

[Электронный ресурс] : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Минск, 19-20 мая 2021 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2021. – С. 222–226.

3. Алексеев, В. Ф. Проблемы и возможные пути их реализации в работе с перспективными выпускниками по привлечению к научным исследованиям / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // Высшее техническое образование : проблемы и пути развития = Engineering education: challenges and developments : материалы IX Международной научно-методической конференции, Минск, 1-2 ноября 2018 года / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 9 – 14.

4. Кадровые риски их классификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.grandars.ru/student/fin-m/vidy-riskov.html>. – Дата доступа: 13.10.2024.

5. Риски: понятие и виды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nauka-rastudent.ru/> – Дата доступа: 13.10.2024.

6. Аналог программного средства OMNINET Software solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.omnitracker.com/>. – Дата доступа: 13.10.2024.

7. Аналог программного средства 2 Fenix+ 3 MST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mst.su/fenix3/>. – Дата доступа: 13.10.2024.

УДК 621.396

## **АЛГОРИТМЫ ИЕРАРХИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**В. Ф. Алексеев<sup>1</sup>, Д. В. Лихачевский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, [v.alekseev@bsuir.by](mailto:v.alekseev@bsuir.by)

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, [likhachevskiyd@bsuir.by](mailto:likhachevskiyd@bsuir.by)

*The article discusses key aspects of thermal processes occurring in radioelectronic devices and proposes algorithms that allow for effective analysis and prediction of temperature regimes in such constructions. The authors emphasize the importance of thermal analysis for ensuring the reliability and durability of radioelectronic equipment components, as well as the need to account for various factors affecting thermal characteristics. As a result of the conducted research, algorithms have been proposed that enable the optimization of thermal processes, enhancing the efficiency of radioelectronic devices. The article will be useful for specialists in the fields of thermal engineering, radioelectronics, and the development of high-tech systems, as well as for students and researchers interested in this topic.*

## **Введение**

При разработке современных радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях ужесточения внешних дестабилизирующих факторов необходимо уделять особое внимание проблеме анализа и обеспечения тепловых характеристик электронных устройств. Это объясняется тем, что тепловые процессы, протекающие в современной аппаратуре, для которой характерны высокие удельные показатели, очень тесно связаны с другими физическими процессами, определяющими показатели технического уровня разрабатываемых устройств. Тепловые нагрузки становятся критически важными для их надежности и долговечности.

Современный подход к исследованию тепловых процессов РЭС основывается на методах математического моделирования. При этом программное обеспечение соответствующих специализированных пакетов прикладных программ, комплексов и подсистем теплового проектирования базируется на различных методах и подходах к моделированию. Большую роль при реализации проектных процедур играют принципы системного подхода к решению задач автоматизированного анализа и обеспечения тепловых характеристик РЭС. При этом программное обеспечение соответствующих специализированных пакетов прикладных программ, комплексов и подсистем теплового проектирования РЭС (SolidWorks Flow Simulation, COMSOL Multiphysics, ANSYS, Altium, Mentor Graphics, АСОНИКА-ТМ и др.) базируется на различных методах и подходах к оценке тепловых режимов [1–11].

### **Иерархическое моделирование тепловых процессов РЭС**

Иерархическое моделирование тепловых процессов в радиоэлектронных средствах представляет собой важный инструмент для анализа и оптимизации теплового состояния электронных компонентов и систем. Процесс разработки и оптимизации тепловых характеристик требует комплексного подхода, включающего как теоретические, так и практические аспекты. Рассмотрим основные принципы иерархического моделирования, его структурные уровни и методические подходы.

Иерархический подход позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью исследовать температурные поля сложных объектов РЭС.

В основе иерархического подхода лежит принцип местного влияния, который в общей форме можно сформулировать следующим образом: любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на отдельные участки поля. С учетом данного принципа можно с меньшей степенью детализации описывать тепловые процессы в удаленных от интересующего участка областях исследуемого объекта.

Применение иерархического подхода к исследованию тепловых полей в РЭС предусматривает выполнение следующих процедур:

1. Сложные пространственные распределения источников теплоты заменяются более простыми (упрощаются формы реальных исследуемых областей с сохранением некоторых интегральных характеристик: площадей, объемов, периметров, некоторых определяющих размеров).

