
Верхний уровень, $z_{i\max}$	33 $^\circ\text{C}$	+1
Нижний уровень, $z_{i\min}$	13 $^\circ\text{C}$	-1

Для ведения эксперимента применяется план  $2^4$  (таблица 5.4). Технология реализации вычислительного факторного эксперимента предложена нами в главе 2. Результаты факторного эксперимента (SPICE-моделирования) записаны в столбец экспериментальных значений выходного параметра  $y_{\text{Э}}$ . Столбцы теоретических значений выходного параметра  $y_{\text{T}}$  и значений квадратов разностей  $(\Delta y)^2$  заполняются позже.

Ортогональность столбцов матрицы планирования позволяет определить коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 10,037;$$

$$b_1 = 0,0036875;$$

$$b_2 = -0,0036875;$$

$$b_3 = 0,0208125;$$

$$b_4 = -0,0021875.$$

Таблица 5.4 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$x_1$ (R7)	$x_2$ (R8)	$x_3$ (VD1)	$x_4$ (VT6)	$y_3$ , В	$y_T$ , В	$(\Delta y)^2$ , В <sup>2</sup>
1	-1	-1	-1	-1	10,0180	10,0181	$1 \cdot 10^{-8}$
2	-1	-1	-1	+1	10,0140	10,0137	$9 \cdot 10^{-8}$
3	-1	-1	+1	-1	10,0600	10,0597	$9 \cdot 10^{-8}$
...	...	...	...	...	...	...	...
16	+1	+1	+1	+1	10,0550	10,0553	$9 \cdot 10^{-8}$
					$\Sigma(\Delta y)^2 = 1,11 \cdot 10^{-6}$		

Следовательно, линейный полином имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = 10,037 + 0,0036875x_1 - 0,0036875x_2 + 0,0208125x_3 - 0,0021875x_4. \quad (5.29)$$

С помощью полученного линейного полинома (5.29) вычислено теоретическое значение выходного параметра  $y_T$  в каждом опыте. Результаты занесены в предпоследний столбец  $y_T$  таблицы 5.4. Последний столбец  $(\Delta y)^2$  таблицы 5.4 содержит значения квадратов разности между экспериментальным и теоретическим значениями выходного параметра. Итоговая сумма квадратов разности значений для линейного полинома составляет  $(\Delta y)^2 = 1,11 \cdot 10^{-6}$ . Полученное значение свидетельствует о хорошем соответствии линейной модели по отношению к экспериментальным данным. Следовательно, линейный полином (5.29) – адекватная регрессионная модель. Уравнение температурной погрешности в соответствии с (2.23) будет выглядеть:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = 0,011 \frac{\Delta T_{R7}}{T_{R7}} - 0,011 \frac{\Delta T_{R8}}{T_{R8}} + 0,062 \frac{\Delta T_{VD1}}{T_{VD1}} - 0,0065 \frac{\Delta T_{VT6}}{T_{VT6}}. \quad (5.30)$$

Из (5.30) следует, что наибольшее влияние на относительную погрешность выходного напряжения оказывает температурная погрешность стабилитрона VD1. Температурная зависимость выходного напряжения ПИОН имеет положительный тренд и определяется положительным знаком коэффициента влияния стабилитрона. Два ЭРИ – резисторы R7 и R8 – образуют комплементарную пару с точки зрения топологической термокомпенсации. Значения их коэффициентов влияния равны по модулю и противоположны по знаку. Два других ЭРИ – стабилитрон VD1 и транзистор VT6 – имеют менее выраженный эффект комплементарности, поскольку абсолютные значения их коэффициентов влияния отличаются примерно в 10 раз.

Концепцию топологической термокомпенсации, положенную в основу нового конструктивного исполнения №2 ПИОН, поясняет рисунок 5.26. Из всех ЭРИ, входящих в уравнение

(5.30), только стабилитрон  $VD1$  имеет рабочую температуру ( $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), отличную от фоновой температуры печатной платы ( $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Под рабочей температурой стабилитрона понимается температура его поверхности, возникающая при эксплуатации в лабораторных условиях, описанных выше. Удобно найти на плоскости несущей конструкции изотермическую линию, которая бы примерно совпадала по уровню с рабочей температурой стабилитрона  $VD1$ . При этом стабилитрон  $VD1$  будет самостоятельно создавать себе рабочую температуру равную уровню изотермы, а остальные ЭРИ из (5.30) будут находиться на заданной линии, благодаря наведенному перегреву от транзистора  $VT4$ . В результате на изотермической линии располагаются две комплементарные пары ЭРИ в соответствии с (5.30), которые обозначены как локальная группа №1 и локальная группа №2.

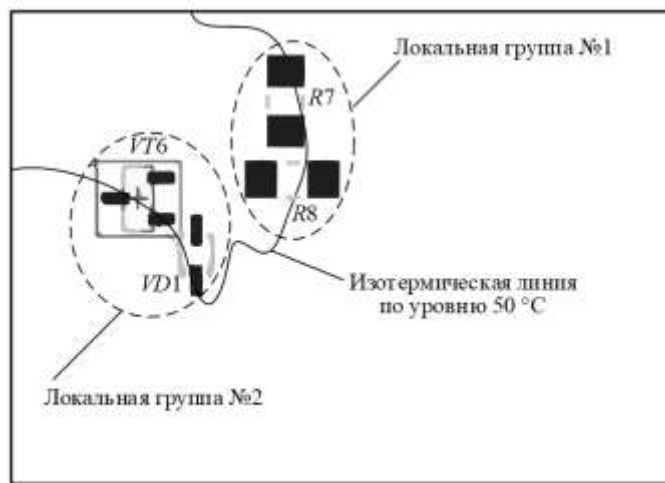
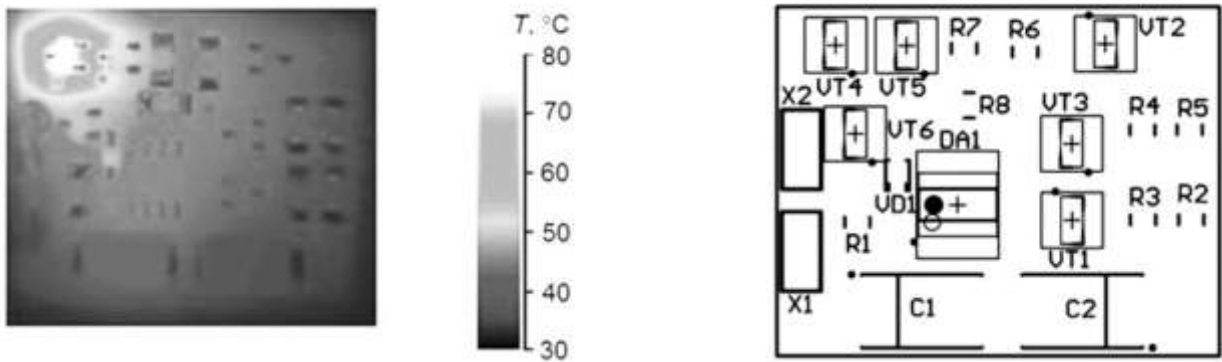


Рисунок 5.26 – Размещение локальных групп ЭРИ

Концепция топологической термокомпенсации реализована в конструктивном варианте №2 ПИОН (рисунок 5.27, а). Размещение на плате локальных групп ЭРИ (рисунок 5.27, б) потребовало также изменить расположение нескольких других ЭРИ:  $VT5$ ,  $R5$ ,  $R3$ ,  $R1$ .



а)

б)

Рисунок 5.27 – Второй конструктивный вариант ПИОН

В результате проведения эксперимента была исследована температурная стабильность выходного напряжения двух вариантов конструкции ПИОН (рисунок 5.28). Кривая 1 соответствует температурной зависимости выходного напряжения для первого конструктивного варианта, кривая 2 – для второго конструктивного варианта. Уровень 3 показывает номинальное значение выходного напряжения ПИОН  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}} = 10$  В. Кривые 1 и 2 представляют близкие к линейным функциям зависимости. При этом угол наклона кривой 2 имеет меньший угловой коэффициент по сравнению с кривой 1. Это свидетельствует о лучшей температурной стабильности второго конструктивного варианта.

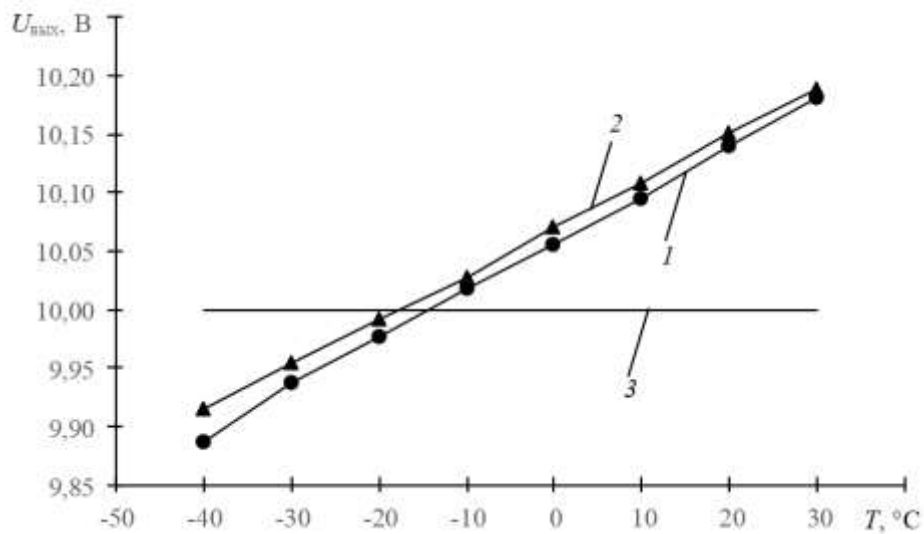


Рисунок 5.28 – Температурная стабильность выходного напряжения

Учитывая линейный характер зависимостей, можно оценить температурный коэффициент напряжения двух вариантов как:

$$TKU_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1 \Delta T} = \frac{10,180 - 9,887}{10 \cdot [30 - (-40)]} = 4,19 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$TKU_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2 \Delta T} = \frac{10,188 - 9,916}{10 \cdot [30 - (-40)]} = 3,89 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

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. Этот факт экспериментально подтверждает положение [42] о том, что метод термокомпенсации эффективен в относительно

узком температурном диапазоне. Проявление эффекта топологической термокомпенсации в области низких температур окружающей среды для конструктивного варианта №2 ПИОН ограничивает возможные условия его применения. Это эксплуатация в составе категорий изделий 1; 1.1; 2; 2.1; 3 исполнений У, ТУ, ХЛ, УХЛ, О, М, ОМ, В по ГОСТ 15150-69 [21].

Полученное уравнение температурной погрешности (5.30) есть функция, зависящая от рабочих температур ЭРИ, входящих в уравнение. В свою очередь, рабочие температуры ЭРИ являются функциями, зависящими от мощности тепловыделения проходного транзистора  $VT4$  (рисунок 5.29, а). Функция рабочей температуры для стабилитрона  $VD1$  имеет отличный от других функций вид, поскольку стабилитрон обладает также собственной значительной мощностью тепловыделения ( $P_{VD1} = 63$  мВт). Подставим экспериментальные значения рабочих температур для ЭРИ  $VD1$ ,  $VT6$ ,  $R8$ ,  $R7$  в (5.30). При этом полагаем  $\Delta T_{ЭРИ} = 1$  К, значения рабочих температур в (5.30) взяты в кельвинах. Получим зависимость относительной погрешности выходного напряжения ПИОН от рассеиваемой мощности проходного транзистора  $VT4$  (рисунок 5.29, б). Уменьшение рассеиваемой мощности транзистора  $VT4$  приводит к увеличению относительной погрешности выходного напряжения. Закономерность следует из (5.30), поскольку относительное изменение выходного напряжения обратно пропорционально относительной температуре ЭРИ.

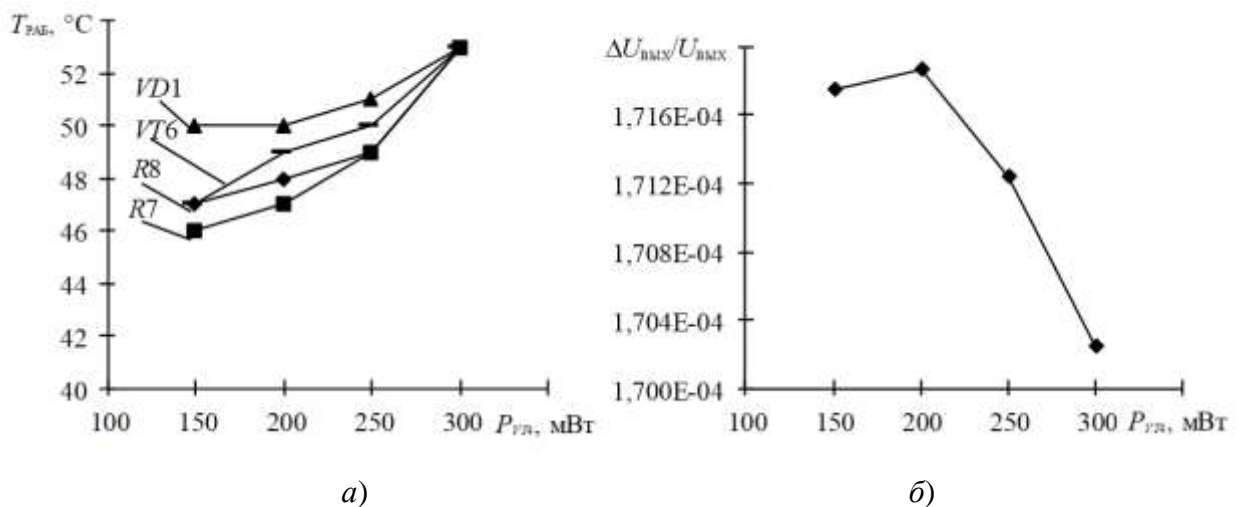


Рисунок 5.29 – Зависимость относительной погрешности выходного напряжения от рассеиваемой мощности

## 5.5 Результаты моделирования топологической термокомпенсации для трехмерных несущих конструкций электронных средств

В экспериментальной части исследования докажем с помощью моделирования положение: неравномерность температурного поля конструкции ОИС влияет на температурную стабильность электрических выходных параметров ЭС.

Объект исследования – импульсный усилитель мощности (ИУМ) – предназначен для построения блоков управления приводами космических аппаратов. Структурная схема включения ИУМ приведена на рисунке 5.30. Питание устройства происходит от вторичного источника питания (ВИП) двуполярным набором напряжений  $\pm 4\text{В}$  и  $\pm 50\text{В}$  через контакты 5, 8 и 9. Датчики тока  $R_i$  обеспечивают контроль питающих напряжений с помощью микропроцессорного устройства (МПУ). МПУ через контакты 1, 2, 3, 4 осуществляет также управление драйвером силовых ключей (ДСК), входящим в ИУМ. ДСК представляет собой гальваническую изоляцию входов управления от цепей нагрузки ИУМ с помощью трансформаторов. Выходные сигналы с мостового усилителя (МУ) поступают через контакты 6, 7 на фильтр ( $\Phi$ ), а затем на привод электродвигателя (ЭД).

Схема электрическая принципиальная составной части объекта исследования (рисунок 5.31) – мостового усилителя – состоит из малогабаритной элементной базы:

- резисторы  $R1 \dots R6$  полупроводниковые интегральные;
- трансформатор  $T1$  импульсный в микромодульном исполнении ММТИ;
- диоды  $VD1 \dots VD4$  быстровосстанавливающиеся 2Д717А9;
- транзисторы биполярные  $VT1 \dots VT4$  2Т690АС и  $VT5, VT7$  2Т665А91 структуры  $n-p-n$ ;
- транзисторы биполярные  $VT9 \dots VT12$  2Т689АС и  $VT6, VT8$  2Т664А91 структуры  $p-n-p$ .

Основные параметры ИУМ:

- амплитуда входных импульсов:  $U_{ВХ} = \pm 1\text{В}$ ;
- частота следования импульсов  $f_{ИМП} = 1000\text{Гц}$ ;
- ширина импульсов  $T_{ИМП} = 500\text{мкс}$ ;
- амплитуда выходного напряжения холостого хода  $U_{ВЫХ} = 13,572\text{В}$ ;
- амплитуда тока на нагрузке  $R_H = 200\text{Ом}$   $I_{ВЫХ} = 52,713\text{мА}$ ;
- средняя мощность на нагрузке  $R_H = 200\text{Ом}$   $P_{СР.ВЫХ} = 125\text{мВт}$ .

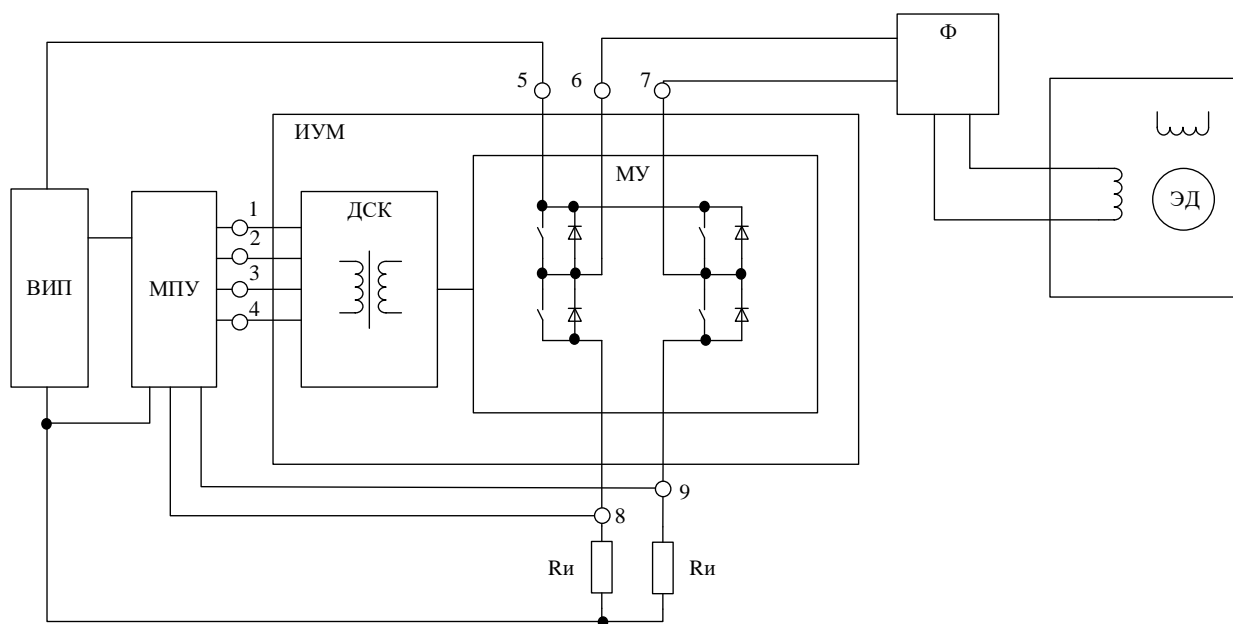


Рисунок 5.30 – Структурная схема включения ИУМ

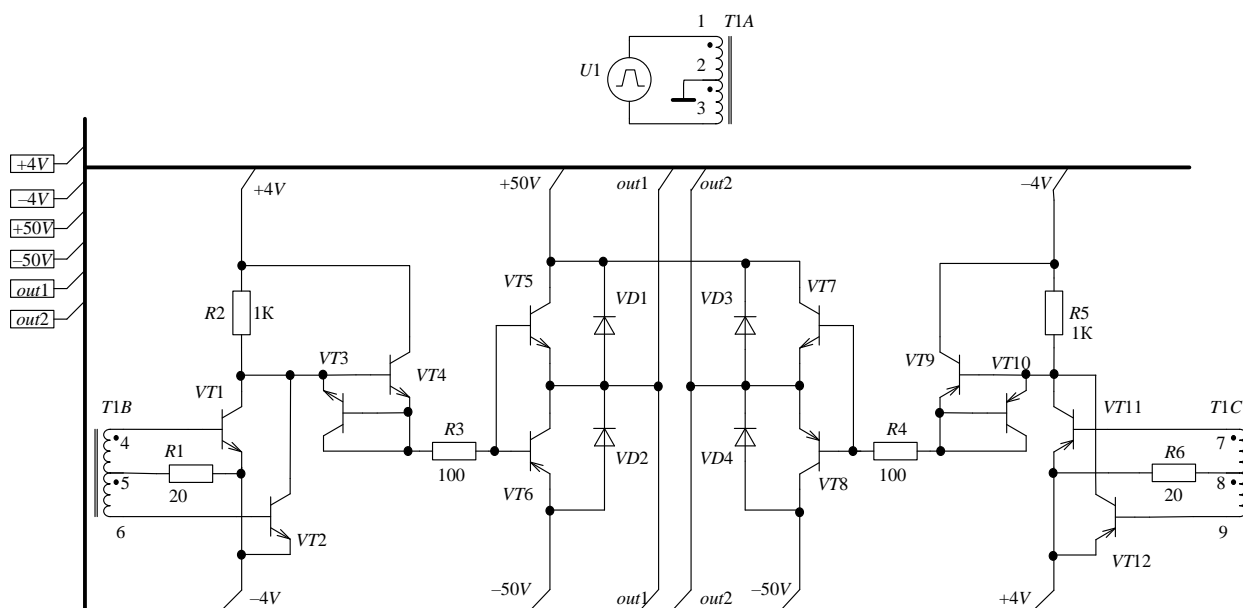


Рисунок 5.31 – Схема электрическая принципиальная ИУМ

Схемотехническое моделирование мостового ИУМ проведено в программной среде Spectrum Software MicroCAP 11. Математические SPICE-модели элементной базы ИУМ представляют авторскую разработку по методике, изложенной в главе 3. Тестовая работоспособность схемы ИУМ проверена с помощью эпюры выходного напряжения холостого хода (рисунок 5.32), а также с помощью эпюр тока и средней мощности, выделяемой на активной нагрузке  $R_H = 200$  Ом.



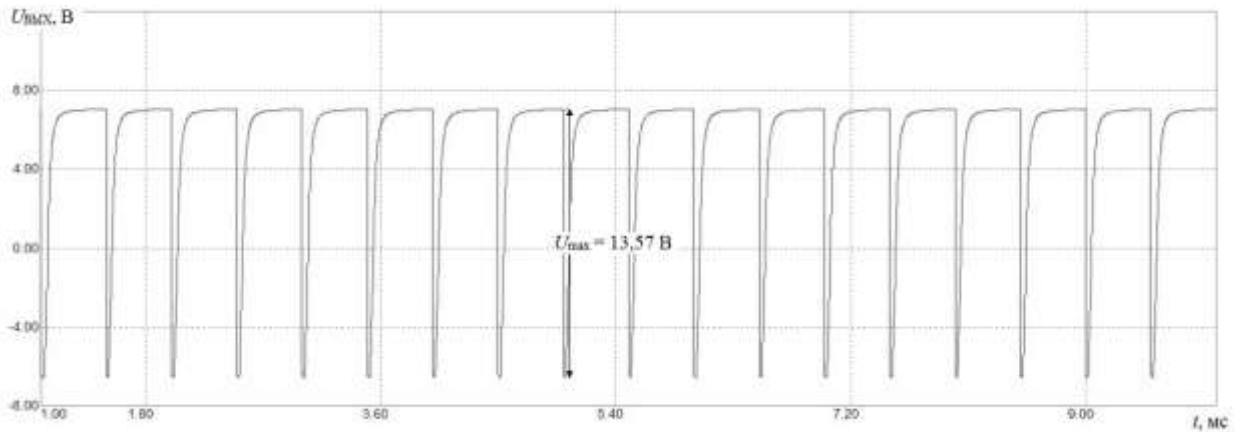


Рисунок 5.32 – Эпюра импульсов выходного напряжения

Вычислительный факторный эксперимент с целью нахождения уравнения температурной погрешности (2.23) является продолжением схемотехнического моделирования и также реализуется в программной среде Spectrum Software MicroCAP 11. Критерий оптимизации – минимизация относительной погрешности удвоенной амплитуды выходного напряжения ИУМ, как функции относительных изменений рабочих температур ЭРИ:

$$\frac{\Delta 2U_{\text{ВЫХ}}}{2U_{\text{ВЫХ}}} = f\left(\frac{\Delta T_i}{T_i}\right).$$

Факторы в вычислительном эксперименте – рабочие температуры ЭРИ, входящих в электрическую схему ИУМ. В ходе предварительных тестовых испытаний отобраны шесть ЭРИ, изменение температуры которых влияет на выходной параметр ИУМ: транзисторы VT3, VT4, VT5, VT7, VT9, VT10. Число опытов в матрице планирования составляет  $N = 2^6 = 64$ . Номинальное значение температуры всех ЭРИ:  $T_{\text{ЭРИ}} = 300$  К (27 °С). Интервалы варьирования факторов:  $\Delta T_{\text{ЭРИ}} = 10$  К. Основные характеристики плана эксперимента приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	Значение фактора $z_i$	Кодовое значение фактора $x_i$
Основной уровень, $z_{0i}$	300 К	0
Интервал варьирования, $\Delta z_i$	10 К	---
Верхний уровень, $z_{i\max}$	310 К	1
Нижний уровень, $z_{i\min}$	290 К	-1

Ортогональность столбцов матрицы планирования позволяет определить коэффициенты регрессии:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_{\varepsilon i}}{N},$$

где  $N = 64$  – количество реализаций факторного эксперимента;  $y_{\varepsilon i}$  – значение удвоенной амплитуды выходного напряжения ИУМ в  $i$ -ой реализации вычислительного эксперимента.

Линейный полином по результатам вычисления коэффициентов регрессии имеет вид:

$$2U_{\text{ВЫХ}} = 13,618 + 0,033x_{VT3} + 0,036x_{VT4} + 0,007x_{VT5} + \\ + 0,024x_{VT7} + 0,027x_{VT9} + 0,012x_{VT10}, \quad (5.38)$$

где  $x_i$  – соответствующее кодовое значение фактора для выбранных ЭРИ.

Для проверки возможности нелинейного полинома проведено дополнение к базовой матрице планирования. Введены столбцы с произведениями четырех наиболее значимых факторов:  $x_{VT3}x_{VT4}$ ,  $x_{VT3}x_{VT7}$ ,  $x_{VT3}x_{VT9}$ ,  $x_{VT4}x_{VT7}$ ,  $x_{VT4}x_{VT9}$ ,  $x_{VT7}x_{VT9}$ . Установлено, что сумма квадратов разности значений для нелинейного полинома на несколько порядков превышает аналогичный показатель для линейного полинома:

$$\Sigma(y_{\varepsilon i} - u_{Ti})^2_{\text{нелин}} \gg \Sigma(y_{\varepsilon i} - u_{Ti})^2_{\text{лин}},$$

где  $u_{Ti}$  – теоретическое значение удвоенной амплитуды выходного напряжения ИУМ в  $i$ -ой реализации вычислительного эксперимента.

По этой причине адекватной регрессионной моделью признан линейный полином.

