

УДК 004.942

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОНСТРУКТИВОВ ПРИЕМО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Д.А. Боголюбов, Н.С. Кармановский

Рассматривается алгоритм реализации метода конечных разностей для автоматизированного расчета тепловых режимов печатных плат приемо-измерительных модулей, содержащих тепловыделяющие элементы термостабилизации. Рассмотрены сравнительные характеристики разработанного метода с известными типовыми программными продуктами.

Ключевые слова: приемо-измерительные модули, метод конечных разностей, РЭА, САПР.

Введение

Особенностью работы печатных плат приемо-измерительных модулей системы ГЛОНАСС является наличие в них тепловыделяющих элементов (ТЭ), необходимых для стабилизации теплового режима. Поддержание температуры производится пятью нагревательными элементами мощностью по 0,75 Вт, равномерно распределенными по поверхности печатной платы [1]. Это, в свою очередь, требует проведения расчета тепловых режимов с учетом особенностей размещения ТЭ (нагревателей).

На сегодняшний день имеется большое количество программных продуктов, позволяющих произвести анализ тепловых режимов подобных модулей. Вместе с тем существующее программное обеспечение (ПО) не предоставляет требуемой точности расчета печатных плат с ТЭ, имеет значительные системные требования к аппаратным ресурсам САПР и высокую стоимость лицензий для конечных пользователей.

Предлагаемый в работе подход к автоматизации тепловых расчетов реализован в соответствии с классической схемой конечно-разностного анализа [2]. Явные методы решения дифференциальных уравнений при требуемой точности вычислений предполагают выполнение излишне большого числа итераций. Неявные методы позволяют увеличить временной шаг, но вынуждают производить громоздкие вычисления. В работе предложено использовать алгоритм автоматизации расчета тепловых режимов на основе полунявных методов, за счет чего удастся уменьшить объем вычислений и при этом существенно увеличить временной шаг без потери точности. Точность расчета с использованием данного алгоритма может устанавливаться пользователем [3].

Конечно-разностная модель

Программная реализация предложенного метода сводится к автоматизации решения системы дифференциальных уравнений второго порядка. В настоящее время известно несколько способов решения. Для разрабатываемого программного обеспечения был выбран следующий способ.

На первом этапе производим дискретизацию объема печатной платы и ТЭ. Полученные структурные элементы делим на четыре типа:

- внутренние структурные элементы печатной платы;
- внутренние структурные элементы нагревателей;
- структурные элементы платы и нагревателей на границе с окружающей средой;
- структурные элементы на месте контакта нагревателей и платы.

Для расчета элементов первого типа используется решение уравнения вида [4]

$$\frac{U_{i,j,k,n+1} - U_{i,j,k,n}}{\Delta T} = a \frac{U_{i-1,j,k,n} + U_{i+1,j,k,n} + U_{i,j-1,k,n} + U_{i,j+1,k,n} + U_{i,j,k-1,n} + U_{i,j,k+1,n}}{\Delta x}. \quad (1)$$

Здесь a – температуропроводность материала.

Для элементов второго типа используется дифференциальное уравнение по методу Гаусса-Зейделя.

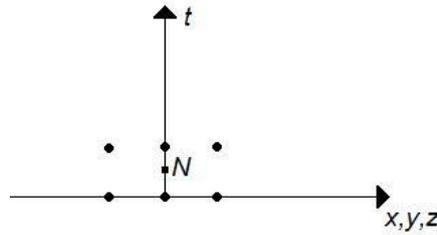


Рис. 1. Точки на плоскости, имеющиеся для решения уравнения данного элемента методом Гаусса-Зейделя