2. Составные объекты (подсистемы) с неоднородной структурой заменяются квазиоднородными (имеющими некоторые признаки однородности) областями с эффективными теплофизическими свойствами.

3. Пространственные распределения величин, описывающих теплообмен на границах областей (температур окружающих тел и хладоносителей, коэффициентов теплоотдачи, тепловых потоков), заменяются их средними значениями.

Для практического использования иерархического подхода разработчику РЭС требуется уметь проводить построения приближенных тепловых моделей (макромоделей), описывающих тепловой режим исследуемых объектов с требуемой степенью детализации. Кроме этого, разработчик должен уметь выделять определенные части всего объекта для составления модели, пригодной для последующего более детального анализа тепловых процессов.

Иерархическое моделирование основано на идее многослойной структуры, где каждый уровень модулируется на основе данных и результатов, полученных на предыдущем. Этот подход позволяет разбивать сложные системы на более простые подзадачи, упрощая анализ и обеспечивая возможность более точного управления тепловыми процессами.

В общей теории систем описанные выше операции носят название агрегирования (выполняется укрупнение исходной модели) и декомпозиции (составление модели для более детального анализа).

Выполнение операций агрегирования и декомпозиции тесно связаны с иерархией конструктивного построения РЭС.

Одним из ярких примеров применения иерархического моделирования является анализ теплоотводов в современных процессорах. На макроуровне исследуется общее распределение температуры на поверхности процессора и его взаимодействие с радиаторами. На мезоуровне рассматривается производительность системы охлаждения при различных сценариях нагрузки. На микроуровне проводится детальный анализ тепловых потоков внутри микросхемы, что позволяет оптимизировать ее структуру и снижать тепловые потери.

### **Алгоритмы иерархического анализа тепловых процессов РЭС**

При иерархическом подходе к исследованию тепловых характеристик РЭС используется как нисходящий, так и восходящий алгоритмы моделирования тепловых процессов.

Укрупненный алгоритм нисходящего иерархического моделирования тепловых процессов электронных системах может быть представлен в виде нескольких основных этапов: Данный подход позволяет учитывать тепловые характеристики на различных уровнях системы и эффективно управлять тепловыми режимами.

1. Определение структуры системы предполагает идентификацию компонентов РЭС и их размещение, а также определение иерархии уровней моделирования: от общего уровня до отдельных компонентов (например, группа функциональных блоков, отдельные аппараты, чипы и т.д.).

2. Сбор данных о тепловых характеристиках состоит из коэффициентов теплопередачи, теплоемкости и других термодинамических свойств для всех компонентов. На этом этапе необходимо учитывать параметры окружающей среды (температура, влажность и другие условия эксплуатации).

3. Моделирование тепловых процессов на верхнем уровне: оценка общей тепловой мощности РЭС, включая источники тепла и потери; предварительное распределение тепловых потоков между компонентами с использованием упрощенных моделей (например, метод баланса энергии).

4. Детализация на уровне компонентов: моделирование тепловых процессов для каждого компонента с учетом его специфики (например, воспринимаемый ток, рассеяние тепла); применение методов численного решения (например, метод конечных элементов) для более точного анализа.

5. Анализ устойчивости и оптимизация: оценка температуры и устойчивости работы компонентов в различных режимах; разработка рекомендаций по улучшению тепловых характеристик (например, оптимизация конфигурации, улучшение системы охлаждения).

6. Верификация и валидация модели: сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами; корректировка моделей на основе полученных результатов.

7. Система мониторинга и управления: создание системы мониторинга температурных режимов в реальном времени; разработка алгоритмов для автоматической регулировки работы компонентов в зависимости от температурных условий.

Восходящее иерархическое моделирование тепловых процессов в РЭС – это процесс, который позволяет оценивать тепловые режимы различных компонентов и систем, чтобы обеспечить их надежность и работоспособность. Укрупненный алгоритм такого моделирования можно представить в виде следующих шагов:

1. Определение целей и задач моделирования: установить цель моделирования (например, оценка температуры компонентов, тепловые потери и т.д.); определить задачи, которые необходимо решить (например, оптимизация путей теплоотвода, нахождение критических точек перегрева и т.д.).