Уравнение температурной погрешности в соответствии с (2.23) будет выглядеть:

$$\frac{\Delta 2U_{\text{ВЫХ}}}{2U_{\text{ВЫХ}}} = 0,072 \frac{\Delta T_{VT3}}{T_{VT3}} + 0,079 \frac{\Delta T_{VT4}}{T_{VT4}} + 0,015 \frac{\Delta T_{VT5}}{T_{VT5}} + \\ + 0,053 \frac{\Delta T_{VT7}}{T_{VT7}} + 0,060 \frac{\Delta T_{VT9}}{T_{VT9}} + 0,026 \frac{\Delta T_{VT10}}{T_{VT10}}. \quad (5.39)$$

Анализ (5.39) позволяет утверждать:

- все коэффициенты влияния в уравнении температурной погрешности имеют один знак, поэтому эффекта термокомпенсации путем объединения ЭРИ в ОЛГ достичь не представляется возможным;

- для достижения минимального значения уравнения температурной погрешности ИУМ следует стремиться к минимальным значениям изменения рабочих температур ЭРИ  $\Delta T_{\text{ЭРИ}}$  при поддержании максимальных значений рабочих температур этих же ЭРИ;

- выдвинутое требование минимизации конструктивно может быть достигнуто либо с помощью микротермостатирования, либо с помощью нахождения геометрического места ЭРИ в пространственной структуре ОИС, где:

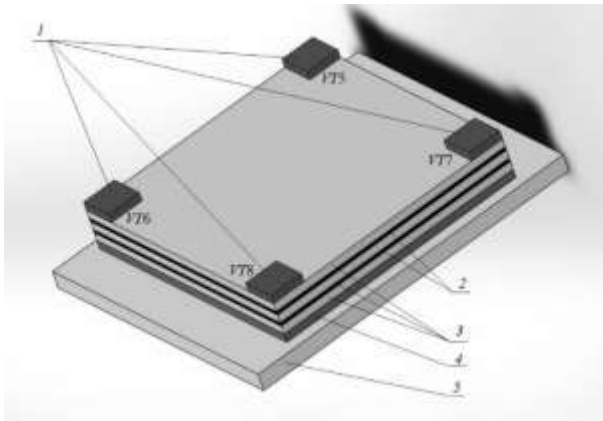
$$\{\Delta T_{VT3}, \Delta T_{VT4}, \Delta T_{VT5}, \Delta T_{VT7}, \Delta T_{VT9}, \Delta T_{VT10}\} \rightarrow \min; \quad (5.40)$$

$$\{T_{VT3}, T_{VT4}, T_{VT5}, T_{VT7}, T_{VT9}, T_{VT10}\} \rightarrow \max. \quad (5.41)$$

Конструкция ОИС ИУМ представлена на рисунке 5.33, *а*. Основа конструкции – керамическая пластина корпуса ОИС (5) толщиной 1 мм. На ней расположена многослойная структура ОИС, реализованная по технологии 3D TSV [152]. Сущность технологии TSV – в формировании переходных отверстий в кремниевых подложках (реактивным ионным травлением, лазерной абляцией и т.п.). Переходные отверстия заполняются проводящим материалом – поликремнием или металлом (медь, золото, вольфрам и др.), в результате образуются вертикальные проводники, связывающие подложки в стекле. Для более эффективного теплоотвода между стеклом подложек и корпусом ОИС находится медная пластина (4) толщиной 0,5 мм. Стекло ОИС состоит из трех слоев кремниевых подложек (3) размером 15×15 мм и толщиной 0,5 мм каждая. Кремниевые подложки отделяются друг от друга диэлектрическими слоями (2), выполненными на основе диоксида кремния SiO<sub>2</sub>. Толщина диэлектрических слоев составляет 200 мкм каждый. По результатам схемотехнического моделирования в среде Spectrum MicroCAP было установлено, что электрическая схема ИУМ (см. рисунок 5.31) содержит четыре ЭРИ со значительными величинами тепловыделений: транзисторы VT5 ( $P = 530$  мВт), VT6 ( $P = 60$  мВт), VT7 ( $P = 60$  мВт), VT8 ( $P = 530$  мВт). Остальные ЭРИ обладают пренебрежимо малыми собственными тепловыделениями. 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.

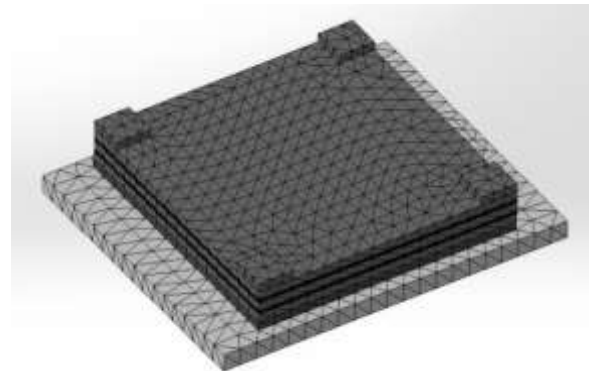
Теплофизическое моделирование конструкции ОИС ИУМ проведено в среде SolidWorks Simulation, которая позволяет бесшовно перейти от создания 3D модели ОИС непосредственно к анализу особенностей ее температурного поля. Наиболее просто реализуется моделирование стационарного теплового режима. Четыре тепловыделяющих объекта – транзисторы VT5...VT8 – характеризуются постоянной во времени величиной тепловыделения, которая была установлена на этапе схемотехнического моделирования:  $P = 530, 60, 60, 530$  мВт, соответственно. Начальные условия теплофизического моделирования: температура окружающей среды и температура конструкции ОИС равна  $T_{ср} = 0$  °С (273 К). Теплообмен с окружающей средой происходит за счет конвективного механизма теплопередачи. Коэффициент конвективной теплоотдачи в процессе моделирования является величиной постоянной и составляет  $\alpha_k = 17,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Величина коэффициента теплоотдачи соответствует среднему значению диапазона для свободной конвекции газов по источнику [153]:  $\alpha_k \in (5...30)$ . Конвективный теплообмен происходит со всех граней конструкции ОИС, обращенных в окружающую среду. Среда SolidWorks Simulation позволяет в автоматическом режиме создавать сетку треугольных элементов с промежуточными узлами для

расчета температурного поля методом конечных элементов (рисунок 5.33, б). Размер элемента сетки составил  $\Delta = 0,602$  мм при коэффициенте формы  $k = 1,5$ .



- 1 – тепловыделяющие ЭРИ (кристаллы транзисторов VT5...VT8);  
 2 – диэлектрические слои (SiO<sub>2</sub>);  
 3 – подложки (Si); 4 – теплоотводящая пластина (Cu); 5 – корпус ОИС (керамика)

*a*



Размер элемента сетки  $\Delta = 0,602$  мм;  
 коэффициент формы  $k = 1,5$

*б*

Рисунок 5.33 – Конструкция и сеточная модель ОИС ИУМ

Результаты моделирования стационарного теплового режима ОИС ИУМ представлены на рисунке 5.34. Наибольшее значение температурного поля  $T_{\max} = 335,4$  К (62,4 °С) наблюдается на кристаллах транзисторов VT5 и VT8, расположенных по диагонали стека ОИС (рисунок 5.34, а). В крайних позициях другой диагонали конструкции ОИС (на углах корпуса) расположены точки с наименьшими значениями температурного поля  $T_{\min} = 320,8$  К (47,8 °С). Начиная от теплонагруженных кристаллов транзисторов VT5 и VT8 и далее в сторону центра конструкции ОИС, формируются изотермические линии температурного поля. Зондирование поверхностей корпусов кристаллов ЭРИ VT6 и VT7 позволяет определить рабочую температуру  $T_{VT6} = T_{VT7} = 330,1$  К (57,1 °С). Функциональные возможности среды SolidWorks Simulation позволяют определить координаты точек в пространственной структуре стека ОИС для последующего размещения ЭРИ. Заметим, что ЭРИ VT5 и VT7 уже фиксированы, следовательно, речь идет об отыскании геометрического места для ЭРИ VT3, VT4, VT9, VT10. Как было отмечено выше, наилучший случай по (5.39) характеризуется условиями (5.40) и (5.41). Учитывая случай стационарного теплового режима, условие (5.40) соблюдается по всей конструкции ОИС и будет равно изменению температуры окружающей среды  $\Delta T_i = \Delta T_{\text{ср}}$ . Условие (5.41) можно достигнуть путем размещения кристаллов ЭРИ VT3, VT4, VT9, VT10 в объемные локальные группы (ОЛГ1, ОЛГ2) на изотермической поверхности вблизи источников тепловыделения с необходимыми технологическими зазо-

рами между ЭРИ. В конструкции ОИС существуют две такие изотермические поверхности (симметричные относительно центра) с температурой  $T_{\text{ОЛГ1}} = T_{\text{ОЛГ2}} = 333 \text{ К}$  ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и координатами центров поверхностей  $(2,42; -5,46; 3,4) \text{ мм}$  и  $(13,3; -15,2; 3,4) \text{ мм}$ . Начало координат показано на рисунке 5.34, б, оно совпадает с левым ближним углом (относительно наблюдателя) корпуса ОИС.

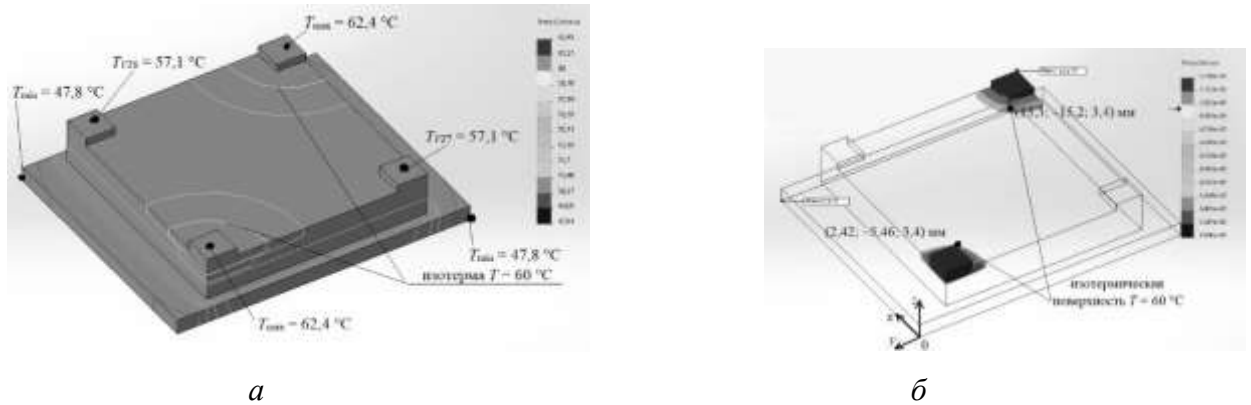


Рисунок 5.34 – Температурное поле конструкции ИУМ в стационарном режиме

Проведем анализ конструктивного исполнения ОИС ИУМ (рисунок 5.33, а) на предмет диапазонов изменения температурной стабильности для выходного параметра по (5.39). По справочным данным [154] определим предельные рабочие температуры эксплуатации для транзисторов  $VT3$  (2Т690АС),  $VT4$  (2Т690АС),  $VT5$  (2Т665А91),  $VT7$  (2Т665А91),  $VT9$  (2Т689АС),  $VT10$  (2Т689АС):

$$T_{\text{РАБ min}} = 213 \text{ К} (-60 \text{ }^\circ\text{C}); T_{\text{РАБ max}} = 398 \text{ К} (125 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Согласно проведенному теплофизическому моделированию в стационарном режиме температура ОЛГ с ЭРИ  $VT3$ ,  $VT4$ ,  $VT9$ ,  $VT10$  составила  $T_{\text{ОЛГ}} = 333 \text{ К}$  ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) при температуре окружающей среды  $T_{\text{СР}} = 273 \text{ К}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Следовательно, перегрев ОЛГ составляет  $\theta_{\text{ОЛГ}} = T_{\text{ОЛГ}} - T_{\text{СР}} = 333 - 273 = 60 \text{ К}$ . Рабочие температуры тепловыделяющих транзисторов  $VT5$ ,  $VT7$  составляют  $T_{\text{РАБ } VT5} = 335,4 \text{ К}$  ( $62,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $T_{\text{РАБ } VT7} = 330,1 \text{ К}$  ( $57,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (см. рисунок 5.34, а). Перегрев транзистора  $VT5$  относительно ОЛГ будет:  $\theta_{VT5} = T_{\text{РАБ } VT5} - T_{\text{ОЛГ}} = 335,4 - 333 = 2,4 \text{ К}$ .

Определим минимально возможную температуру ОЛГ:

$$T_{\text{ОЛГ min}} = T_{\text{СР min}} + \theta_{\text{ОЛГ}} = 213 + 60 = 273 \text{ К} (0 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Определим температуру среды при максимально возможном значении рабочей температуры ОЛГ  $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К}$  ( $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ):

$$T_{\text{СР max}} = T_{\text{ОЛГ max}} - \theta_{\text{ОЛГ}} = 393 - 60 = 333 \text{ К} (60 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Заметим, что при  $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К}$  рабочая температура транзистора  $VT5$  находится в пределах допустимых значений ( $T_{\text{РАБ } VT5} < T_{\text{РАБ max } VT5}$ ):

$$T_{\text{РАБ } VT5} = T_{\text{ОЛГ max}} + \theta_{VT5} = 393 + 2,4 = 395,4 \text{ К.}$$

Примем минимальное значение изменения температуры окружающей среды  $\Delta T_{\text{min}} = 10 \text{ К}$ . Тогда максимальное значение изменения температуры среды будет определяться пределом рабочей температуры в области низких температур:

$$\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{ОЛГ min}} - T_{\text{РАБ min}} = 273 - 213 = 60 \text{ К.}$$

Определим максимальное значение температуры ОЛГ при  $\Delta T_{\text{max}} = 60 \text{ К}$ :

$$T_{\text{ОЛГ}} (\Delta T_{\text{max}} = 60 \text{ К}) = T_{\text{РАБ max}} - \Delta T_{\text{max}} = 398 - 60 = 338 \text{ К} (65 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Аналогичным образом можно вычислить значения  $T_{\text{ОЛГ}}$  при  $\Delta T = 50, 40, 30, 20 \text{ К}$ . В графическом виде проведенный анализ можно представить на координатной плоскости в системе координат  $\frac{\Delta 2U}{2U} = f(T_{\text{ОЛГ}})$  в виде семейства гиперболических кривых (рисунок 5.35). Каждая кривая построена по (5.39) при соответствующем значении  $\Delta T$ . Жирным начертанием выделены границы допустимых режимов эксплуатации, определяемые  $T_{\text{ОЛГ min}}$ ,  $T_{\text{ОЛГ max}}$  и  $T_{\text{ОЛГ}} (\Delta T_{\text{max}} = 60 \text{ К})$ . В четырех крайних точках полученной замкнутой фигуры вычислены значения температурной погрешности ОИС ИУМ по (5.39). Максимальное значение температурной погрешности в точке  $T_{\text{ОЛГ min}} = 273 \text{ К}$  при  $\Delta T_6 = 60 \text{ К}$  составляет  $\frac{\Delta 2U}{2U} = 0,0644$ . Минимальное значение температурной погрешности в точке  $T_{\text{ОЛГ max}} = 393 \text{ К}$  при  $\Delta T_6 = 10 \text{ К}$  составляет  $\frac{\Delta 2U}{2U} = 0,0081$ . Разница между максимальным и минимальным значениями температурной погрешности будет  $0,0644/0,0081 = 7,95$  раза. Зависимость температурной погрешности от температуры объемной локальной группы имеет нелинейный (гиперболический) характер, причем по мере увеличения разницы температур  $\Delta T$  нелинейность зависимости  $\frac{\Delta 2U}{2U} = f(T_{\text{ОЛГ}})$  также увеличивается. Разница температурной погрешности при  $\Delta T = 10 \text{ К}$  равна  $0,0107/0,0081 = 1,32$  раза.

Проведенное экспериментальное исследование выявило:

- при фиксированном значении изменения температуры окружающей среды ( $\Delta T = \text{const}$ ) разница в температурной погрешности выходного параметра ИУМ достигает 1,3 раза за счет изменения местоположения ОЛГ в пространственной структуре ОИС;

- с помощью уравнения температурной погрешности (5.39) возможно проводить аналитическую оценку температурной стабильности конструкции ЭС путем размещения термочувствительных ЭРИ в определенных зонах.

Сформулируем рекомендации, направленные на дальнейшие направления исследования:

- эффективность применения ОЛГ для повышения температурной стабильности конструкции ЭС можно увеличить, если по результатам вычислительного эксперимента коэффициенты влияния будут иметь разный знак;

- желаемое объединение ЭРИ в ОЛГ в конструкции ОИС на современном технологическом этапе развития можно реализовать с помощью сквозных металлизированных отверстий в кремниевых подложках (TSV).

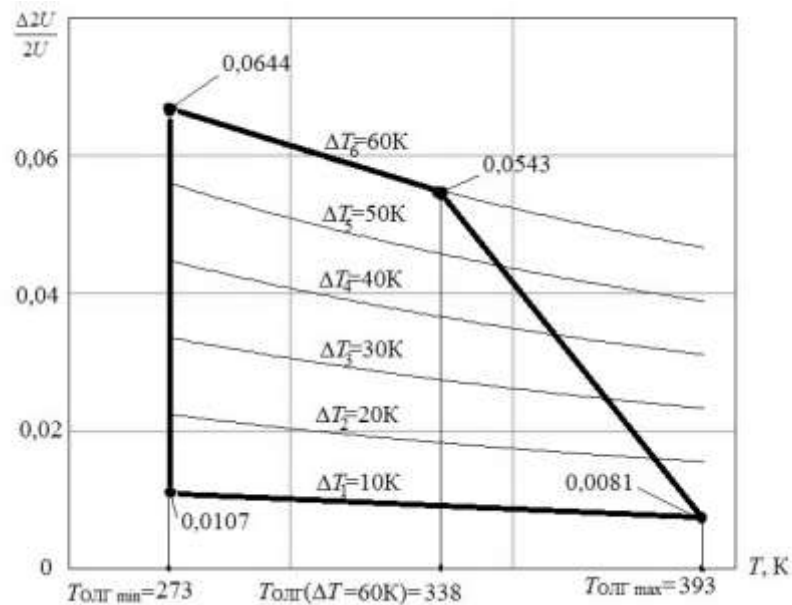


Рисунок 5.35 – Граничные значения температурной погрешности

## 5.6 Основные результаты исследования

1. Доказано, что наличие в составе элементной базы электронных средств источников со значительными собственными тепловыделениями обуславливает анизотропность теплового поля на несущих конструкциях I и II уровня.

2. 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 двумерные; трехмерные. Классификационным критерием выступает соотношение габаритных показателей по длине, ширине, высоте несущей конструкции.

3. Впервые предложено применение метода дихотомии для локализации ЭРИ, как источников тепловыделений, для условно одномерных несущих конструкций. Локализация ЭРИ на условно одномерных несущих конструкциях позволяет уменьшить кривизну температурного профиля на порядок.

4. Впервые введено понятие локальной группы ЭРИ – группы смежных элементов, расположенных на изотермической линии или изотермической поверхности. Формирование локальных групп ЭРИ на условно двухмерных несущих конструкциях позволяет увеличить температурную стабильность электронных средств до 8 %.

5. Показано, что в объемных интегральных микросхемах, обладающих значительными собственными тепловыделениями, изотермические линии распределены не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Разновидностью локальной группы для объемных интегральных микросхем служит объемная локальная группа – группа смежных элементов, расположенных на изотермической линии по оси аппликат, т.е. на разных проводящих слоях ОИС.

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

В итоге предложен модифицированный метод топологической термокомпенсации, отличающийся формированием локальных групп ЭРИ на несущих конструкциях электронных средств с анизотропными температурными полями, 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.



## ГЛАВА 6. МИНИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Цель данной главы – исследование метода термостабилизации электронных средств посредством микротермостатирования, когда уравнение температурной погрешности содержит доминирующие коэффициенты влияния.

### 6.1 Метод микротермостатирования

Известно [54-79], что системы термостатирования осуществляют тепловое управление объектом с целью формирования в нем температурного поля с требуемыми характеристиками. Реальные термостаты, применяемые для термостабилизации электронных средств, весьма разнообразны (см. п. 1.4). С развитием в конце XX века цифровой вычислительной техники и микроминиютизации ЭКБ произошло качественное изменение схемотехники и конструкций термостатов. В частности, появилась возможность применения цифровой ЭКБ и программных методов управления тепловым режимом электронных средств, все чаще стала применяться стабилизация температуры отдельных ЭРИ, наиболее чувствительных к изменению температуры окружающей среды. Указанные возможности привели к возникновению относительного нового конструктивного исполнения – микротермостатов, отличительной особенностью которых является статирование на уровне ЭРИ или группы ЭРИ.

Предложенное в главе 2 уравнение температурной погрешности:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots \quad (6.1)$$

позволяет обоснованно подойти к выбору метода термостабилизации ЭС. Там же были рассмотрены три случая сочетаний коэффициентов влияния  $a_i$  для слагаемых первого порядка малости в уравнении (6.1):

*Случай 1.* Случай равновеликих коэффициентов  $a_i$ .

*Случай 2.* Случай равномодульных коэффициентов  $a_i$ .

*Случай 3.* Случай доминирующих коэффициентов  $A_u$ . Предполагалось, что среди множества коэффициентов влияния  $a_i$  в (6.1) существуют несколько таких  $A_u$ , чья абсолютная величина на порядок и более превосходит абсолютные величины остальных коэффициентов уравнения:

$$|A_u| \gg \{|a_1| \approx |a_2| \approx \dots \approx |a_i|\}; \quad \{A_u\} \in \{a_i\}.$$

Техническим решением для этого случая оправдано применение микротермостатирования. Это техническое решение направлено на минимизацию изменения относительной рабочей температуры  $u$ -ого ЭРИ  $\frac{\Delta T_u}{T_u}$ , а значит – на минимизацию  $\frac{\Delta N}{N}$ .

В этой главе нас интересует случай №3 – случай доминирующих коэффициентов  $A_u$ . Обратимся к [54], где приведен типовой структурный состав подогревного микротермостата (рисунок 6.1). Центральным объектом выступает объект термостатирования  $1$  – это либо одиночный ЭРИ, либо группа ЭРИ. Объект термостатирования находится внутри камеры термостата  $3$ , свободное внутреннее пространство которой заполнено теплоизоляционной прослойкой  $2$ . Поверхность камеры микротермостата охвачена снаружи нагревателем  $4$  для обеспечения равномерной температуры статирования. Камера микротермостата размещается во внутреннем объёме кожуха  $5$ . Свободное внутреннее пространство кожуха заполняется основной теплоизоляцией  $7$ . Кожух снабжён крышкой  $8$  с крепёжными винтами  $9$ . Поскольку объектом термостатирования являются ЭРИ, то их обязательным атрибутом будут электрические контакты. Контакты в зависимости от конструктивного исполнения ЭРИ могут быть либо штыревые, либо планарные. И тот, и другой случай можно трактовать как наличие тепловых стоков  $6$  от камеры статирования во внешнюю среду. Тепловые стоки – одна из причин появления погрешности статирования  $\Delta T_{ст}$  в камере микротермостата относительной номинальной температуры статирования  $T_{ст}$ .

Заметим, что рассмотренная структура микротермостата в каждом конкретном случае может отличаться по наличию или отсутствию конструктивных частей  $1 \dots 9$  и их взаимного расположения.

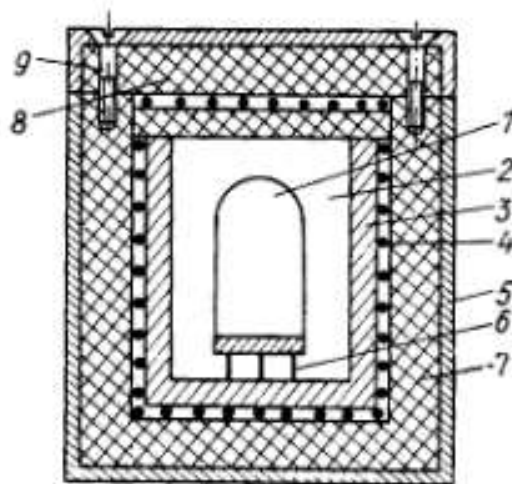


Рисунок 6.1 – Типовой структурный состав подогревного микротермостата

Система тепловой защиты микротермостатов содержит различные элементы (прослойки, нагревательные устройства, тоководы и пр.), в той или иной степени влияющие на тепловой режим объекта. Для анализа работы системы необходимо учитывать влияние каждого из элементов, поэтому возникает задача математического описания процессов теплопроводности в этих элементах. Поскольку конструкции их разнообразны, желательно выбирать такие математические модели, которые по возможности были бы пригодны для количественной оценки температурной стабильности электронных средств. Уравнение температурной погрешности (6.1) пригодно для этих целей в силу своей универсальности (см. главу 2).

Так же, как и для объекта термостатирования, описание процесса теплопередачи в элементах конструкции тепловой защиты микротермостатов в общем случае оказывается сложной задачей из-за геометрической формы, наличия трехмерного поля температур, зависимости теплофизических свойств от температуры. Поэтому для дальнейшего теоретического исследования сделаны допущения:

1. Геометрической моделью реальной оболочки микротермостата является криволинейная стенка, ограниченная двумя (замкнутыми или разомкнутыми) внутренней  $S_1$  и внешней  $S_2$  поверхностями (рисунок 6.2, а, б).

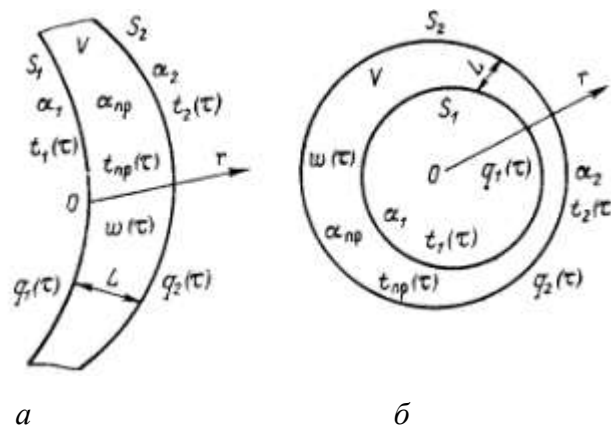


Рисунок 6.2 – Разомкнутые и замкнутые оболочки микротермостата

2. Оболочка однородна, т.е. состоит из однородного материала с известными значениями теплофизических характеристик (коэффициенты температуропроводности  $a$ , теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкости  $c$  и плотность  $\rho$ ).

3. Температурное поле в модели является одномерным, что соответствует изменению температуры в реальной оболочке преимущественно по ее толщине.

4. Модель оболочки (как и реальный элемент) подвержена внешним или внутренним тепловым воздействиям, которые принимаются равномерно распределенными по ограничивающим поверхностям или по объему модели.

## 6.2 Методика вычислительного факторного эксперимента для решения обратной задачи температурной стабильности

Пусть имеется уравнение температурной погрешности (6.1) с доминирующими коэффициентами  $A_u$  (рассмотренный выше случай №3). Исходное множество коэффициентов влияния  $\{a_i\}$  в (6.1) разобьем на два подмножества:

- подмножество  $\mathbf{M} = \{A_u\}$ , мощность которого соответствует количеству доминирующих коэффициентов в (6.1). ЭРИ из подмножества  $\mathbf{M}$  предполагаются к микротермостатированию;

- подмножество  $\mathbf{K} = \{a_i \setminus A_u\}$ , мощность которого соответствует разности между исходным количеством коэффициентов влияния и количеством доминирующих коэффициентов в (6.1). ЭРИ из подмножества  $\mathbf{K}$  предполагают непосредственный контакт с внешней окружающей средой.

Объединение двух подмножеств  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{K}$  дает исходное множество коэффициентов влияния в (6.1):

$$\{a_i\} = \mathbf{M} \cup \mathbf{K}.$$

Наличие двух подмножества  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{K}$  позволяет выделить четыре сочетания группировок ЭРИ в конкретных конструктивных реализациях электронных средств с микротермостатированием:

1. ЭРИ из подмножеств  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{K}$  характеризуются пренебрежимо малым перегревом (собственным и фоновым) относительно среды:

$$\delta T_{\mathbf{M}} = \delta T_{\mathbf{K}} \approx 0. \quad (6.2)$$

Необходимо ввести пояснения относительно собственного и фонового перегрева. В [111] обосновано применение величин собственного и фонового перегревов. В частности, доказывается, что для уравнения теплопроводности (4.1) в любой точке твердотельной системы ЭС стационарную температуру можно представить в следующем виде:

$$T_i = T + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j, \quad (6.3)$$

где  $T$  – температура среды;  $P_i, P_j$  – общая мощность источников теплоты для  $i$ -ого тела и для  $j$ -ой части остальной системы;  $F_{ii}, F_{ij}$  – тепловые коэффициенты, отражающие влияние одного тела на тепловой режим другого.

