

УДК 004.942: 519.6:539.3

**Оценка влияния стохастических вибраций ракетно-носителя
на долговечность наноспутника Politan-2-SAU****Цибенко А.С., Крищук Н.Г., Рассамкин Б.М.**
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Аннотация. Приведена методика определения долговечности наноспутника POLYTAN-2-SAU в условиях стохастических вибраций на этапе вывода. Для определения характеристик амплитуд напряжений вибродинамического состояния конструкции наноспутника применен метод спектральных разложений в сочетании с методом конечных элементов. Определение числовых характеристик напряженно-деформированного состояния наноспутника при стохастических вибрациях выполнено в среде универсальной системы ANSYS 12.1. Временные реализации случайного процесса эквивалентных по Мизесу напряжений моделируются в виде гармоничного ряда. На основе моделирования реализации процесса распределения эквивалентных по Мизесу напряжений определены их амплитуды и количество циклов их изменения. Оценку повреждаемости наноспутника при стохастических вибрациях проведено по закону накопления повреждений Пальмгрен-Майнера на основе данных о повторяемости регулярных циклов эквивалентных по Мизесу напряжений и приведенной кривой усталости материалов.

Ключевые слова: наноспутник, стохастические вибрации, напряженно-деформированное состояние, спектральная плотность, вибрация, конечные элементы, стационарный случайный процесс, усталостные повреждения, долговечность, закон Пальмгрена-Майнера

В последнее десятилетие отмечается значительный рост числа запусков космических аппаратов наноспутников (НС) (весом от 1 до 10 кг). Традиционно такие спутники используются для обучения и отработки новых технологий, однако сфера их применения постоянно расширяется. Важную роль в этом направлении играет стандарт «CubeSat», согласно которому выполнено большинство конструкций подобных спутников, в том числе и с участием с 2014 года «КПИ им. Игоря Сикорского» (разработка, проектирование, монтаж, испытания, эксплуатация PolyITAN-1, PolyITAN-2-SAU), (PolyITAN-3-PUT в стадии разработки).

Появление стандарта «CubeSat» связана с необходимостью решения одной из важнейших проблем подготовки специалистов в космической отрасли - проведение практических работ по созданию и эксплуатации реальных, пусть даже самых простых, космических аппаратов. Основные концепции создания спутников формата «CubeSat» заключаются в уменьшении времени проектирования и изготовления НС и уменьшения их стоимости.

Отработка функциональности НС PolyItan-2-SAU требует решения широкого спектра задач, связанных с анализом необходимой долговечности на разных этапах жизненного цикла. На этапе вывода ЧС на орбиту возникает особый вид нагрузки, так называемая эксплуатационная вибрация, которая носит случайный характер. Именно поэтому оценка долговечности НС PolyItan-2-SAU от действия стационарных случайных нагрузок на этапе выведения на орбиту является важной технической задачей.

Объектом исследований в данной работе являлась верифицирована имитационная модель НС PolyItan-2-SAU [1], созданная с помощью современных информационных технологий и систем.

Предметом исследования является оценка влияния стохастических вибраций ракето-носителя на долговечность НС Politan-2-SAU.

НС PolyITAN-2-SAU (рис.1) представляет собой совокупность функционально связанных систем (энергопитания, управления, ориентации и стабилизации, телеметрического контроля, обеспечения теплового режима, радиотехнических и сбора научной информации), которые размещены на несущем каркасе. Для поставки электроэнергии всей аппаратуре НС служит система энергопитания. Постоянные источники электроснабжения не могут обеспечить НС электропитанием в течение длительного времени. Поэтому на ЧС предусмотрены источники пополнения электроэнергии - фотоэлектрические преобразователи, преобразующие солнечную энергию в электрическую. Их объединение в единую систему образуют солнечные батареи.

Исходными данными для определения напряженно-деформированного и динамического состояния НС являются геометрические характеристики структурных элементов конструкции (рис. 1а), распределение масс не силовых элементов и таблицы их центрирования. Для несущего каркаса и элементов крепления модуля системы ориентации и стабилизации используется алюминиевый сплав Д16 (модуль Юнга $E=71\text{ГПа}$, коэффициенты Пуассона $\nu=0.3$, плотность $\rho=2640\text{кг/м}^3$, предел прочности $\sigma_b=305\text{МПа}$), для антенного модуля и элементов электронной платформы (ЭП) - алюминиевый сплав АМг6 ($E=71\text{ГПа}$, $\nu=0.3$, $\rho=2770\text{кг/м}^3$, $\sigma_b=420\text{МПа}$), для несущих стоек ЭП - латунь Л63 ($E=116\text{ГПа}$, $\nu=0.35$, $\rho=8840\text{кг/м}^3$, $\sigma_b=90\text{МПа}$). Платы ЭП изготовлены из стеклотекстолита КАСТ-В ($E=21\text{ГПа}$, $\nu=0.11$, $\rho=1800\text{кг/м}^3$, $\sigma_b=85\text{МПа}$ на растяжение, $\sigma_b=130\text{МПа}$ на сжатие). Габаритные размеры имитационной 3D модели НС составляют $100 \times 100 \times 227$ мм, расчетная масса - 1.8 кг [1].