Строится аппроксимация в точке N (рис. 1). Тепловая мощность выделяется в этой точке и обозначается $f_{i,j,k,n+1/2}$ (n – шаг по времени):

$$U_{i,j,k,n+1}^{(p+1)} = \frac{\alpha}{1+3\alpha} (U_{i-1,j,k,n+1}^{(p+1)} + U_{i,j-1,k,n+1}^{(p+1)} + U_{i,j,k-1,n+1}^{(p+1)} + U_{i+1,j,k,n+1}^{(p+1)} + U_{i,j+1,k,n+1}^{(p+1)} + U_{i,j,k+1,n+1}^{(p+1)}) + \frac{1}{1+3\alpha} r_{i,j,k,n} \quad (2)$$

где

$$r_{i,j,k,n} = \frac{\alpha}{2} (U_{i-1,j,k,n} + U_{i+1,j,k,n} + U_{i,j-1,k,n} + U_{i,j+1,k,n} + U_{i,j,k-1,n} + U_{i,j,k+1,n}) + U_{i,j,k,n} + \Delta T \cdot f_{i,j,k,n+1/2},$$

$$\alpha = \frac{a\Delta T}{\Delta x^2}.$$

Свойства элементов третьего типа как граничных с окружающей средой определяются свойствами среды [4]. Это необходимое допущение было сделано для окончательной формулировки граничных условий к задаче.

Для элементов четвертого типа существуют два граничных условия:

$$\begin{cases} U_- = U_+ \\ \lambda_1 \frac{\partial U_+}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial U_-}{\partial y} \end{cases}$$

где U_- , U_+ – тепловые мощности, заданные для контактирующих элементов, λ_1 и λ_2 – теплопроводности материалов контактирующих элементов.

Первое условие в этой системе означает, что U равны для обеих контактирующих поверхностей. Это обусловлено тем, что для решения контактной задачи задается единая сетка для обоих контактирующих слоев.

Производные заменяются на конечные разности. Приближение 1-го порядка:

$$\lambda_1 \frac{U_{i,j_0+1,k-1,n} - U_{i,j_0,k-1,n}}{\Delta x} = \lambda_2 \frac{U_{i,j_0,k_0,n} - U_{i,j_0,k,n}}{\Delta x}, \quad \forall i, k. \quad (3)$$

Направление j перпендикулярно границе раздела сред. В данном случае j_0 – индекс слоя элементов, где проходит граница раздела сред. Заметим, что равенство (3) не зависит от параметров конечно-разностной сетки и не вносит изменений в устойчивость системы.

Затем производится решение по методу последовательной релаксации:

$$U_{i,j_0,k,n+1}^{(p+1)} = U_{i,j_0,k,n+1}^{(p)} + \omega \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} U_{i,j_0,k,n+1}^{(p)} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} U_{i,j_0-1,k,n+1}^{(p+1)} - U_{i,j_0,k,n+1}^{(p)} \right), \quad (4)$$

где ω – коэффициент релаксации. Результатом расчета по указанной методике является получение тепловой мощности и значений перегрева для каждого структурного элемента печатной платы и ТЭ.

Алгоритм реализации метода

Алгоритм разрабатываемого программного обеспечения представлен на рис. 2.