Частным случаем температуры  $T_i$  в (6.3) в настоящем исследовании выступает рабочая температура  $i$ -ого ЭРИ. Второе слагаемое в правой части (6.3) имеет физический смысл собствен-

ного перегрева  $i$ -ого ЭРИ. Этот перегрев возникает из-за выделения теплоты в данном ЭРИ. Третья группа слагаемых в (6.3) – сумма  $\sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j$  – определяет перегрев  $i$ -ого ЭРИ, вызванный всеми остальными (кроме  $i$ -ого) ЭРИ. Сумма слагаемых  $\sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j$  имеет физический смысл фонового перегрева.

Возвращаясь к начальной формулировке сочетания 1 ( $\delta T_M = \delta T_K \approx 0$ ), выражение (6.3) можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} T_M = T_{СТ}; \\ T_K = T_{СР}, \end{cases} \quad (6.4)$$

где  $T_M, T_K$  – рабочие температуры ЭРИ, принадлежащие ко множествам **М** и **К**;  $T_{СТ}$  – температура статирования;  $T_{СР}$  – температура окружающей среды.

Заметим, что в (6.2) под средой понимается следующее. Для множества **М** среда – это температура внутри камеры статирования, т.е. температура статирования  $T_{СТ}$ ; для множества **К** среда – это температура внешней окружающей среды  $T_{СР}$ .

Типичным представителем подмножества **М** является резонатор кварцевый герметизированный РГ-06 (рисунок 6.3). Согласно технической документации [35] мощность, рассеиваемая на резонаторе, составляет не более 1 мВт, следовательно  $\delta T_M \approx 0$ .

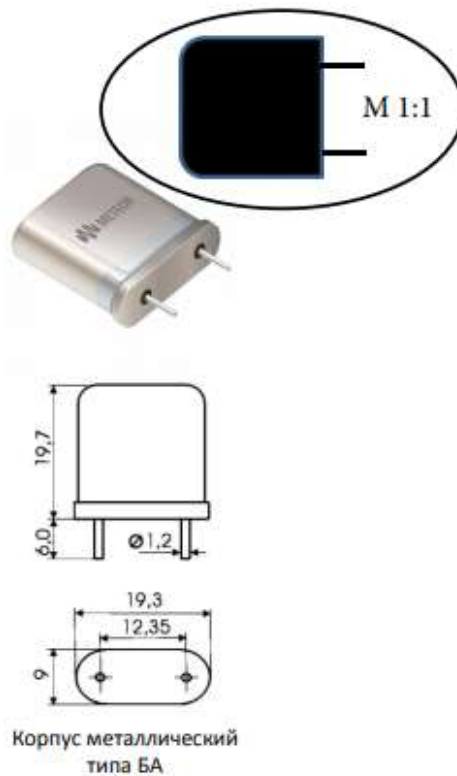


Рисунок 6.3 – Резонатор кварцевый герметизированный РГ-06

2. ЭРИ из подмножества **М** обладают собственным и/или фоновым перегревом. Это означает, что в камере микротермостата находится хотя бы один ЭРИ со значимой мощностью тепловыделения. ЭРИ из подмножества **К** по-прежнему характеризуются пренебрежимо малым перегревом (собственным или фоновым) относительно среды:

$$\begin{cases} \delta T_M > 0; \\ \delta T_K \approx 0, \end{cases} \quad (6.5)$$

или

$$\begin{cases} T_M = T_{CT} + \delta T_M = T_{CT} + F_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j; \\ T_K = T_{CP}. \end{cases} \quad (6.6)$$

Здесь типичным представителем подмножества **М** является стабилитрон кремниевый прецизионный КС539Г (рисунок 6.4). Согласно технической документации мощность, рассеиваемая на стабилитроне, составляет 720 мВт, следовательно  $\delta T_M > 0$ .

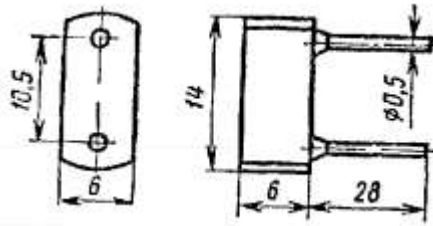


Рисунок 6.4 – Стабилитрон кремниевый прецизионный КС539Г

3. ЭРИ из подмножества **М** характеризуются пренебрежимо малым собственным и фоновым перегревом относительно среды; при этом ЭРИ из подмножества **К** обладают собственным и/или фоновым перегревом. Это означает, что за пределами камеры микротермостата находится хотя бы один ЭРИ со значимой мощностью тепловыделения:

$$\begin{cases} \delta T_M \approx 0; \\ \delta T_K > 0, \end{cases} \quad (6.7)$$

или

$$\begin{cases} T_M = T_{CT}; \\ T_K = T_{CP} + \delta T_K = T_{CP} + F_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j. \end{cases} \quad (6.8)$$

В зависимости от пространственной протяженности несущей конструкции ЭС ( $x, y, z$ ) и от мощности источника тепловыделения ( $P$ ) перегрев ЭРИ подмножества **К** может отличаться от (6.7), (6.8). В предельном случае для части подмножества **К** возможен вариант (6.4):

$$\begin{cases} \delta T_{\mathbf{M}} \approx 0; \\ \delta T_{\mathbf{K}'} \approx 0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}}; \\ T_{\mathbf{K}'} = T_{\text{СР}}, \end{cases}$$

где  $\mathbf{K}'$  – часть подмножества  $\mathbf{K}$  с нулевым перегревом.

4. ЭРИ из подмножества  $\mathbf{M}$  обладают собственным и/или фоновым перегревом. ЭРИ из подмножества  $\mathbf{K}$  также обладают собственным и/или фоновым перегревом. Это означает, что и в камере микротермостата, и за ее пределами находятся хотя бы по одному ЭРИ со значимой мощностью тепловыделения:

$$\begin{cases} \delta T_{\mathbf{M}} > 0; \\ \delta T_{\mathbf{K}} > 0, \end{cases} \quad (6.9)$$

или

$$\begin{cases} T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + \delta T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j; \\ T_{\mathbf{K}} = T_{\text{СР}} + \delta T_{\mathbf{K}} = T_{\text{СР}} + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j. \end{cases} \quad (6.10)$$

По-прежнему, в зависимости от пространственной протяженности несущей конструкции ЭС ( $x, y, z$ ) и от мощности источника тепловыделения ( $P$ ) перегрев ЭРИ подмножества  $\mathbf{K}$  может отличаться от (6.9), (6.10). В предельном случае для части подмножества  $\mathbf{K}$  возможен вариант:

$$\begin{cases} T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + \delta T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j; \\ T_{\mathbf{K}'} = T_{\text{СР}}. \end{cases}$$

В зависимости от условий эксплуатации ЭС рабочая температура ЭРИ  $T_{\mathbf{K}}$  из подмножества  $\mathbf{K}$  не является постоянной величиной и, как следует, из (6.8), (6.10) является функцией температуры окружающей среды (рисунок 6.5). В идеальном случае рабочая температура ЭРИ  $T_{\mathbf{M}}$  из подмножества  $\mathbf{M}$  не должна зависеть от температуры внешней окружающей среды. В действительности из-за тепловых потерь в камере микротермостата всегда присутствует абсолютное отклонение температуры статирования  $\Delta T_{\text{СТ}}$ :

$$T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + \Delta T_{\text{СТ}} + \delta T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + \Delta T_{\text{СТ}} + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j. \quad (6.11)$$

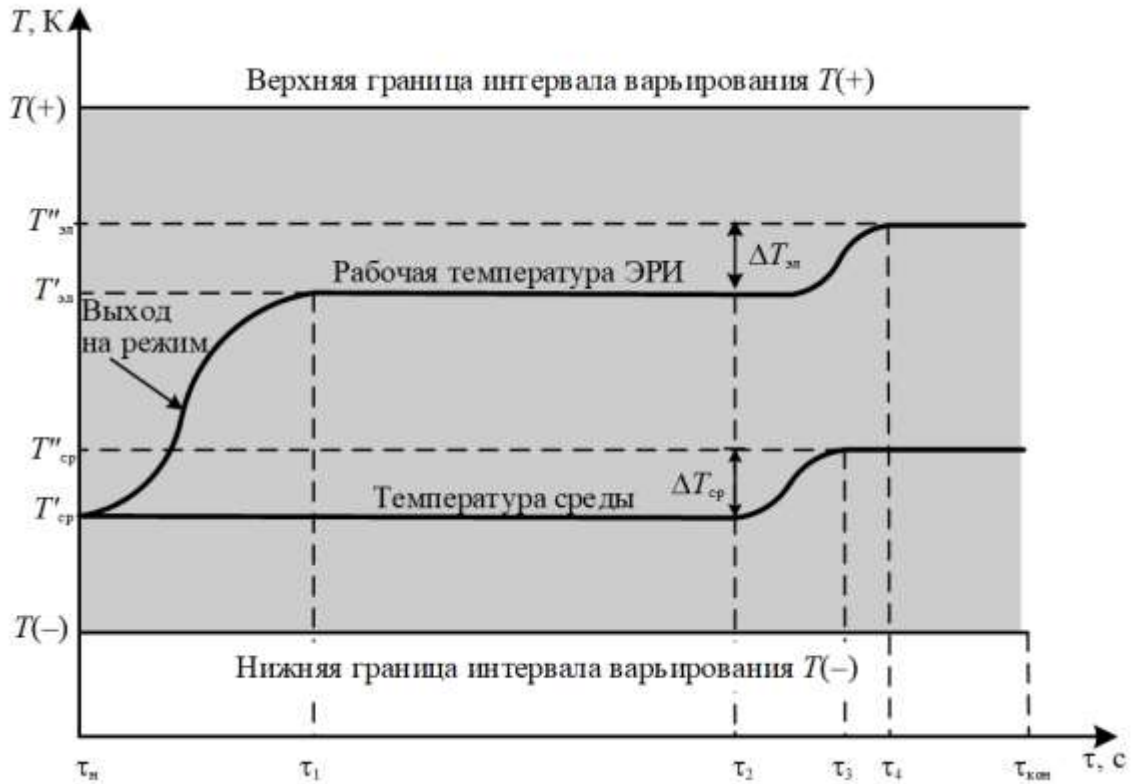


Рисунок 6.5 – Взаимосвязь изменения температуры окружающей среды и рабочей температуры ЭРИ

Наиболее просто и понятно трактуется физический смысл тепловых коэффициентов  $F_{ii}$  и  $F_{ij}$  в интерпретации математической модели на основе сосредоточенных параметров. Известно [111, 154], что тепловое сопротивление – это способность тела (его поверхности или какого-либо слоя) препятствовать распространению теплового движения молекул. Общая формула теплового сопротивления  $R_t$  связывает прямой пропорциональностью разницу температур  $\delta T$  и обратной пропорциональностью тепловой поток  $P$ , протекающий через участок твердого тела:

$$F = R_t = \frac{T_2 - T_1}{P} = \frac{\delta T}{P}, \quad (6.12)$$

где  $T_2$  – температура начала участка;  $T_1$  – температура конца участка.

Поставим (6.12) в выражение (6.11) и получим окончательное уравнение для температур ЭРИ из подмножества  $\mathbf{M}$  (рабочих температур ЭРИ, находящихся в камере микротермостата):

$$\begin{aligned} T_{\mathbf{M}} &= T_{\text{СТ}} + \Delta T_{\text{СТ}} + \delta T_{\mathbf{M}} = T_{\text{СТ}} + \Delta T_{\text{СТ}} + R_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{ij} P_j = \\ &= T_{\text{СТ}} + \Delta T_{\text{СТ}} + \delta T_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \delta T_j. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Если предположить, что в камере микротермостата есть только собственный перегрев ЭРИ и  $\sum_{j=1, j \neq i}^n \delta T_j = 0$ , то (6.13) становится тождественно первому варианту (6.11).



Для практического применения (6.13) необходимо знать величины  $R_t$  и  $P$ . Величина теплового сопротивления  $R_t$  может быть найдена либо на основе справочных данных, либо на основе экспериментальных исследований. На рисунке 6.6 представлен фрагмент справочных данных [155] для германиевого транзистора. В разделе «Электрические, тепловые и предельно допустимые эксплуатационные данные» приводятся значения теплового сопротивления транзистора:

- от переходов до корпуса транзистора  $R_t = 2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ ;
- от переходов до окружающего воздуха (без радиатора)  $R_t = 35 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ .



3

Рисунок 6.6 – Фрагмент справочных данных на транзистор

Суммарная величина теплового сопротивления  $R_t$  для каждого конкретного типа ЭРИ складывается из нескольких последовательно соединенных тепловых сопротивлений, соответствующих внутренней структуре ЭРИ и способу его монтажа (рисунок 6.7).

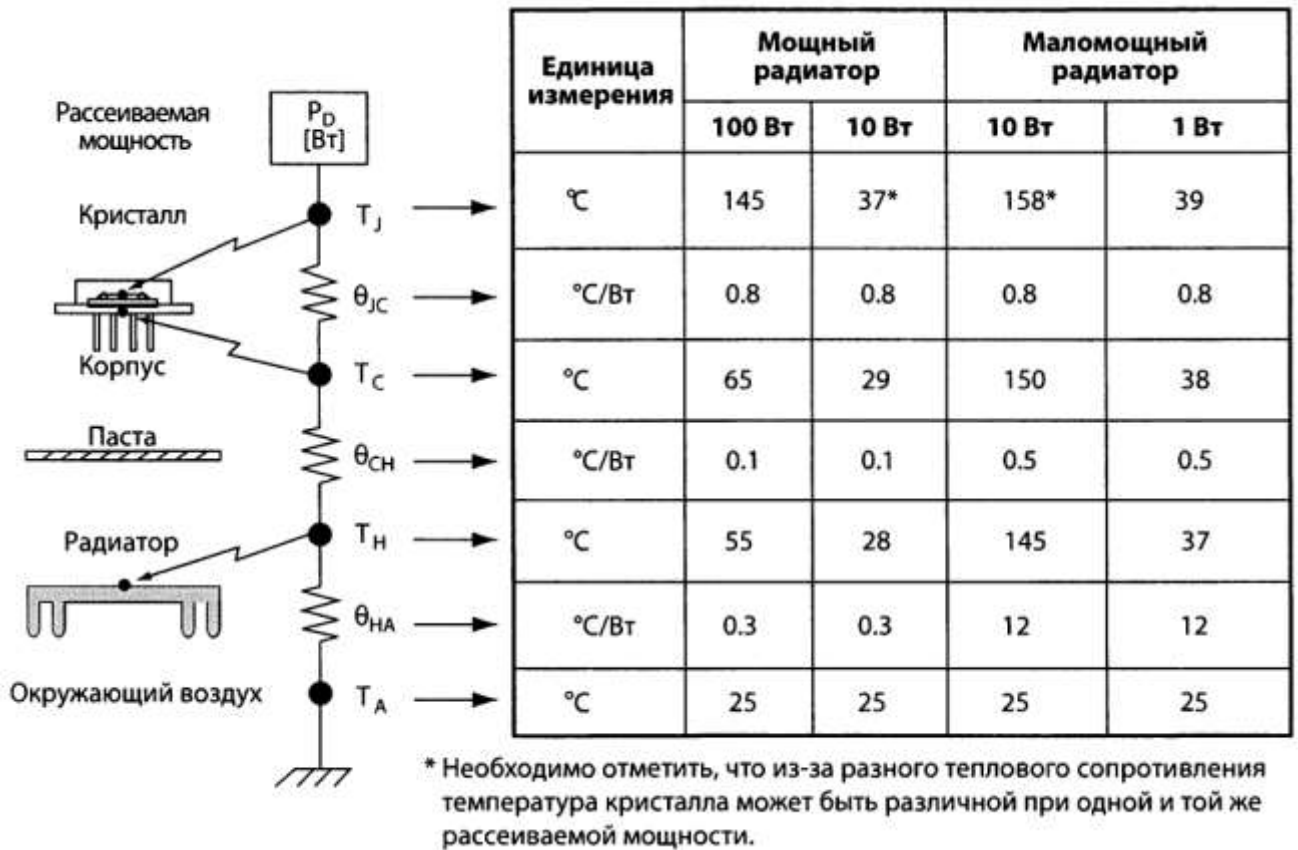


Рисунок 6.7 – Типичные значения тепловых сопротивлений полупроводниковых ЭРИ

Методы определения теплового сопротивления, в том числе и полупроводниковых приборов, на основе экспериментальных исследований широко и разнообразно представлены в трудах [156-161].

Величина мощности  $P$ , выделяемой источником тепловыделения, может быть определена на стадии вычислительного факторного эксперимента с помощью программных комплексов схемотехнического моделирования. Подробно методика вычислительных факторных экспериментов рассматривалась в главе 2. На рисунке 6.7 показаны карты режимов по постоянному току для электрических схем. В программном комплексе OrCAD Capture (рисунок 6.7, а) проведено схемотехническое моделирование усилителя, собранного по каскодной схеме включения. В режиме исследования по постоянному току возле каждого ЭРИ схемы выведено числовое значение мощности тепловыделения. В программном комплексе Spectrum MicroCAP (рисунок 6.7, б) проведено схемотехническое моделирование усилителя звуковой частоты в классе усиления А. Функциональные возможности MicroCAP по аналогии с OrCAD позволяют в режиме исследования по постоянному току оценить мощность тепловыделения для каждого ЭРИ.

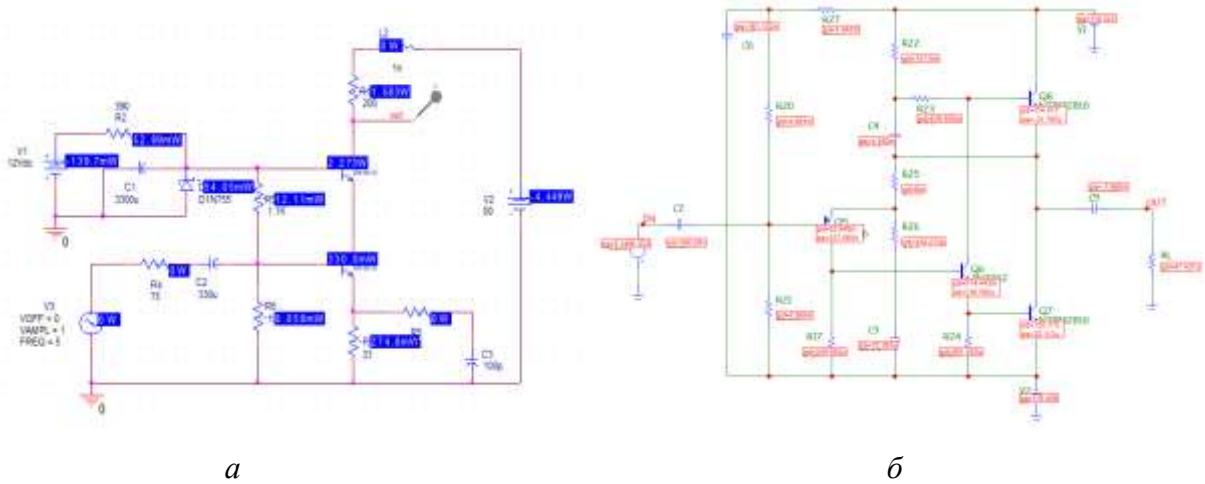


Рисунок 6.7 – Карта режимов по постоянному току

Таким образом, величины  $R_t$  и  $P$  в (6.11)...(6.13) могут быть найдены на основе справочных данных, в процессе натурального или имитационного моделирования ЭС.

Покажем, что с помощью уравнения температурной погрешности (2.23) возможно оценить конструктивные особенности микротермостата в (6.11), а в частности, величины  $\Delta T_{СТ}$ ,  $T_{СТ}$ ,  $\delta T_m$ . Ограничимся в уравнении температурной погрешности (2.23) слагаемыми первого порядка:

$$\frac{\Delta N}{N} = a_1 \frac{\Delta T_1}{T_1} + a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2} + \dots + a_n \frac{\Delta T_n}{T_n} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\Delta T_i}{T_i}, \quad (6.14)$$

где  $a_i$  – известные коэффициенты влияния, полученные по результатам вычислительного факторного эксперимента по методике, рассмотренной в главе 2.

*Задача №1.* Пусть в (6.14) первое слагаемое  $a_1 \frac{\Delta T_1}{T_1}$  будет соответствовать ЭРИ, которое предполагается разместить в камере микротермостата. Остальные слагаемые в (6.14)  $a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2}, \dots, a_n \frac{\Delta T_n}{T_n}$  будут соответствовать ЭРИ, размещаемых в непосредственном контакте с окружающей средой (без микротермостатирования). Необходимо найти величину  $\Delta T_1$ , которая в данной постановке имеет физический смысл абсолютного отклонения температуры статирования за счет тепловых потерь микротермостата  $\Delta T_1 = \Delta T_{СТ}$ , при заданном уровне относительной погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$ .

Выразим искомую величину  $\Delta T_1$  из (6.14):

$$\Delta T_1 = \frac{T_1 \cdot \left( \frac{\Delta N}{N} - a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2} - a_3 \frac{\Delta T_3}{T_3} - \dots - a_n \frac{\Delta T_n}{T_n} \right)}{a_1}. \quad (6.15)$$

В (6.15) величины номинальных рабочих температур ЭРИ  $T_2, T_3, \dots, T_n$  есть температуры элементов подмножества  $\mathbf{K}$ , т.е. ЭРИ без микротермостатирования. Тогда с учетом (6.10), (6.12) температура каждого ЭРИ из подмножества  $\mathbf{K}$ :

$$T_i = T_{\text{CP}} + \delta T_i = T_{\text{CP}} + F_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j = T_{\text{CP}} + R_{ii}P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j, \quad (6.16)$$

где  $\delta T_i$  – собственный и/или фоновый перегрев  $i$ -ого ЭРИ;  $R_{ii}$  – тепловое сопротивление  $i$ -ого ЭРИ;  $P_i$  – мощность тепловыделения  $i$ -ого ЭРИ;  $\sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j$  – слагаемые, отвечающие за фоновый перегрев.

По аналогии с (6.16) можно записать выражение для рабочей температуры  $T_1$ , т.е. рабочую температуру ЭРИ внутри камеры микротермостата:

$$T_1 = T_{\text{CT}} + \delta T_1 = T_{\text{CT}} + R_{i1} \cdot P_1,$$

где  $\delta T_1$  – собственный перегрев элемента термостатирования;  $R_{i1}$  – тепловое сопротивление элемента термостатирования;  $P_1$  – мощность тепловыделения элемента термостатирования.

Разность рабочих температур ЭРИ  $\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_n$  обусловлена девиацией температуры окружающей среды:

$$\Delta T_2 = \Delta T_3, \dots, \Delta T_n = \Delta T_{\text{CP}}.$$

С учетом сказанного формулу (6.15) можно записать в виде:

$$\Delta T_1(T) = \frac{(T_{\text{CT}} + R_{i1} \cdot P_1) \cdot \left( \frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij}P_j} \right)}{a_1}. \quad (6.17)$$

Полученная формула (6.17) представляет собой семейство гиперболических кривых при заданных значениях погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$  (рисунок 6.8). Здесь принято, что номинальная температура среды равна  $T_{\text{НОМ}} = 273$  К; коэффициенты влияния уравнения (6.14) находятся в зависимости  $a_1 \gg a_i$ , т.е. присутствует доминирующий коэффициент влияния  $a_1$ ; перегрев ЭРИ отличен от нуля  $R_{ii} \cdot P_i \neq 0$ . С учетом перечисленных условий можно видеть, что центральная кривая семейства, полученная при нулевой погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N} = 0$  имеет точку пересечения с осью абсцисс при  $T = 273$  К. Действительно, при  $T = 273$  К и  $\frac{\Delta N}{N} = 0$  числитель (6.17) обращается в нуль, а значит и функция принимает нулевое значение. В

иных случаях, когда  $\frac{\Delta N}{N} \neq 0$  для выполнения равенства нулю функции (6.17) требуется условие:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}.$$

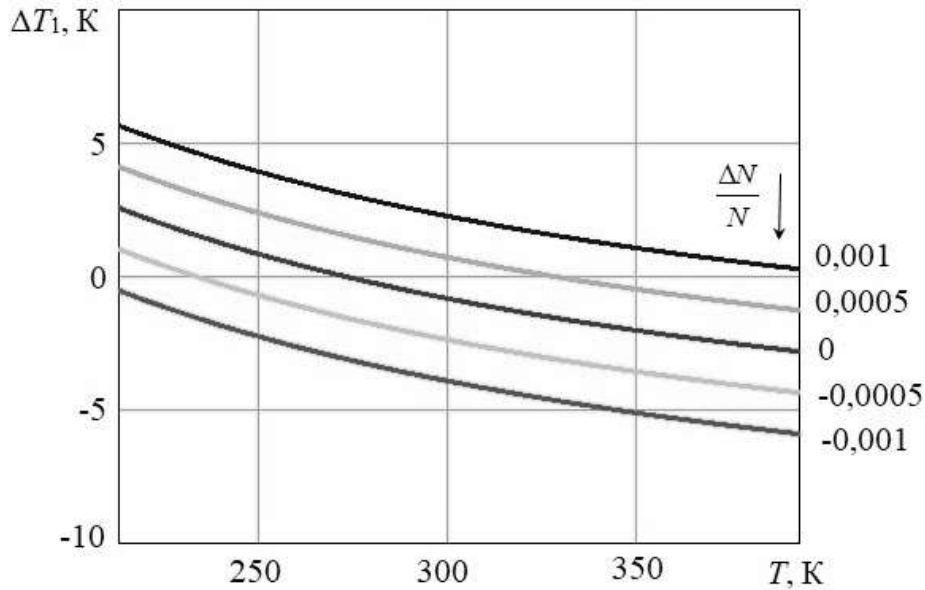


Рисунок 6.8 – Функциональная зависимость тепловых потерь в микротермостате от температуры внешней среды при заданных уровнях погрешности выходного параметра ЭС

В общем виде (6.17) можно записать следующим образом:

$$\Delta T_1(T) = \frac{\alpha \cdot \left( B - \sum \gamma_i \frac{T - \chi}{T + \eta} \right)}{\varphi},$$

где  $\alpha$ ,  $\gamma_i$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  – постоянные коэффициенты, имеющие физический смысл коэффициентов влияния ( $\gamma_i$ ,  $\varphi$ ) и температуры ( $\alpha$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ );  $B$  – параметр, имеющий физический смысл заданной погрешности выходного параметра ЭС  $\left( \frac{\Delta N}{N} \right)$ .

Рассмотренная задача №1 может быть распространена на случай нахождения в камере микротермостата нескольких ЭРИ. Тогда функция (6.17) видоизменится таким образом:

$$\Delta T(T) = \frac{\left( T_{\text{СТ}} + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n1} F_{ij} P_j \right) \cdot \left( \frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=n1+1}^{n2} a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n2} F_{ij} P_j} \right)}{\sum_{i=1}^{n1} a_i}. \quad (6.18)$$

Случай (6.18) предполагает, что в исходном уравнении температурной погрешности (6.14) присутствует несколько ЭРИ  $n_1$ , обладающих доминирующими величинами. Эти ЭРИ располагаются в камере микротермостата и обладают перегревом  $R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n_1} F_{ij} P_j$ . Оставшиеся ЭРИ ( $n_2 = n - n_1$ ) по-прежнему находятся за пределами камеры микротермостата, в непосредственном контакте с окружающей средой.

*Задача №2.* Пусть в (6.14) первое слагаемое  $a_1 \frac{\Delta T_1}{T_1}$  будет соответствовать ЭРИ, которое предполагается разместить в камере микротермостата. Остальные слагаемые в (6.14)  $a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2}, \dots, a_n \frac{\Delta T_n}{T_n}$  будут соответствовать ЭРИ, размещаемых в непосредственном контакте с окружающей средой (без микротермостатирования). Необходимо найти величину термостатирования  $T_1 = T_{CT}$  при заданном уровне относительной погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$ .