В разработанной расчетной схеме (рис.1б) учитываются кинематические условия размещения НС в системе его транспортировки, а именно защемление верхних и нижних торцов каркаса по всем степеням свободы и освобождения продольных линейных перемещений на боковых ребрах каркаса. Эмпирические данные величин стационарных стохастических виброн нагружений НС в узлах его крепления к транспортировочному контейнеру в диапазоне частот 20-2000 Гц приведены в табл. 2 [1]. Дискретная модель НС (рис.1в) построена с использованием конечных элементов (СЭ) SOLID 186, SHELL 181, BEAM 188 и CONTA 174 кода ANSYS 12.1 [2].

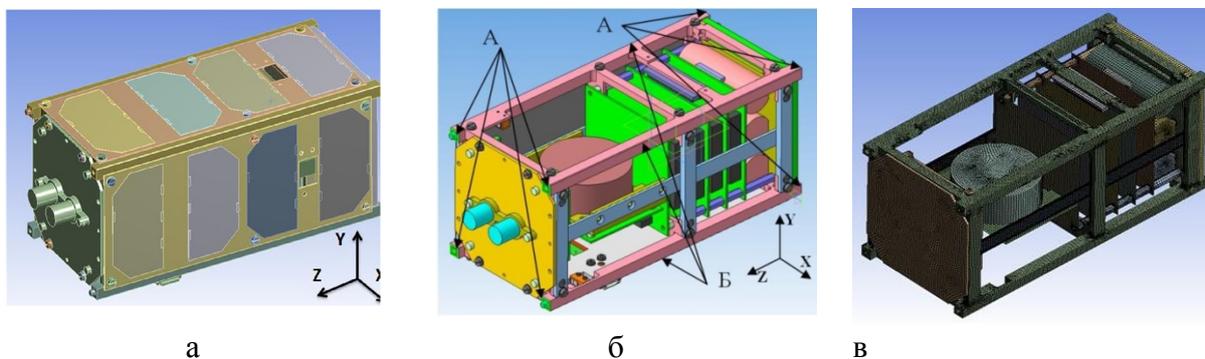


Рис. 1. НС POLYITAN-2-SAU: - внешний вид (а); - опорные поверхности А и Б несущего каркаса (б); - дискретная (1221504 узлов объединенных 326300СЭ) модель (в)

Таблица 1.

Характеристики стационарных стохастических виброн нагружений НС

Частота, Гц	Спектральные плотности мощности ускорений в направлении трех взаимно перпендикулярных осей X, Y, Z $S_{xx}^a = S_{yy}^a = S_{zz}^a, g^2/\Gamma\text{ц}$
20	0.01125
130	0.05625
800	0.05625
2000	0.01500

Для определения характеристик амплитуд напряжений вибродинамических состояний конструкции НС применяли метод спектральных разложений (МСР) в сочетании с методом конечных элементов (МКЭ). Считали, что возмущения напряжений в НС обусловлено стационарным случайным процессом. С помощью разложения узловых перемещений СЕ по собственным формам использовали уравнения динамического равновесия НС в модальных координатах

$$\ddot{y}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = f_j, \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где n - количество форм колебаний выбранных для анализа; y_j - обобщенные перемещения в базисе собственных векторов; ω_j и ξ_j - собственная круговая частота и коэффициент модального соотношения для учета демпфирования по Релею [3], f_j - стационарная случайная функция нагрузки с известными вероятностными характеристиками, которая соответствует модальной координате. Обобщенные перемещения $y_j = y_j(t)$ и модальные нагрузки $f_j = f_j(t)$ представили с использованием МСР в канонической форме [3, 4], а решение (1) в пространстве частоты определяли как

$$Y_j(\omega) = \sum_{k=1}^n H_{ja}(i\omega) F_k(\omega), \quad (j=1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

Передачные функции $H_{jk}(i\omega)$, соответствующие (1), образуют диагональную матрицу, где $H_{jk}(i\omega) = \delta_{jk} / L_j(i\omega)$, где $L_j(i\omega) = \omega_j^2 + 2i\xi_j \omega - \omega^2$ - Фурье-образ оператора уравнения (1), δ_{jk} - дельта-символ Кронекера, i - мнимая единица.