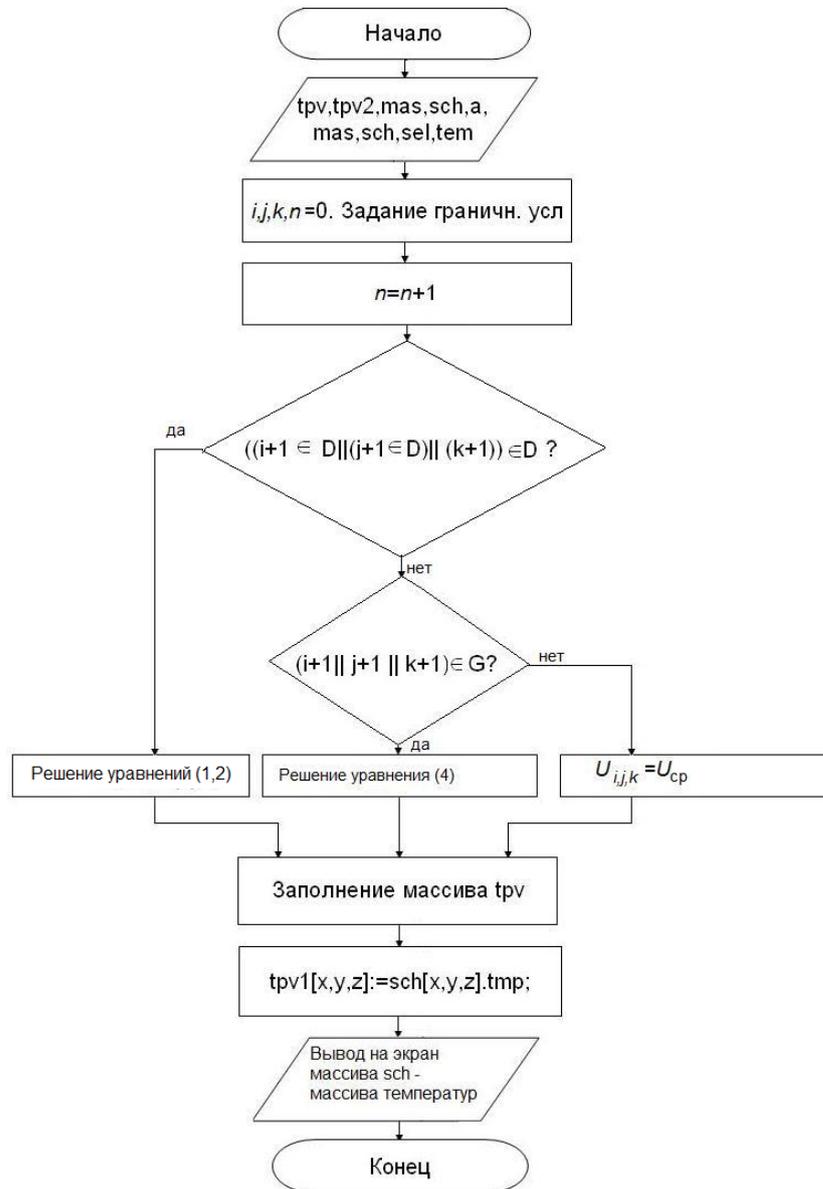


Рис. 2. Алгоритм разрабатываемого программного обеспечения

Отличительной особенностью разрабатываемого программного обеспечения является возможность отслеживания хода расчета, приближенного к режиму реального времени. Пользователь может получать графическое изображение результатов расчета с временным шагом в 1 с и останавливать (приостанавливать) расчет в любой момент времени. Такая возможность не реализуется в известных программных пакетах. Это обусловлено чрезмерными затратами аппаратных ресурсов САПР. Важно отметить, что примененные технологии визуализации реализованы на видеокартах GeForce 4 и анало-

гичных, что позволяет значительно сократить системные требования по сравнению с программами-аналогами.

В частности, глобальные массивы, куда записываются исходные данные, разделены по своим функциям. Один из них (tem) содержит данные исключительно для визуализации процесса расчета (цвета элементов, их координаты и параметр прозрачности), а второй (trv) – данные теплофизической модели (свойства материала, тепловая мощность, температуропроводность). Первый массив рассчитывается с помощью графического сопроцессора, а второй массив – с помощью центрального процессора. Подобное разделение процессов ведет к существенной экономии аппаратных ресурсов и позволяет реализовать заявленную возможность визуализации результатов теплового расчета в режиме, близком к режиму реального времени: шаг, с которым выполняется расчет, может быть равен 10 мс. При расчете с шагом в 100 мс на компьютере на основе одноядерного процессора Celeron с оперативной памятью 512 Мб визуализация результатов реализуется полностью без каких-либо затруднений с возможностью запуска других приложений операционной системы.

Результаты расчетов

При программной реализации данного алгоритма рационально используется объем оперативной памяти. Алгоритм позволяет сократить время расчета тепловых режимов на 10–15 % по сравнению с программами-аналогами.