Выразим искомую величину  $T_{CT}$  из (6.14):

$$T_{CT} = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N} - a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2} - a_3 \frac{\Delta T_3}{T_3} - \dots - a_n \frac{\Delta T_n}{T_n}}. \quad (6.19)$$

По аналогии с задачей №1 величины номинальных рабочих температур ЭРИ  $T_2, T_3, \dots, T_n$  есть температуры элементов подмножества **K**, т.е. ЭРИ без микротермостатирования. Температура каждого ЭРИ из подмножества **K**:

$$T_i = T_{CP} + \delta T_i = T_{CP} + F_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j = T_{CP} + R_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j.$$

Разность рабочих температур ЭРИ  $\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_n$  обусловлена девиацией температуры окружающей среды:

$$\Delta T_2 = \Delta T_3, \dots, \Delta T_n = \Delta T_{CP}.$$

Величина  $\Delta T_1$  имеет физический смысл абсолютного отклонения температуры статирования за счет тепловых потерь микротермостата  $\Delta T_1 = \Delta T_{CT} = \text{const}$ .

С учетом сказанного, формулу (6.19) можно записать в виде:

$$T_{CT}(T) = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{HOM}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}}. \quad (6.20)$$

Функция (6.20) представляет собой семейство гиперболических кривых при заданных значениях погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$  (рисунок 6.9). Принято, что номинальная температура среды равна  $T_{\text{НОМ}} = 273$  К; коэффициенты влияния уравнения (6.14) находятся в зависимости  $a_1 \gg a_i$ , т.е. присутствует доминирующий коэффициент влияния  $a_1$ , причем  $a_1 > 0$ ; перегрев ЭРИ отличен от нуля  $R_{ii} \cdot P_i \neq 0$ . С учетом перечисленных условий можно видеть, что центральная кривая семейства, полученная при погрешности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N} = 0,001$  в координате  $T = 273$  К принимает значение температуры статирования  $T_{\text{СТ}} = 308$  К. Действительно, при  $T = 273$  К компонент  $\sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}$  в (6.20) обращается в нуль и выражение превращается в независящее от аргумента  $T$  равенство:

$$T_{\text{СТ}} = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N}}$$

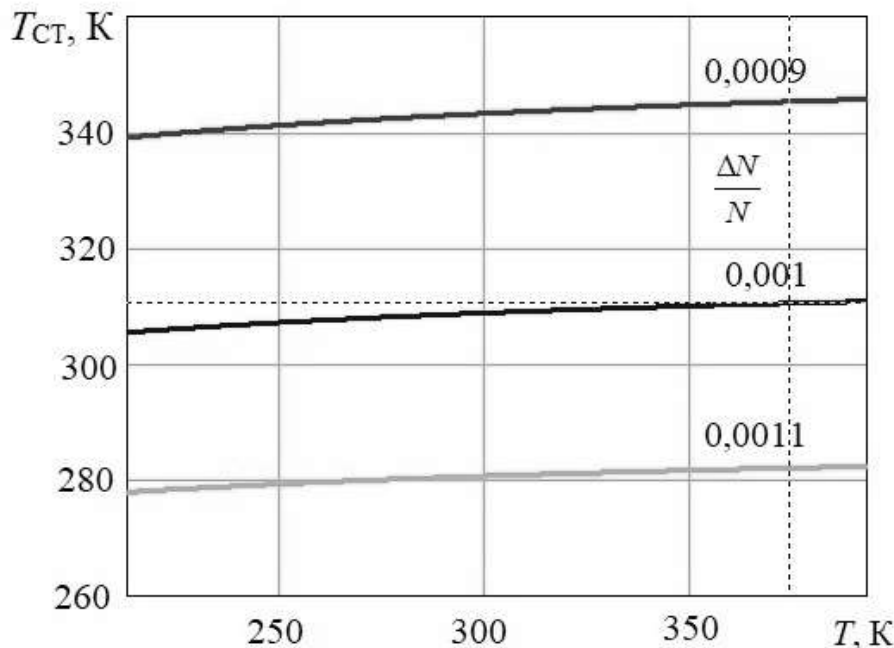


Рисунок 6.9 – Функциональная зависимость температуры статирования от температуры внешней среды при заданных уровнях погрешности выходного параметра ЭС

Рассмотренная задача №2 может быть распространена на случай нахождения в камере микротермостата нескольких ЭРИ. Тогда функция (6.20) видоизменится следующим образом:

$$T_{\text{CT}}(T) = \frac{\Delta T \cdot \sum_{i=1}^{n1} a_i}{\frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=n1+1}^{n2} a_i \frac{T - T_{\text{HOM}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n2} F_{ij} P_j}}. \quad (6.21)$$

В (6.21) предполагается, что несколько ЭРИ количеством  $n1$  обладают доминирующими величинами. Эти ЭРИ располагаются в камере микротермостата. Оставшиеся ЭРИ ( $n2 = n - n1$ ) находятся за пределами камеры микротермостата, в непосредственном контакте с окружающей средой.

*Задача №3.* Пусть в (6.14) первое слагаемое  $a_1 \frac{\Delta T_1}{T_1}$  будет соответствовать ЭРИ, которое предполагается разместить в камере микротермостата. Остальные слагаемые в (6.14)  $a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2}, \dots, a_n \frac{\Delta T_n}{T_n}$  соответствуют ЭРИ, размещаемым в непосредственном контакте с окружающей средой (без микротермостатирования). Необходимо найти величину перегрева внутри камеры микротермостата  $\delta T_1$  при заданных значениях температуры статирования  $T_{\text{CT}}$ .

Воспользуемся выражением (6.19) из задачи №2:

$$T_{\text{CT}} = T_1 = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N} - a_2 \frac{\Delta T_2}{T_2} - a_3 \frac{\Delta T_3}{T_3} - \dots - a_n \frac{\Delta T_n}{T_n}}. \quad (6.22)$$

Представим величину температуры статирования в виде суммы номинальной температуры статирования и собственного перегрева термостатирования:

$$T_1 = T_{\text{CT}} + \delta T_1.$$

По аналогии с задачами №1, 2 величины номинальных рабочих температур ЭРИ  $T_2, T_3, \dots, T_n$  есть температуры элементов подмножества  $\mathbf{K}$ , т.е. ЭРИ без микротермостатирования. Температура каждого ЭРИ из подмножества  $\mathbf{K}$ :

$$T_i = T_{\text{CP}} + \delta T_i = T_{\text{CP}} + F_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j = T_{\text{CP}} + R_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j.$$

Разность рабочих температур ЭРИ  $\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_n$  обусловлена девиацией температуры окружающей среды:

$$\Delta T_2 = \Delta T_3, \dots, \Delta T_n = \Delta T_{\text{CP}}.$$

Величина  $\Delta T_1$  имеет физический смысл абсолютного отклонения температуры статирования за счет тепловых потерь микротермостата  $\Delta T_1 = \Delta T_{\text{CT}} = \text{const}$ .

С учетом всех замечаний, формулу (6.22) можно записать в виде:



$$T_{\text{СТ}} + \delta T_{\text{СТ}} = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}}. \quad (6.23)$$

Из (6.23) выразим интересующую величину перегрева в камере микротермостата  $\delta T_1$ :

$$\delta T_{\text{СТ}}(T) = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}} - T_{\text{СТ}}. \quad (6.24)$$

Функция (6.24) представляет собой семейство гиперболических кривых при заданных значениях температуры статирования  $T_{\text{СТ}}$  (рисунок 6.10). Принято, что номинальная температура среды равна  $T_{\text{НОМ}} = 273$  К; температура статирования  $T_{\text{СТ}} > T_{\text{НОМ}}$ ; коэффициенты влияния уравнения (6.14) находятся в зависимости  $a_1 \gg a_i$ , т.е. присутствует доминирующий коэффициент влияния  $a_1$ , причем  $a_1 > 0$ ; перегрев ЭРИ и погрешность выходного параметра ЭС отличны от нуля:  $R_{ii} \cdot P_i \neq 0$  и  $\frac{\Delta N}{N} \neq 0$ . С учетом этих условий можно видеть, что центральная кривая семейства, полученная при температуры статирования  $T_{\text{СТ}} = 308$  К в координате  $T = 273$  К принимает нулевое значение перегрева внутри камеры микротермостата  $\delta T_{\text{СТ}} = 0$ . Легко заметить, что при  $T$

$= 273$  К компонент  $\sum_{i=2}^n a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} P_j}$  в (6.24) обращается в нуль и выражение превраща-

ется в тождество для номинального значения температуры статирования, независящее от температуры внешней среды:

$$\delta T_{\text{СТ}} = \frac{a_1 \cdot \Delta T_1}{\frac{\Delta N}{N}} - T_{\text{СТ}}.$$

Рассмотренная задача №3 может быть распространена на случай нахождения в камере микротермостата нескольких ЭРИ. Тогда функция (6.24) видоизменится следующим образом:

$$\delta T_{\text{СТ}}(T) = \frac{\Delta T \cdot \sum_{i=1}^{n1} a_i}{\frac{\Delta N}{N} - \sum_{i=n1+1}^{n2} a_i \frac{T - T_{\text{НОМ}}}{T + R_{ii} \cdot P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n2} F_{ij} P_j}} - T_{\text{СТ}}, \quad (6.25)$$

где  $n1$  – количество ЭРИ, обладающих доминирующими величинами и располагающихся в камере микротермостата;  $n2 = (n - n1)$  – ЭРИ за пределами камеры микротермостата, в непосредственном контакте с окружающей средой.

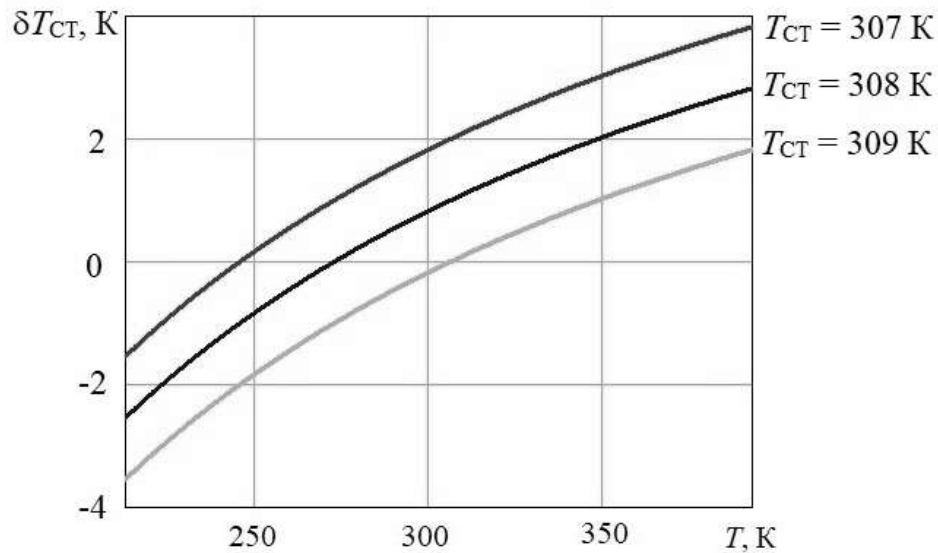


Рисунок 6.10 – Функциональная зависимость перегрева в камере микротермостата от температуры внешней среды при заданных значениях температур статирования

### 6.3 Результаты применения метода микротермостатирования

Целью экспериментальной части исследования является сравнение температурной стабильности стабилизатора напряжения (рисунок 6.11) для двух случаев:

1. Отсутствие специальных методов термостабилизации.
2. Применение микротермостатирования по отношению к источнику опорного напряжения (стабилитрону) VD5.

Схема электрическая принципиальная стабилизатора напряжения состоит из следующих наименований ЭРИ:

- резисторы  $R_1$ ,  $R_H$  постоянные металлопленочные ОМЛТ ОЖ0.467.107ТУ;
- конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  электролитические алюминиевые Jamicon TKR680M2WL35;
- диоды  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$ ,  $VD_4$  импульсные Diodes Incorporated FR306;
- стабилитрон  $VD_5$  Nexperia BZX84-C15.215;
- транзистор  $VT_1$  ST Microelectronics MJE340;
- транзистор  $VT_2$  ON Semiconductor MJE15032.

Основные параметры стабилизатора:

- амплитуда входного сигнала:  $U_{ВХ} = 30$  В;
- частота входного сигнала  $f = 100$  Гц;
- напряжение стабилизации  $U_{СТАБ} = 13,7$  В;
- сопротивление нагрузки  $R_H = 40$  Ом.

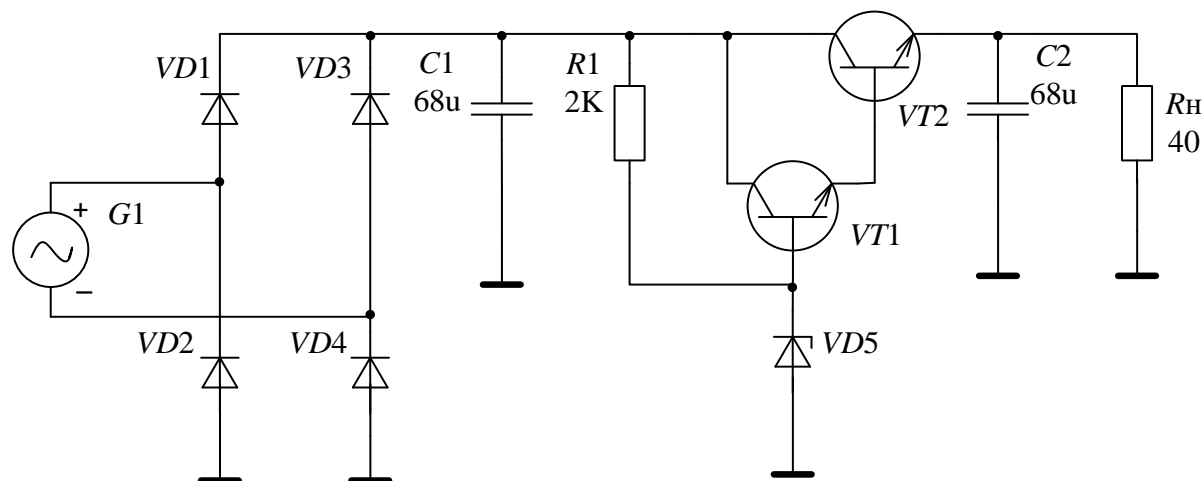


Рисунок 6.11 – Электрическая схема стабилизатора напряжения

Используя информационные технологии, рассмотренные в главе 2, был проведен вычислительный факторный эксперимент по отношению к электрической схеме стабилизатора напряжения. При этом схемотехнический анализ проводился в программном комплексе OrCAD PSpice, статистические расчеты – в программном комплексе MathCAD. После проверки значимости коэффициентов регрессии окончательное уравнение температурной погрешности в соответствии с (2.23) имеет вид:

$$\frac{\Delta U}{U} = -0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} - 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} - 0,207 \frac{\Delta T_{VD5}}{T_{VD5}}, \quad (6.26)$$

где  $-0,077$ ;  $-0,120$ ;  $-0,207$  – значимые коэффициенты влияния для ЭРИ  $VT1$ ;  $VT2$ ;  $VD5$ , соответственно.

Анализ (6.26) позволяет утверждать:

- температурная погрешность напряжения стабилизации в основном зависит от температурной нестабильности трех ЭРИ: транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , стабилитрон  $VD5$ . Остальные ЭРИ (факторы) электрической схемы оказывают незначительное влияние на температурную погрешность ЭС;

- коэффициенты влияния второго порядка  $a_i \cdot a_j$  в (6.26) пренебрежимо малы, поэтому адекватной регрессионной моделью признан линейный полином;

- отрицательный знак коэффициентов регрессии в (6.26) свидетельствует об отрицательном тренде температурной зависимости параметров ЭРИ;

- для обеспечения заданной температурной стабильности данного устройства возможно два решения: применение высокостабильных ЭРИ  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ ; термостатирование ЭРИ  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ .

Для упрощения дальнейшего хода экспериментального исследования проведем отбор единственного и наибольшего по абсолютной величине фактора – стабилитрона *VD5* – для целей микротермостатирования. Экспериментальная установка для микротермостатирования конструктивно состоит из двух частей:

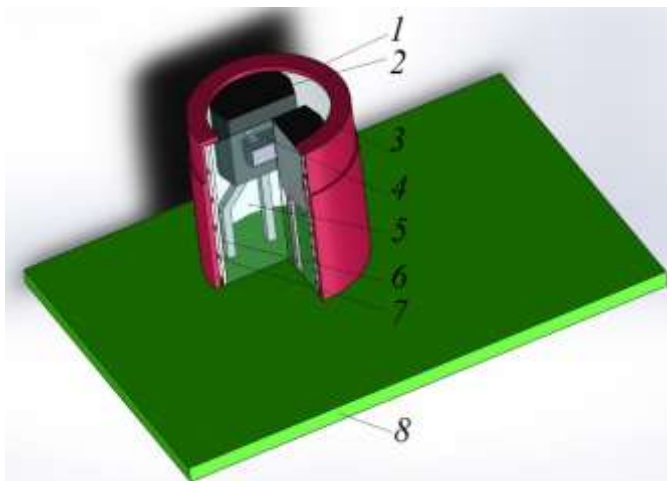
- печатный узел стабилизатора напряжения, на котором расположена камера микротермостата (рисунок 6.12, *а*);
- управляющий блок, формирующий корректирующие воздействия микротермостата (рисунок 6.12, *б*).

*а**б*

Рисунок 6.12 – Экспериментальная установка микротермостатирования

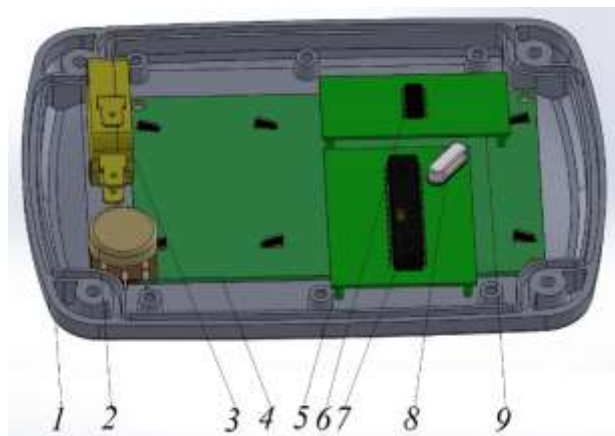
Камера микротермостата (рисунок 6.13, *а*) представляет собой компактную цилиндрическую конструкцию диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Внутри камеры располагаются транзистор-нагреватель *BC337-25*, элемент термостатирования – стабилитрон *BZX84-C15* и датчик температуры *LM35DZ*. Транзистор и датчик имеют штыревые контакты для монтажа в отверстия печатной платы и заключены в стандартные корпуса *TO-92*. Стабилитрон *BZX84-C15* имеет корпус *SOT-23*, предназначенный для планарного монтажа. Однако в данном случае стабилитрон зафиксирован между плоскими гранями корпусов нагревателя и датчика теплопроводящим клеем *DOWSIL SE 9184*. Для надежной механической фиксации элементов микротермостата применены: термоусадочная трубка, диаметр которой позволяет по касательной охватывать корпуса нагревателя и датчика, а также несколько спиральных витков медного провода для стягивания вышеназванных элементов. Внутреннее пространство камеры микротермостата (полость внутри термоусадочной трубки) заполняется теплоизолирующим материалом – каолиновой ватой *МКРР-130*. Элементы микротермостата вместе с элементами механической фиксации закрываются цилиндрическим пластиковым кожухом.

Управляющий блок выполнен в стандартном пластиковом корпусе *Gainta G500B* размером 145×90×32 мм. В крышке корпуса (рисунок 6.13, б) сделан прямоугольный вырез для жидкокристаллического дисплея *LCD-2004-A*. Помимо основной панели дисплей имеет вспомогательную плату конвертера преобразования *I2C/SPI*, которая располагается на бобышках в правой верхней части панели. В корпусе размещена еще одна плата, на которой смонтированы микроконтроллер управления микротермостатом *Atmel ATmega8A* и кварцевый резонатор *HC-49S 10.00*. В левой части корпуса располагаются кнопка выключения управляющего блока и переменный резистор для регулировки температуры нагревателя.



а

1 – кожух; 2 – датчик *LM35DZ*; 3 – транзистор-нагреватель *BC337-25*; 4 – стабилитрон *BZX84-C15*; 5 – теплоизоляционный материал *МКРР-130*; 6 – термоусадочная трубка; 7 – спиральный каркас; 8 – печатная плата



б

1 – корпус; 2 – переменный резистор; 3 – кнопка выключения; 4 – плата жидкокристаллического дисплея; 5 – плата микроконтроллера; 6 – контроллер дисплея; 7 – микроконтроллер *Atmel ATmega8A*; 8 – кварцевый резонатор *HC-49S 10.00*; 9 – плата конвертера преобразования *I2C/SPI*

Рисунок 6.13 – Структурный состав установки микротермостатирования

Схема электрическая принципиальная управляющего блока микротермостата вместе с исполнительными элементами изображена на рисунке 6.14. Основа схемы – 8-разрядный микроконтроллер *DD1* с 8 Кб внутрисистемно программируемой Flash памяти *Atmel ATmega8A*. Работа микроконтроллера обеспечивается кварцевым резонатором *ZQ1* модели *HC-49S* с тактовой частотой 10 МГц. Сброс и выключение управляющего блока происходит кнопкой *SA1*. Исполнительные элементы микротермостата – нагреватель *VT1* и датчик *BT1* – подключены к портам *PB3* и *PB4* микроконтроллера. В качестве нагревателя применяется транзистор *BC337-25*, на участке база-коллектор которого подключен переменный резистор *R3* сопротивлением 10К. Регулиров-

кой резистора  $R3$  изменяется ток коллектора транзистора-нагревателя  $VT1$ , что ведет к изменению его рабочей температуры и влияет на время выхода на режим микротермостата. Для ускорения выхода на режим термостатирования переменный резистор  $R3$  устанавливают в крайнее правое положение.

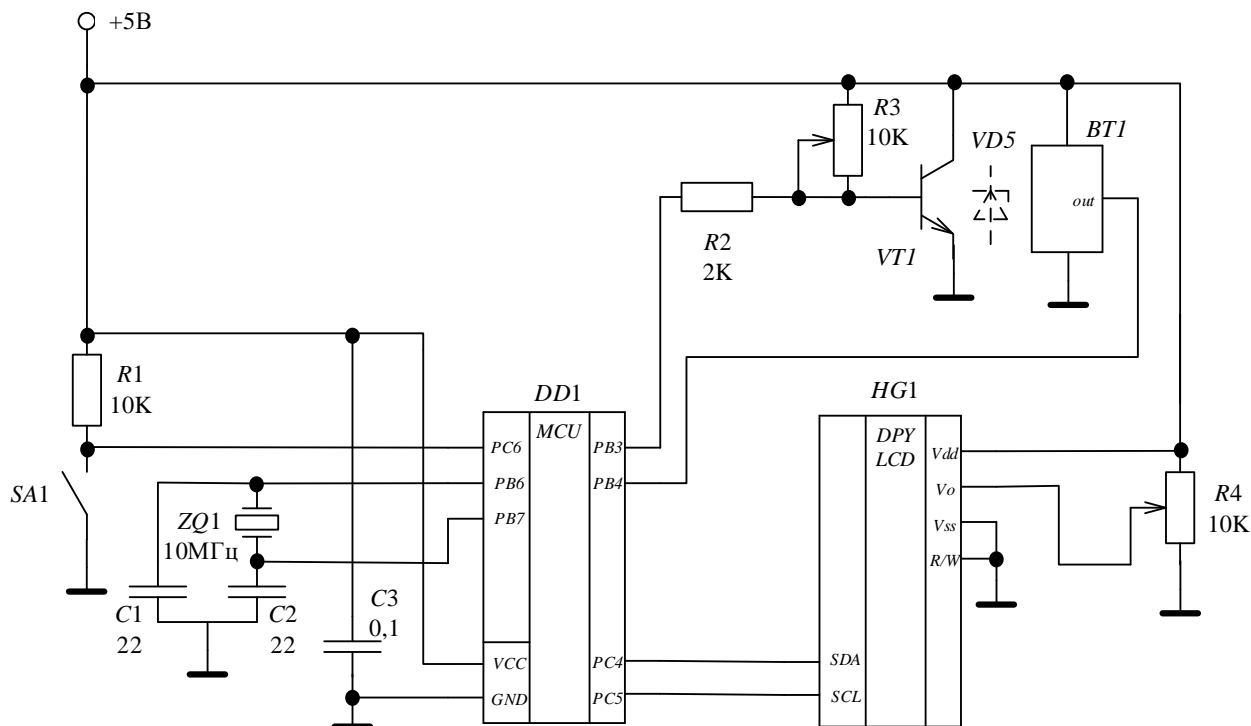


Рисунок 6.14 – Схема электрическая принципиальная управляющего блока

Датчик  $BT1$  модели  $LM35DZ$  – это прецизионный интегральный датчик температуры, у которого выходное напряжение пропорционально температуре по шкале Цельсия. Пунктирным начертанием между нагревателем и датчиком изображен термостатируемый элемент – стабилитрон  $VD5$  из вышеприведенной схемы стабилизатора напряжения. Для визуального контроля за температурой статирования к микроконтроллеру через порты  $PC4$  и  $PC5$  подключен жидкокристаллический дисплей  $LCD-2004-A$ . Поскольку дисплей оснащен конвертером преобразования  $I2C/SPI$ , то связь с микроконтроллером происходит по двухпроводному последовательному интерфейсу. Наличие последовательного интерфейса позволяет сэкономить цифровые выводы контроллера для подключения дополнительной периферии. Переменный резистор  $R4$ , установленный на плате конвертера позволяет, регулировать яркость подсветки дисплея. Питание управляющего блока происходит от стандартного зарядного устройства  $DEXP IET002048$  для мобильных устройств. Выходной порт зарядного устройства обеспечивает напряжение  $+5$  В и максимальную силу тока  $1000$  мА.

С цифрового выхода  $PB4$  микроконтроллера  $DD1$  подается сигнал на базу транзистора  $VT1$ . Применяется позиционный способ регулирования: сигнал логической единицы ( $U_{\text{вых}} = 5$  В)

в активном режиме и сигнал логического нуля ( $U_{\text{вых}} = 0 \text{ В}$ ) в пассивном режиме. Известно [54], что позиционный (релейный) закон регулирования оправдан для термостатирования малых объемов. Применение в качестве нагревателя миниатюрного транзистора *BC337-25* позволяет термостатировать непосредственно стабилитрон *VD5*. Датчик *BT1* отслеживает температуру в термостатируемом объеме с точностью  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выходное напряжение датчика *BT1* изменяется линейно с коэффициентом  $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ . Температура статирования программным путем устанавливается в  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Основа измерительной установки для исследования температурной стабильности схемы стабилизатора напряжения – комплекс для температурных испытаний Thermostream TP04310A. Комплекс TP04310A специально разработан для быстрых, качественных и точных испытаний печатных плат, электронных компонентов и модулей (см. главу 3). Принцип работы комплекса построен на температурном воздействии сжатого воздуха с большим расходом на испытываемый образец (микросхему или печатную плату). Остальная неиспытываемая поверхность объекта накрывается защитным термоизолирующим полотном (держатель термоизолирующий). Большой расход воздуха и давление позволяют комплексу менять температуру на образце за считанные секунды в очень широком диапазоне. Этот диапазон температур шире, чем у любых стандартных климатических камер. Главным преимуществом комплекса TP04310A является очень высокая точность контроля температуры ( $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), этот параметр превышает показатели самых качественных климатических камер.

Испытуемый образец стабилизатора напряжения подключался на входе к источнику питания переменного тока Napri PW-500, а на выходе – к мультиметру Mastech MAS838. Прибор Napri PW-500 представляет собой одноканальный трансформаторный (линейный) источник питания с плавной регулировкой переменного тока и напряжения. Выходное напряжение линейного источника точное, стабильное и не содержит высокочастотных пульсаций.