Решение стохастической задачи в моментах представили уравнением

$$S_{Y_j}(\omega) = |H_{ja}(i\omega)|^2 S_{F_a}(\omega), \quad (3)$$

где $S_{F_a}(\omega)$ и $S_{Y_j}(\omega)$ - спектральные плотности соответственно входного процессов и амплитуд векторов системного отклика.

Для определения временного распределения эквивалентных по Мизесу напряжений $p(t)$ в узлах дискретной модели НС применена методика [2, 5], согласно которой их величины определены как

$$p^2(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{q_i(t)\} \{q_j(t)\} \Psi_i^\sigma [A] \Psi_j^\sigma, \quad (4)$$

где $\{q_i(t)\}$, $\{q_j(t)\}$ - модальные координаты, соответствующие i -й и j -й форме колебаний, Ψ_i^σ , Ψ_j^σ - компоненты напряжений в модальных координатах для i -й и j -й формы колебаний, $[A]$ - симметричная, положительная матрица коэффициентов.

Практический интерес в анализе вибродинамических состояний НС при случайных нагрузках представляет определение среднеквадратических значений (СКЗ) эквивалентных по Мизесу напряжений

$$\sigma_{\sigma(t)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \langle q_i(t)q_j(t) \rangle \Psi_i^\sigma [A] \Psi_j^\sigma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Gamma_{ij} T_{ij}, \quad (5)$$

где $\Gamma_{ij} = \langle q_i(t)q_j(t) \rangle$, $T_{ij} = (\Psi_{\sigma,i}^b)^T [A] \Psi_{\sigma,j}^b$, а $\Psi_{\sigma,i}^b$, $\Psi_{\sigma,j}^b$ - компоненты напряжений в узле b для i -й и j -й формы колебаний.

Определение числовых характеристик напряженно-деформированного состояния ЧС при стохастических вибрациях осуществляли в среде универсальной системы ANSYS 12.1. Конечно-элементную модель конструкции строили в режиме диалога с использованием функционального меню. В разработанной расчетной модели НС спектральную плотность мощности вибрационного ускорения задавали непосредственного в узлах СЕ модели, отвечающие конструкциям крепления КА к транспортному контейнеру. Численным расчетом определяли распределение величин реакций на возмущения (перемещения, напряжения и их спектральные характеристики) элементов конструкции КА [1].

Установлено, что максимальные величины эквивалентных по Мизесу напряжений в диапазоне частот 20-20 000 Гц случайных вибраций НС имеют место в перемычке несущего каркаса вблизи крепления кронштейна системы ориентации и стабилизации в направлении оси Y (рис.16). В этом случае величина СКЗ данных напряжений для интервала 3σ составляет 103,6 МПа. Процесс напряжений является узкополосным. Основная часть спектральной плотности мощности эквивалентных по Мизесу напряжений $S_\sigma(t)$ сосредоточена в диапазоне частот от 20 Гц до 160 Гц.

Для определения количества циклов нагрузок, соответствующих величинам напряжений $S_\sigma(t)$ необходимо иметь не спектральные плотности, а временные реализации напряжений, действующих в элементах силовой конструкции НС. Для получения реализаций случайных процессов напряжений используется статистическое моделирование, исходными данными для которого являются спектральные характеристики процессов напряжений $S_\sigma(t)$. Временные реализации случайного процесса эквивалентных за Мизесом напряжений, моделируются в виде гармоничного ряда [3]:

$$\sigma(t) = \sum_0^N [S(\omega_j) \Delta \omega_j]^{1/2} \cos(\omega_j t + \alpha_j), \quad (6)$$

где ω_j - значение частоты на графике спектральной плотности напряжений; $S(\omega_j)$ - соответствующие им значения спектральной плотности; $\omega_j = (\omega_j + \delta \omega_j)$, $\delta \omega_j$ - случайные флуктуации частоты; α_j - независимые случайные величины.

Алгоритм моделирования случайного процесса (6) реализовано с использованием системы MS Excel 2010. На рис. 2а показан интервал суммарных временных реализаций случайного процесса протяженностью 10 с. На основе анализа процесса распределения эквивалентных за Мизесом напряжений определяли их амплитуды и количество циклов их изменения. Установили, что для интервала 1с количество циклов составляет 60, тогда в течение 120с вибрационного нагружения конструкции НС количество циклов изменения амплитуд напряжений составляла 7200.

На рис. 2б представлена гистограмма распределения временных реализаций напряжений в интервале от -3σ к 3σ . Закон распределения величин напряжений является классическим гауссовским случайным процессом с нулевым средним. Согласно [5] за время в 2 мин амплитуды циклов напряжений для 1σ составляют 34.5 МПа, для 2σ - 69.0 МПа, для 3σ - 103.5 МПа. Вероятности их возникновения соответственно равны 68.3%, 27.1% и 4.3% с повторяемостью соответственно в количестве 4917, 1951 и 312.

