

УДК 004.94

DOI 10.17223/19988621/36/11

М.П. Сухоруков**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА¹**

Представлены результаты численного моделирования собственных частот бортовой радиоэлектронной аппаратуры в соответствии с реальными условиями работы. Исследованы и разработаны упрощенные модели электрорадиоизделий, позволяющие сократить число элементов и узлов конечно-элементной модели при сохранении точности результатов. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, собственные частоты, подробная модель, упрощенная модель, конечно-элементная модель, бортовая радиоэлектронная аппаратура, космический аппарат.

Актуальность

Развитие многофункциональных компьютерных систем, согласованно выполняющих объемное конструирование и инженерные расчеты, позволяет на этапе проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) определять собственные (резонансные) частоты, осуществляя проверку наличия резонансных частот в рабочем частотном диапазоне изделия и оптимизируя конструкцию таким образом, чтобы исключить возникновение резонансов и повысить надежность вновь создаваемого изделия.

В связи с активным внедрением в инженерную практику вычислительной техники, наиболее эффективным приближенным методом решения прикладных задач механики является метод конечных элементов, реализованный во многих программных средствах.

Однако РЭА КА представляет собой сложную геометрическую модель, для описания которой требуется конечно-элементная модель большой размерности, что приводит к значительному увеличению временных и аппаратных ресурсов для проведения численного моделирования, а порой становится и вовсе невозможным из-за малых вычислительных мощностей конструкторских подразделений.

Актуальной задачей поэтому является повышение эффективности механического анализа по определению собственных частот за счет исследования и разработки упрощенных математических моделей.

Постановка задачи

Целью модального анализа является определение собственных частот и форм колебаний конструкции. Также модальный анализ может быть первым шагом для других видов динамического анализа, таких, как анализ переходных процессов, гармонический и спектральный анализ. Модальный анализ предполагает, что сис-

¹ 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.

тема является линейной. Все виды нелинейности – нелинейное поведение материала, контактные граничные условия, конечные перемещения – игнорируются.

Уравнение свободных колебаний является частным случаем общего уравнения движения

$$[M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \Rightarrow [M]\{x''\} + [K]\{x\} = 0, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс; $[C]$ – матрица демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости; $\{x\}$ – перемещение; $\{x'\}$, $\{x''\}$ – первая и вторая производные перемещения по времени; $\{F\}$ – сила; t – время.

Модальный анализ имеет ряд допущений:

- расчет производят без учета динамических нагрузок;
- принимается линейное упругое поведение материалов;
- используется теория малых деформаций, не учитываются нелинейные эффекты;
- матрица $[C]$ отсутствует, значит, не учитываются эффекты демпфирования;
- вектор сил $\{F\}$ отсутствует, значит, не рассчитывается возбуждение конструкции внешними силами;
- форма свободных колебаний вычисляется в относительных единицах и не позволяет определять абсолютные смещения.

Для линейной системы свободные колебания являются гармоническими и могут быть записаны в виде

$$\{x\} = \{\varphi_i\} \cos(\omega_i t), \quad (2)$$

где φ_i – i -й собственный вектор, представляющий форму (моду) колебаний на i -й собственной частоте, ω_i – i -я собственная круговая частота (радиан в единицу времени).

Подставив уравнение 2 в 1, получаем

$$(-\omega_i^2 [M] + [K])\{\varphi_i\} \cos(\omega_i t) = 0.$$

Собственные частоты и формы колебаний можно найти из уравнения

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\varphi_i\} = 0.$$

В данной работе приведен расчет свободных колебаний без учета предварительных напряжений, однако возможно проведение анализа с учетом предварительного напряженного состояния (конструкционные и/или термические нагрузки).

Согласно условиям эксплуатации, конструкция бортовой РЭА считается жестко закрепленной [1]. Жесткое закрепление: ограничивает все степени свободы выбранных вершин, ребер, поверхностей: для твердых тел исключает линейное перемещение в направлениях x , y , z . Для поверхностных и линейных тел исключает линейное перемещение в направлениях x , y , z и вращательное перемещение относительно x , y , z .

Поставленная задача решена методом конечных элементов в специализированном программном обеспечении ANSYS Workbench.

Разработка упрощенных моделей

Разработка и исследование упрощенных моделей проводилось на конструкции системы автономной навигации (САН) для КА всех типов орбит. САН представляет собой конструктивно-законченный узел, учитывающий жесткие ограничения по габаритам, массе и потребляемой мощности с применением серийных компонентов промышленного и военно-космического назначения.