Результаты измерений представлены в графическом виде (рисунок 6.15). На координатной плоскости (рисунок 6.15, *a*) продемонстрирована температурная зависимость напряжения стабилизации для двух конструктивных исполнений стабилизатора напряжения: без применения термостатирования и с применением микротермостатирования стабилитрона *VD5*. Диапазон изменения температуры окружающей среды варьировался в эксперименте от минус  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Можно видеть, что температурные кривые имеют качественно идентичный характер – линейно возрастающую зависимость. Каждая экспериментальная кривая аппроксимирована линейно. Линейность характеристик позволяет оценить температурный коэффициент напряжения (ТКН) двух конструктивных вариантов по известной формуле:

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U}{U \cdot \Delta T} \cdot 100\% = \frac{12,96 - 13,87}{13,72 \cdot (-45 - 10)} = 0,1206 \frac{\%}{^\circ\text{C}} \text{ (вариант без термостатирования);}$$

$$\text{ТКН} = \frac{13,82 - 14,17}{14,15 \cdot (-45 - 10)} \cdot 100\% = 0,045 \frac{\%}{^\circ\text{C}} \text{ (вариант с микротермостатированием).}$$

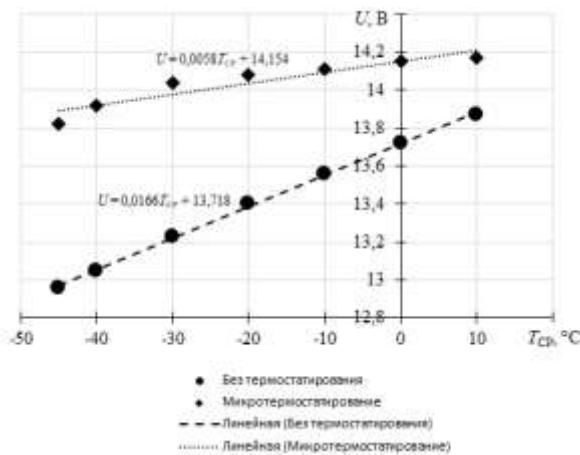
Сравнение ТКН свидетельствует об увеличении температурной стабильности в 2,68 раза для конструктивного варианта с микротермостатированием. Дальнейшее увеличение температуры окружающей среды снижает эффективность применения микротермостата, поскольку перестает выполняться условие [54]:

$$P < \sigma_{\text{ЭКВ.СР}}(T_{\text{СТ}} - T_{\text{СР.max}}),$$

где  $P$  – мощность тепловыделения термостатируемого объекта (стабилитрона VD5);  $\sigma_{\text{ЭКВ.СР}}$  – эквивалентная тепловая проводимость от объекта в окружающую среду;  $T_{\text{СТ}} = 35^\circ\text{C}$  – температура термостатирования;  $T_{\text{СР.max}}$  – максимальное значение температуры окружающей среды.

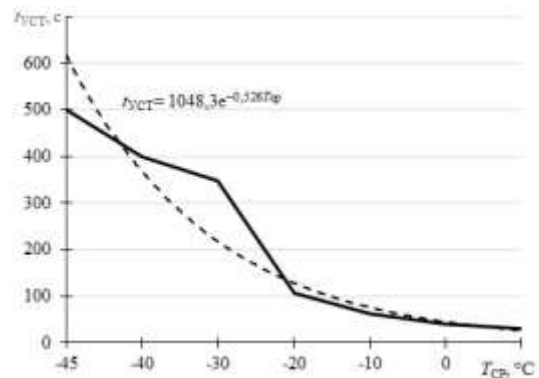
Анализ пускового режима микротермостата (рисунок 6.15, б) предполагает определение интервала времени  $t_{\text{УСТ}}$ , по прошествии которого система термостатирования после ее включения входит в установившейся режим. Полученная зависимость имеет нелинейный убывающий характер с минимальным временем выхода на режим в 30 с при температуре  $+10^\circ\text{C}$  и максимальным временем выхода на режим в 500 с при температуре  $-45^\circ\text{C}$ . Изменение времени выхода на режим происходит по регулярному закону, близкому к экспоненциальному. Применяя метод экспоненциальной аппроксимации, получим:

$$t_{\text{УСТ}} = 1048,3e^{-0,526T_{\text{СР}}}.$$



а

Температурная зависимость напряжения стабилизации для двух конструктивных вариантов стабилизатора напряжения



б

Зависимость времени пускового режима микротермостата от температуры окружающей среды

Рисунок 6.15 – Статическая и динамическая характеристики микротермостата



Фиксация времени выхода на режим сопровождалась достижением напряжения стабилизации, соответствующей значению текущей температуры (см. рисунок 6.15, а). Увеличение времени выхода на режим при уменьшении температуры окружающей среды связано со значительным температурным перепадом и, как следствие, возрастающими тепловыми потерями в камере микротермостата. Особенность конструкции камеры микротермостата (см. рисунок 6.13, а) заключается в наличии шести тепловых стоков – штыревых контактов нагревателя и датчика, выполненных из металла, которые при увеличении перепада температур начинают более интенсивно отводить тепловую энергию во внешнюю среду.

Экспериментальное положение точек зависимости относительной погрешности напряжения стабилизации от температуры окружающей среды  $\Delta U/U = f(T_{\text{CP}})$  хорошо аппроксимируется линейными выражениями (рисунок 6.16, а). Можно видеть, что для конструктивного случая без термостатирования при  $T_{\text{CP}} = T_{\text{НОМ}} = 0$  °С устройство имеет нулевую погрешность; для случая с микротермостатированием при  $T_{\text{CP}} = 0$  °С погрешность  $\Delta U/U = 3,2$  %. Разница в величинах угловых коэффициентов составляет 3 раза.

Имея в распоряжении первичные экспериментальные данные (рисунок 6.15) и аналитический вид уравнения температурной погрешности (6.26), перейдем к оценке температурной погрешности двух конструктивных исполнений стабилизатора напряжения. Перегрев ЭРИ  $\Delta T$  ( $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ ), входящих в (6.26), находится с помощью выражения:

$$\Delta T = R_T \cdot P,$$

$R_T$  – тепловое сопротивление ЭРИ;  $P$  – мощность тепловыделения ЭРИ.

Тепловое сопротивление является паспортным значением ЭРИ и может быть найдено в соответствующей технической документации на элемент (datasheet). Мощность тепловыделения ЭРИ наиболее просто можно определить на этапе проведения вычислительного факторного эксперимента (см. главу 2) по нахождению коэффициентов влияния (6.26). Современные программные комплексы схемотехнического моделирования [87, 88] позволяют получать карту режимов электрической схемы, в том числе – мощность тепловыделения ЭРИ при проведении анализа по постоянному току (DC Analysis).

Рабочая температура ЭРИ находится как:

$$T_{\text{РАБ}} = \Delta T + T_{\text{НОМ}} = \Delta T,$$

где  $T_{\text{НОМ}} = 0$  °С – номинальная температура окружающей среды. Нулевое значение  $T_{\text{НОМ}}$  принято для упрощения расчетов.

Для первого конструктивного варианта (без термостатирования) абсолютное отклонение рабочей температуры стабилизатора  $VD5$  равно отклонению температуры окружающей среды от номинального значения:

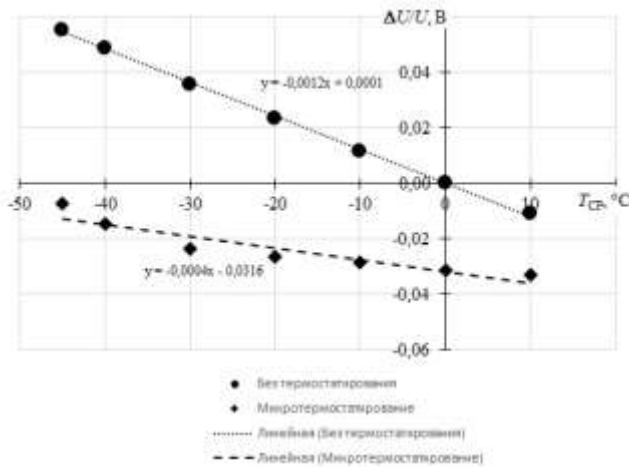
$$\Delta T_{VD5} = \Delta T_{VT1} = \Delta T_{VT2} = \Delta T.$$

Проведем анализ величины  $\Delta T_{VD5}$  для второго конструктивного варианта. Из уравнения температурной погрешности (6.26) выразим  $\Delta T_{VD5}$ :

$$\Delta T_{VD5} = \frac{T_{VD5} \cdot \left( \frac{\Delta U}{U} + 0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} + 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} \right)}{-0,207}. \quad (6.27)$$

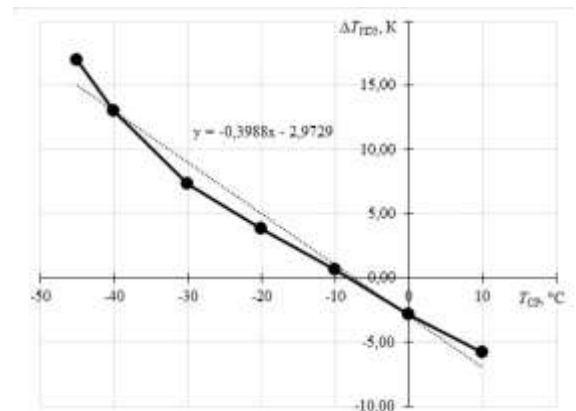
Подставляя в (6.27) значения найденных величин в эксперименте, табулированные для температур окружающей среды  $[-40 \text{ }^\circ\text{C}, \dots, 10 \text{ }^\circ\text{C}]$ , получим зависимость абсолютного отклонения рабочей температуры стабилитрона VD5 для второго конструктивного варианта стабилизатора напряжения (рисунок 6.16, б). Среднее значение отклонения рабочей температуры в указанном диапазоне температур составляет  $\Delta T_{CP} = 4,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученная экспериментальная характеристика  $\Delta T_{VD5} = f(T_{CP})$  аппроксимируется линейным выражением:

$$\Delta T_{VD5} = -0,3988T_{CP} - 2,9729.$$



а

*Относительная погрешность напряжения стабилизации для двух конструктивных вариантов*



б

*Абсолютное отклонение рабочей температуры стабилитрона в камере микротермостата*

Рисунок 6.16 – Количественные характеристики погрешности микротермостата

Следовательно, микротермостат будет иметь нулевое отклонение от температуры статирования ( $\Delta T_{VD5} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) при температуре окружающей среды  $T_{CP} = -7,45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Задавая допустимый уровень температурной погрешности выходного напряжения в (6.27), по аналогии выводятся эмпирические функциональные зависимости температуры статирования  $T_{ст}$  и перегрева в камере статирования  $\delta T_{ст}$  в зависимости от температуры окружающей среды:

$$T_{\text{СТ}} = f(T_{\text{СР}}) \Big|_{\frac{\Delta U}{U} = \text{const}} ; \quad \delta T_{\text{СТ}} = f(T_{\text{СР}}) \Big|_{\frac{\Delta U}{U} = \text{const}} \cdot$$

Таким образом, уравнение температурной погрешности (2.23, 6.26) при заданных уровнях температурной погрешности выходного параметра ЭС может служить для определения основных конструктивных параметров микротермостата.

Сформулируем рекомендации, направленные на дальнейшее улучшение эксплуатационных свойств рассмотренной конструкции микротермостата:

- для ускорения выхода на режим и для более точного поддержания температуры статирования целесообразно применить пропорциональный закон регулирования исполнительного элемента;
- применение датчика и нагревателя, выполненных в корпусах с планарным расположением выводов, позволит снизить эффект теплового стока по штыревым выводам в первоначальной конструкции;
- уменьшение температурной погрешности рассмотренного стабилизатора напряжения возможно достичь путем термостатирования всей группы ЭРИ ( $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VD5$ ), входящих в (6.26), путем размещения их в термостатируемом объеме.

#### 6.4 Основные результаты исследования

1. Показано, что уравнение температурной погрешности (6.1), полученное по методике вычислительного факторного эксперимента, пригодно для решения обратной задачи температурной стабильности. В частности, если задан уровень температурной стабильности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$ , 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  $\delta T$ .

2. Предложена конструкция экспериментального микротермостата стабилизатора напряжения, лишенная значительной материалоемкости и экономических затрат, и позволяющая увеличить температурную стабильность выходного напряжения не менее, чем в 2 раза по сравнению с конструктивным вариантом без применения термостатирования.

3. Выявлен ряд эксплуатационных преимуществ за счет применения микроконтроллера при формировании корректирующих воздействий в экспериментальном микротермостате, а именно: программирование температуры статирования; возможность программного изменения

закона регулирования; рациональное использование свободных аппаратных ресурсов микроконтроллера, входящего в состав ЭС.

4. Показано, что абсолютное отклонение температуры статирования в камере экспериментального микротермостата в диапазоне температур окружающей среды  $[-45; +10]$  °С позволяет достигать погрешность напряжения стабилизации не хуже  $\pm 3,5$  %.

Таким образом, предложен улучшенный метод микротермостатирования, отличающийся обоснованным выбором доминантных ЭРИ, вносящих наибольший вклад в общую температурную погрешность, позволяет увеличить температурную стабильность выходного параметра устройства не менее, чем в 2 раза по сравнению с базовым вариантом.

## ГЛАВА 7 – КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ СИНТЕЗА SPICE-МОДЕЛЕЙ ПО ПРОТОТИПАМ ЭРИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Цель данной главы – разработка комплекса программ «Российский компонент» для синтеза SPICE-моделей относительно прототипов электрорадиоизделий отечественной электронной компонентной базы.

### 7.1 Метод структурной декомпозиции электрорадиоизделий

При моделировании сложных ЭРИ целесообразно применять декомпозицию моделей. Для определенности процесса декомпозиции вводится численная мера сложности модели. Сложность модели должна учитывать число входов  $n$  и выходов  $m$  модели. 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  $\gamma$  следует определять в зависимости от того, во сколько раз увеличивается трудоемкость синтеза модели при увеличении числа ее входов на единицу.

Функцию сложности в некоторых случаях можно считать аддитивной, т.е. если модель объекта состоит из нескольких ( $g$ ) подсистем, то общая сложность равна сумме сложностей этих подсистем, т.е.  $L = \sum_{i=1}^g L_i$ , где  $L_i$  – сложность  $i$ -й подсистемы исходного объекта.

Учитывая сказанное, процесс декомпозиции модели можно рассматривать как процесс минимизации ее сложности, т.е. решение следующей минимизационной задачи:

$$L_D \rightarrow \min_{D \in \{D\}} \Rightarrow D^*$$

где  $D$  – операция декомпозиции;  $\{D\}$  – множество допустимых вариантов декомпозиции;  $D^*$  – оптимальная декомпозиция, минимизирующая сложность  $L$  декомпозируемой системы.

Рассмотрим пример декомпозиции ЭРИ на две различные подсистемы ПС1 и ПС2 различными способами (рисунок 7.1). Это означает, что множество  $\{D\}$  состоит из  $N$  различных вариантов, для которых числа связей  $k$  и  $q$  принимают различные значения. Хорошей декомпозицией следует считать ту, в которой эти числа минимальны. Действительно, используя приведенную выше меру сложности, получаем:

$$L = L(k, q) = (n + q)^\gamma k + k^\gamma (m + q).$$

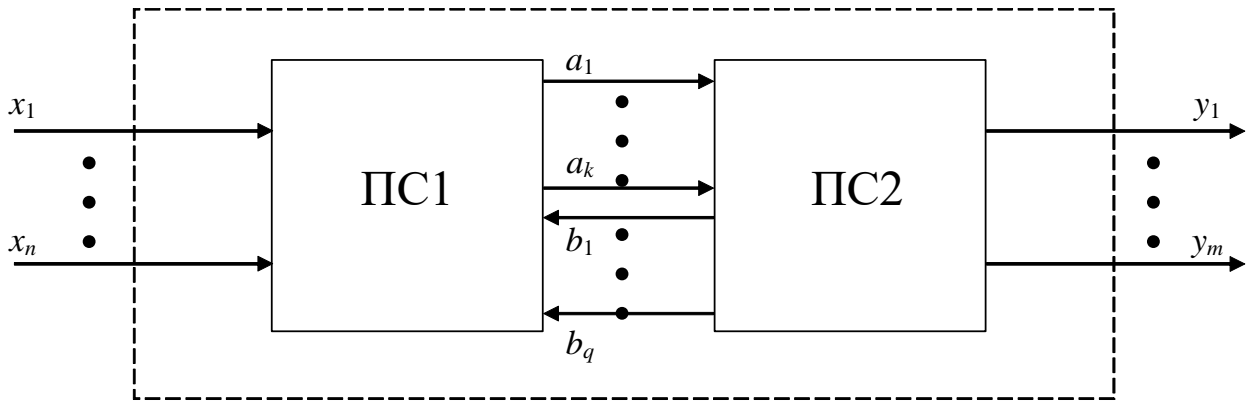


Рисунок 7.1 – Пример декомпозиции сложного ЭРИ на две подсистемы

Оптимальной декомпозицией  $D^*$  из  $\{D\}$  будет та, которая минимизирует  $L(k, q)$ . Пусть  $D_i$  –  $i$ -я декомпозиция, которая определяется двумя числами:

$$D_i = \langle k_i, q_i \rangle, i = 1, \dots, N.$$

Решение получаем в виде  $D^* = D_i$ , если

$$L(k_i, q_i) = \min_{i=1, \dots, N} \{L(k_i, q_i)\}.$$

Таким образом, цель декомпозиции модели состоит, прежде всего, в том, чтобы упростить последующий синтез модели объекта «расщеплением» ее на более простые подсистемы. Этот процесс должен производиться с учетом априорной информации о структурных особенностях объекта.

Рассмотрим множество систем  $C = \{C_k\}$ ,  $k = 1, \dots, K$ . Для любой отдельной системы  $C_{k_0} \in \{C_k\}$  остальные  $C_k$ , для которых  $k \neq k_0$ , есть среда  $M$ .  $C_k$  можно рассматривать как множество непересекающихся подсистем. Подсистему также можно рассматривать состоящей из множества непересекающихся подсистем низшего уровня.

Для подсистем самого нижнего уровня в иерархии определений, задающих разбиение множества  $\{C_k\}$  на непересекающиеся подмножества, описания соответствуют их экспериментальным свойствам. Систему, для которой все свойства определены экспериментально (т.е. описание ее дано не через описание множества подсистем, ее составляющих), назовем элементом  $\mathcal{E}$ . В иерархии определений элементы находятся на самом нижнем уровне:

$$C_k = \{\mathcal{E}_c, k, l\}, \quad l = 1, \dots, L_c, k.$$

Описание свойств подсистем и систем более высоких уровней может быть дано через описание свойств подсистем более низкого уровня.

Экспериментируя с некоторой подсистемой  $C_k$  как с элементом (т.е. не разделяя на подсистемы), можно получить ее описание и тем самым уменьшить количество подсистем в модели.

Состояние всей совокупности подсистем  $\{C_k\}$ , а значит, и всей системы  $C$ , находящейся на самом высоком уровне в системе определений, обозначим  $X$ :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n\}; \quad X \in \{X\},$$

где  $\{X\}$  – пространство состояний совокупности рассматриваемых систем  $C_k$ ;  $\{X_k\}$  – пространство состояний  $C_k$ ;  $\{X_M\}$  – пространство состояний среды  $M$  (эти пространства имеют общие координаты);  $x_j$  – координата вектора пространства состояний – действительное число, обозначающее величину, полученную при физических измерениях или наблюдениях.

Любой подсистеме  $C_k$  соответствует совокупность свойств (совокупность закономерностей ее функционирования):

$$\Omega = \{\omega h\}, \quad h = 1, 2, \dots, H.$$

где  $\omega h$  – закономерность функционирования  $C_k$  в определенных условиях.

Свойства  $C_k$  проявляются в результате взаимодействия со средой; в различных условиях могут проявляться различные свойства – закономерности функционирования системы или элемента.

Закономерность  $\omega h$  представляет собой совокупность описаний множества частных закономерностей ( $\omega q$ ), проявляемых системой в условиях, которые соответствуют отдельным конкретным экспериментам. Закономерность  $\omega h$  – это функциональное соотношение, которое может быть задано как в виде формулы (некоторой аналитической зависимости), так и в виде таблицы отдельных пар чисел, соответствующих  $\omega q$  (значения аргумента и функции, заданные на некотором подмножестве или всем пространстве состояний  $\{X_q\}$ ).

Таким образом,  $\omega h = \{\omega q\}$ ,  $q = 1, 2, \dots, Q_h$ , где  $\omega q$  – экспериментальный физический факт, выявляющий элементарное свойство системы и проявляющийся в определенных условиях.

Началу процесса функционирования  $C_k$  в соответствии с  $\omega q$ , т.е. конкретной реализации физической закономерности, однозначно соответствует начальное состояние среды –  $X_{M,t}^0$  и начальное состояние подсистем  $C_k$  –  $X_{C,t}^0$ , где состояние  $M$  – это  $X_M = (x_{m1}, \dots, x_{md})$ , а состояние  $C_k$  – это  $X_C = (x_{c1}, \dots, x_{cy})$ .

В каждый момент времени  $t$  система  $C$  и среда  $M$  находятся в одном определенном состоянии  $(X_C, t, X_M, t)$ , которое в общем случае может быть известно лишь с некоторой вероятностью.

Событием в  $C$  назовем всякое изменение состояния  $X_C$ . Изменение можно зафиксировать только сравнением векторов, соответствующих состояниям  $C$  в различные моменты времени  $t$  и  $t + \varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ ).

Рассмотрим события, происходящие в результате взаимодействия системы и среды. Обозначим событие в  $C_k$  как  $X_C, t, t + \varepsilon = \langle X_C, t, X_C, t + \varepsilon \rangle$ ; событие в среде  $M$  – как  $X_M, t, t + \varepsilon = \langle X_M, t, X_M, t + \varepsilon \rangle$ .

Результат взаимодействия – это пара событий (событие в отдельной системе  $C_k$  и событие в среде):

$$\langle \omega C, M, t, t + \varepsilon \rangle = \{ X_C, t, t + \varepsilon, X_M, t, t + \varepsilon \}.$$

При моделировании удобно наблюдать за изменениями в полной системе  $C$  через изменения в отдельных подсистемах  $C_k$ .

Всякое взаимодействие отдельной подсистемы  $C_{k0}$  с другими  $C_k \in M$  порождает пары событий, наблюдаемых в  $C_{k0}$  и в  $M$ , разделенных между собой во времени интервалом  $\tau = t' - t$ , имеющем, в общем случае, случайную продолжительность.

Взаимодействием элементов системы, или взаимодействием элемента системы со средой, назовем пары событий, отнесенные к различным моментам времени  $t$  и  $t'$  ( $t' \geq t$ ). Причем событию  $\langle \omega C, M, t \rangle$ , отнесенному к моменту  $t$  (процесс изменений в  $\langle X \rangle$ , заканчивающийся в момент  $t$ ), будет всегда с определенной вероятностью соответствовать событие  $\langle \omega C, M, t' \rangle$  (процесс заканчивается в момент  $t'$ ).

Любое свойство системы проявляется в определенных условиях в результате взаимодействия со средой. Конкретному эксперименту  $\omega q$  всегда соответствуют в определенный момент времени  $t$  определенные условия, возникающие в результате некоторого предшествующего события в  $C$ . Эти условия заключаются в следующем:

1) система  $C$  должна находиться в одном из допустимых для данного эксперимента  $\omega q$  состояний  $X_q \in \{X\}_q$ ;

2) для каждой из координат вектора  $X_q - X_q, j$  определяется значение функции  $\psi q, j$  в момент времени  $t$ :

$$\psi q, j = 1, \text{ если } x_q, j \in \{x_j\}^*, \omega, q, j;$$

$$\psi q, j = 0, \text{ если } x_q, j \notin \{x_j\}^*, \omega, q, j,$$

где  $\{x_j\}^*, \omega, q, j$  – множество допустимых состояний по координате  $j$  в момент времени  $t$ .

Событие в системе  $C$ , соответствующее появлению условий, определяющих проявление свойства  $\omega q$ , выявляется функцией

$$*\omega q = *\omega q(\psi q, 1, \psi q, 2, \dots, \psi q, j, \dots, \psi q, N).$$



Здесь  ${}^*\omega q$  принимает значение 1, если  $X_q \in \langle X_q \rangle$ , и 0 – в противном случае. Если  ${}^*\omega q = 0$ , то никаких событий не происходит; если  ${}^*\omega q = 1$ , т.е. возникают условия, в которых начинается физический процесс, соответствующий  $\omega q$ , то наблюдаемое событие

$$\langle \omega C, M, t, t + \varepsilon \rangle = \{ X_C, t, t + \varepsilon, X_M, t, t + \varepsilon \}.$$

Событию в  $C_k$   $X_C, t, t + \varepsilon, t'$ , которое рассматривается в описании  $\omega q$ , соответствует оператор

$$\Phi_q^*(X_{t'-\varepsilon'}, \varepsilon + \varepsilon' \leq \tau,$$

где  $\Phi_q^*$  задает отображение  $X_{t'-\varepsilon'}$  в  $\{X\}q, t'$ .

Оператор  $\varphi = \varphi^*(\varphi^*(X_t))$  задает отображение  $X_t$  в  $\{X\}q, t'$ .

Конкретный вид функций  ${}^*\omega$  и  $\varphi$  для всех  $\omega q$ , т.е. для всех возможных взаимодействий по всем  $C_k$ , задает пересечение  $\{X_C, K\}$  и  $\{X_M\}$  по координатам и тем самым определяет структуру  $C$  (множество элементов системы и их взаимодействия).

Изменения структуры системы определяются изменением состава  $C$ , т.е. свойств элементов системы в результате их взаимодействий. Описание изменений системы  $C$  состоит в описании изменений  ${}^*\omega, \varphi$  для различных  $\omega q$  при всевозможных взаимодействиях. Если считать элементарными терминами составляющие  $\omega q$ :  ${}^*\omega, \varphi, \varphi^*$ , то изменения структуры могут описываться через изменения состава  $\omega q$ , для чего может вводиться функция  $\mathfrak{Z}$ , определяющая соответствие состава оператора  $\omega q$  событию в системе.

Рассмотрим некоторый процесс  $A$  функционирования сложного ЭРИ  $C$ , для которого в качестве характеристик состояний выбраны функции  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ , а в качестве параметров – величины  $a_1, a_2, \dots, a_k$ . Математическая модель для процесса  $A$  – система соотношений вида

$$x_1(t) = f_1(t, a_1, a_2, \dots, a_k);$$

.....

$$x_n(t) = f_n(t, a_1, a_2, \dots, a_k).$$

Если бы функции  $f_1, f_2, \dots, f_n$  были известны (точно или с необходимой степенью приближения), приведенные соотношения оказались бы идеальной в данных условиях математической моделью процесса. На практике модели такого вида, когда характеристики процесса являются явными функциями только его параметров и времени, встречаются редко.

Если продолжить рассмотрение некоторого процесса  $A$ , то его можно расчленить на ряд элементарных актов (блоков, подпроцессов)  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) таким образом, чтобы построение математической модели для каждого из них было заведомо возможно. Граница между ними условна и проходит «по телу» ЭРИ, рассекая многочисленные связи с циркулирующими по ним потоками информации. При технологически грамотном расчленении ЭРИ часть его элементов из

модели исчезает, поэтому такие элементы не оказывают значимого влияния на ход процессов, исследуемых с помощью модели.

Разделение модели системы на блоки неоднозначно и зависит от того, какие части системы ранее анализировались автономно, от имеющихся стандартных программных комплексов, от традиций исследователя и т.п. Однако при прочих равных условиях обмен информацией между блоками должен быть по возможности минимальным. При решении вопроса о допустимости удаления блока без замены его эквивалентом несущественными и подлежащими удалению считаются блоки модели, маловлияющие на принятый критерий интерпретации результатов моделирования. Правила замены блоков упрощенными эквивалентами различаются в зависимости от характера взаимодействия блоков с оставшейся частью системы. Например, удаляя оконечные блоки, составляющие описание взаимодействующего с моделируемой системой «потребителя», следует отразить цели последнего при формировании критерия интерпретации результатов моделирования.

