

## Методика последовательного моделирования тепловых процессов для аппаратуры систем управления: перспективы исследования

*А.А. Калганов<sup>1</sup>, В.Г. Лисиенко<sup>2</sup>, А.П. Калганова<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>АО «НПО автоматики», Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург*

*<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург*

**Аннотация:** Статья представляет собой обзор проблемы обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры ракет-носителей и описывает необходимость разработки методики ресурсоёмкой (с точки зрения вычислительных ресурсов) и точной оценки теплового режима радиоэлектронной аппаратуры. Методика предполагает использование метода конечных элементов и представляет собой последовательное использование программных пакетов «ANSYS» и «АСОНИКА-ТМ» для расчёта температурного поля, возникающего при работе прибора.

**Ключевые слова:** тепловые процессы, теплообмен, система управления, ракета-носитель, метод конечных элементов, МКЭ, АНСИС, АСОНИКА-ТМ, радиоэлектронная аппаратура, РЭА, электрорадиоизделие, ЭРИ.

### Введение

В настоящее время всё актуальнее становится проблема освоения космического пространства. Освоение космического пространства производится с целями научных исследований, покорения новых планет, создания глобальных систем навигации и связи, поиска и освоения полезных ресурсов в космическом пространстве. Для достижения этих целей создана и развивается ракетно-космическая отрасль. Отрасль в ходе своего развития сталкивалась и сталкивается со многими задачами, в частности с задачей создания новых ракет-носителей, предназначенных для выведения полезной нагрузки на околоземную орбиту и способных вывести эту нагрузку с максимальной точностью и минимальными затратами ресурсов.

Процесс создания ракет-носителей связан с необходимостью обеспечения функционирования бортовой аппаратуры систем управления. В условиях технического прогресса происходит рост потребляемой системой управления энергии, что приводит к увеличению тепловой мощности оборудования, а связи с требованиями по уменьшению габаритных размеров приборов происходит гораздо более быстрый их нагрев. Перегрев

---

способствует снижению надёжности, что недопустимо в данной сфере применения, потому что в случае отказа системы управления в полёте ракета-носитель, как и полезная нагрузка, не выполняют возложенные задачи. Наиболее остро проблема становится при выведении на околоземную орбиту пилотируемых кораблей, потому что в данной ситуации подвергаются риску жизни экипажа.

В специализированных изданиях, связанных с исследованиями в области создания ракетно-космической техники, часто встречаются материалы исследований, проводимых в рамках описанной во введении темы. Исследования, как правило, направлены на создание новых либо оптимизацию существующих способов и средств стабилизации теплового режима космических аппаратов. Реже исследования направлены на создание способов и средств предотвращения перегрева либо переохлаждения составных частей ракет-носителей. Это связано со значительно меньшим временем основной работы ракеты-носителя по сравнению с временем основной работы космического аппарата.

В.Ф. Дремин в своём труде «Защита аппаратуры от внешних воздействующих факторов» чётко обозначил актуальность описываемого направления исследований.

Источником теплоты в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) являются различные электрические устройства и радиодетали. Потребляемая радиодетальными электрическая энергия преобразуется в них в электромагнитную, механическую, и другие виды энергии. То есть, часть потребляемой энергии превращается в полезные сигналы, а остальная - в теплоту. Известно, что в блоках, собранных из крупных деталей только от десяти до пятнадцати процентов потребляемой энергии превращается в энергию полезных сигналов.

---

Одним из важнейших первичных факторов, влияющих на тепловой режим РЭА, являются изменение температуры окружающей среды и внешние тепловые потоки, например солнечная радиация. К вторичным факторам относят давление внутри корпуса РЭА, наличие невесомости, влажность, запыленность.

Ракетно-космические РЭА размещаются в герметичных и не герметичных отсеках ракет и космических аппаратов. Различные условия при движении в плотных слоях атмосферы, при полете по околоземным орбитам и в дальнем космосе предъявляют жесткие требования к системе обеспечения теплового режима (минимальные габариты, масса, потребляемая мощность); вакуум, и наличие невесомости еще более усложняют работу этих систем.

Радиодетали и электрорадиоматериалы обладают ограниченной теплостойкостью, т.е. могут нормально работать лишь в заданном диапазоне температур. Причина этого в физических и химических процессах, которые при превышении (или понижении) температуры либо развиваются лавинообразно, либо приводят к усиленному старению материалов [1].

В труде В.Ф. Дремина, а также в других трудах подробно описаны математические основы теплообменных процессов, подтверждающие актуальность описанной выше проблемы [2,3].

Чтобы изначально (на этапе разработки) исключить перегрев аппаратуры нужно в предельно сжатые сроки закладывать определённые конструкторские решения, позволяющие снизить конечную температуру радиоэлементов, входящих в состав бортовой аппаратуры системы управления. При принятии решений также нужно помнить про строго ограниченную максимально возможную массу оборудования, т.е. задача усложняется отсутствием возможности реализации одного из самых эффективных методов охлаждения – жидкостного охлаждения. Исходя из

---

вышеизложенного, следует иметь возможность максимально быстрой и точной оценки температурного режима радиоэлементов.

