

СЕКЦІЯ 5

Авіаційна та ракетно-космічна
техніка

УДК 004.94 : 629.78

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НАНОСПУТНИКА POLYITAN-2 –SAU НА ЭТАПЕ ВЫВЕДЕНИЯ

Цыбенко А.С., Рассемакин Б.М., Рыбалка А.А., Шокрута Н.С.
КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Анотация: Для разработанной конструкции НС PolyItan-2-SAU в работе построена рациональная комбинированная КЭМ, содержащая объемные, оболочечные, балочные и контактные КЭ. Расчетным путем, на основе единой КЭМ определены амплитудно-частотные характеристики и параметры НДС в конструктивных элементах PolyItan-2-SAU при действии квазистатических перегрузок, гармонических и случайных вибраций, отвечающих этапу выведения. Установлено, что в соответствии с предъявляемыми требованиями рассматриваемая конструкция PolyItan-2-SAU является рациональной с точки зрения прочности

Ключевые слова: прочностные характеристики, наноспутник, PolyItan-2-SAU, амплитудно-частотные характеристики

Наноспутник (НС) PolyITAN-2-SAU разработан в Национальном техническом университете Украины “Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского” в рамках международного космического проекта QB50 под общей координацией Института гидродинамики фон Кармана (Бельгия).

Одним из важнейших этапов при проектировании и наземной отработке является задача обеспечения прочности НС на разных этапах его жизненного цикла, включающая комплексный расчетно-экспериментальный анализ динамики и прочности НС.

Основным и наиболее ответственным с точки зрения действующих на НС механических нагрузок, является этап выведения на орбиту. На данном этапе НС испытывает максимальные квазистатические перегрузки, гармонические и случайные вибрации, импульсные и акустические воздействия [1-4].

Цель исследования – расчетный анализ динамики и прочности НС POLYITAN-2-SAU на этапе выведения.

Постановка задачи

3D модель POLYITAN-2-SAU содержит несущий каркас в форме пространственной рамы, на которой размещены: научный модуль, модуль системы ориентации и стабилизации (СОС), обшивка, электронная платформа (ЭП), антенный блок. Модуль СОС состоит из массивного маховика с электроприводом, управляющей платы и двух кронштейнов, с помощью которых осуществляется крепление к несущему каркасу. ЭП содержит пять электронных плат, три аккумуляторных батареи и четыре наборные стойки для сочленения и крепления к несущему каркасу. Габаритные размеры 3D модели - 100×100×227 мм, расчетная масса - 1.8 кг.

Материал несущего каркаса и элементов крепления СОС - алюминиевый сплав Д16, антенного модуля и элементов ЭП - алюминиевый сплав АМг6, наборных стоек ЭП - латунь Л63, электронных плат - стеклотекстолит КАСТ-В.

Некоторые физико-механические характеристики конструкционных материалов НС приведены в табл.1, где: E – модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; σ_T – предел текучести; σ_σ – предел прочности.

Таблица 1

Физико-механические свойства используемых в НС изотропных конструкционных материалов

Материал	E , МПа	ν	ρ , кг/м ³	σ_T , МПа	σ_σ , МПа
АМг6	71000	0.3	2640	145	305
Д16	72000	0.3	2770	260	382
Л63	116000	0.35	8440	-	290

Для материала КАСТ-В: $E=2100$ МПа, $\nu = 0.11$, $\rho =1800$ кг/м³, пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно $\sigma_p^\sigma = 85$ МПа, $\sigma_{сж}^\sigma = 130$ МПа.

На этапе запуска НС расположен в пусковом контейнере системы выведения Р-РОD ракеты-носителя. Нижними торцами НС опирается на пружинный толкатель, верхними на крышку пускового контейнера. Боковые ребра каркаса опираются на направляющие рельсы внутри контейнера.

Динамический и прочностной цикл работ предполагает:

- исследование прочности НС при максимальных квазистатических перегрузках;
- проведение модального анализа;
- анализ динамических и прочностных характеристик НС при действии гармонических и стационарных случайных вибраций;

В соответствии с требованиями QB50 [5], величины квазистатических перегрузок (ускорений) НС приняли равными $a_x = a_y = a_z = 13.0g$. Минимальная допустимая собственная частота колебаний НС не должна быть меньше 90 Гц.