Рассмотрим способы замены блока, воздействующего на исследуемую часть системы. Это воздействие зависит не только от структуры блока, но и от реакции со стороны исследуемой части. Поэтому характеристики воздействия в общем случае нельзя однозначно определить при автономном исследовании блока, и его нельзя заменить одним, не зависящим от исследуемой части эквивалентом.

Блок модели, воздействующей на исследуемую часть системы, можно заменить множеством упрощенных эквивалентов, не зависящих от исследуемой части. Каждый эквивалент формирует одно из возможных воздействий в пределах заданного диапазона, а моделирование проводится в нескольких (по числу воздействий) вариантах.

Применим рассмотренные правила к схеме на рисунке 7.2. При удалении оконечных элементов (22, 23, 36, 37 на рисунке 7.2, *а*), составляющих описание взаимодействующего с системой «потребителя», часто невозможно наглядно представить результаты моделирования. Поэтому функционирование этих элементов следует отразить при конструировании критерия *г* интерпретации результатов (рисунок 7.2, *б*).

Ряд элементов (14, 15, 28, 29) заменяются пассивными связями, транслирующими без искажения информацию, которой обмениваются сохранившиеся элементы. Некоторая часть элементов заменяется внешними воздействиями. Например, элементы 10, 11, 24, 25 заменены воздействием  $\xi_1$ , элементы 1-4 – воздействием  $\xi_2$ . Возможны комбинированные замены: элементы 18, 19, 32, 33 заменены пассивной связью и воздействием  $\xi_3$ . Оставшиеся элементы группируются в блоки I, II, III. Описания этих блоков могут быть полностью воспроизведены в модели или, если это необходимо, заменены упрощенными операторами, характеризующими отдельные аспекты функционирования соответствующей части системы.

Пусть характеристиками состояний подпроцессов в блоках  $A_i$  будут соответственно функции  $z_{ij}, j = 1, 2, \dots, r_i$ . В качестве параметров для описания подпроцессов  $A_i$  выберем соответственно величины  $\beta_{il}, l = 1, 2, \dots, h_i$ . Совокупность математических моделей для подпроцессов  $A_i$ , рассматриваемых совместно для всех  $i = 1, 2, \dots, m$ , в общем случае еще не составляет математической модели для процесса  $A$ . Эта совокупность характеризует отдельные изолированные подпроцессы  $A_i$ :

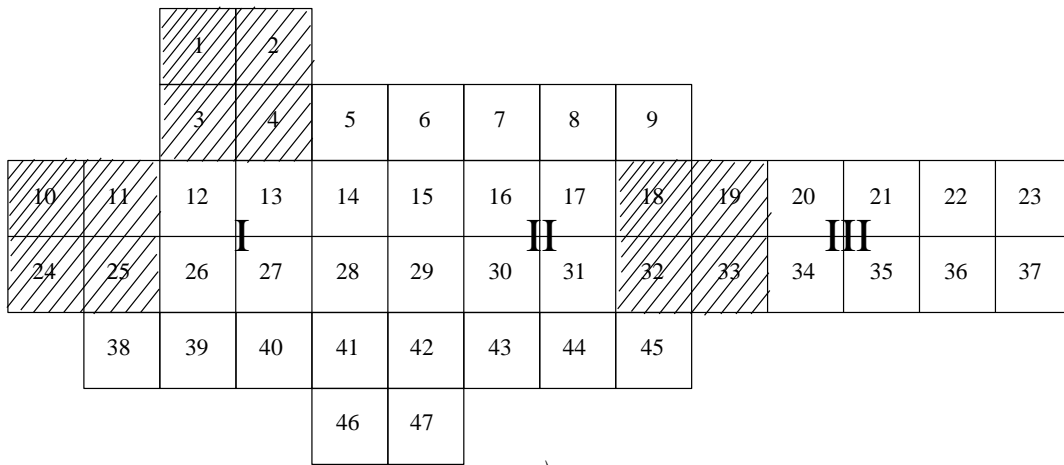
$$\Phi_{A_i}(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{i r_i}, \beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{i h_i}, t) = 0.$$

Кроме этих соотношений, необходимо иметь соотношения вида

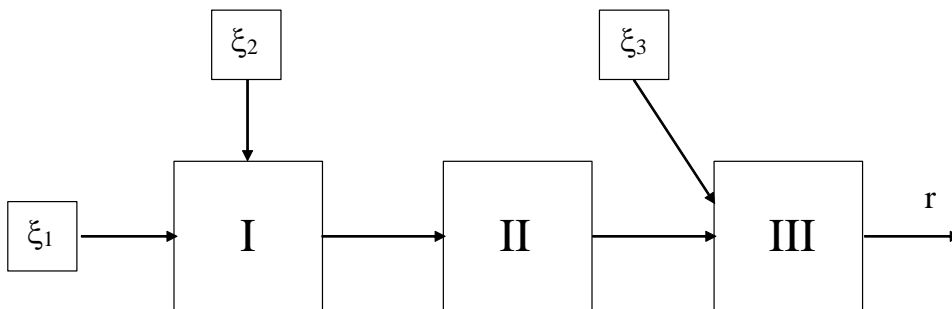
$$\Psi_p(x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, \dots, a_k, z_{11}, \dots, z_{mr}, \beta_{11}, \dots, \beta_{mh}, t) = 0,$$

$$p = 1, 2, \dots, s,$$

связывающие характеристики  $z_{ij}$  подпроцессов  $A_i$  с характеристиками  $x_1, x_2, \dots, x_n$  процесса  $A$ . Совокупность соотношений двух последних видов может служить математической моделью процесса  $A$ . Получившаяся таким образом блочная модель (рисунок 7.2, б) предназначена для моделирования взаимодействия блоков через немногочисленные связи, пропускающие ограниченную и обзорную информацию.



a)



б)

Рисунок 7.2 – Исходное ЭРИ как сумма подсистем

Блочные модели являются естественным средством для исследования управляемых систем, конструктивно расчлененных на отдельные части. В связи с этим процесс построения моделей иерархичен: каждый блок в свою очередь допускает блочное представление. Это облегчает управление моделью и организацию (разделение) работ по ее реализации. Каждый блок может быть исследован автономно: аналитически, экспериментально или посредством специального «внутреннего» моделирования. При этом описание некоторых блоков может быть задано стохастически.

Совокупность алгоритмов, моделирующих элементы, с учетом алгоритмов их взаимодействия определяет исходный моделирующий алгоритм системы. В большинстве случаев исходный алгоритм нельзя положить в основу модели системы из-за его громоздкости и трудностей реализации на средствах используемой вычислительной техники, поскольку конечные цели моделирования элементов и всей системы различны. Исследователи, занимающиеся оценкой характеристик какого-либо конкретного элемента, разрабатывают моделирующий алгоритм так, чтобы получить оценки характеристик именно этого элемента с максимальной или заданной точностью. Конечные же цели моделирования системы в том, чтобы суммарная ошибка оценки выходных показателей системы не превосходила некоторых наперед заданных величин. В суммарную ошибку входят ошибки случайные (из-за конечного числа реализаций на модели) и детерминированные (обусловленные неточностями структурного описания элементарных процессов).

Обычно стремление точнее описывать процессы в элементах сопровождается усложнением моделирующих алгоритмов, что приводит к увеличению времени счета одной реализации и при ограниченном времени, отведенном на моделирование, – к уменьшению числа реализаций на модели системы. Это, в свою очередь, сопровождается увеличением случайных ошибок в получаемых оценках. Поиск компромиссного соотношения между случайными и детерминированными ошибками с учетом ошибок моделирования, обусловленных ограниченным объемом имеющихся данных, практически всегда связан с анализом допустимых упрощений, как исходных алгоритмов элементов, так и алгоритмов их взаимодействия.

## 7.2 Структура комплекса программ «Российский компонент» на основе синтеза SPICE-моделей электрорадиоизделий отечественной электронной компонентной базы

Ранее, в главе 1 говорилось о проблемах синтеза математических моделей российской электронной компонентной базы. Здесь есть два основных аспекта.

Первый аспект. Исторически, с 80-х годов XX века, сложилось так, что отечественные производители электронной компонентной базы не сопровождают выпускаемую ими продукцию разработкой соответствующих математических моделей, в частности – разработкой SPICE-моделей. На этом фоне гораздо выгоднее смотрятся сайты крупных производителей зарубежной электронной компонентной базы (Analog Devices, Texas Instruments, Motorola, Philips и др.), где каждому электрорадиоизделию соответствует своя математическая модель. Такой подход позволяет разработчикам радиоэлектронной аппаратуры после выбора элементной базы сразу переходить к этапу схемотехнического моделирования и проработке схемных решений. В российском инженерном пространстве ввиду отсутствия адекватных математических моделей от предприятий-производителей у разработчиков радиоэлектронной аппаратуры возникает альтернатива:

- либо вообще отказываться от этапа схемотехнического моделирования, приравнивая его к несерьезным, выдуманым видам деятельности;
- либо, значительно увеличивая общий срок проектирования ЭС, самостоятельно заниматься синтезом математических моделей ЭРИ.

Второй аспект. Проблему отсутствия SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы можно было бы решить с помощью специализированных программных модулей, например Model Editor от Cadence OrCAD. Однако анализ возможностей указанного программного модуля (см. главу 3) показал следующее:

- перечень входных паспортных данных на конкретное ЭРИ, используемый Model Editor для синтеза SPICE-модели, зачастую содержит сведения, которые не используются в справочной литературе или конструкторской документации на отечественные ЭРИ. Возникает проблема несовместимости массивов входных данных;
- функциональные возможности программного модуля Cadence OrCAD распространяются на дискретную двухтерминальную элементную базу, в малой степени на дискретную многотерминальную элементную базу и вообще не распространяются на интегральную многотерминальную элементную базу.

Таким образом, в настоящее время проблема синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы не решена. Используя разработанную методику синтеза SPICE-

моделей отечественных ЭРИ с температурной зависимостью параметров (см. главу 3), в этой главе представлена попытка решения задачи по автоматизации их создания.

В области автоматизации схемотехнического проектирования наибольшее распространение получили варианты программы SPICE, поддерживаемые многими известными производителями программного и аппаратного обеспечения. В настоящее время программа SPICE стала индустриальным стандартом симуляции электрических схем. Одна из наиболее выдающихся коммерческих версий SPICE является вариант PSPICE, правообладателем которой является Cadence Design Systems. Наличие академической лицензии Cadence Allegro / OrCAD в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) послужило предпосылкой для выбора программной среды поддержки формата SPICE.

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 (рисунок 7.3). Новые функциональные возможности позволяют пользователям выполнять команды TCL/Tk, а также настраиваемые сценарии через окно командной строки или через экранные формы. Основные функциональные возможности TCL/Tk включают процедуры и команды для манипулирования данными, управляющие конструкции, математические выражения, подпрограммы ввода-вывода, системные вызовы, обработку реестра, проектирование экранных форм и многое другое.

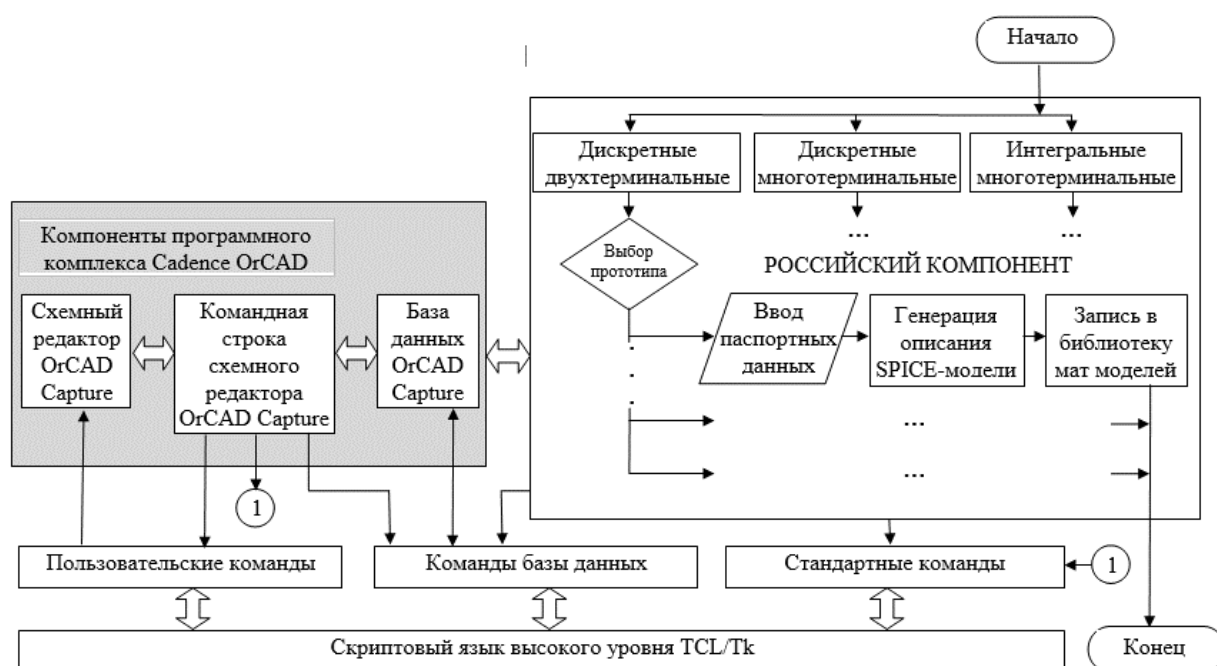


Рисунок 7.3 – Структурная схема комплекса программ «Российский компонент», выполненная на языке высокого уровня TCL/Tk Scripting

TCL/Tk – скриптовый язык высокого уровня. Язык разработан Джоном Оустерхаутом во время его работы в университете Калифорнии в Беркли. Области применения языка – быстрое прототипирование, создание графических интерфейсов для консольных программ (пакетов программ), встраивание в прикладные программы, тестирование. Тип исполнения – интерпретируемый.

В TCL/Tk данными всех типов, включая код программы, можно манипулировать как строками. Программа на TCL/Tk состоит из команд, разделённых символами новой строки или точками с запятой. Ключевых слов как таковых нет – понятие команды в TCL/Tk аналогично понятию процедуры или функции распространённых языков программирования.

Пример кода простейшей программы на языке TCL/Tk с комментариями представлен ниже.

```
# Присвоение строкового значения переменной X
set X "Simple string"
# Присвоение числового значения переменной Y
set Y 10
# Вывод содержимого X и Y
puts $X
puts $Y
# Вывод разделителя, для удобства чтения выводимой в терминал информации
puts "....."
# В одной команде puts может быть выведено более одной переменной, для этого
используются двойные кавычки
set label "Значение переменной Y:"
puts "$label $Y"
```

Вернемся к проблеме автоматизированного создания SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы. В открытую архитектуру компонентов программного комплекса Cadence OrCAD (рисунок 7.3) внедрен оригинальный комплекс программ «Российский компонент», реализованный на языке высокого уровня TCL/Tk Scripting. Начало работы с комплексом программ «Российский компонент» начинается с выбора типа синтезируемой SPICE-модели: дискретная двухтерминальная; дискретная многотерминальная; интегральная многотерминальная. Затем в каждом выбранном типе моделей происходит конкретизация, а именно выбор наименования прототипа ЭРИ. 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. Происходит завершение работы комплекса программ.

Для дальнейшей разработки комплекса программ «Российский компонент» целесообразно воспользоваться диаграммами UML. Известно [162], что UML – язык графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения, для моделирования бизнес-процессов, системного проектирования и отображения организационных структур. С помощью диаграмм UML структуру программы можно разделить на компоненты и подкомпоненты. Стандарты UML на сегодняшний день насчитывают 13 видов диаграмм, которые делятся на две группы: структурные и поведенческие.

Поскольку большинство современных комплексов программ опирается на объектно-ориентированное программирование, где от разработчика требуется описание типов возможных функций, *диаграммы классов* – самый популярный вариант UML. На диаграмме классов (рисунок 7.4) приведена статичная структура комплекса программ «Российский компонент», включая классы, их атрибуты, поведение и взаимосвязи. Класс обозначен прямоугольником из трех блоков, расположенных один над другим: в верхнем блоке указано имя класса, а в остальных двух блоках отражена дополнительная информация: атрибуты, операции и поведение.

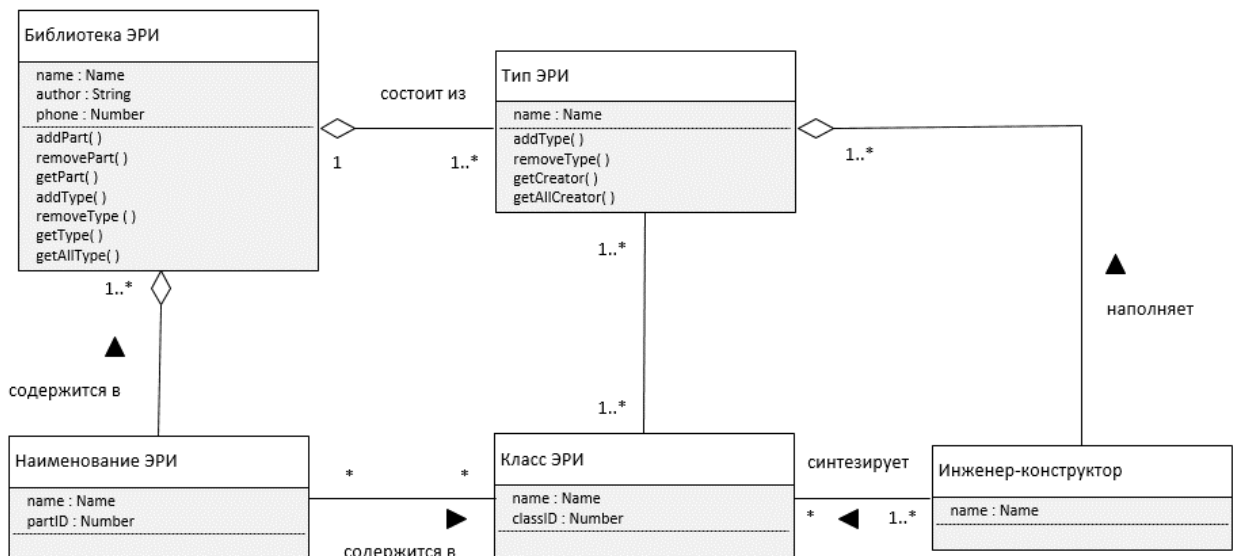


Рисунок 7.4 – Диаграмма классов UML комплекса программ «Российский компонент»

Диаграмма прецедентов (рисунок 7.5) комплекса программ «Российский компонент» описывает функциональное назначение системы. Диаграмма прецедентов является исходным



концептуальным представлением или концептуальной моделью комплекса программ «Российский компонент» в процессе ее проектирования и разработки.



Рисунок 7.5 – Диаграмма прецедентов UML

При построении диаграммы прецедентов актер (эктор) связан с прецедентами, один актер может выполнять несколько прецедентов, и наоборот, у одного прецедента может быть несколько актеров, которые его выполняют. Диаграмма прецедентов насчитывает 7 актеров: инженер-конструктор, отдел снабжения, конструкторский отдел, начальник отдела, консультант, делопроизводитель, исследователь. Сами прецеденты изображены на рисунке 7.5 в виде эллипсов в количестве 13 исходных единиц.

Отношения расширения (<< extended >>) дополняет прецедент (информирование инженеров-конструкторов) тремя другими прецедентами (сообщение плана работ, сообщение графика работ, сообщение результатов работы), «срабатывающими» при некоторых условиях. Отношения расширения добавляют в исходный прецедент последовательность действий, содержащуюся в другом прецеденте. Стрелки направлены в сторону включаемого прецедента (информирование инженера-конструктора).

### 7.3 Основные алгоритмы комплекса программ «Российский компонент»

Рассмотрим подробнее одну из составляющих комплекса программ «Российский компонент», а именно программное приложение «Б19К».

Решая задачу синтеза SPICE-моделей ЭРИ отечественного производства, разработчик часто сталкивается с прототипами, состоящими из однотипных элементов, незначительно отличающихся друг от друга в пределах своего семейства. Эффективное решение этой задачи может быть получено за счет автоматизированного формирования описания SPICE-модели по исходным данным прототипа ЭРИ. Наличие в семействе резисторных блоков Б19К тридцати четырех вариантов исполнения приводит к множеству математических моделей с точки зрения температурной стабильности. Конкретная реализация математической модели резисторного блока будет зависеть от схемы включения, номинала сопротивления резистивных элементов, погрешности сопротивления, температурных коэффициентов сопротивления (рисунок 7.6).

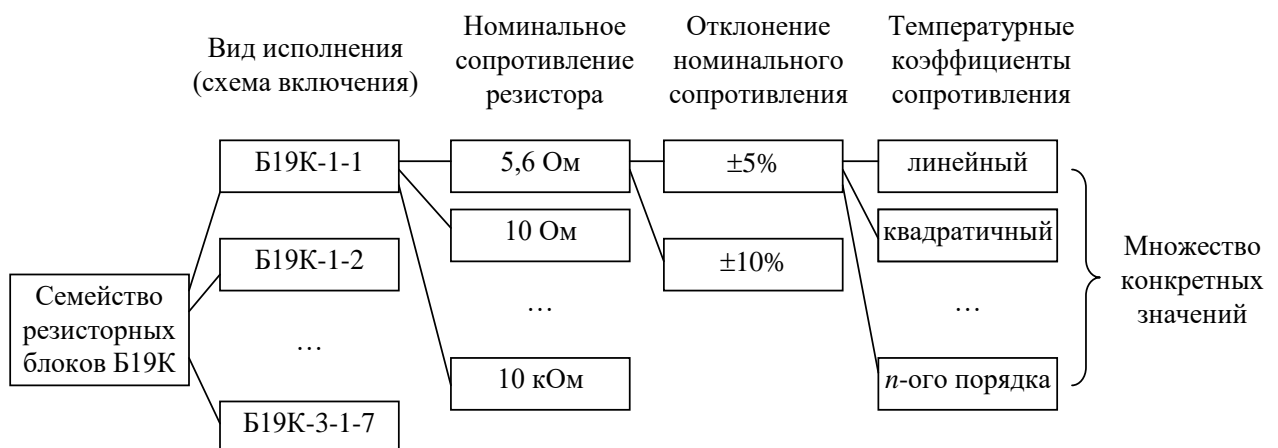


Рисунок 7.6 – Структурное ветвление семейства резисторных блоков Б19К в зависимости от исходных данных

Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор формата представления математических моделей резисторных блоков Б19К и средств его поддержки;
- разработка средства автоматизации для формирования моделей;
- тестовый сравнительный анализ «прототип-модель» на примере конкретного образца резисторного блока.

Формат SPICE предполагает базовое представление резистора в виде:

***Rxxx <узел1> <узел2> [имя модели] <значение>***,

где *xxx* – произвольная алфавитно-цифровая последовательность общей длиной не более 7 символов, которая пишется слитно с символом R и вместе с ним образует имя компонента; *узел1*, *узел2* – номера узлов подключения к электрической цепи; *имя модели* – имя математической модели в формате SPICE; *значение* – номинальное значение сопротивления;

Непосредственная математическая модель резистора в формате SPICE выглядит как:

***.MODEL <имя модели> RES (R=<значение>  
+ DEV=<значение>% TC1=<значение>  
+ TC2=<значение>***,

где *.MODEL* – директива описания математической модели; *RES* – признак математической модели резистора; *R* – масштабный коэффициент; *DEV* – коррелированный технологический разброс номинала сопротивления; *TC1*, *TC2* – линейный и квадратичный температурные коэффициенты сопротивления.

Кроме указанных параметров формат SPICE допускает также указание для математической модели резистора масштабного коэффициента спектральной плотности шума, экспоненциального температурного коэффициента сопротивления, некоррелированного технологического разброса номинала сопротивления, различных видов температуры прототипа.

Произвольное количество одиночных резисторов можно объединить в функциональную группу и получить описание макромодели резисторного блока с помощью парных директив *.SUBCKT... .ENDS*:

***.SUBCKT <имя макромодели> <узлы подключения>  
Rxxx <узел1> <узел2> [имя модели] <значение>  
...  
Rzzz <узел(n-1)> <узелn> [имя модели] <значение>  
.MODEL <имя модели> RES (R=<значение>  
+ DEV=<значение>% TC1=<значение>  
+ TC2=<значение>  
.ENDS***

Следовательно, задача формирования SPICE-модели резисторного блока Б19К с позиции температурной стабильности заключается в создании текстового описания удовлетворяющего условиям:

1. Топологически верная схема соединения резисторов внутри блока;
2. Параметры математической модели  $R$ ,  $DEV$ ,  $TC1$ ,  $TC2$  соответствуют физическим параметрам конкретного образца резисторного блока.

Утилита PSpice Model Editor, входящая в состав программного комплекса Cadence OrCAD, по физическим параметрам рассчитывает параметры математических моделей 11 видов ЭРИ (см. главу 3). Однако среди этого перечня типов математических моделей возможность создания резистора или резисторного блока отсутствует.

В главе 3 нами была предложена методика создания SPICE-моделей резисторных блоков, основанная на следующих основных этапах:

1. Экспериментальное исследование температурной зависимости сопротивления каждого резистивного элемента резисторного блока.
2. Группировка температурных зависимостей по критерию сходственности и подобия.
3. Усреднение сгруппированных температурных зависимостей.
4. Установление линейных и нелинейных ТКС.

Суть методики. Представим ТКС первого резистивного элемента  $i$ -ого образца как функцию от температуры в виде  $y_{i1} = f(T)$ . Из экспериментальных зависимостей следует, что ТКС всех резистивных элементов  $i$ -ого образца будут:

$$\begin{cases} y_{i1} = f(T); \\ y_{i2} = f(T) + a_2; \\ y_{i3} = f(T) + a_3; \\ \dots \\ y_{in} = f(T) + a_n; \end{cases}$$

где  $n$  – количество резистивных элементов в образце;  $a_i$  – коэффициент параллельного переноса.

Следовательно, достаточно найти параметры нелинейности только для одной функции  $f(T)$  в пределах каждого резисторного блока, а коэффициент  $a$  определять технологическим разбросом сопротивления  $DEV$  относительно номинального значения. Аналогично можно поступить с образцом, имеющим разнонаправленные тренды ТКС, если независимо рассматривать две группы ТКС – с отрицательным и с положительным трендом.

Предложенная в главе 3 методика послужила основанием для автоматизации процесса формирования SPICE-моделей резисторных блоков Б19К (рисунок 7.7).

