

# Анализ прочности наноспутника POLYITAN-2 при действии случайных нагрузок на этапе выведения на орбиту

А.С. Цыбенко • Б.М. Рассмакин • А.А. Рыбалка

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 24 May 2017 / Accepted: 7 November 2017

**Аннотация.** В рамках действующих стандартов создания новых космических аппаратов проектирование и отработка как больших так и сверхмалых спутников требует решения широкого спектра задач, связанных с анализом прочности аппарата на разных этапах его жизненного цикла. Основным и наиболее сложным, с точки зрения действующих нагрузок, является этап выведения на орбиту. На этом этапе спутник подвержен воздействию экстремальных ускорений, гармонических и случайных вибраций, ударных нагрузок. В настоящей работе представлен прочностной анализ наноспутника POLYITAN-2 при действии случайных вибраций на этапе выведения на орбиту. Разработана эффективная твердотельная и соответствующая ей конечно-элементная модель наноспутника. С использованием программного комплекса Ansys проведено расчетное исследование напряженно-деформированного состояния наноспутника. Проведена оценка прочности конструктивных элементов. Установлено, что для рассматриваемого варианта исполнения POLYITAN-2 условия прочности выполняются.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, случайные вибрации, метод конечных элементов, наноспутник, прочность.

## Введение

Задача обеспечения прочности космических аппаратов (КА) включает в себя анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) КА при квазистатических перегрузках [1], гармонических и случайных вибрациях, импульсных и акустических нагрузках, а также неоднородных температурных распределениях [2-4].

Случайные вибрации КА обусловлены его транспортировкой к месту пуска, работой двигателей и систем ракеты-носителя (РН), воздействием аэродинамических сил на корпус РН.

Прочностной анализ КА при случайном нагружении содержит расчетно-теоретический и экспериментальный этапы [5]. Расчетное исследование предполагает разработку адекватной имитационной модели (ИМ) КА, подверженного случайным вибрациям, и определение на ее основе числовых характеристик стохастического напряженно-деформированного состояния.

Полученные данные расчетов кроме прочностного анализа также используются при экспериментальной отработке изделия: выборе мест установки датчиков вибрационных ускорений, выделении элементов модели, подлежащих более детальной экспериментальной проверке и уточнению. Имитационному моделированию, таким образом, отводится важная роль в решении комплексной проблемы обеспечения прочности КА при действии случайных вибраций.

Для решения задач статистической динамики механических систем эффективным является метод спектральных разложений, основанный на представлении случайной функции в виде ряда или стохастического интеграла Фурье с последующим системным анализом в пространствах частоты и волновых чисел [7,8]. Наиболее распространенным для исследования стационарных случайных колебаний линейных систем на основе метода конечных элементов (МКЭ) является комбинация методов модальных координат [9] и спектральных представлений [8-10].

**Цель исследования** – конечноэлементный анализ характеристик НДС конструктивных элементов POLYITAN-2 при случайных вибрациях, обусловленных выведением наноспутника (НС) на околоземную орбиту.

### Постановка задачи

При создании НС POLYITAN-2 негерметичной схемы руководствовались унифицированным форматом CubeSat 2U [4], определяющим концепцию облика НС, его массогабаритные характеристики, тип несущей конструкции и т.п [6].

Разработанная 3D модель POLYITAN-2 (рис.1), 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 включает пять электронных плат, три аккумуляторных батареи и четыре наборные стойки для сочленения и крепления к несущему каркасу. Габаритные размеры 3D модели POLYITAN-2 - 100×100×227 мм, расчетная масса НС - 1.8 кг.