### **Метод конечных элементов**

Самым точным методом оценки при наземной отработке системы управления является проведение экспериментов с приборами с целью выявления реального температурного поля, установившегося на момент окончания того или иного эксплуатационного режима. В силу высокой стоимости экспериментов, длительности подготовки экспериментальной и технологической базы, ограниченности времени конструкторской разработки проведение экспериментов затруднено.

Температуры радиоэлементов также можно оценить математическими расчётами – методом конечных элементов.

Метод конечных элементов является одним из вариационных методов и часто трактуется как метод Ритца. Область, занимаемая телом, разбивается на конечные элементы. Чаще всего это треугольники и прямоугольники в плоском случае и тетраэдры и параллелепипеды в пространственном. Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещение внутри элемента по перемещениям в узлах, т.е. в местах стыков конечных элементов. За координаты функции принимают функции, тождественно равные нулю всюду, кроме одного конечного элемента, внутри которого они совпадают с функциями формы. В качестве неизвестных коэффициентов метода Ритца берутся узловые перемещения. После минимизации функционала энергии получается алгебраическая система уравнений (так называемая основная система) [4,5].

Метод конечных элементов по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы. Затем между этими элементами каким-либо способом устанавливается

взаимосвязь. Если известны соотношения между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента, то можно описать свойства и исследовать поведение конструкции в целом [6].

Метод конечных элементов реализуется без длительных затрат времени, но предусматривает ряд отклонений и допущений из-за ограниченности вычислительных мощностей. Погрешность расчёта достигает от тридцати до пятидесяти процентов. Точная математическая оценка затруднена из-за объёма вычислений: узкий шаг интегрирования по времени при значительном количестве дифференциальных уравнений (для каждого из нескольких миллионов конечных элементов решается система, состоящая минимум из шести дифференциальных уравнений).

По вопросам моделирования тепловых процессов в исследованиях часто встречаются другие математические методы моделирования. Например, метод конечных разностей или метод термоэлектронной аналогии. В данной работе эти методы не рассматриваются в силу более низкой их точности либо в силу невозможности их применения к радиоэлектронной аппаратуре [7,8].

### **Программные средства расчёта методом конечных элементов**

Сегодня интенсивное развитие большинства отраслей промышленности, а также научно-исследовательской деятельности неразрывно связано с внедрением высокотехнологичных инноваций, основанных, как правило, на использовании современных технологий инженерного анализа. [9].

Широкое распространение получил программный комплекс «ANSYS». Программный комплекс «ANSYS» позволяет проводить вычисления температур методом конечных элементов [10, 11].

В литературе описано значительное количество способов различного задания конечных элементов для моделирования тепловых процессов. В

основной массе, расчёты, проведённые с помощью описываемых способов, менее сложны, более точны и менее ресурсоёмки, чем стандартный расчёт с помощью программного комплекса «ANSYS», но описанные способы могут применяться только при моделировании тепловых процессов относительно простых тел, не обладающих сложной многоуровневой поверхностью. Например, пластины с нанесённым на неё лаковым покрытием. Печатная плата с размещёнными на ней радиоэлементами является сложной поверхностью и требует большого числа конечных элементов для точного расчёта температуры. Следовательно, требуются значительные временные и ресурсные затраты на проведение точного (с точностью до конкретного радиоэлемента) расчёта температур, возникающих в ходе работы стандартного прибора, состоящего минимум из пяти печатных плат [11, 12].

Исходя из вышеизложенного, с помощью программного комплекса «ANSYS» целесообразно проводить укрупнённые расчёты прибора, т.е. расчёты моделей, в которых не задаются конкретные радиоэлементы. Такой расчёт позволяет получить среднемассовую температуру каждой отдельно взятой платы. Также такой расчёт даёт погрешность вычислений от тридцати до пятидесяти процентов за счёт того, что каждый отдельно взятый радиоэлемент имеет локальную (по сравнению со среднемассовой температурой платы) температуру, значительно превышающую среднемассовую температуру платы за счёт малой массы радиоэлемента.

Также широкое распространение получила система «АСОНИКА» (автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры). Система «АСОНИКА» используется в рамках процесса создания радиоэлектронной аппаратуры систем управления для проведения контроля за правильностью применения изделий электронной техники в аппаратуре специального назначения.

---

Одним из модулей системы «АСОНИКА» является программный комплекс «АСОНИКА-ТМ», позволяющий проводить расчёты температур одной автономно рассматриваемой платы. Расчёт с помощью программного комплекса «АСОНИКА-ТМ» позволяет получить конечную температуру каждого отдельно взятого радиоэлемента.

При расчёте с помощью «АСОНИКА-ТМ» не требуется значительных затрат времени и вычислительных ресурсов на машинный расчёт, но возникает проблема обеспечения точности расчёта. Проблема точности расчёта фактически возникает из-за невозможности чёткого задания в «АСОНИКА-ТМ» влияния соседних плат на рассматриваемую, в отличие от значительно более ресурсоёмкого «ANSYS» [1].

