

УДК 004.942: 53

М.П. Сухоруков

Математические модели радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата

Исследована возможность использования общепризнанных подходов и методов для разработки упрощенной модели унифицированного электронного модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Проведено численное моделирование тепловых и механических режимов функционирования УЭМ КА. Показана эффективность математического упрощения в сравнении с геометрическим.

Ключевые слова: численное моделирование, подробная модель, упрощенная модель, бортовая радиоэлектронная аппаратура, космический аппарат.

Актуальность. Обеспечение длительного срока активного существования космических аппаратов (КА) является важнейшей научной, инженерной и экономической задачей. Эта задача может быть решена с применением современных систем численного моделирования, которые в свою очередь могут оценить работоспособность разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Унифицированный электронный модуль (УЭМ) представляет собой конструктивно-законченный узел, имеющий жесткие ограничения по массе, габаритам, потребляемой мощности и разрабатываемый с применением серийных компонентов промышленного и космического назначений.

Подробная математическая модель [1] унифицированного электронного модуля (УЭМ) бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического аппарата (КА) (рис. 1) для проведения анализа тепловых и механических режимов работы включает в себя множество геометрических элементов: несущие конструкции 1-го и 2-го уровней, средства коммутации, металлизацию переходных отверстий, проводящий рисунок, электрорадиоизделия (ЭРИ), припой, слой клея, лака и т.д.

Для учета вышеперечисленного количества элементов модели УЭМ при численном моделировании требуется построение подробной расчетной сетки, что ведет к увеличению времени расчета.

Поэтому является актуальной задача построения упрощенных математических моделей, которые позволят обеспечить сокращение вычислительных ресурсов, необходимых для проведения анализа тепловых и механических режимов работы УЭМ, что как следствие приведет к:

- возможности проработки большего числа вариантов конструкции УЭМ;
- уменьшению технического риска отказов электронного оборудования при реализации передовых решений (проектных, конструктивных, технологических);
- сокращению времени проведения расчетов и как следствие сокращению сроков разработки УЭМ и бортовой РЭА в целом.

Рассматриваемые подходы к созданию упрощенных моделей базируются на общепризнанных методах и подходах [2–4], оказывающих влияние на результаты расчетов в допустимых пределах точности, таких как:

- **физическое упрощение:** исключение из рассмотрения зависимости физических процессов, характеристик материалов модели УЭМ от температуры, времени, пространственных координат; интеграция (группировка) нескольких идентичных (схожих) по тепловым и механическим, надежностным (долговечность) характеристикам элементов конструкции УЭМ в одно целое; исключение

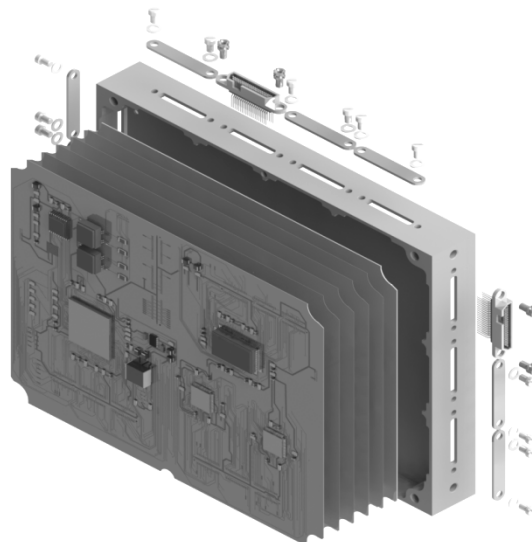


Рис. 1. Подробная модель УЭМ

из рассмотрения некоторых начальных и граничных условий: саморазогрев проводника при протекании электрического тока, тепловыделения отдельных ЭРИ и др. Физическое упрощение может сопровождаться геометрическим и математическим упрощениями;

– **геометрическое упрощение:** игнорирование мелких деталей, а также отверстий, скруглений и фасок;

– **математическое упрощение:** контроль сеточных элементов (генерация параллелепипедов); контроль за плотностью сетки (максимальные, минимальные размеры граней, поверхностей геометрии, конечных элементов расчетной сетки и др.); применение вместо твердотельных оболочечных моделей.