2. Сбор данных: собрать информацию о конструктивных особенностях радиоэлектронных средств; получить данные о физических и термодинамических свойствах материалов; составить список источников тепла (например, силовые элементы, процессоры, источники питания).

3. Создание иерархии модели:

– уровень 1: общая модель системы (например, общее распределение тепла в устройстве);

– уровень 2: модели индивидуальных подсистем (например, моделей блоков и модулей);

– уровень 3: модели компонентов (например, отдельных элементов схем и радиаторов).

4. Выбор методов моделирования: определить методы, подходящие для моделирования тепловых процессов (например, численные методы, аналитические модели, методы конечных элементов); выбрать программное обеспечение для выполнения расчетов.

5. Построение математической модели: оформить уравнения теплопроводности, конвекции и излучения в соответствующих системах; учесть граничные условия и начальные данные для каждого уровня модели.

6. Проведение расчетов: выполнить расчеты тепловых процессов на различных уровнях иерархии; собирать и анализировать результаты, обращая внимание на критические точки.

7. Верификация и валидизация модели: сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными или результатами предыдущих исследований; провести анализ чувствительности модели к изменениям параметров.

8. Оптимизация: на основе полученных результатов провести оптимизацию конструкции для улучшения тепловых характеристик (например, улучшение путей теплоотвода, выбор материалов).

9. Документация и отчетность: подготовить документацию с описанием модели, методов, результатов и рекомендаций для практического применения.

10. Итерация: при необходимости повторить шаги 4–9 для доработки модели на основе новых данных или изменений в требованиях.

Этот алгоритм является общим направлением и может быть детализирован в зависимости от конкретных задач и условий моделирования.

### **Заключение**

Эффективный анализ тепловых процессов является ключевым аспектом разработки и эксплуатации радиоэлектронных устройств. Рассмотренные алгоритмы позволяют не только точно моделировать тепловые потоки и распределение температуры в различных конструкциях, но и оптимизировать проектирование с целью повышения надежности и долговечности этих средств.

Современные подходы к математическому моделированию и численному анализу тепловых процессов открывают новые возможности для инжиниринга в области радиоэлектроники. Использование современных программных решений и вычислительных технологий способствует более глубокой интерпретации результатов и их применению на практике. Таким образом, внедрение описанных алгоритмов в процесс проектирования и испытаний позволяет значительно улучшить характеристики радиоэлектронных средств и обеспечить их устойчивую работу в различных условиях эксплуатации.

### Список использованных источников

1. Madera, A., & Kandalov, P. (2020). Thermal Processes in Electronic Equipment at Uncertainty. *Journal of Engineering Thermophysics*, 29(1), 170-180.
2. Мадера, А.Г. Моделирование теплообмена в технических системах. М.: Науч. фонд «Первая исслед. лаб. им. акад. В.А. Мельникова», 2005. – 204 с.
3. Мадера, А.Г. Иерархический метод математического моделирования стохастических тепловых процессов в сложных электронных системах, *Comput. Res. Model.*, 2019, т. 11, № 4 – с. 613–630.
4. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения=Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 54–62.
5. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2020 года: в 3 ч. Ч. 3 / редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2020. – С. 34–37.
6. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2020 года: в 3 ч. Ч. 3 / редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2020. – С. 282–286.
7. Оптимизация теплового режима приемо-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде SolidWorks Flow Simulation / Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Романовский П. С., Стануль А. А. // *Znanstvena misel journal*. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 47–60.
8. Моделирование джоулева нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В.Ф.Алексеев и др. // Доклады БГУИР. - 2018. - № 7(117). - С. 90 - 91.
9. Алексеев, В. Ф. Системный анализ тепловых характеристик при тепловом моделировании = System analysis of thermal characteristics in thermal design / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, К. А. Вериго // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам III Международной открытой научно-практической конференции «Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях» / Воронежский государственный лесотехнический университет. – Воронеж, 2018. – №6(42). – С. 21–22.
10. Алексеев, В. Ф. Численное моделирование тепловых процессов электронных модулей на базе моделей, созданных в Altium Designer и SolidWorks / В.Ф. Алексеев, А.А. Константинов // *Danish Scientific Journal*. – 2018. – Vol.1, No 19. – Pp. 16–30.
11. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.