Используемое в настоящее время ПО не предоставляет требуемую точность расчетов, имеет закрытые исходные коды и алгоритмы, требует значительных вычислительных мощностей. Основные программы-аналоги – SolidWorks/COSMOSWorks, ANSYS, ЛИПА – уступают предлагаемому программному обеспечению по ряду показателей, таких как требования к аппаратным средствам САПР, точность предоставляемых результатов, удобство пользовательского интерфейса. Сравнительный анализ современных программных пакетов был произведен в ходе расчетов тепловых режимов одних и тех же радиоэлектронных блоков. Результаты этого анализа приведены в табл. 1.

Программные продукты	Декларируемая погрешность результатов	Фактическая погрешность результатов	Системные требования
SolidWorks/ COSMOSWorks	3,5 – 17%	11,2 %	2-ядерный ЦП, 2,4 ГГц с 3 Гб ОЗУ
ANSYS	5 – 9%	7,2 %	2-ядерный ЦП, 2,8 ГГц с 4 Гб ОЗУ
ЛИПА	10-14%	13,2 %	2-ядерный ЦП, 1,8 ГГц с 1 Гб ОЗУ
Разрабатываемое ПО	4-7 %	5,7 %	ЦП Celeron, от 2 ГГц с 512 Мб ОЗУ

Таблица 1. Сравнительный анализ программных продуктов автоматизации тепловых расчетов

Декларируемая погрешность рассматриваемых САПР соответствует значениям, приведенным в официальной документации к программным пакетам. Фактическая погрешность результатов расчетов приведена на примере расчетов шести модулей, а также климатических испытаний. Из табл. 1 видно, что погрешность расчетов в рассматриваемых программах сравнительно невелика. Программный пакет ANSYS соответствует требованиям по погрешности расчета тепловых режимов, предъявляемых ОСТ 4-Г0.012.221-78. Однако из-за перегруженности пользовательского интерфейса и несовершенства применяемых алгоритмов ANSYS имеет несоизмеримо большие системные

требования к аппаратным средствам САПР по сравнению с разрабатываемым ПО. Стоимость лицензии для юридических лиц продукта ANSYS Mechanical, предоставляющего неполную функциональность CAD/CAE систем, составляет от 50 000 руб. за установку на одно рабочее место.

Ввиду необходимости установки САПР тепловых расчетов не менее чем на 5 рабочих мест представляется очевидной экономическая выгода от предлагаемого ПО. Оно свободно от излишней функциональности и обладает большей гибкостью вследствие открытых алгоритмов и программного кода, которые могут быть скорректированы в зависимости от конкретной поставленной задачи. Основные требования к функциональности разрабатываемого программного обеспечения заключаются в следующем:

1. возможность выполнения расчетов как стационарного состояния, так и переходного процесса;
2. обеспечение общей погрешности расчета в пределах 10%;
3. возможность контроля за ходом расчета в режиме реального времени или приближенном к реальному времени с шагом не более 5 с.

Апробация программы произведена на примере расчета приемо-измерительного модуля (рис. 3), содержащего 5 ТЭ мощностью 0,75 Вт. Размер модуля 155×210×12 мм. Рабочая температура составила минус 10°С, начальная температура – минус 40°С.