Создание упрощенных моделей базировалось на общепризнанных методах и подходах [2–7], оказывающих влияние на результаты расчетов в допустимых пределах, таких как:

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

- *физическое упрощение*: исключение из рассмотрения зависимости физических характеристик материалов модели конструкций бортовой РЭА от времени, пространственных координат; интеграция (группировка) нескольких идентичных (схожих) по механическим характеристикам конструкций в одно целое. Физическое упрощение может сопровождаться геометрическим.

- *математическое упрощение*: контроль сеточных элементов; управление плотностью сетки (максимальные, минимальные размеры граней, поверхностей геометрии, конечных элементов расчетной сетки и др.).

Принятое физическое упрощение: характеристики материалов считаются изотропными. Это допущение обоснованно, так как для большинства материалов типична изотропия физических характеристик.

Принятое геометрическое упрощение: в несущей конструкции 2-го уровня проигнорированы монтажные отверстия. Это допущение внесет незначительную погрешность, но при этом позволит в значительной степени сократить число элементов и узлов конечно-элементной модели.

Исходные геометрические модели ЭРИ обладают высокой степенью детализации, что при последующем проведении расчетов приводит к увеличению размерности конечно-элементной модели. Поэтому проведение упрощения моделей ЭРИ, при сохранении адекватности результатов, позволит в большей степени сократить число элементов и узлов расчетной сетки.

Основным преимуществом упрощенных моделей ЭРИ вместо полных является простота геометрического представления. Это особо важно для моделирования бортовой РЭА, которая содержит десятки и сотни ЭРИ различного типа.

Задачей упрощения ЭРИ является нахождение таких моделей, которые будут оказывать на печатную плату воздействие, максимально приближенное к полным моделям.

Несмотря на то, что в элементах САН плата крепится на металлическую теплоотводящую пластину, для проверки адекватности упрощения моделей ЭРИ использовалась только пластина стеклотекстолита размером 30×30 мм и толщиной 1.5 мм. Таким образом, система моделирования становится более подверженной влиянию ЭРИ, что дает возможность более точного сравнения характеристик полной и упрощенной модели.

Анализ элементной базы САН показал, что в соответствии с требованиями к установке, формовке выводов и методами крепления элементов, ЭРИ можно разделить на следующие типы:

- 1) выводные элементы без дополнительного крепления корпуса;
- 2) выводные элементы с дополнительным креплением корпуса;
- 3) элементы с матрицей шариковых или столбиковых выводов;
- 4) безвыводные элементы с креплением на пайку металлизированных поверхностей;
- 5) безвыводные элементы с креплением на пайку металлизированных поверхностей и креплением на клей корпуса.

В качестве примера объекта исследования выбрана микросхема в корпусе 401.14-5.

При исследовании рассматривались три типа упрощенных моделей:

- модель одиночного корпуса (без выводов), рис. 1, б;
- габаритная модель корпуса ЭРИ, рис. 1, в;
- модель распределенной массы по габаритной площади корпуса, рис. 1, г.