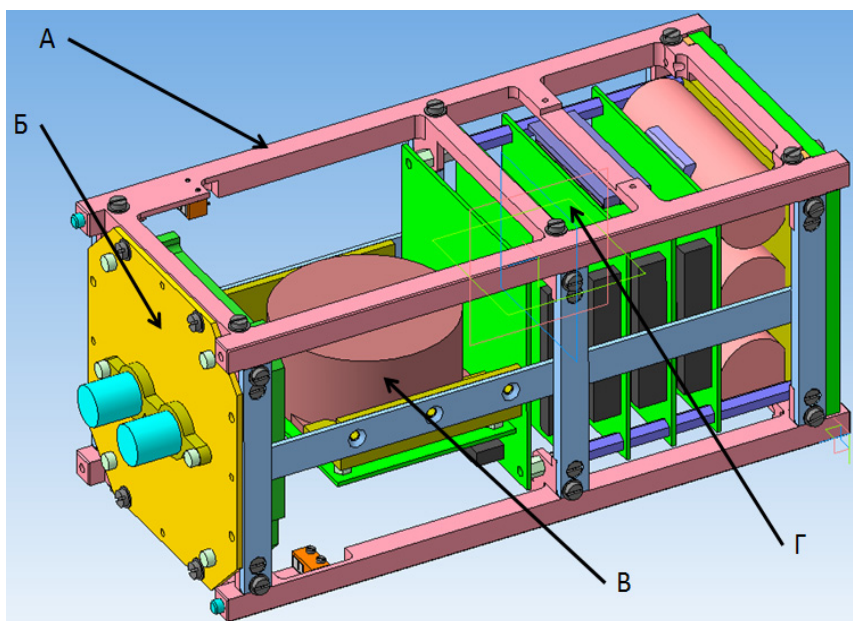


Рис. 1. Геометрическая модель НС POLYITAN-2 и его конструктивные элементы: А – несущий каркас; Б – научный модуль; В – модуль СОС; Г – электронная платформа

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 используемых материалов приведены в табл.1, где:  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность материала;  $\sigma_g$  – предел прочности.

Таблица 1

#### Физико-механические свойства используемых изотропных конструктивных материалов

Материал	$E$ , МПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_g$ , МПа
АМг6	71000	0.3	2640	305
Д16	72000	0.3	2770	450
Л63	116000	0.35	8440	290

Для материала КАСТ-В:  $E=2100$  МПа,  $\nu = 0.11$ ,  $\rho =1800$  кг/м<sup>3</sup>, пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно  $\sigma_p^g = 85$  МПа,  $\sigma_{сж}^g = 130$  МПа.

В модальном анализе размещение НС в транспортировочном контейнере учитывали посредством введения в ИМ кинематических ограничений, - полагали нулевыми относительные перемещения ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ) опорных торцовых поверхностей несущего каркаса, за исключением продольных ( $u_z \neq 0$ ) для боковых ребер.

Согласно [4], прочность и жесткость НС на этапе выведения должна обеспечиваться при воздействии на него случайных вибраций, обусловленных кинематическим возбуждением по опорным поверхностям НС со стороны транспортировочного контейнера в направлении трех взаимно перпендикулярных продольной Z и поперечных X, Y осей. Кинематическое возбуждение задавали в форме широкополосного стационарного случайного процесса с известными компонентами матрицы взаимных спектральных плотностей ускорений (табл.2).

Таблица 2

**Характеристики кинематического нагружения по опорным поверхностям НС в транспортировочном контейнере**

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

**Рациональная имитационная модель НС POLYITAN-2**

3D модель НС POLYITAN-2 (рис.1) содержит более 100 конструктивных элементов, полный учет которых в конечно-элементном анализе приводит к неоправданному увеличению размерности задачи. В этой связи, расчетная 3D модель НС была рационализирована, - исключены из рассмотрения элементы, вкладом которых в обеспечение прочности и жесткости конструкции НС можно пренебречь: обшивка, элементы крепежа, датчики солнца, магнитометр и т.д. Следует отметить, что массы элементов обшивки, датчиков солнца и магнитометра учитывали в рационализированной ИМ НС посредством их равномерного “размазывания” по соответствующим поверхностям контакта с несущим каркасом. Массу крепежа учитывали как распределенную посредством соответствующей добавки к плотности материала несущего каркаса.

На основе 3D имитации НС построили конечно-элементную модель (КЭМ) POLYITAN-2 в системе ANSYS [10]. При аппроксимации каркаса, научного модуля, наборных стоек ЭП, аккумуляторов и антенного модуля использовали 20-ти узловые гексагональные конечные элементы (КЭ) SOLID186. Дискретизацию кронштейнов СОС и электронных плат ЭП осуществляли пластинчатыми четырехслойными КЭ SHELL181. Сочленение пластинчатых и объемных КЭ реализовали посредством безмассовых абсолютно жестких связей на основе двухузловых балочных КЭ BEAM188. При сопряжении фрагментов дискретных моделей с различной плотностью разбиения однотипными КЭ использовали контактные элементы CONTA174. В результате получили рациональную дискретную КЭМ НС, состоящую из 326300 элементов с 1221504 узлами.