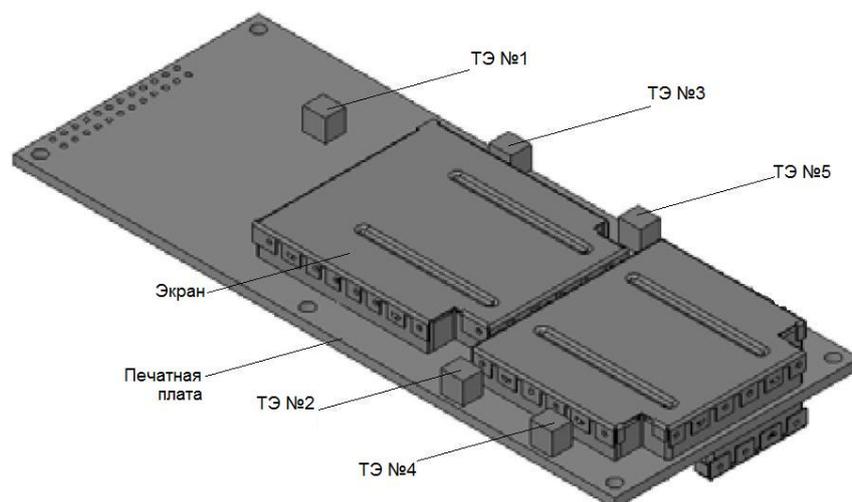


Рис. 3. Плата приемо-измерительного модуля

Результаты теплового расчета приемо-измерительного модуля через 8 минут после включения обогрева приведены в табл. 2.

Программный продукт	Средняя температура под экраном	Температура нагревательного элемента № 1	Температура нагревательного элемента № 2	Температура нагревательного элемента № 4
SolidWorks/ COSMOSWorks	-16,0 (21%)	-14,9 (24%)	-12,9 (20%)	-12,6 (19%)
ANSYS	-10,6 (3%)	-8,2 (3%)	-7,6 (4%)	-7,7 (4%)
ЛИРА	-13,1 (11%)	-3,0 (12%)	-2,8 (10%)	-2,7 (11%)
Разрабатываемое ПО	-8,8 (3%)	-5,5 (5%)	-5,1 (3%)	-5,2 (3%)
Климатические испытания	-9,74	-7,11	-6,12	-6,26

Табл. 2. Результаты расчета тепловых режимов приемо-измерительного модуля, °С

В табл. 2 в скобках приведено отклонение расчетных значений от результатов климатических испытаний приемо-измерительного модуля. Из этих данных следует, что в ходе выполнения расчетов разрабатываемое программное обеспечение показало уровень программной погрешности, сопоставимый с ПО ANSYS. Итоговый уровень программной погрешности составил 3–5 %, что укладывается в интервал погрешности расчета, приведенный в табл. 1.

Заключение

За счет оптимизации взаимодействия программы с оперативной памятью (табл. 1) достигается значительная экономия аппаратных ресурсов по сравнению с аналогичными программными комплексами. В частности, SolidWorks 2010 потребовало для осуществления подобных циклов расчетов 3 Гб оперативной памяти на модели приемо-измерительного модуля, тогда как разрабатываемое программное обеспечение функционирует при наличии в компьютере модуля оперативной памяти объемом 512 Мб. Время проведения расчетов при этом сопоставимо у обеих программ. Было установлено, что при использовании оперативной памяти большего объема (1 Гб) экономия времени составила 12%.

В настоящее время данная программная разработка представляется актуальной и перспективной, и в ближайшее время планируется провести дополнительную корректировку алгоритма для дальнейшего уменьшения требований к аппаратным средствам САПР и расширения функциональности программы. Разрабатываемое ПО может стать системой поддержки принятия решений на всех этапах проектирования подобных модулей.

Литература

1. Боголюбов Д.А., Кармановский Н.С. Исследование тепловых режимов различных радиоэлектронных конструктивов с помощью системы COSMOSWorks // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 234–238.
2. Копысов С.П., Пономарев А.Б., Рынков В.Н. Открытое визуальное окружение для взаимодействия с геометрическими ядрами, генерации / перестроения / разделения сеток и построения расчетных моделей // Труды Всероссийской конференции «Прикладная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления». – М.: ВЦ РАН, 2004. – Т. 2. – С. 154–164.
3. Баранов Л.Б. Актуальные вопросы технологии современных САПР // Труды Всероссийской конференции «Прикладная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления». – М.: ВЦ РАН, 2004. – Т. 2. – С. 131–142.
4. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.

Боголюбов Данила Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, astenias@mail.ru

Кармановский Николай Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, karmanov50@mail.ru