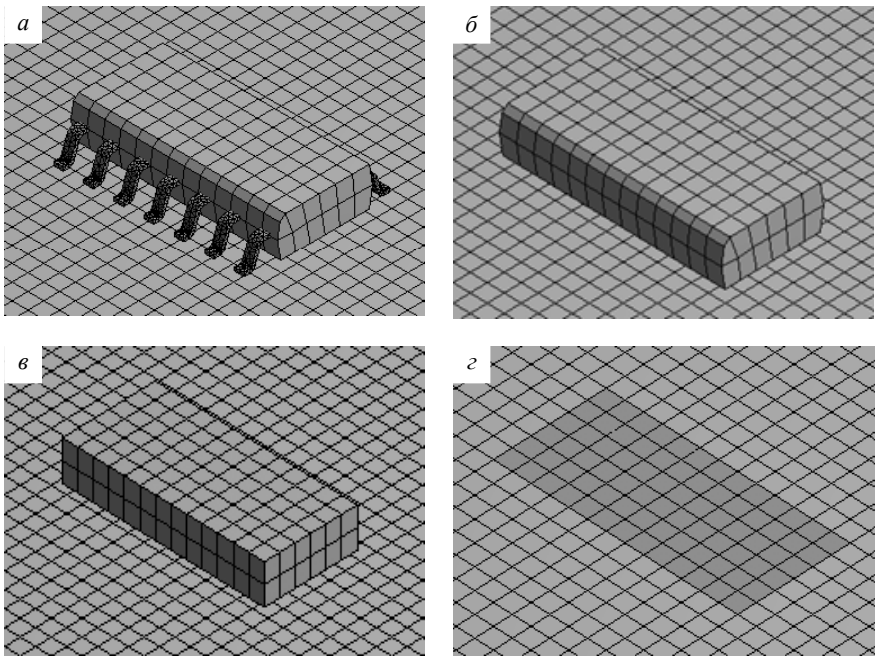


Рис. 1. Варианты моделирования ЭРИ: а – подробная геометрическая модель; б – модель одиночного корпуса; в – габаритная модель; г – модель распределенной массы по габаритной площади корпуса

В качестве основных результатов модального анализа приведены первые собственные частоты, время счета и количество разбиений модели (табл. 1).

Таблица 1

Результаты модального анализа моделей ЭРИ

Модели	Подробная геометрическая модель	Модель одиночного корпуса	Габаритная модель	Модель распределенной массы
Количество элементов	8868	4206	3466	4699
№ собственной частоты	Частота, Гц			
1	4889	4895	4883	4811
2	13565	13574	13565	13640
3	13778	13812	13803	13845
4	18064	18026	18034	17692
5	26534	26510	26330	25789
6	26819	26882	26729	26768
Время счета, с	13.1	7.3	6.4	7.8

Расхождение собственных частот упрощенной и подробной моделей приведено в табл. 2.

Таблица 2

Расхождение собственных частот упрощенной и полной модели (%)

Собственная частота	Модель одиночного корпуса	Габаритная модель	Модель распределенной массы
1	0.122	0.122	1.595
2	0.066	0.000	0.552
3	0.246	0.181	0.486
4	0.210	0.166	2.059
5	0.090	0.766	2.807
6	0.234	0.335	0.190

Сравнение результатов моделирования показывает, что наличие, расположение и формовка выводов ЭРИ не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на параметры взаимодействия с модельной платой. Следовательно, ЭРИ, имеющие большую контактную площадь корпуса, даже при наличии большого количества мелких выводов могут быть упрощены всеми моделями.

Исследование показало, что наиболее выгодными с точки зрения времени счета являются габаритная модель и модель распределенной массы. Стоит отметить, что габаритная модель имеет преимущество по точности по сравнению с другими моделями.

Для разработанной упрощенной модели конструкции САН была построена конечно-элементная модель (см. рис. 1).

Результаты моделирования

Результаты модального анализа конструкции элементов САН для наиболее значимых частот представлены на рис. 2 – 4.

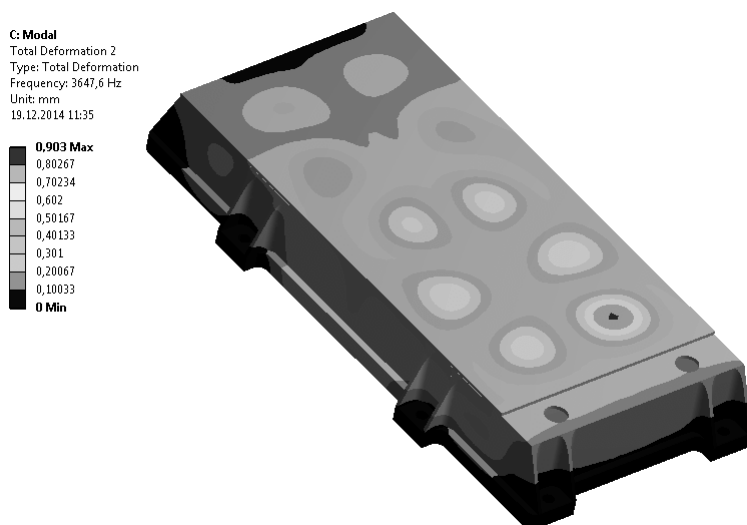


Рис. 2. Деформация (перемещения) элементов САН по оси x на частоте 3647.61 Гц (18-я мода)



Рис. 3. Деформация (перемещения) элементов САН по оси y на частоте 4116.7 Гц (22-я мода)



Рис. 4. Деформация (перемещения) элементов САН по оси z на частоте 2750 Гц (11-я мода)

Согласно результатам численного моделирования, частота для первой моды – 1158.2 Гц, для второй – 1349.3 Гц, для третьей – 1467.5 Гц, что соответствует требованиям эксплуатации, заявленным в техническом задании на изделие (собственные частоты должны быть не менее чем 150 Гц).