**Метод решения**

Решение задачи статистической динамики НС представили в виде последовательности этапов. Вначале определяли усеченный спектр  $n$  собственных форм и частот колебаний дискретной модели НС в рекомендуемом частотном диапазоне 20-2000 Гц [4]. Затем, руководствуясь методом модальных координат получили усеченную несвязную систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка по временному аргументу. Следуя [7, 8, 10], решение полученной системы уравнений в пространстве частоты определяли как

$$S_{y_j}(\omega) = |H_{ji}(i\omega)|^2 S_{G_i}(\omega), \quad (1)$$

где

$$|H_{ji}(i\omega)|^2 = \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega^2}, (j = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Здесь  $S_{y_j}(\omega)$  и  $S_{G_i}(\omega)$  - соответствующие спектральные плотности входного и выходного процессов;  $H_{ji}(i\omega)$  - передаточная функции системы;  $\varepsilon$  - коэффициент демпфирования;  $\omega_j$  - собственная частота;  $n$  - номер собственной частоты.

Затем, используя известные соотношения [7, 8, 10], находили вероятностные характеристики обобщенных перемещений  $y_j$  и их производных  $\dot{y}_j$  и  $\ddot{y}_j$ . Корреляционную функцию напряжений определяли по методике изложенной в [11].

**Результаты исследования**

Некоторые из найденных частот колебаний приведены в таблице 3. Суммарное количество частот и форм колебаний ИМ в исследуемом диапазоне частот составляет  $n = 43$ .

Таблица 3

## Собственные частоты колебаний НС

Номер частоты	Частота, Гц	Номер частоты	Частота, Гц	Номер частоты	Частота, Гц
1	325,06	6	690,51	11	985,88
2	673,92	7	905,11	12	1226,20
3	678,15	8	912,16	13	1226,80
4	678,59	9	948,01	14	1233,80
5	682,07	10	948,35	15	1235,60
16	1236,20	17	1239,30	18	1241,00
19	1241,40	20	1242,60	21	1247,60

С использованием программного комплекса Ansys [10] определили распределения среднеквадратических значений (СКЗ) эквивалентных напряжений (по Мизесу [12]) в узлах конструкции при возбуждении НС случайным стационарным процессом для трех вариантов нагружения (табл.2). Необходимо отметить, что согласно [2], нагружение (табл.2) подчиняется нормальному закону распределения. При анализе прочности применяется правило  $3\sigma$ .

Согласно [2] при прочностном анализе элементов НС следует вводить коэффициент безопасности  $f_{дин} = 1.72$ , который учитывает неточность теоретического и экспериментального определения действующих нагрузок, методов исследований и т.п. Для анализа прочности стеклотекстолитовых плат ЭП необходим дополнительный коэффициент  $k = 1.25$ , являющийся множителем к коэффициенту безопасности. Расчет коэффициентов запасов прочности выполняли для каждой группы материалов отдельно. Допускаемые напряжения для металлов принимались равными  $[\sigma]_M = \sigma_e / f_{дин}$ , для стеклотекстолита -  $[\sigma]_K = \sigma_{сж}^e / f_{дин} k$ . Коэффициенты запаса прочности для элементов НС, выполненных из металлов, определяли как

$$\eta = \frac{[\sigma]_M}{\sigma_s}, \quad (2)$$

для плат ЭП

$$\eta = \frac{[\sigma]_K}{\sigma_s}. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_s$  - СКЗ эквивалентные по Мизесу напряжения определяемые по правилу трех  $\sigma$  [7, 8].

Распределения СКЗ напряжений Мизеса для трех вариантов нагружений для приведены в табл.4.

Таблица 4

## Максимальные СКЗ напряжений Мизеса и минимальные коэффициенты запаса прочности элементов НС

Элемент конструкции	X		Y		Z	
	$\eta_s^{\max}$ , МПа	$\eta_{\min}$	$\eta_s^{\max}$ , МПа	$\eta_{\min}$	$\eta_s^{\max}$ , МПа	$\eta_{\min}$
Переключатель несущего каркаса	8.58	30.50	60.39	4.33	59.48	4.40
Держатель аккумуляторов	0.04	4357.00	0.19	924.24	2.62	67.63
Наборная стойка ЭП	7.89	28.00	14.66	15.01	24.36	9.01
Плата ЭП	0.66	59.89	0.82	48.20	18.24	2.16

Анализ результатов расчетного исследования НС показал, что наиболее нагруженным элементом НС является плата ЭП, для которой минимальный коэффициент запаса прочности составляет  $\eta_{\min} = 2.16$  в случае действия случайных вибраций в направлении оси Z (рис. 2). Максимальное СКЗ напряжений достигается у места крепления платы к наборной стойке ЭП. Зона наибольших напряжений находится на переключателе

несущего каркаса вблизи крепления кронштейнов модуля СОС (рис. 3) в случае действия случайных вибраций по оси Y, при этом коэффициент запаса прочности составляет  $\eta_{\min} = 4.33$ .

