

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРИ ТУСУРа,  
канд техн. наук, доцент

А.Г. Лошилов

10.05.23 2023 г.



Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники» («ТУСУР»)

Диссертация «Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры» выполнена на кафедре радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

В 1996 г. Озеркин Денис Витальевич окончил Томскую государственную академию систем управления и радиоэлектроники по специальности «Конструирование и технология радиоэлектронных средств». В 2000 году защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 «Радиотехнические и телевизионные системы и устройства» на тему «Анализ и синтез термостабильных радиотехнических устройств». Диплом кандидата технических наук КТ №027348 выдан 15.09.2000 г. В 2003 году Озеркину Д.В. было присвоено ученое звание доцента по кафедре конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры. Аттестат доцента №020877 выдан в соответствии с решением Министерства образования Российской Федерации от 22 января 2003 года № 110-д. С 2000 года работал на кафедре конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры, затем с 2017 года по настоящее время – на кафедре радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга. С 2009 года возглавляет радиоконструкторский факультет Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники в должности декана.

Научный консультант – Туев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга» ТУСУР.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертация Озеркина Дениса Витальевича является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема разработки совокупности SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы, а также комплекса программ, позволяющих автоматизировать вычислительный эксперимент в отношении обеспечения температурной стабильности радиоэлектронной аппаратуры, имеющей большое значение для развития технических наук.

В работе раскрыта актуальность темы исследования, произведена оценка степени ее проработанности как на теоретическом уровне, так и в практической плоскости. В ходе диссертационного исследования предложен оригинальный метод проведения вычислительного факторного эксперимента с целью нахождения уравнения температурной погрешности характеристик радиоэлектронной аппаратуры, синтезированы частные SPICE-модели отечественной электронной компонентной базы, рассмотрены численные методы и вычислительные алгоритмы решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных. На основе анализа классических методов обеспечения термостабилизации, а также программных средств проектирования термостабильной радиоэлектронной аппаратуры, обоснована актуальность разработки математических моделей, численных методов и программного обеспечения для исследования моделей элементов радиоэлектронной аппаратуры с повышенной температурной стабильностью.

Разработан комплекс математических моделей, численных методов, применяемых на различных стадиях проектирования термостабильной радиоэлектронной аппаратуры.

Проведено экспериментальное исследование предлагаемых математических моделей, численных методов применительно к существующей отечественной электронной компонентной базе, а также применительно к типовым узлам радиоэлектронной аппаратуры. Показано их превосходство над рассмотренными альтернативными решениями.

Проведен ряд исследований практической реализации предложенного комплекса математических моделей, численных методов и программных средств для синтеза SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы.

Разработана методология проектирования термостабильной радиоэлектронной аппаратуры на основе математической модели – уравнения температурной погрешности. Применение предложенной методологии позволяет обоснованно и рационально подходить к проблеме обеспечения заданной температурной стабильности согласно техническому заданию на проектирование радиоэлектронной аппаратуры.

### **Личное вклад автора**

Результаты диссертационной работы, соответствующие поставленным задачам и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Вклад автора состоит в разработке методологии математического моделирования элементов радиоэлектронной аппаратуры, подверженных тепловым воздействиям, а также в разработке методики синтеза частных математических моделей ЭРИ, наиболее адекватно отражающих реальные температурные зависимости параметров прототипов.

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

### **Степень достоверности результатов работы**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в работе, определяется адекватностью разработанных математических моделей, их сравнительным анализом с соответствующими прототипами. Результаты применения вычислительных алгоритмов по нахождению уравнения температурной погрешности характеристик радиоэлектронной аппаратуры оцениваются по статистическим критериям Фишера и Стьюдента. Результаты применения численных методов для решения уравнения теплопроводности в частных производных сопоставляются с тестовыми задачами.

### **Научная новизна диссертации**

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

2. Предложена методика синтеза нестандартных SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы с температурной зависимостью параметров, отличающаяся от классических методик декомпозицией разрабатываемой модели на

типовые каскады с последующим подбором эмпирических формул функциональных зависимостей с помощью нелинейной аппроксимации. Методика применима по отношению к элементной базе малой и средней степени интеграции, что позволяет использовать ее при решении задач обеспечения заданной температурной стабильности электронных средств.

3. Впервые в непрерывной области значений решения уравнения теплопроводности введено понятие локальной группы элементов. Минимизация функции температурной погрешности на основе локальных групп элементов отличается применимостью к анизотропным тепловым полям и позволяет рационально использовать явление термокомпенсации рабочих температур элементов.

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

5. Предложены модифицированные вычислительные программные блоки и методики для численного нахождения значений температурного поля несущих конструкций электронных средств (ЭС), отличающиеся обоснованным выбором конкретного варианта реализации в зависимости от размерности исходной задачи. Программные блоки и методики практически пригодны для нахождения значений абсолютных и относительных рабочих температур конструкций ЭС в уравнении температурной погрешности.

6. 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.

### **Практическая значимость**

1. Разработанная методика синтеза адекватных математических моделей электрорадиоизделий (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. Практическое применение функции локализации кристаллов ЭРИ с заданным коэффициентом дихотомии позволяет уменьшить на порядок кривизну температурного профиля экспериментального образца условно одномерной структуры несущей конструкции бортовой космической радиоэлектронной аппаратуры. Модифицирован численный метод дихотомии с обеспечением выбора значения коэффициента, обеспечивающего уменьшение на порядок кривизны температурного профиля подложки.

3. Разработанный программный комплекс «Российский компонент» для генерации SPICE-моделей, реализованный на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk, 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.

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.

### **Ценность научных работ соискателя**

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

производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств», идентификатор проекта RFMEFI57717X0266.