Примечание: значения напряжений и деформаций в модальном анализе не являются информативными.

Выводы

1. Проведено компьютерное моделирование и получены собственные частоты конструкции бортовой РЭА КА.

2. Применение разработанных упрощенных моделей позволило сократить число узлов конечно-элементной сетки в 1.68 раза (с 637180 до 379274), элементов в 1.57 раза (с 338278 до 215464).

3. Согласно результатам компьютерного моделирования, доминирующей частотой по оси x является частота 3647.6 Гц (колеблется 63 % массы конструкции); по оси y – 4116.7 Гц (колеблется 37.72 % массы конструкции); по оси z – 2750 Гц (колеблется 20.16 % массы конструкции).

4. Колебания оставшейся массы конструкции САН распределено в пределах от 1158 до 10160 Гц, что соответствует требованиям эксплуатации, заявленным в ТЗ (собственные частоты должны быть не менее чем 150 Гц).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сунцов С.Б., Карабан В.М., Сухоруков М.П., Морозов Е.А. Численное моделирование напряженно деформированного состояния унифицированного электронного модуля // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 120–125.
2. Armstrong C., McKeag R., Ou H., Price M.A. Geometric processing for analysis // Proceedings of Geometric Modeling and Processing. 2000. P. 45–56.
3. Bronsvoort W., Bidarra R., Nyirenda P. Developments in feature modelling // Computer-Aided Design & Applications. 2006. No. 5. P. 655–664.
4. Lee S.H. Feature-based multiresolution modeling of solids // ACM Transactions on Graphics. 2005. No. 4. P. 1417–1441.
5. Lee S.H. Feature-based multi-resolution and multi-abstraction non-manifold modeling system to provide integrated environment for design and analysis of injection molding products / Sang Hun Lee, Kunwoo Lee, Kyu-Yeol Lee // Computers & Graphics. 2006. No. 3. P. 232–241.
6. Сунцов С.Б., Карабан В.М., Сухоруков М.П., Морозов Е.А. Создание упрощенной тепловой модели унифицированного электронного модуля // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 114–119.
7. Rezayat M. Midsurface abstraction from 3D solid models: general theory and applications // Computer-Aided Design. 1996. No. 28. P. 905–915.

Статья поступила 12.02.2015 г.

Sukhorukov M.P. NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL FREQUENCIES OF THE SPACECRAFT RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

DOI 10.17223/19988621/36/11

The work presents results of numerical modeling of natural frequencies of onboard avionics in accordance with the actual conditions of operation. Simplified models of electric articles that reduce the number of elements and nodes of the finite element model are researched and developed with maintaining the accuracy of the results. The results of the simulation are presented.

Keywords: numerical modeling, natural frequencies, detailed model, simplified model, finite element model, onboard avionics, spacecraft.

SUKHORUKOV Maxim Petrovich (Graduate, Research Institute of Space Technology, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: Max_sukhorukov@mail.ru

REFERENCES

1. Suntsov S.B., Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A. Chislennoe modelirovanie napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya unifitsirovannogo elektronnoy modulya. *Izv. vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 9/3, pp. 120–125. (in Russian)
2. Armstrong C., McKeag R., Ou H., Price M.A. Geometric processing for analysis. *Proceedings of Geometric Modeling and Processing*, 2000, pp. 45–56.
3. Bronsvoort W., Bidarra R., Nyirenda P. Developments in feature modelling. *Computer-Aided Design & Applications*, 2006, no. 5, pp. 655–664.
4. Lee S.H. Feature-Based Multiresolution Modeling of Solids. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, no. 4, pp. 1417–1441.
5. Lee S.H. Feature-based multi-resolution and multi-abstraction non-manifold modeling system to provide integrated environment for design and analysis of injection molding products / Sang Hun Lee, Kunwoo Lee, Kyu-Yeol Lee. *Computers & Graphics*, 2006, no. 3, pp. 232–241.
6. Suntsov S.B., Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A. Sozdanie uproszhchennoy teplovoy modeli unifitsirovannogo elektronnoy modulya. *Izv. vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 9/3, pp. 114–119. (in Russian)
7. Rezayat M. Midsurface abstraction from 3D solid models: general theory and applications. *Computer-Aided Design*, 1996, no. 28, pp. 905–915.