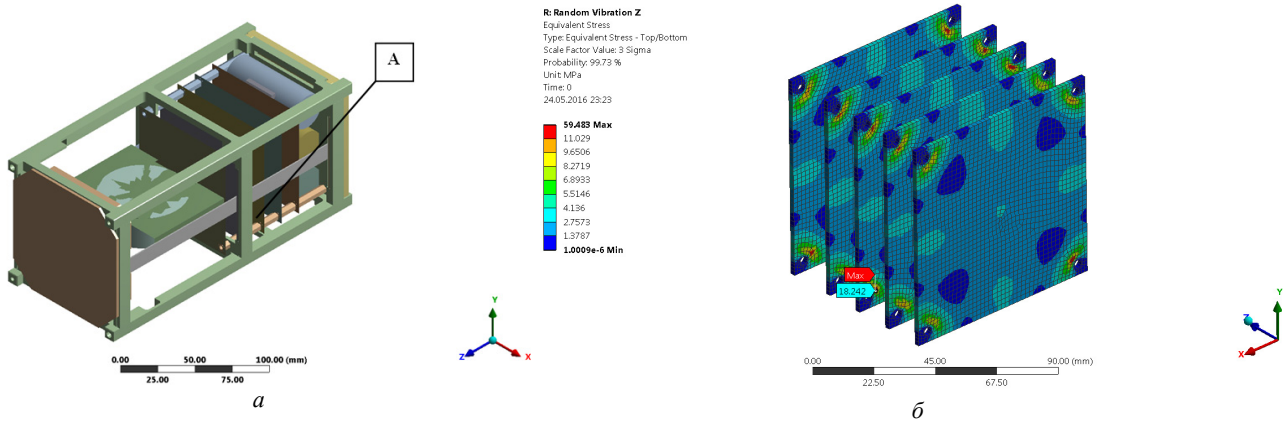


Рис. 2. Точка максимального СКЗ напряжений Мизеса в плате ЭП –а; максимальное СКЗ напряжений Мизеса в плате ЭП ( $\sigma_s^{max} = 18.24\text{MPa}$ ) -б

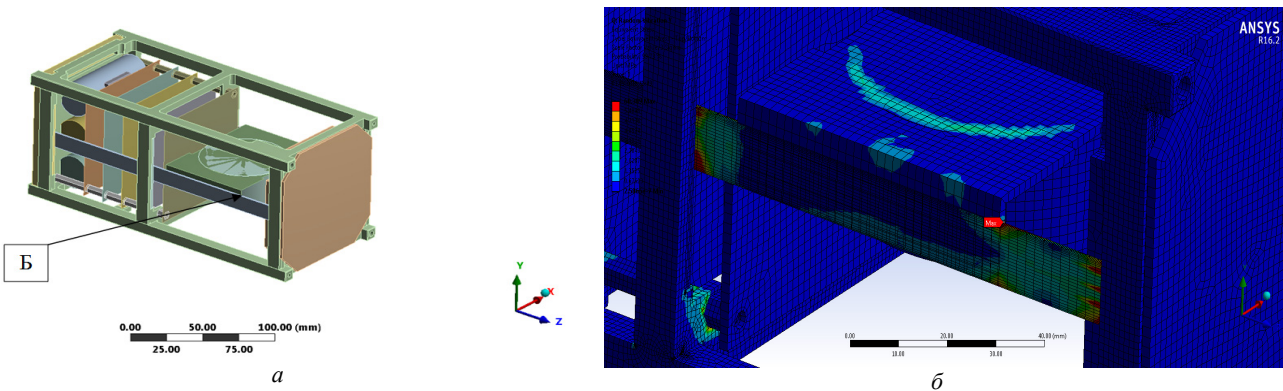


Рис. 3. Точка максимального СКЗ напряжений в несущем каркасе НС –а, максимальное СКЗ напряжений в несущем каркасе НС ( $\sigma_s^{max} = 60.39\text{MPa}$ ) -б

### Выводы

1. Для разработанной конструкции НС PolyItan-2 построена рациональная комбинированная КЭМ, содержащая объемные, оболочечные, балочные и контактные КЭ.
2. Расчетным путем определены вероятностные характеристики НДС в конструктивных элементах PolyItan-2.
3. Установлено, что в соответствии с предъявляемыми требованиями рассматриваемая конструкция PolyItan-2 является рациональной с точки зрения прочности и жесткости при действии случайных вибраций на этапе выведения на орбиту.