Методика синтеза математических моделей отечественных электрорадиоизделий нашла практическое применение при выполнении НИОКР «Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы российского производства», результаты которой впоследствии использованы на ранних стадиях разработки новых поколений малогабаритных космических аппаратов в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева (г. Железногорск).

Материалы диссертационного исследования также внедрены в учебный процесс Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Так теоретические и экспериментальные особенности проведения регрессионного анализа электронных схем и реализации вычислительного факторного эксперимента нашли отражения в учебном пособии «Основы научно-исследовательской деятельности» для обучающихся в аспирантуре по направлениям 03.06.01 «Физика и астрономия», 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи». В рамках готовящейся к лицензированию образовательной программы уровня магистратуры 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» подготовлен ряд учебно-методических пособий, в которых нашли отражение теоретические материалы представленного диссертационного исследования: «Проектирование сложных систем», «Эксперимент: планирование, проведение, анализ», «Моделирование тепловых и оптических свойств светодиодов и светотехнических устройств».

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

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

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертационная работа Озеркина Дениса Витальевича на тему «Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, является законченным самостоятельным научным исследованием, имеющим научную ценность.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

п. 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;

п. 3. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели;

п. 5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента или на основе анализа математических моделей;

п. 6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей;

п. 7. Качественные или аналитические методы исследования математических моделей.

**Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором**

По материалам диссертации Озеркина Д.В. опубликовано 35 печатных работ, в том числе 11 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК; в 2 монографиях; в 4 статьях в изданиях Scopus. Получено 5 патентов на изобретения и полезные модели; свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

#### **Монографии**

1. **Озеркин Д.В.** Методология создания термозависимых SPICE-моделей отечественной электронной компонентной базы. Томск: Изд-во ТУСУР, 2020. 244 с.
2. **Озеркин Д.В.** Altium Designer. SolidWorks. Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. 280 с.

#### **Статьи в зарубежных и отечественных журналах из списка Scopus**

1. Starosek D.G., **Ozerkin D.V.**, Tuev V.I., Ryapolova Y.V., Olisovec A.U., Ermolaev A.V. Investigation of Temperature Regime and Luminous Flux of Light-emitting Element of Light

Emitting Diode Lamp // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2015, Vol. 10, #16. Pp. 6944-6948.

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

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

#### Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Версия на английском языке (Scopus). **Ozerkin D.V., Starosec D.G., Tuev V.I.** Topological Thermocompensation for Light-Emitting Diode Linear Modules of Filament Lamps // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 61. # 6. Pp. 1175-1184.

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

#### **Статьи в рецензируемых сборниках трудов**

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

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

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

#### **Патенты на изобретения и полезные модели**

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

2. Козлов В.Г., **Озеркин Д.В.**, Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры микросборок // Патент на изобретение RUS 2459231 от 30.09.2010 г.
3. Козлов В.Г., Алексеев В.П., **Озеркин Д.В.**, Козлов Г.В. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок // Патент на изобретение RUS 2461047 от 05.07.2011 г.
4. Козлов В.Г., **Озеркин Д.В.**, Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры элементов микросборок // Патент на изобретение RUS 2439746 от 01.06.2010 г.
5. Афонин К.Н., Вилисов А.А., **Озеркин Д.В.**, Ряполова Ю.В., Солдаткин В.С., Старосек Д.Г., Туев В.И. Светодиодная лента для лампы // Патент на полезную модель RU 183304 U1, 17.09.2018.
6. Козлов В.Г., Алексеев В.П., **Озеркин Д.В.** Микротермостат с позисторным нагревателем // Патент на изобретение RUS 2164709 от 29.04.1999 г.

#### Тезисы и доклады в трудах конференций

1. Бондаренко В.О., **Озеркин Д.В.** Синтез SPICE-моделей резисторных сборок Б19К при проектировании бортовой космической радиоаппаратуры // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 311 – 313.
2. Зырин И.Д., Шабловский А.В., **Озеркин Д.В.** Разработка библиотеки SPICE-моделей электронной компонентной базы Российского производства // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2011». Томск. Издательство ТУСУР. 2011. С. 297-299.
3. **Озеркин Д.В.**, Пепеляев А.В. Принципы формирования SPICE-моделей Российской электронной компонентной базы // Электронные средства и системы управления. 2010. №2. С. 11-14.
4. Мирзаев Х., Мирзаев Х., Тютюник С., Захаров Д., Старосек Д., **Озеркин Д.** Исследование движения потоков газа в лабораторном макете термоанемометра // Современные проблемы радиоэлектроники. Красноярск, издательство Сибирского федерального университета. 2016. С. 212-215.
5. Алексеев В.П., Белоусов А.В., **Озеркин Д.В.** Системное проектирование термоустойчивых бортовых радиотехнических устройств // 7-я международная науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-7-2001)». Барнаул: ТПУ. 2001. С.209-212.

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

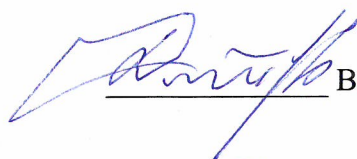
7. Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Использование типовых программ схмотехнического моделирования в конструкторском проектировании РЭС // Пятая Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск. 2000. Т. 5. С. 421 – 429.

Диссертация «Модели, алгоритмы и комплекс программ анализа и синтеза характеристик термостабильной радиоэлектронной аппаратуры» Озеркина Дениса Витальевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

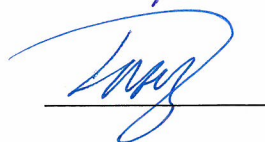
Заключение принято на заседании кафедры КСУП.

Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 51 от «09» ноября 2023 г.

Председатель,  
д.т.н., профессор кафедры КСУП

  
В.М. Дмитриев

Секретарь,  
д.т.н., профессор кафедры КСУП

  
Т.В. Ганджа