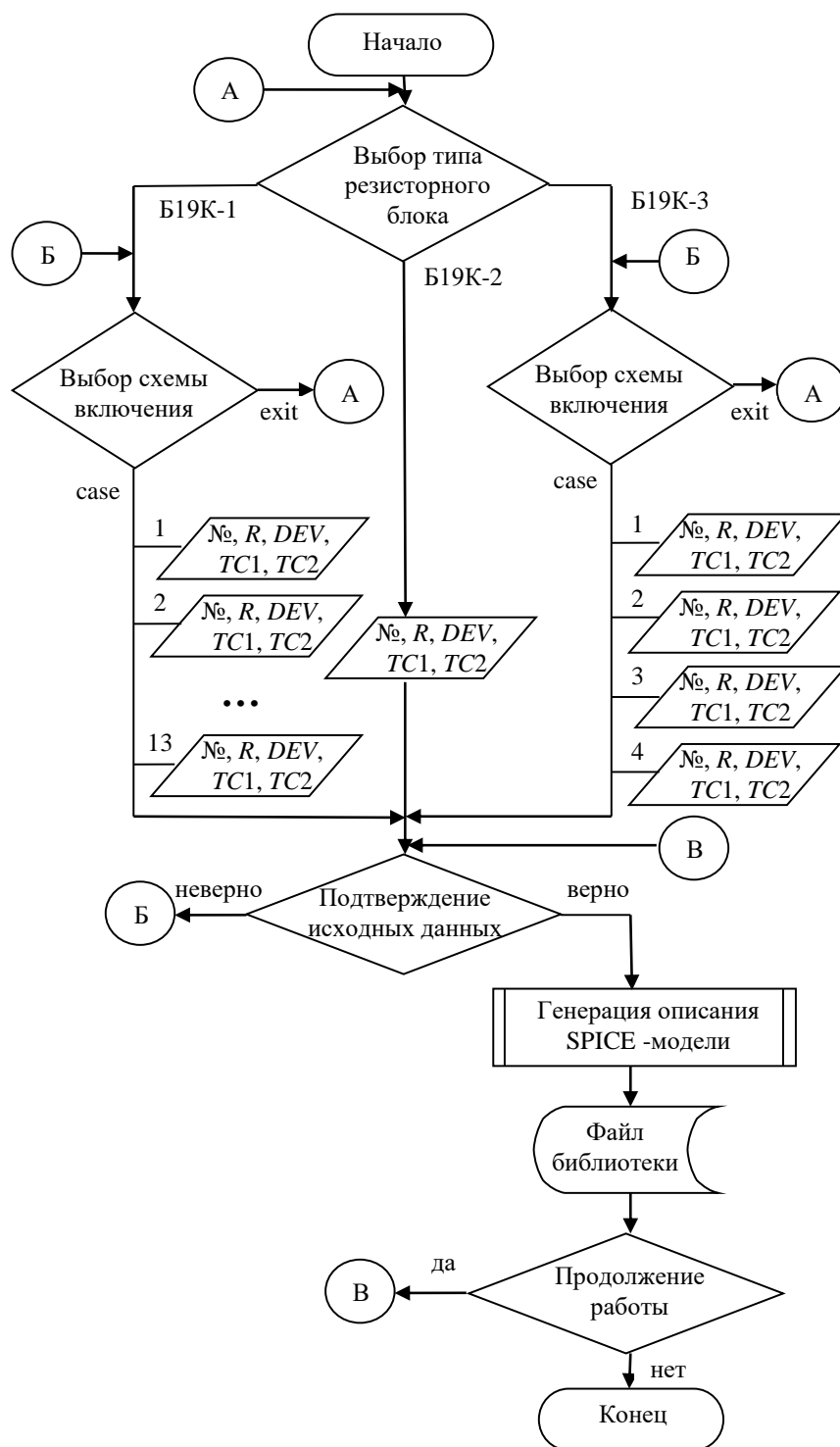


Рисунок 7.7 – Блок-схема автоматизированного процесса по формированию SPICE-моделей резисторных блоков семейства Б19К

Начало процесса предполагает выбор типа резисторного блока среди трех возможных подмножеств: Б19К-1; Б19К-2; Б19К-3. Каждое подмножество имеет различное число вариантов электрических схем включения резистивных элементов:

- 13 вариантов для Б19К-1;
- 1 вариант для Б19К-2;

- 4 варианта для Б19К-3.

После выбора схемы включения происходит переход к вводу параметров математической модели:

- порядковый номер SPICE-модели резисторного блока №;
- номинальное сопротивление резистивных элементов  $R$ ;
- коррелированный технологический разброс номинала сопротивления  $DEV$ ;
- линейный температурный коэффициент сопротивления  $TC1$ ;
- квадратичный температурный коэффициент сопротивления  $TC2$ .

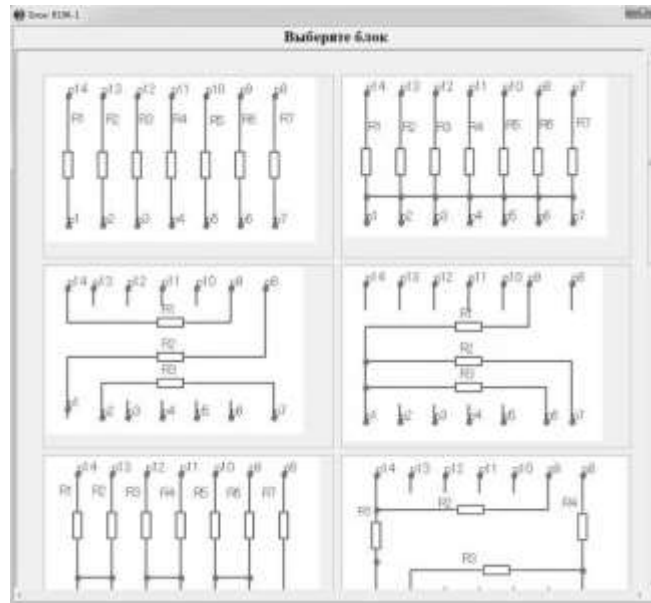
После подтверждения исходных данных происходит автоматическая генерация SPICE-модели резисторного блока. Текстовое описание формируется в виде файла библиотеки. Для удобства использования предусматриваются три точки возврата: А, Б, В.

#### 7.4 Синтез SPICE-моделей

Автоматизированный процесс по формированию SPICE-моделей резисторных блоков реализован на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk в виде программы «Б19К». Работа с программой состоит во взаимодействии пользователя с тремя экранными формами. На главной экранной форме (рисунок 7.8, а) три графических кнопки выбора, представляющие собой изображение типов резисторных блоков семейства Б19К. Нажатие на графическую кнопку приводит к появлению второй экранной формы (рисунок 7.8, б), в которой происходит конкретизация электрической схемы включения контекстно для выбранного типа блока. Каждое изображение электрической схемы также представляет собой графическую кнопку. Выбор электрической схемы приводит к появлению третьей экранной формы (рисунок 7.8, в) – диалоговому окну для ввода параметров математической модели. Конечным результатом работы является генерация файла библиотеки \*.lib с текстовым описанием SPICE-модели резисторного блока. Описание соответствует предварительно выбранной электрической схеме и содержит введенные параметры математической модели. Полученный файл библиотеки \*.lib можно использовать с любым SPICE-подобным симулятором электронных схем.



а



б

в

главная экранная форма – а;  
 экранная форма выбора схемы включения – б;  
 экранная форма ввода исходных данных – в

Рисунок 7.8 – Экранные формы программы «Б19К»

Тестовый сравнительный анализ «прототип-модель» проведен на примере конкретного образца резисторного блока Б19К2-100 Ом. Согласно предложенной в главе 3 методике

экспериментальные значения температурной зависимости сопротивления резистивных элементов экспериментального образца преобразованы в усредненный эквивалент (рисунок 7.9).

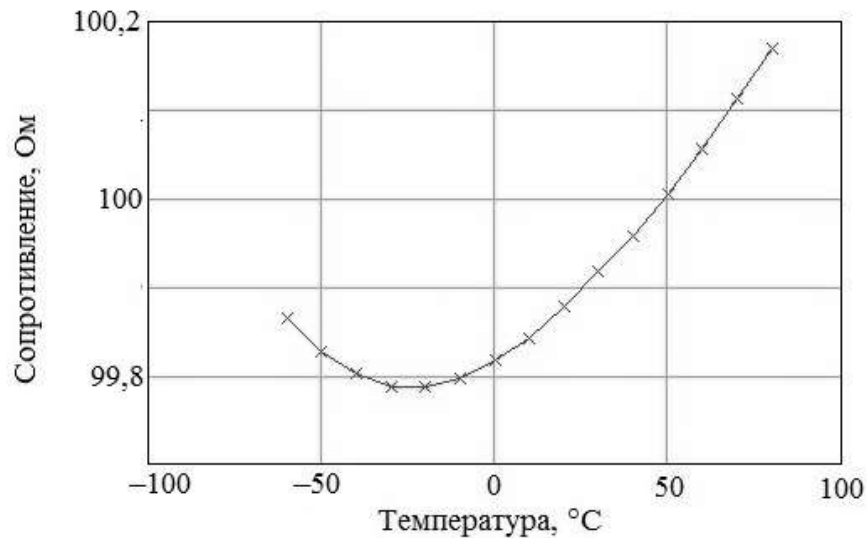


Рисунок 7.9 – Усредненная температурная зависимость сопротивления для экспериментального образца резисторной сборки Б19К2-100 Ом

Аппроксимация усредненной температурной зависимости полиномом второго порядка приводит к уравнению:

$$R(T) = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 = 99,821 + 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,55 \cdot 10^{-5} \cdot T^2.$$

Для соответствия с форматом представления SPICE-модели резистора линейный и квадратичный температурные коэффициенты сопротивления  $TC1$  и  $TC2$  вычисляются в относительном виде:

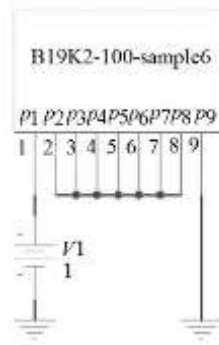
$$TC1 = \frac{b_1}{b_0} = \frac{1,72 \cdot 10^{-3}}{99,821} = 17,229 \cdot 10^{-6} C^{-1};$$

$$TC2 = \frac{b_2}{b_0} = \frac{3,55 \cdot 10^{-5}}{99,821} = 355,591 \cdot 10^{-9} C^{-1}.$$

Коррелированный технологический разброс номинала сопротивления  $DEV$  для выбранного образца составляет 5% (справочные данные).

Сформированный программой файл \*.lib с описанием SPICE-модели резисторного блока позволяет перейти к схемотехническому моделированию в программном комплексе Cadence OrCAD. Визуальное представление резисторного блока – это условное графическое обозначение (рисунок 7.10, а) в схемном редакторе OrCAD Capture. Условному графическому обозначению ставится в соответствие текстовое описание макромодели резисторного блока (рисунок 7.10, 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

схема включения резисторного блока – а;  
текстовое описание резисторного блока – б

Рисунок 7.10 – Представление резисторного блока

Напряжение 1 В подано на резистивный элемент  $R1$  (вывод №1 резисторного блока), остальные резистивные элементы соединены между собой.

Условия схемотехнического моделирования в OrCAD:

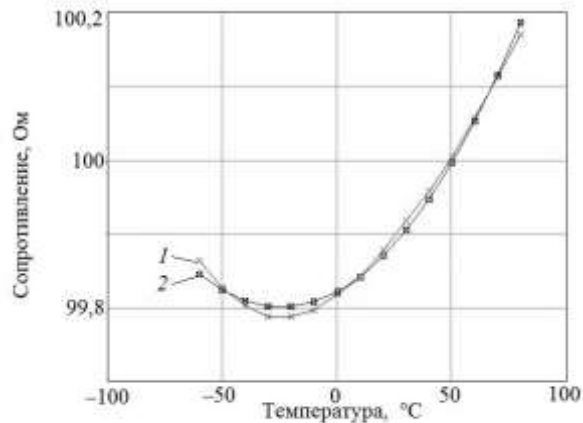
- температура окружающей среды  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;
- диапазон варьирования источника напряжения  $U_{\text{ВХ}} = 0 \dots 10 \text{ В}$ ;
- шаг варьирования источника напряжения  $\Delta U_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$ ;
- диапазон изменения температуры  $T = -60 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- шаг изменения температуры  $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для сравнения на одной координатной плоскости (рисунок 7.11) представлены: ранее полученная усредненная экспериментальная зависимость  $R_{\text{ЭКС}} = f(T)$  и импортированная из постпроцессора Cadence PSpice Probe зависимость по результатам моделирования  $R_{\text{МОД}} = f(T)$ .

Среднеквадратическое отклонение зависимостей 1 и 2 составляет  $\sigma = 0,011 \text{ Ом}$ . Полученное значение  $\sigma$  следует считать приемлемым, поскольку относительная погрешность составляет:

$$\delta = \frac{\sigma}{R} \cdot 100\% = \frac{0,011}{100} \cdot 100 = 0,011\% .$$

Дальнейшее повышение степени полинома аппроксимации не требуется. Сформированная SPICE-модель резисторного блока Б19К2-100 Ом адекватно отражает поведение экспериментального образца с точки зрения температурной стабильности.



усредненная экспериментальная зависимость – 1;  
результат моделирования в OrCAD – 2

Рисунок 7.11 – Сравнение температурных зависимостей сопротивления

Основные результаты исследования:

1. Для сокращения материальных и временных ресурсов при формировании SPICE-моделей целесообразно применение средств автоматизации для генерации текстовых описаний.
2. Предложенная в главе 3 методика моделирования температурной стабильности резисторных блоков апробирована с помощью оригинального программного модуля «Б19К». Сравнительный анализ «прототип-модель» для испытуемого экспериментального образца показал погрешность в описании температурной зависимости сопротивления в 0,011%.
3. Рассмотренный подход по автоматизированному формированию SPICE-моделей может быть распространен на другие типы электрорадиоизделий отечественного и зарубежного производства.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном диссертационном исследовании автор осуществил попытку решения проблемы температурной стабильности ЭС. Сделано это на основе на основе глобальной математической модели – уравнения температурной погрешности:

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

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

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

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

Компоненты уравнения температурной погрешности определяют основные задачи, которые следует решить для нахождения этого уравнения. В результате проведенного диссертационного исследования решены задачи:

1. Разработан модифицированный метод регрессионного анализа температурной стабильности ЭС для реализации вычислительного факторного эксперимента с применением широко известных программных комплексов схмотехнического 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 схмотехнического 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.

Разработана методика реализации вычислительного факторного эксперимента с применением широко известных программных комплексов схемотехнического моделирования OrCAD PSpice и Spectrum MicroCAP. Указанные программные продукты могут использоваться на альтернативной основе. Функциональные возможности этих программных комплексов позволяют проводить вычислительный факторный эксперимент как для однопараметрических, так и для многопараметрических ЭРИ. Последующий статистический анализ приводит сначала к получению уравнения регрессии, а затем к уравнению температурной погрешности.

Решена значительная по важности задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ. Разработанная методология синтеза SPICE-моделей с температурной зависимостью параметров практически пригодна для схемотехнического анализа в современных SPICE-симуляторах с целью последующего нахождения коэффициентов влияния  $a_i$  в уравнении температурной погрешности. Многообразие существующей электронной компонентной базы с позиции синтеза SPICE-моделей целесообразно оценивать по критерию сложности  $L = L(n, m)$ , где  $n$  и  $m$  – количество входов и выходов, соответственно. Такой подход в наиболее общем случае позволяет разделить номенклатуру электронной компонентной базы на три категории: дискретные двухтерминальные ЭРИ; дискретные многотерминальные ЭРИ; интегральные многотерминальные ЭРИ.

В диссертационном исследовании разработаны программные блоки для решения уравнения теплопроводности в одно-, двух- и трехмерной постановке в среде MathCAD, которые целесообразно применять для случаев конструкций ЭС в форме параллелепипедов.

Программные блоки в среде MathCAD базируются на методе конечных разностей и его разновидности – методе правой прогонки. Разработанную методику по решению уравнения теплопроводности в трехмерной постановке в среде SolidWorks целесообразно применять для случаев конструкций ЭС сложной, криволинейной формы. Связано это с применением в среде SolidWorks метода конечных элементов. Разработанные программные блоки и методика практически пригодны для нахождения значений абсолютных и относительных рабочих температур конструкций ЭС в уравнении температурной погрешности.

Показано, что наличие в составе элементной базы электронных средств источников со значительными собственными тепловыделениями обуславливает анизотропность теплового поля на несущих конструкциях I и II уровня. Для целей обеспечения температурной стабильности электронных средств методом топологической термокомпенсации принята 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. Предложены оригинальные методики топологического позиционирования ЭРИ с целью обеспечения температурной компенсации в условиях термоанизотропности несущей конструкции ЭС. В зависимости от конструктивных особенностей несущей конструкции ЭС увеличение температурной стабильности выходного параметра может быть от 8 до 100 %.

В исследовании показано, что уравнение температурной погрешности может быть пригодным для решения обратной задачи температурной стабильности. В частности, если задан уровень температурной стабильности выходного параметра ЭС  $\frac{\Delta N}{N}$ , становится возможным вывод аналитических выражений для величин абсолютного отклонения температуры статирования  $\Delta T_{СТ}$ , для величин номинальной температуры статирования  $T_{СТ}$  и для величин перегрева внутри камеры микротермостата  $\delta T$ . Предложена конструкция экспериментального микротермостата стабилизатора напряжения, лишенная значительной материалоемкости и экономических затрат, и позволяющая увеличить температурную стабильность выходного напряжения не менее, чем в 2 раза по сравнению с конструктивным вариантом без применения термостатирования.

Представленное диссертационное исследование дает основание для продолжения научных изысканий в области деградационных процессов электронных средств. В реальных условиях эксплуатации бортовой электронной аппаратуры, срок активного существования которой достигает 20-25 лет, помимо температурных воздействий имеют значение радиационные эффекты, повышенная влажность, механические нагрузки. Перечисленные виды дестабилизирующих воздействий приводят к глобальной математической модели стабильности ЭС, представляющей собой систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta N_1}{N_1} = f_1(T, t); \\ \frac{\Delta N_2}{N_2} = f_2(H, t); \\ \frac{\Delta N_3}{N_3} = f_3(\varphi, t); \\ \frac{\Delta N_4}{N_4} = f_4(K, t), \end{array} \right.$$

где  $T$  – температура окружающей среды;  $H$  – эквивалентная доза ионизирующего излучения;  $\varphi$  – относительная влажность;  $K$  – интегральный коэффициент механических воздействий;  $t$  – время.

Таким образом, 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».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Озеркин Д.В. Моделирование анизотропности температурного поля объемных интегральных микросхем // Известия высших учебных заведений радиоэлектроника. Приборостроение, 2020, Т. 63, №7. С. 657-665.
2. Озеркин Д.В. Методология создания термозависимых SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы. Томск, издательство ТУСУР, 2020. 244 с.
3. Озеркин Д.В. Расчет температурного поля многослойных несущих конструкций численными методами // Системы анализа и обработки данных. 2022. № 2 (86). С. 105–120.
4. 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.
5. 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.
6. Озеркин Д.В., Русановский С.А. Методология моделирования транзисторных оптопар ЗОТ122 с учетом температурной стабильности // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 3(68). С. 76–94.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.

13. 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.

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

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

16. Физика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. 4-е изд. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 944 с.

17. Стабильность [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия: [сайт]. [2019]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Стабильность> (дата обращения: 19.09.2019).

18. ГОСТ Р 52562-2006. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие воды. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.

19. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2003. 11 с.

20. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. М.: Сов. радио, 1980. 480 с.

21. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2006. 59 с.

22. ГОСТ 15543.1-89. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 20 с.

23. ГОСТ 26883-86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1992. 11 с.

24. ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. М: ИПК Издательство стандартов, 2000. 29 с.



25. ГОСТ 30630.2.1-2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. М.: Стандартиформ, 2014. 32 с.
26. ГОСТ 20.57.406-81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2005. 133 с.
27. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2011. 32 с.
28. ГОСТ Р 55996-2014. Системы космические. Требования к содержанию и построению разделов технического задания на разработку изделий космической техники научного и социально-экономического назначения. М.: Стандартиформ, 2014. 30 с.
29. ГОСТ Р 56468-2015. Аппараты космические автоматические. Системы обеспечения теплового режима. Общие технические требования. М.: Стандартиформ, 2015. 11 с.
30. Информационный указатель документов по стандартизации ракетно-космической техники за 1 кв. 2019 года ИУС-1-2019 (Интернет-версия) [Электронный ресурс] // Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш) : [сайт]. [2019]. URL: [http://www.tsniimash.ru/upload/documents/ИУС-2-2019\\_\(интернет-версия\).docx](http://www.tsniimash.ru/upload/documents/ИУС-2-2019_(интернет-версия).docx) (дата обращения: 19.09.2019).
31. ГОСТ Р 56648-2015. База электронная компонентная для ракетно-космической техники. Входной контроль и дополнительные испытания. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2016. 18 с.
32. Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Системный анализ и методы научно-технического творчества. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. 303 с.
33. АО Контакт [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «Контакт» : [сайт]. [2019]. URL: <http://www.zavod-kontakt.ru/> (дата обращения 20.09.2019).
34. АО «НИИ Гириконд» [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «НИИ Гириконд» : [сайт]. [2019]. URL: <http://www.giricond.ru/> (дата обращения 20.09.2019).
35. Завод «Метеор». Стратегия повышенной надежности [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО Завод «Метеор» : [сайт]. [2019]. URL: <https://meteor.su/> (дата обращения 20.09.2019).
36. «ВЗПП-С». О предприятии [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «ВЗПП-С» : [сайт]. [2019]. URL: <http://www.vzpp-s.ru/about.htm> (дата обращения 20.09.2019).
37. Интеграл. Высокие технологии для лучшей жизни [Электронный ресурс] // Официальный сайт ОАО «Интеграл» : [сайт]. [2019]. URL: <https://www.integral.by/ru/about/history> (дата обращения 20.09.2019).

38. Оптрон. Энергосберегающее оборудование и технологии [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «Оптрон» : [сайт]. [2019]. URL: <http://www.optron.ru/> (дата обращения 20.09.2019).
39. АО Экситон [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «Экситон» : [сайт]. [2019]. URL: <https://экситон.рус> (дата обращения 20.09.2019).
40. АО «НИИЭТ» – Научно-исследовательский институт электронной техники [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «ПКК Миландр» : [сайт]. [2019]. URL: <https://niiet.ru/> (дата обращения 20.09.2019).
41. Официальный сайт АО «ПКК Миландр» – разработчик и производитель интегральных микросхем [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «НИИЭТ» : [сайт]. [2019]. URL: <https://www.milandr.ru/> (дата обращения 20.09.2019).
42. Кривоносов А.И. Температурная компенсация электронных схем. М.: Связь, 1977. 136 с.
43. Косых А.В. Адаптивная динамическая температурная компенсация уходов частоты кварцевых генераторов // Омский научный вестник, 2008, № 1(64). С. 163-169.
44. Баранов А.В., Козиков А.Л. Компенсирующие СВЧ устройства с положительным температурным коэффициентом влияния // Проектирование и технология электронных средств. Владимир, ВГУ, 2016, №4. С. 37-44.
45. Liang J., Yi Sh., Bai W., Wang L., Zhan Ch., Liao C., Lam H.-M., Zhang M., Zhang Sh., Jiao H. A  $-80$  dB PSRR  $4.99$  ppm/ $^{\circ}$ C TC bandgap reference with nonlinear compensation // Microelectronics Journal, January 2020, V. 95, 104664.
46. Cho T.-H., Lee Y.-T. Multi-Level Flash Memory with Temperature Compensation // United States Patent US 6,870,766 B2. Date of Patent: 03.22.2005.
47. Lee M.R., Hammer C.M., Seguire D.R. Temperature Compensation Method for Capacitive Sensors // United States Patent US 2008/0047764 F1. Date of Patent: 02.28.2008.
48. Асташова К.В., Бондаренко Т.В., Кублицкая О.В., Никонов И.В. Методы повышения температурной стабильности частоты устройств на поверхностных акустических волнах // III региональная молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной науки». Омск, ОмГТУ, 2014. С. 98-101.
49. Тихан М.А. Коррекция температурной погрешности тензорезистивного датчика давления при нестационарном термовлиянии // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Приладобудування. Львов, 2010, №39. С. 91-96.
50. Большой энциклопедический словарь: Политехнический / Гл. ред. А.Ю.Ишлинский. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 656 с.

51. ОСТ 1 02546-85. Система теплоаккумулирующая обеспечения теплового режима оборудования летательных аппаратов. Общие требования. 1985. 21 с.

52. Алексеев В.П. Стабилизация параметров радиотехнических устройств и систем на основе микротермостатирования / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, ТИАСУР, 1985. 214 с.

53. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.

54. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой расчет термостатов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. 176 с.

55. Бабанин В. Термостатирование элементов микроконтроллерных устройств // Радиолоцман, 2016, №08 (63). С. 52-55.

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

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

58. 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.

59. 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.

60. А.с. СССР № 476665, М. кл. H03H 3/02 Соколов Б.А., Вороховский Я.Л., Петросян И.Г., Смирнов Е.М., Шаталов О.М. Термостабилизированный пьезоэлектрический резонатор // БИ, 1975, № 25.

61. Пат. РФ №2348962, кл. G05D 23/19. Козлов В.Г., Алексеев В.П., Карабан В.М. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок. Опубл. 10.03.2009. Бюл. №7.

62. Гаджиев Н.Д., Гарибов М.А., Гусейнов Н.Л., Мамедов Д.Ш. Микротермостат для интегральных схем // Авторское свидетельство SU 514278 от 15.05.1976 г.

63. Цыганков П.Я., Орлов О.М., Голиков А.Н., Малова К.Ф., Сморгачев Ю.К., Родионова З.Л., Борисов Л.Г. Микротермостат // Авторское свидетельство SU 515095 от 25.05.1976 г.

64. Мосина И.Е., Зенукова М.Е., Зенуков Б.В., Яковлева Т.Л., Чуксеев Р.Н., Чуксеева Е.А., Чуксеева А.Р., Логинова Л.Н., Кожеченков О.Е., Кожеченков Г.Ю. Термостат для микросхемы // Патент на полезную модель RU 119139 U1 от 10.08.2012 г.

65. Shin D.D., Lee D.G., Mohanchandra K.P., Carman G.P. Thin Film NiTi Microthermostat Array // Sensors and Actuators A: Physical, 2006, Vol. 130-131, № SPEC. ISS, pp. 37-41.

66. Симонян Р.А., Саноян А.А., Гулян А.Г. Высокоточный микротермостат // Известия Национальной академии наук РА и Государственного инженерного университета Армении. Серия технических наук, 2010, Т. 63, №3, с. 302-305.

67. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. Л.: Наука, 1967. 282 с.

68. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005. 533 с.

69. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Ибрагимова А.М. Автоматизированная система для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». С. 70-74.

70. Жилина Л.И. Теория проектирования сегнетотермоэлектрических систем электротермостатирования устройств радиотехники и связи / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Омск, Омский гос. ун-т путей сообщения, 1998. 408 с.

71. Тахистов Ф.Ю. Методики расчета и выбора параметров термоэлектрических термостатов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, СПбГУИТМО, 2007. 131 с.

72. Нежведилов Т.Д. Разработка систем термостабилизации компьютерного процессора на основе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Махачкала, ДГТУ, 2006. 95 с.

73. Евдулов О.В. Исследование и разработка систем теплоотвода и термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры на основе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, СПбГУИТМО, 2001. 215 с.

74. Губа А.А. Термоэлектрические устройства для термостатирования с использованием плавящихся веществ / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Махачкала, ДГТУ, 2008. 120 с.

75. Шварц В.П., Лабжинский С.И., Гольдштейн Е.И., Кольцов В.В. Устройство для термостатирования // Авторское свидетельство SU 1001036 A1 от 28.02.1983 г.

76. Вайнер А.Л., Наер В.А., Спокойный Ю.Е. Термоэлектрическое реверсивное устройство охлаждения-нагрева // Авторское свидетельство SU 258660 A1 от 03.12.1969 г.

77. Wijngaards D.D.L., Wolffenbuttel R.F. Study on Temperature Stability Improvement of On-Chip Reference Elements Using Integrated Peltier Coolers // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 52. No. 2. April 2003. pp. 478 – 482.

78. Richman J.L. Peltier Junction Used for Thermal Control of Solid State Devices // United States Patent 4685081 from 08.04.1987.

79. Nagakubo Y., Tsuda T., Ishizaka T., Sati S., Yokoi S., Komiyama M., Ohya T., Mizuguchi N. Peltier Control Circuit and a Peltier Device Structure // United States Patent 5515682 from 05.14.1996.
80. Гусев В.П. и др. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1963. 368 с.
81. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973. 128 с.
82. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
83. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА. М.: Радио и связь, 1983. 296 с.
84. Сыпчук П.П., Талалай А.М. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. М.: Сов. радио, 1979. 168 с.
85. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах. М.: Физматлит, 1961. 228 с.
86. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. М.: Энергия, 1977. 576 с.
87. Кеуон Дж. OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 640 с.
88. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования MicroCAP 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.
89. Резисторы. Группы 6010, 6020, 6060. РД 11 0856.3–93 / Сборник справочных листов. СПб.: РНИИ «Электронстандарт», 1994. 224 с.
90. Леухин В.Н., Андрейкин А.В., Нагаев А.А. Анализ влияния технологических операций на выходные показатели качества резистивных сборок // Вестник МарГТУ. 2008. №2. С. 56–62.
91. Хла М., Кандырин Ю.В. САПР резистивныхборок // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 6(185). С. 63–70.
92. Спирин В.Г. Сопrotивление контактов тонкопленочного резистора // Технология и конструирования в электронной аппаратуре. 2008. № 5(77). С. 20–23.
93. Deveney M.F. Temperature tracking SPICE macro-model for laser and LED driven opto-coupler assemblies// IEEE Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems. 1992. Vol. 2, pp.1556–1559.
94. Милешкин А.Е. Построение математических макромоделей компонентов фоторезисторных оптрoнов // Теория и практика современной науки. 2016. №6. Т.1(12). С. 882–886.