Параметры гармонических и случайных вибраций приведены в табл.2 и табл.3.

Таблица 2

Параметры гармонических вибронгрузений

Частота, Гц	Амплитуды виброускорений $a_x^{гарм} = a_y^{гарм} = a_z^{гарм}$, g
5-100	2.5
100-125	1.3

Таблица 3

Характеристики стационарных случайных вибронгрузений

Частота, Гц	Спектральные плотности ускорений $S_{xx}^a = S_{yy}^a = S_{zz}^a$, g ² /Гц
20	0.01125
130	0.05625
800	0.05625
2000	0.01500

Для анализа собственных частот и форм колебаний, а также напряженно-деформированного состояния (НДС) НС при действии квазистатических перегрузок, гармонических и случайных вибраций использовали метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS [6]. Анализ динамики НС при действии гармонических вибраций осуществляли на основе метода модальных координат. Для анализа

стационарных случайных вибраций НС использовали комбинацию методов модальных координат и спектральных разложений [6-8].

Конечно-элементная аппроксимация 3D модели НС, сгенерирована в среде ANSYS [6]. При дискретизации каркаса, научного модуля, наборных стоек ЭП, аккумуляторов и антенного модуля использовали 20-ти узловые гексагональные конечные элементы (КЭ) SOLID186. Для аппроксимации кронштейнов СОС и электронных плат ЭП применяли пластинчатые КЭ SHELL181 с 4-мя слоями по толщине. Сочленение пластинчатых и объемных КЭ осуществляли посредством безмассовых абсолютно жестких связей на основе двухузловых балочных элементов BEAM188. При сопряжении фрагментов дискретных моделей с различной плотностью разбиения однотипными КЭ использовали контактные элементы CONTA174.

Результаты исследования

При проведении расчетного исследования НДС НС от действия квазистатических перегрузок условия размещения НС в транспортировочном контейнере учитывали посредством задания нулевых перемещений ($u_x = u_y = u_z = 0$) опорных поверхностей несущего каркаса, за исключением продольных ($u_z \neq 0$) для боковых ребер (рис.1б). Было установлено, что наибольшие эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_s^{max} = 140.70$ МПа возникают при перегрузке $a_x = 13g$ в перемычке несущего каркаса вблизи точек крепления к кронштейнам СОС.

При проведении модального анализа кинематические ограничения, отвечающие размещению НС в транспортировочном контейнере, приняли идентичными вариантам квазистатического нагружения.

В результате анализа определили, что низшая собственная частота колебаний НС составляет 325Гц. Она отвечает форме колебаний электромаховичного двигателя в поперечном направлении X. Регламентируемое [5] нижнее предельное значение собственной частоты составляет 90Гц, в этой связи условие частотной совместимости ($325\text{Гц} > 90\text{Гц}$) НС выполняется.

В гармоническом анализе учитывали, что виброускорения (табл. 2) синфазно передаются на НС от транспортировочного контейнера через опорные поверхности силового каркаса (рис.1б). При проведении расчетов приняли модель демпфирования Рэлея [6,8] с постоянным коэффициентом демпфирования равным 0.02.

Установили, что зона наибольших эквивалентных по Мизесу напряжений (29.78 МПа) находится у места крепления кронштейна модуля СОС к перемычке несущего каркаса, при амплитуде виброускорений $a_x^{zarm} = 2.5g$ и частоте 100 Гц. Для других случаев нагружения (a_y^{zarm}, a_z^{zarm}) величины эквивалентных по Мизесу напряжений существенно меньше.

Нагружение НС стационарными случайными вибрациями (табл.3) со стороны транспортировочного контейнера осуществлялось через опорные поверхности несущего каркаса (рис.1б). При проведении расчетов приняли модель демпфирования Рэлея [6,8] с постоянным коэффициентом демпфирования равным 0.02.

Установлено, что зона наибольших СКЗ напряжений ($\sigma_{\sigma_{max}} = 60.39$ МПа) находится в перемычке несущего каркаса вблизи крепления кронштейнов модуля СОС в случае вибрационного нагружения S_{yy}^a .

Коэффициенты безопасности (КБ) рассчитаны согласно ECSS-E-ST-32-10С для эксплуатационных и расчетных нагрузок. Для квазистатических перегрузок в случае эксплуатационных нагрузок $f^T = 1.2$, гармонических и случайных вибраций $f^T = 1.65$. При

анализе прочности НС по расчетным нагрузкам: квазистатические перегрузки $f^B = 1.56$, гармонические и случайные вибрации $f^B = 1.88$.