Физические упрощения зачастую не приводят к уменьшению количества узлов расчетной (конечно-элементной) сетки, однако позволяют сократить время подготовки модели к расчету и время его выполнения за счет сокращения количества факторов и переменных задачи.

Для определения наиболее эффективного подхода к созданию упрощенной математической модели было проведено численное моделирование тепловых и механических режимов функционирования УЭМ КА с использованием 4 упрощенных моделей УЭМ и последующим сравнением с подробной моделью (Модель № 1):

– Модель № 2 – геометрическое упрощение: объединение, игнорирование мелких деталей, таких как фаски, отверстия, скругления;

– Модель № 3 – математическое упрощение: изменение плотности сетки;

– Модель № 4 – геометрическое и математическое упрощения, а именно изменение плотности сетки;

– Модель № 5 – геометрическое и математическое упрощения, а именно выбор формы сеточных элементов.

Стоит отметить, что при создании упрощенной модели № 5 использовался метод протяжки (метод Sweep) [4], так как этот метод позволяет создавать регулярные сетки и добиваться лучшей схожести расчетных результатов.

Проверка адекватности и достоверности моделей УЭМ проведена путем сопоставления результатов расчета. Для этого был проведен анализ тепловых и механических (напряженно-деформированных состояний) режимов работы.

Уравнение теплового анализа в самом общем случае записывается следующим образом [4]:

$$[C] \cdot T' + [K] \cdot T = Q(t, T), \quad (1)$$

где $[C]$ – матрица удельной теплоемкости; T' – первая производная температуры по времени; $[K]$ – матрица теплопроводности; T – температура; Q – вектор скорости генерации тепла в системе; t – время.

Уравнение движения (перемещения) конструкции УЭМ в общем виде [1]

$$[M] \cdot x'' + [C] \cdot x' + [K] \cdot x = F(t), \quad (2)$$

где $[M]$ – матрица масс; $[C]$ – матрица демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости; x – перемещение; x'' , x' – первая и вторая производные перемещения по времени, соответственно; F – сила.

Для реализации условий эксплуатации УЭМ необходимы следующие типы граничных условий: температура – для задания температуры от термостабильной плиты (граничное условие I рода) и радиационный теплообмен (граничное условие III рода).

При задании начальных условий считаем, что температура конструкции УЭМ в начальный момент времени распределена равномерно.

При создании упрощенных моделей было введено физическое упрощение: отсутствует зависимость физических процессов от времени (замена нестационарных режимов – стационарным).

В стационарном уравнении теплового анализа все изменяющиеся со временем параметры исключаются, однако допустимыми являются нелинейные эффекты. С учетом сказанного уравнение (1) преобразуется в уравнение

$$[K] \cdot T = Q(T). \quad (3)$$

В стационарном уравнении движения (2) все зависящие от времени слагаемые равны нулю

$$[K] \cdot x = F. \quad (4)$$

Матричное уравнение в стационарном уравнении движения решается относительно перемещений x .

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился на основании результатов теплового анализа и условий механического закрепления УЭМ при размещении на термостабильной плите в составе бортовой РЭА КА.

Критериями сравнения явились: количество узлов расчетной сетки, результаты теплового анализа, результаты анализа напряженно-деформированного состояния.

Число узлов (N) расчетных сеток для разработанных моделей представлено на рис. 2.

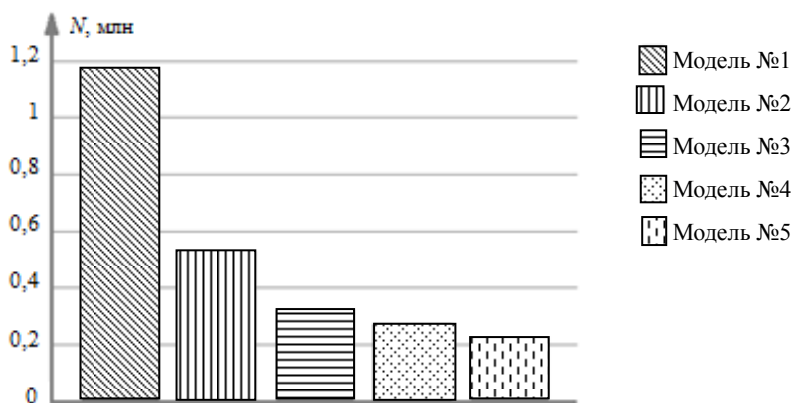


Рис. 2. Количество узлов расчетной сетки

На основании полученных данных было проведено сравнение результатов анализов, полученных при использовании упрощенных моделей, с результатами анализов подробной модели (табл. 1, 2).