95. Полупроводниковые диоды. Диоды высокочастотные. Диоды импульсные. Оптоэлектронные приборы: Справочник / А.Б.Гитцевич и др.; ред. А.В.Голомедов. М.: КУБК-а, 1997. 592 с.
96. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник / В.И.Иванов, А.И.Аксенов, А.М.Юшин. М.: Энергоатомиздат, 1988. 448 с.
97. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 (программа Model Editor) // Компоненты и технологии. 2007. № 7. С. 149–154.
98. Хан Джамшед Н. Применение герметичных оптронов в военной и космической электронике // Компоненты и технологии. 2010. № 6 (107). С. 82–86.
99. Волошин С. Твердотельные реле для коммутации цепей постоянного тока // Компоненты и технологии. 2005. №7 (51). С. 138–140.
100. Шитиков А. Мощные полупроводниковые приборы компании International Rectifier // Электроника: наука, технология, бизнес. 1997. №3–4 (9–10). С. 43–45.
101. Эдгардт А. Твердотельные реле компании International Rectifier // Компоненты и технологии. 2002. №5 (22). С. 34–37.
102. Исламгазина Л. Силовые полупроводниковые приборы ЗАО «Протон-Импульс» // Компоненты и технологии. 2004. №8 (43). С. 74–76.
103. Абрамова Н. Основные параметры и особенности применения твердотельных реле ЗАО Протон-Импульс // Компоненты и технологии. 2005. № 6 (50). С. 154–162.
104. Авдюшкин С.А., Максимов И.А., Иванов В.В., Кочура С.Г., Кондян С.С., Рубанов П.В., Каськов Т.Н. Влияние электрического режима на уровень радиационной стойкости оптоэлектронного коммутатора 249КП5Р // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. №3. С. 19–21.
105. Исламгазина Л. Применение различных материалов, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. 2005. №5. С. 96–99.
106. Микросхемы интегральные. Микросхемы серии К224 .. КР514: справочник / Российский научно-исследовательский институт «Электронстандарт». Сост. Н.П.Розен. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Электронстандарт, 1993. 232 с.
107. Очков В.Ф. MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 368 с.
108. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования. Колл. авторов. Под ред. В.В.Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 682 с.

109. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М.: Энергия, 1967. 232 с.
110. Селютин В.А. Машинное конструирование электронных устройств. М.: Сов. радио, 1977. 384 с.
111. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
112. Дульнев Г.Н. и др. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: Учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов/Г.Н.Дульнев, В.Г.Парфенов, А.В.Сигалов. М.: Высш. шк., 1990. 207 с.
113. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер с англ. - М.: Мир, 1983. 512 с.
114. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск, Наука и техника, 1976. 144 с.
115. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
116. Ovchinnikov S.V., Lyashenko A.V. Synthesized Model for Analytical Calculation of Temperature Field and Thermal Resistance Elements of Solid State Electronics // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2012. № 12. С. 11-18.
117. Базилевич Р.П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств. Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1981. 168 с.
118. Штейн М.Е., Штейн Б.Е. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры. М.: Сов. радио, 1973. 296 с.
119. Морозов К.К., Одинокоев В.Г. Использование ЭЦВМ при конструировании некоторых узлов радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1972. 104 с.
120. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 393 с.
121. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. М.: Физматгиз, 2006. 400 с.
122. Основные элементы SolidWorks (SolidWorks 2010). Training. Dassault SolidWorks Corporation, 2009. 550 с.
123. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии). М.: Высшая школа, 1977. 392 с.
124. Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г., Каллаев С.Н. Теплофизические свойства кремния и его расплава при высоких температурах // Вестник Дагестанского научного центра. 2013. №49. С. 15-18.
125. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

126. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г.Варламова. М.: Сов. радио, 1980. 480 с.
127. ГОСТ Р 53386-2009. Платы печатные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.
128. ГОСТ 17021-88. Микросхемы интегральные. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. 11 с.
129. Зацепин Д.А., Чолах С.О. Физические основы технологий микро- и наноэлектроники. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 236 с.
130. Тукшаитов Р., Сулейманова И. Филаментные светодиодные лампы. Аналитический обзор современных источников литературы // Полупроводниковая светотехника, 2018, №1 (51). С. 30-35.
131. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. М.: Форум–Инфра-М, 2005. 560 с.
132. Garrou P., Koyanagi M., Ramm P. Handbook of 3D Integration. Handbook of 3D Integration, 2014, Volume 3. 451 p.
133. Старосек Д.Г., Озеркин Д.В. Обеспечение температурной стабильности ламп с ультратонкими светодиодными нитями // В мире научных открытий, 2015, №12-3 (72). С. 922-937.
134. Короткова К.В., Романова М.А., Смирнов С.В. Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2017, Т. 20, №1. С. 38-41.
135. Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии, 2005, №7 (51). С. 16-24.
136. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э.Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
137. Поль А. Преимущества использования 0,5-Вт светодиодов в современных источниках света // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №4. – С. 14-16.
138. Ельфимов Г.В. Теория переходных кривых. М.: Трансжелдориздат, 1948. 312 с.
139. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 576 с.
140. Кофанов Ю.Н., Сарафанов А.В., Трегубов С.И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат. М.: Радио и связь, 2001. 220 с.
141. Карапетян А.М. Автоматизация оптимального конструирования электронных вычислительных машин. М.: Сов. радио, 1973. 152 с.



142. Деньдобренько Б.Н., Малика А.С. Автоматизация конструирования РЭА. М.: Высш. школа, 1980. 384 с.
143. Yan H., Zhou Q., Hong X. Thermal aware placement in 3D ICs using quadratic uniformity modeling approach // *Integration, the VLSI Journal*. 2009, Vol. 42. pp. 175-180.
144. Cong J., Luo G. Thermal-Aware 3D Placement // *Three Dimensional Integrated Circuit Design. EDA, Design and Microarchitectures*. 2010. Springer, Boston, MA. pp.103-144.
145. Luo G., Shi Y., Cong J. An Analytical Placement Framework for 3-D ICs and Its Extension on Thermal Awareness // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2013, Vol. 32. Iss. 4. pp. 510-523.
146. Cong J., Luo G., Shi Y. Thermal-Aware Cell and Through-Silicon-Via Co-Placement for 3D ICs // 2011. 48th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC). pp. 670-675.
147. Jeong J., Jang S., Choi W., Kim Y., Chun K. Thermal structure design for enhanced heat spreading in 3D ICs // *IEEE 2013 Tencon - Spring, Sydney, NSW, Australia*. pp. 544-547.
148. Lakatoş E.Ş. 60 years from the invention of the integrated circuits // *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 2018, 66 (3). Pp. 72-80.
149. Koyanagi M. et al. Three-Dimensional Integration Technology Based on Wafer Bonding with Vertical Buried Interconnections // *IEEE Transactions on Electron Devices*, nov. 2006, vol. 53, no. 11. Pp. 2799-2808.
150. Yaniv Z., Yang M., Laxton P. Buffer Layer to Enhance Photo and/or Laser Sintering // *United States Patent 61174758 from 03.26.2010*.
151. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. М.: Машиностроение, 2004. 172 с.
152. Fukushima T., Bea J., Murugesan M., Lee K.-W., Tanaka T., Koyanagi M. Self-assembly-based 3D integration technologies // *3rd IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, Tokyo, 2012*. Pp. 151-157.
153. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
154. Петухов В.М. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. Дополнение первое: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 224 с.
155. Лабутин В.К. Мощные низкочастотные транзисторы. М.: Энергия, 1964. 33 с.
156. Тетенькин Я.Г., Сергеев В.А. Измерение теплового сопротивления цифровых интегральных схем с использованием температурной зависимости времени задержки сигнала // *Радиоэлектронная техника*, 2015, №1 (7). С. 96-93.

157. Мартынов И.А. Измерение теплового сопротивления кристалл-корпус микросхем и полупроводниковых приборов с использованием тепловизора // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2016, №4. С. 78-82.

158. Ершов А.Б., Хорольский В.Я., Хабаров А.Н., Ефанов А.В. Определение теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых диодов по переходной функции термочувствительного параметра // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2014, №3 (27). С. 169-186.

159. Юдин В.В., Сергеев В.А. Определение теплового сопротивления КМОП цифровых интегральных микросхем // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем, 2014, №9. С. 159-163.

160. Евдокимова Н.Л., Долгов В.В., Иванов К.А. Определение теплового сопротивления кристалл-корпус полупроводникового прибора из его кривого охлаждения // Известия высших учебных заведения. Электроника, 2019, Т. 24. №1. С. 30-41.

161. Доманов В.И., Доманов А.В., Зайцев В.А. Измерение теплового сопротивления силовых транзисторов // Электроника и электрооборудование транспорта, 2014, №2. С. 43-45.

162. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования = Applying UML and Patterns : An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development. 3-е изд. М.: Вильямс, 2006. 736 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ



РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **2 164 709** (13) **C2**  
(51) МПК<sup>7</sup> **G 05 D 23/24**

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 99109421/09, 29.04.1999

(24) Дата начала действия патента: 29.04.1999

(43) Дата публикации заявки: 10.02.2001

(46) Опубликовано: 27.03.2001

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ВОРОХОВСКИЙ Я.Л. и др. Кварцевый резонатор-термостат с саморегулирующимся позисторным нагревателем. В.: "Электронная техника". Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1977, вып. 3(22). RU 2018912 С1, 30.08.1994. GB 1155361, 18.06.1969. US 3395265, 30.07.1968. ТИТЦЕ У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. - М.: Мир, 1983, с.258, рис.16.7. ХОРОВИЦ П., Хилл У. Искусство схемотехники, т.1. - М.: Мир, 1983, с.355, рис.5.48а.

Адрес для переписки:  
634050, г.Томск, пр. Ленина 40, ТУСУР,  
патентно-информационный отдел

(71) Заявитель(и):

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

(72) Автор(ы):

Козлов В.Г.,  
Алекеев В.П.,  
Озеркин Д.В.

(73) Патентообладатель(ли):

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## (54) МИКРОТЕРМОСТАТ С ПОЗИСТОРНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике регулирования температуры в прецизионных радиоэлектронных устройствах и может быть использовано для поддержания постоянства параметров этих устройств в широком диапазоне температур окружающей среды. Микротермостат с позисторным нагревателем содержит позистор (П) (2), расположенный на термостатируемой подложке (ТП) (1), регулирующий транзистор (Т) (5), коллектор которого соединен с источником питания, а эмиттер с одним из выводов П(2). Введены резистор (Р) (6) обратной связи, включенный между другим выводом П(2) и общей шиной, операционный усилитель (ОУ) (7) рассогласования и делитель напряжения (ДН)

(8,9,10), определяющий величину температуры термостатирования П(2), включенный между источником питания и общей шиной. Выход ДН(9) соединен с инвертирующим входом ОУ(7). Выход ОУ(7) соединен с базой регулирующего Т(5), а неинвертирующий вход ОУ(7) соединен с Р(6) обратной связи. Технический результат: повышение точности термостатирования в широком диапазоне температур окружающей среды за счет сокращения числа теплоинерционных звеньев и введения замкнутой системы регулирования, уменьшающей электрическое напряжение на позисторном нагревателе при увеличении его температуры, 1 ил., 1 табл.

RU 2 164 709 C 2

RU 2 164 709 C 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 459 231** <sup>(13)</sup> **C2**(51) МПК  
**G05D 23/00** (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010140166/08, 30.09.2010  
(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
30.09.2010  
Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 30.09.2010  
(43) Дата публикации заявки: 10.04.2012 Бюл. № 10  
(45) Опубликовано: 20.08.2012 Бюл. № 23  
(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2348962 C1, 10.03.2007. RU 2355016 C2,  
10.05.2009. SU 289651, 08.12.1970. SU 1672421  
A1, 23.08.1991. EP 0878990 A1, 18.11.1998. EP  
0456398 A2, 13.11.1991. US 5067040, 19.11.1991.

Адрес для переписки:  
634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,  
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):  
Козлов Виталий Григорьевич (RU),  
Озёркин Денис Витальевич (RU),  
Козлова Валентина Григорьевна (RU)  
(73) Патентообладатель(и):  
Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР) (RU)

## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ МИКРОСБОРОК

(57) Реферат:  
Изобретение относится к технике регулирования температуры в прецизионных электронных устройствах и может быть использовано для поддержания постоянства параметров этих устройств в широком диапазоне температур окружающей среды. Технический результат, на достижение которого направлено предлагаемое решение, - увеличение площади для размещения термостатируемых элементов микросборок без увеличения длины и ширины устройства для стабилизации температуры микросборок (без увеличения основных габаритообразующих размеров устройства). Сущность изобретения состоит в том, что в устройстве для стабилизации температуры микросборок, содержащем обшивку проводник, прямоугольную диэлектрическую пластину, на рабочей поверхности которой вдоль ее продольной оси расположен полосковый пленочный нагреватель, симметрично относительно нагревателя расположены два прямоугольных участка для размещения на них элементов микросборок и на

поперечной оси рабочей поверхности пластины у ее края - датчик температуры, а также схему регулирования температуры и блокировочный конденсатор, на части тыльной поверхности диэлектрической пластины по всей ее длине нанесен слой металла, элементы микросборок залиты диэлектрическим компаундом, в состав первого и второго вариантов устройства дополнительно введены два металлических брусочка прямоугольного сечения, длина которых равна длине диэлектрической пластины и которые расположены с обеих сторон полоскового пленочного нагревателя и механически соединены своими основаниями с рабочей поверхностью диэлектрической пластины, вторая прямоугольная диэлектрическая пластина, длина которой равна длине первой пластины, а ширина - расстоянию между брусочками, на всей тыльной поверхности второй пластины нанесен слой металла, а на ее рабочей поверхности образованы два участка, на которых размещены элементы микросборок, залитые диэлектрическим компаундом, аналогичные

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 461 047** <sup>(13)</sup> **C1**

(51) МПК  
*G05D 23/00* (2006.01)  
*G05D 23/30* (2006.01)  
*H05B 3/00* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011127615/08, 05.07.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.07.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.07.2011

(45) Опубликовано: 10.09.2012 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2355016 C2, 10.05.2009. RU 2348962 C1,  
10.03.2009. SU 1164679 A1, 30.06.1985. US  
20100078424 A1, 01.04.2010. US 20090266809  
A1, 29.10.2009.

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,  
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):

Козлов Виталий Григорьевич (RU),  
Алексеев Валерий Павлович (RU),  
Озёркин Денис Витальевич (RU),  
Козлов Григорий Витальевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР) (RU)

## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ И МИКРОСБОРОК

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике регулирования температуры в прецизионных электронных устройствах и может быть использовано для поддержания постоянства параметров этих устройств в широком диапазоне температур окружающей среды (ТОС). В качестве прецизионных электронных устройств могут быть использованы микросхемы различной степени интеграции вплоть до сверхбольших интегральных схем (СБИС), систем на кристалле, и микросборки. Регулирование температуры микросхем и микросборок осуществляется в отсутствие конвекции, что позволяет использовать устройство для работы в открытом космосе, в частности в космической аппаратуре спутниковых систем. Технический результат - увеличение объема термостабируемого диэлектрического слоя с размещенными внутри него элементами микросхем или микросборок, имеющего малую погрешность термостабирирования в широком диапазоне изменения ТОС. Сущность изобретения

состоит в том, что устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок содержит общий для всего устройства проводник, диэлектрическую подложку, выполненную в форме прямоугольного параллелепипеда из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, схему регулирования температуры, имеющую три вывода, первый из которых соединен с общим проводником, датчик температуры, соединенный со вторым выводом схемы регулирования температуры, блокировочный конденсатор, первый вывод которого соединен с общим проводником, а второй вывод - с третьим выводом схемы регулирования температуры, нагреватель, выполненный в виде прямоугольной резистивной пленки, один конец которого соединен с общим проводником, а другой конец - со вторым выводом блокировочного конденсатора, резистивная пленка нагревателя расположена на всей тыльной поверхности диэлектрической подложки, и в состав устройства дополнительно введены

Стр. 1

RU 2 461 047 C1

RU 2 461 047 C1



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 439 746** <sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
*H01L 23/36* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010122358/28, 01.06.2010

(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
01.06.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.06.2010

(45) Опубликовано: 10.01.2012 Бюл. № 1

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2348962 C1, 10.03.2009. RU 2355016 C2,  
10.05.2009. RU 2164709 C2, 27.03.2001. SU  
1672421 A1, 23.08.1991.

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,  
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):

Козлов Виталий Григорьевич (RU),  
Озёркин Денис Витальевич (RU),  
Козлова Валентина Григорьевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники (ТУСУР) (RU)

## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСБОРОК

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике регулирования температуры в прецизионных электронных устройствах. Сущность изобретения: устройство для стабилизации температуры элементов микросборок содержит проводник, диэлектрическую подложку прямоугольной формы, на рабочей стороне которой вдоль ее продольной оси расположены полосковый пленочный нагреватель, первый конец которого соединен с проводником, две прямоугольные области для размещения элементов микросборок, ограниченные краями подложки и четырьмя нанесенными на эту поверхность линиями, визуально отличающимися от остальных элементов рабочей поверхности подложки, датчик температуры, размещенный у края

подложки на поперечной оси ее рабочей поверхности, и соединенную с общим проводником схему регулирования температуры, блокировочный конденсатор, на тыльной стороне подложки симметрично относительно ее продольной оси размещен металлический слой, длина которого равна длине подложки, а ширина выбирается в пределах 1,00-1,05 расстояния между линиями, нанесенными на рабочую сторону подложки, а сам металлический слой соединен с общим проводником в точке, лежащей на продольной оси тыльной поверхности подложки вблизи второго конца нагревателя. Техническим результатом изобретения является расширение функциональных возможностей термостатируемых устройств, работающих в широком диапазоне частот. 11 ил.

RU 2 4 3 9 7 4 6 C 1

RU 2 4 3 9 7 4 6 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

183 304<sup>(13)</sup> U1

(51) МПК  
F21V 29/00 (2015.01)  
F21Y 105/12 (2016.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
F21V 29/00 (2006.01); F21Y 2105/12 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017146187, 27.12.2017  
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.12.2017  
Дата регистрации:  
17.09.2018  
Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 27.12.2017  
(45) Опубликовано: 17.09.2018 Бюл. № 26  
Адрес для переписки:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР,  
патентно-информационный отдел

(72) Автор(ы):  
Афонин Кирилл Нильевич (RU),  
Вилисов Анатолий Александрович (RU),  
Озеркин Денис Витальевич (RU),  
Ряполова Юлия Витальевна (RU),  
Солдаткин Василий Сергеевич (RU),  
Старосек Данил Геннадьевич (RU),  
Туев Василий Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 20160273720 A1, 22.09.2016. US  
7273299 B2, 25.09.2007. CN 202419372 U,  
05.09.2012. EP 2292970 A2, 09.03.2011. US  
9816695 B2, 14.11.2017. RU 172287 U1,  
04.07.2017.

## (54) СВЕТОДИОДНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ ЛАМПЫ

(57) Реферат:  
Полезная модель относится к светотехнике, в частности к конструкции светодиодной ленты в лампе, заменяющей лампу накаливания в осветительных устройствах бытового и производственного назначения.

Светодиодная лента для лампы содержит протяженную подложку, на которой размещены излучающие кристаллы, контактные выводы для присоединения к токовводам лампы и люминофорную композицию над излучающими кристаллами. Предлагаемое техническое решение отличается от известной конструкции тем, что кристаллы расположены на подложке на переменном расстоянии друг от друга, значение которого изменяется вдоль продольной оси подложки от наибольшего значения  $1,5 \cdot L/(N-1)$

между центрами кристаллов в середине подложки до значения  $0,5 \cdot L/(N-1)$  на ее концах, где  $L$  - длина подложки,  $N$  - количество излучающих кристаллов ( $N=3, 4, \dots$ ). Экспериментально установлено, что в предложенной конструкции светодиодной ленты градиент температуры вдоль продольной оси подложки в шесть раз, а средняя температура подложки на три градуса меньше, чем у прототипа.

Таким образом, уменьшение локального перегрева кристаллов в середине подложки и снижение ее средней температуры позволяет увеличить светоотдачу и надежность светодиодной ленты и, следовательно, лампы. 2 ил.

RU 183304 U1

RU 183304 U1



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации  
(свидетельства):  
**2022663975**

Дата регистрации: **21.07.2022**

Номер и дата поступления заявки:  
**2022663203 15.07.2022**

Дата публикации: **21.07.2022**

Контактные реквизиты:  
**нет**

Автор:

**Озеркин Денис Витальевич (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

**«Проектирование SPICE-моделей резисторных сборок «Б19К»**

**Реферат:**

Программа предназначена для автоматизации создания SPICE-моделей резисторных блоков Б19К в зависимости от исходных данных. Наличие в семействе резисторных блоков Б19К тридцати четырех вариантов исполнения приводит к множеству математических моделей с точки зрения температурной стабильности. Конкретная реализация математической модели резисторного блока будет зависеть от схемы включения, номинала сопротивления резистивных элементов, погрешности сопротивления, температурных коэффициентов сопротивления. Автоматизированный процесс по формированию SPICE-моделей резисторных блоков реализован на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk в виде программы «Б19К». Тип ЭВМ: IBM PC. ОС: Windows XP/Vista//7/10.

**Язык программирования:** TCL/Tk Scripting

**Объем программы для ЭВМ:** 224 Кб



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

**ТУСУР**

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

ОКПО 02069326, ОГРН 1027000867068,  
ИНН 7021000043, КПП 701701001

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

тел: (382 2) 510-530  
факс: (382 2) 513-262, 526-365  
e-mail: office@tusur.ru  
http:// www.tusur.ru

№ \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
ФВБОУ ТУСУР

П.В. Сенченко

2022 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования  
температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной  
аппаратуры»

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры» в учебном процессе при реализации программ бакалавриата и специалитета в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Результаты исследования, изложенные в диссертации, имеют научное и практическое значение. Выводы и рекомендации диссертационного исследования используются при реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлениям подготовки:

- 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», образовательная программа «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»;

- 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования», образовательная программа «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования аэропортов и воздушных трасс».

Ссылки на учебно-методическое обеспечение:

<https://edu.tusur.ru/publications/9854>

<https://edu.tusur.ru/publications/9855>

<https://edu.tusur.ru/publications/9856>

Руководитель образовательных программ,  
к.т.н., заведующий кафедрой КИПР

Н.Н.Кривин



ООО «Современные источники света»

634034, Россия, г. Томск, пр. Кирова, 5  
 ИНН 7017143810 КПП 701701001 ОГРН 1067017147801  
 +7 (3822) 908-112 (приемная)  
 +7 (3822) 908-188 (маркетинг)  
 +7 (3822) 908-151 (отдел продаж)  
 e-mail: info@leadlight.group

[www.leadlight.group](http://www.leadlight.group)

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование численных методов и комплексы программ»

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры» на предприятии LEADlight Group.

Предложен метод одномерной топологической термокомпенсации светодиодных линейных модулей, который позволяет улучшать стабильность световых характеристик светодиодных излучающих элементов минимизацией кривизны температурного профиля.

На основе анализа экспериментальных данных испытаний макета, разработанного с использованием предложенного метода, показано, что применение локализации кристаллов с коэффициентом дихотомии 1,5 позволило уменьшить кривизну температурного профиля с  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  мм<sup>-1</sup>.

Использование результатов работы Озеркина Д.В. позволило повысить надежность светоизлучающих элементов и улучшить технические характеристики светодиодных ламп на светодиодных нитях, производимых нашей компанией.

Главный инженер  
 МП



П.Д. Колянко



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
инновациям  
ФГБОУ ТУСУРА.Г. Лоцилов  
2022 г.**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертационной работы «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование численные методы и комплексы программ»

Озеркина Дениса Витальевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Д.В. Озеркина использованы в Научно-исследовательском институте светодиодных технологий ТУСУР при выполнении работ по целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках проекта «Разработка энергоберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57714X0061.

Результаты диссертационного исследования Д.В. Озеркина использованы при разработке программы и методик испытаний экспериментальных образцов лампы светодиодной ЕГВА.433751.704 ПМ и применяются в институте при испытаниях светодиодных ламп с конвекционным газовым охлаждением.

Внедрение результатов работы Д.В. Озеркина позволило повысить надежность светоизлучающих элементов, изготовленных по технологии Chip-on-Board.

Директор НИИ СТ, д.т.н., профессор

В.И.Тувев





Акционерное общество  
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
имени академика М.Ф. Решетнёва



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru  
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы

Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование численные методы и комплексы программ»

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры» на предприятии Госкорпорации «Роскосмос» АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева.

Результаты диссертационного исследования Д.В. Озеркина использованы при разработке библиотеки SPICE-моделей электрорадиоизделий (ЭРИ) российских производителей для проведения математического моделирования электрических принципиальных схем бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Разработанная библиотека SPICE-моделей позволяет обеспечивать требуемую надежность бортовой РЭА и её составных частей на ранних этапах ее создания. Библиотека SPICE-моделей ЭРИ российских производителей, созданная в ходе опытно-конструкторской работы (ОКР), пригодна для использования совместно с САПР OrCAD Capture и Altium Designer. Выполнение ОКР осуществлялось в соответствии с ГОСТ РВ 15.203-2001.

Внедрение результатов работы Озеркина Д.В. позволило повысить надежность бортовой космической радиоаппаратуры на ранних стадиях проектирования.

Результаты внедрялись при проектировании и испытаниях космических аппаратов «Экспресс-80», «Экспресс-103», «Экспресс-АМУ3», «Экспресс-АМУ7», «Ангосат-2», «Глонасс-К», «Глонасс-К2».

Начальник отдела конструирования бортовой РЭА АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва



С.Б. Сунцов

17.06.2022 г.



Государственная корпорация по космической деятельности  
«РОСКОСМОС»

Акционерное общество

«Научно-производственный центр «Полюс»

(АО «НПЦ «Полюс»)

Кирова пр., 56 «в», г. Томск, Российская Федерация, 634050

тел: (382-2) 55-46-94, факс: (382-2) 55-77-66.

E-mail: info@polus-tomsk.ru, http://POLUS.TOMSKNET.RU

ОГРН 1077017004063, ИНН 7017171342



#### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Озеркина Дениса Витальевича

«Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры»

на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

« 14 » 03 2022 г.

г. Томск

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс» в лице генерального директора Сергея Александровича Русановского подтверждает, что отдельные результаты диссертационной работы Озеркина Дениса Витальевича «Развитие методов математического моделирования температурной стабильности при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», были внедрены в практику работы производства, а именно:

- оригинальная методика синтеза математических моделей электрорадиоизделий формата SPICE, позволяющая получать модели дискретных двухтерминальных, дискретных многотерминальных и интегральных многотерминальных электронной компонентной базы отечественного производства;

- разработанный программный комплекс «Б19К» для генерации SPICE-моделей резисторных блоков, реализованный на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk;

- методы схемотехнической и топологической термокомпенсации на основе выбора оптимальной топологии размещения электрорадиоизделий для случаев одно-, двух- и трехмерных компоновочных решений в несущих конструкциях бортовой космической радиоаппаратуры.

Внедрение результатов работы Озеркина Д.В. позволяет сместить на более ранние сроки проектирования решение задачи о способах термостабилизации электронных средств, а значит сократить время проектирования термостабильных электронных средств.

Генеральный директор



С.А. Русановский