### **Заключение**

Анализ литературы и материалов исследований по обозначенной во введении проблеме показывает актуальность вопроса точного математического моделирования тепловых процессов в аппаратуре систем управления ракетами-носителями.

Исходя из специфики процесса разработки систем управления и имеющихся средств оценки температур радиоэлементов можно заключить, что для данной отрасли проблема точного моделирования стоит наиболее остро. В отрасли отсутствуют достаточно мощные вычислительные аппаратные средства, позволяющие проводить вычисления с точными математическими моделями.

Данные обстоятельства служат мотивацией для разработки эффективной методики моделирования тепловых процессов для аппаратуры систем управления, позволяющей с достаточной степенью точности оценить температуру радиоэлементов, достигаемую в ходе работы прибора.

Суть методики – двухступенчатое последовательное математическое моделирование тепловых процессов:

– приближенное моделирование на уровне прибора с применением программного комплекса «ANSYS» с заданием начальных и граничных температур в соответствии с максимально возможной эксплуатационной температурой окружающей среды;

– подробное моделирование на уровне отдельно взятой печатной платы с применением программного комплекса «АСОНИКА-ТМ» для получения средней температуры каждого радиоэлемента, установленного на плате, с заданием начальной и граничной температур, полученных в ходе расчёта с помощью программного комплекса «ANSYS».

Подтверждение точности расчётов по методике планируется проводить путём проведения экспериментов с прибором, для которого выполняется аналитическая оценка по описанной методике.

Исследование актуально для отрасли в рамках создания радиоэлектронной аппаратуры, т.к. результаты приведут к значительному сокращению времени и финансовых затрат на наземную экспериментальную отработку путём замены части экспериментов на точную аналитическую оценку.

### Литература

1. Дремин В.Ф. Защита аппаратуры от внешних воздействующих факторов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 176 с.

2. Аунг Чжо Мью, Анисимов А.А., Портнов Е.М., Гагарина Л.Г. Методика повышения эффективности управления ресурсоемкими задачами в распределенных вычислительных системах // Инженерный вестник Дона, 2020, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6294](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6294).

3. Смирнов Р.Ф., Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в энергосберегающих гелиоустановках // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782).





4. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
5. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. Ленинград: Энергия, 1969. 224 с.
6. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. Москва: Наука, 1975. 226 с.
7. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
8. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров. Москва: Машиностроение, 2004. 513 с.
9. ANSYS verification manual - ANSYS, inc.: Southpoint 275 Technology Drive Canonsburs, PA, 2004. 660 p.
10. ANSYS CFX, Release 10.0: Installation and Overview - ANSYS, inc.: Southpoint 275 Technology Drive Canonsburs, PA, 2005. 2602 p.
11. Modelling of the thermomechanical behaviour of coated structures using single and multi-level-set techniques coupled with the eXtended Finite Element Method / Bencheikh I., Bilteryst F., Nouari M. [et al.] // Finite Elements in Analysis and Design. – 2017. – N 134. – P. 68-81.
12. Thermo-mechanical analysis of friction stir welding processes / Dialami, N., Chiumenti M., Cervera M. [et al.] // Comput. Methods. – 2017. – N 1. – P. 189-225.

### References

1. Dremn V.F. Zashhita apparatury` ot vneshnix vozdeystvuyushhix faktorov [Protection of equipment from external factors]. Ekaterinburg: UrFU, 2011. 176 p.
2. Aung Chzho M'o, Anisimov A.A., Portnov E.M., Gagarina L.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6294.

3. Smirnov R.F., Baxvalov Yu.A.. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782).
4. Bruyaka V.A. Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara: Samar. gos. texn. un-t, 2010. 271 p.
5. Zhukovskij V.S. Osnovy` teorii teploperedachi [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Leningrad: E`nergiya, 1969. 224 p.
6. Kozdoba L.A.. Metody` resheniya nelinejny`x zadach teplovprovodnosti [Methods for solving nonlinear problems of thermal conductivity]. Moskva: Nauka, 1975. 226 p.
7. Fokin V.G. Metod konechny`x e`lementov v mexanike deformiruемого tvyordogo tela [The finite element Method in the mechanics of a deformable solid]. Samara: Samar. gos. texn. un-t, 2010. 131 p.
8. Chigarev A.V. ANSYS dlya inzhenerov [ANSYS for engineers]. Moskva: Mashinostroenie, 2004. 513 p.
9. ANSYS verification manual - ANSYS, inc.: Southpoint 275 Technology Drive Canonsburs, PA, 2004. 660 p.
10. ANSYS CFX, Release 10.0: Installation and Overview - ANSYS, inc.: Southpoint 275 Technology Drive Canonsburs, PA, 2005. 2602 p.
11. Bencheikh I., Bilteryst F., Nouari M. [et al.]. Finite Elements in Analysis and Design. 2017. №134. pp. 68-81.
12. Dialami, N., Chiumenti M., Cervera M. [et al.]. Comput. Methods. 2017. №1. pp. 189-225.