Таблица 1

Сравнения расчетов (разница результатов)

Показатель	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4	Модель № 5
Максимальная температура, °С	0,1028	0,0051	0,0921	0,1061
Максимальная деформация (перемещения), мм	0,028	0,002	0,027	0,031
Максимальное напряжение, МПа	5	22	5,5	4,3

Таблица 2

Сравнения расчетов (относительная погрешность)

Показатель	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4	Модель № 5
Максимальная температура, %	4,57	0,0022681	4,09	4,72
Максимальная деформация (перемещения), %	0,5110	0,0365	0,4927	0,5657
Максимальное напряжение, %	2	8,96	2,24	1,75

Анализ табл. 1, 2 показал, что наиболее эффективным упрощением является математическое (модель № 3). Но при использовании только математического упрощения для механического (напряженно-деформированного) анализа наблюдается резкое увеличение расхождения между результатами анализа подробной и упрощенной моделей. Это объясняется тем, что для описания, к примеру, фасок, отверстий, скруглений необходимо большое количество узлов, и уменьшение числа узлов приводит к увеличению ошибки расчетов в этих местах.

Данную проблему можно решить совместным использованием математического и геометрического упрощений, что подтверждают результаты, полученные при использовании моделей № 4, 5.

Заключение. Проведен анализ общепризнанных подходов применительно к разработке упрощенных моделей УЭМ.

На основании анализа был реализован ряд моделей с учётом особенностей конструкции и условий эксплуатации УЭМ.

На основании построенных численных подробной и упрощенной моделей проведено компьютерное моделирование тепловых и механических режимов работы УЭМ.

Результаты анализа тепловых и механических режимов работы УЭМ показали эффективность математического упрощения в сравнении с геометрическим, а также резкое увеличение расхожде-

ния между результатами механического анализа подробной и упрощенной моделями, что свидетельствует о целесообразности совместного использования математического и геометрического упрощения.

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 г. №02.G25.31.0042.

Литература

1. Сунцов С.Б. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния унифицированного электронного модуля / С.Б. Сунцов, В.М. Карaban, М.П. Сухоруков, Е.А. Морозов // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9–3. – С. 120–125.
2. Сухоруков М.П. Разработка упрощенных моделей электрорадиоизделий с гибкими выводами для механического анализа // X Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире». – СПб. – 2015. – Т. 1. – С. 99–102.
3. Карaban В.М. Математические модели многослойных печатных плат для теплового моделирования электронных устройств и систем / В.М. Карaban, М.П. Сухоруков, Е.А. Морозов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3(29). – С. 170–174.
4. Сухоруков М.П. Численное моделирование собственных частот радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата // Вестник Том. гос. ун-та. Математика и механика. – 2015. № 4(36). – С. 93–100.
5. Сунцов С.Б. Создание упрощенной тепловой модели унифицированного электронного модуля / С.Б. Сунцов, В.М. Карaban, М.П. Сухоруков, Е.А. Морозов // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9–3. – С. 114–119.

Сухоруков Максим Петрович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 90-01-06
Эл. почта: max_sukhorukov@mail.ru

Sukhorukov M.P.

Approaches to the development of simplified mathematical models of spacecraft electronics

We have studied the possibility of using the generally accepted approaches and methods to develop a simplified model of a unified electronic on-board module electronics for the spacecraft. Numerical simulation of thermal and mechanical operating modes of UEM spacecraft. It revealed the most optimal approach to simplification.

Keywords: numerical modeling, detailed model, simplified model, on-board radioelectronic equipment, space vehicles.