## Аналіз міцності наносупутника POLYITAN-2 при дії випадкових навантажень на етапі виведення на орбіту

О.С. Цибенко, Б.М. Рассамакін, А.О. Рибалка

**Анотація.** В рамках діючих стандартів створення нових космічних апаратів проектування і відпрацювання як великих так і надмалих супутників потребує вирішення широкого спектра завдань, пов'язаних з аналізом міцності апарату на різних етапах його життєвого циклу. Основним і найбільш складним, з точки зору діючих навантажень, є етап виведення на орбіту. На цьому етапі супутник схильний до дії екстремальних прискорень, гармонійних і випадкових вібрацій, ударних навантажень. У даній роботі представлений аналіз міцності наносупутника POLYITAN-2 при дії випадкових вібрацій на етапі виведення на орбіту. Розроблено ефективну твердотільну і відповідну їй звичайно-елементну модель наносупутника. З використанням програмного комплексу Ansys проведено розрахункове дослідження напружено-деформованого стану наносупутника. Проведено оцінку міцності конструктивних елементів. Встановлено, що для аналізованого варіанта виконання POLYITAN-2 умови міцності виконуються.

*Ключові слова:* напружено-деформований стан, випадкові вібрації, метод скінченних елементів, наносупутник, міцність.

## Strength of nanosatellite POLITAN-2 in action of random loads at stage of transfer to orbit

Alexsandr Tsybenko, Borys Rassamakin, Anton Rybalka

**Abstract.** *Within the framework of existing standards for the creation of new spacecraft, the design and development of both large and ultra-small satellites requires the solution of a wide range of problems associated with analyzing the strength of satellites at different stages of their life cycle. The main and most difficult, from the point of view of ultimate loads, is the stage of putting into orbit. At this stage, the satellite is subject to extreme accelerations, harmonic and random vibrations, shock loads. In this paper we present the strength analysis of the nanosatellite POLYITAN-2 under the action of random vibrations at the stage of launching into orbit. An effective solid-state model and a corresponding finite element model of a nanosatellite have been developed. With the use of the software complex Ansys, a computational study of the stress-strain state of the nanosatellite was carried out. The strength of the structural elements is evaluated. It is established that for the considered version of POLYITAN-2 the strength conditions are fulfilled.*

**Keywords:** *stress-strain state, random vibrations, finite element method, nanosatellite, strength, cubesat.*

### References

1. Tsybenko, A., Rassamakin, B. and Rybalka, A. (2017), Stress-Strain State Investigation of Polyitan-2 Nano-Satellite under the Ascent-Stage Quasi-Static Overload Conditions, *Strength of Materials*, 49(3), pp.381-387.
2. 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/>;
3. ECSS-E-ST-10-03C. Testing. (2012). [ebook] Noordwijk: Requirements & Standards Division. Available at: <http://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10-03c-testing/>;
4. 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>;
5. Безмозгий, И., Софинский, А. and Чернягин, А. (2014). Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники. *Космическая техника и технологии*, 3, с.71-80;
6. Цыбенко, А., Рассамакін, Б. and Рыбалка, А. (2016). Напряженно-деформированное состояние наноспутника POLYITAN-2 при квазистатических перегрузках на этапе выведения. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, 86, с.76-82;
7. Болотин, В. (1965). *Статистические методы в строительной механике*. Москва: Изд-во лит-ры по строительству;
8. Светлицкий, В. (2002). *Стохастическая механика и теория надежности*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана;
9. Батте, К. and Вилсон, Е. (1982). *Численные методы анализа и метод конечных элементов*. Москва: Стройиздат;
10. ANSYS Structural Analysis Guide. (2012). [ebook] Available at: <http://www.ansys.com> (T) 724-746-3304 (F) 724-514-9494/;
11. Segalman, D., Fulcher, C. and Reese, G. (1998). An Efficient Method for Calculating RMS von Mises Stress in a Random Vibration Environment. [ebook] Available at: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/573295/>;
12. Писаренко, Г., Яковлев, А. and Матвеев, В. (1988). *Справочник по сопротивлению материалов*. 2nd ed. Киев: Наукова думка.