Следует отметить, что при анализе прочности электронных плат ЭП, также дополнительно учитывали коэффициент перегрузки $k = 1.25$.

Одновременное действие нагрузок на этапе выведения в прочностном анализе конструктивных элементов НС учитывается линейным комбинированием их вкладов в напряженное состояние. Максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений в конструктивных элементах НС определяем как:

$$\sigma_3^{сум} = \sigma_3^{стат} + \sigma_3^{zap} + \sigma_3^{сл}, \quad (1)$$

здесь $\sigma_3^{стат}$, σ_3^{zap} , $\sigma_3^{сл}$ – соответственно напряжения при квазистатических перегрузках, гармоничных и случайных вибрациях.

Прочность НС определяется из условий:

1. отсутствие пластических деформаций при действии эксплуатационных нагрузках;
2. отсутствие разрушений в конструктивных элементах НС при действии расчетных нагрузок.

Коэффициенты запасов прочности для эксплуатационных η_T и расчетных η_B нагрузок определяли как

$$\eta_T = \frac{\sigma_T}{(\sigma_3^{стат} f_{стат}^T + \sigma_e^{zap} f_{дин}^T + \sigma_3^{сл} f_{дин}^T)} \quad (2)$$

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{(\sigma_3^{стат} f_{стат}^B + \sigma_e^{zap} f_{дин}^B + \sigma_3^{сл} f_{дин}^B)} \quad (3)$$

В результате расчетного анализа установлено, что максимальные суммарные эквивалентные по Мизесу напряжения (179.06 МПа) имеют место в перемычке несущего каркаса около мест крепления кронштейнов СОС при нагружении НС в направлении оси X. В этом случае коэффициенты запасов прочности для эксплуатационных и расчетных нагрузок соответственно равны $\eta_T = 1.12$ и $\eta_B = 1.30$.

Выводы

1. Для разработанной конструкции НС PolyItan-2-SAU построена рациональная комбинированная КЭМ, содержащая объемные, оболочечные, балочные и контактные КЭ.
2. Расчетным путем, на основе единой КЭМ определены амплитудно-частотные характеристики и параметры НДС в конструктивных элементах PolyItan-2-SAU при действии квазистатических перегрузок, гармонических и случайных вибраций, отвечающих этапу выведения.
3. Установлено, что в соответствии с предъявляемыми требованиями рассматриваемая конструкция PolyItan-2-SAU является рациональной с точки зрения прочности.

Список литературы

1. ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering Spacecraft mechanical loads analysis handbook. (2013). [ebook] Noordwijk: Requirements & Standards Division. Available at: <http://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-32-26a-spacecraft-mechanical-loads-analysis-handbook/>;
2. Tsybenko A. S. Stress-Strain State Investigation of Polyitan-2 Nano-Satellite under the Ascent-Stage Quasi-Static Overload Conditions / A. S. Tsybenko, B. M. Rassamakin, A. A. Rybalka. // Strength of Materials. – 2017. – №49. – С. 381–387;
3. Цыбенко А. С. Анализ прочности наноспутника POLYITAN-2 при действии случайных нагрузок на этапе выведения на орбиту / А. С. Цыбенко, Б. М. Рассамакин, А. А. Рыбалка. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №81. – С. 28–33;
4. ECSS-E-ST-10-03C. Testing. (2012). [ebook] Noordwijk: Requirements & Standards Division. Available at: <http://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10-03c-testing/>;

5. *QB50*. System Requirements and Recommendations. (2015). 7th ed. [ebook] Available at: <https://www.qb50.eu/index.php/tech-docs/category/5-qb50-system-requirements-document>;
 6. *ANSYS Structural Analysis Guide*. (2012). [ebook] Available at: <http://www.ansys.com> (T) 724-746-3304 (F) 724-514-9494/;
 7. *Болотин, В.* (1965). *Статистические методы в строительной механике*. Москва: Изд-во лит-ры по строительству;
 8. *Батте, К.* and *Вилсон, Е.* (1982). *Численные методы анализа и метод конечных элементов*. Москва: Стройиздат;
-