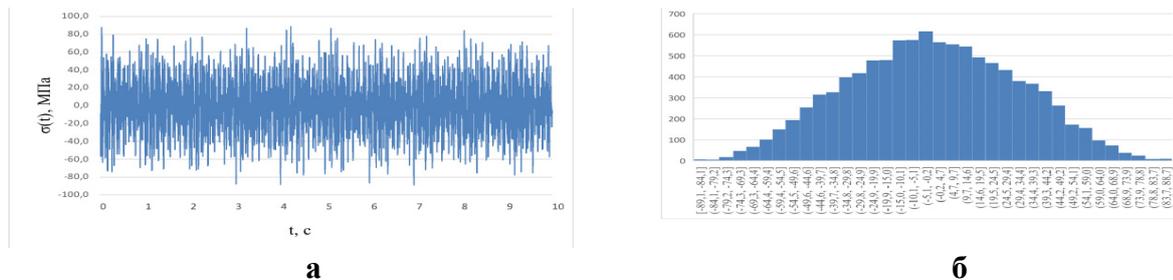


Рис. 2. Реализация случайного процесса распределения напряжений $\sigma(t)$ на интервале 10с (а) и функция плотности вероятности напряжений в узле № 493406 дискретной модели НС (б)

Оценку повреждаемости НС при стохастических вибрациях проводили по расчетным данным повторяемости регулярных циклов эквивалентных по Мизесу напряжений и эмпирической кривой усталости материала соответствующего элемента конструкции для закона накопления повреждений Пальмгрена-Майнера [3-5]

$$D = \sum_{(1\sigma, 2\sigma, 3\sigma)} n_i / N_i = n_{1\sigma} / N_{1\sigma} + n_{2\sigma} / N_{2\sigma} + n_{3\sigma} / N_{3\sigma} \leq 1 \quad (7)$$

Рассмотрение полученных вкладов накопленного усталостного повреждения показывает, что напряжение уровня 1σ не вносят повреждений так, как амплитуда напряжений меньше предела выносливости указанного элемента конструкции НС. Больше повреждений создается напряжениями уровня 3σ , несмотря на то, что они действуют в течение всего 4,33% времени. В результате при вибрационной нагрузке НС в течение 2 мин происходит исчерпание 27,3% усталостной долговечности конструкции. Это означает, что остается еще 72,3% долговечности, тогда согласно [6] медианный ресурс конструкции НС в условиях стохастических вибраций на этапе выведения на орбиту составляет 7 мин 20 с.

Список литературы

1. Цыбенко А. С. Анализ прочности наноспутника POLYITAN-2 при действии случайных нагрузок на этапе выведения на орбиту / А.С. Цыбенко, Б.М. Рассемакин, А.А. Рыбалка // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2017. – №81. – С. 28–33
2. ANSYS Structural Analysis Guide ANSYS Release 12.1. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA <http://www.ansys.com> (T) 724-746-3304 (F) 724-514-9494.
3. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1965. – 343с.
4. Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Моделирование динамического напряженного состояния конструкции авиационного изделия при случайном нагружении нагрузок / М.В. Зарецкий, А.С. Сидоренко // *Труды МАИ* (рубрика «Математика. Физика. Механика»). – 2014. - №75.
5. Space engineering. Structural factors of safety for spaceflight hardware, ECSS-E-ST-32-10C Rev. 1, Noordwijk, The Netherlands, March 2009.
6. Analyzing Random Vibration Fatigue// ANSYS Advantage, Volume II, Issue 3, 2008.

Estimation of influence of stochastic vibrations of a rocket carrier on durability of the Politan-2-SAU nanosatellite

Tsybenko A.S., Kryshchuk N.G., Rassamakin B.M.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

Abstract. The method of determining the durability of the nanosatellite POLYITAN-2-SAU under conditions of stochastic vibrations at the launch stage is presented. To determine the characteristics of the stress amplitudes of the vibro-dynamic states of the nanosatellite structure, the method of spectral decomposition in combination with the finite element method was used. The determination of numerical characteristics of the stress-strain state of the nanosatellite during stochastic vibrations was performed in the environment of the universal system ANSYS 12.1. The temporal realizations of a random process of Mises-equivalent stresses are modeled as a harmonic series. Based on the implementation of the process of distribution of equivalent Mises stresses, their amplitudes and the number of cycles of their change are determined. Estimation of nanosatellite damage during stochastic vibrations was performed according to the repeatability of regular cycles of Mises-equivalent stresses and the reduced fatigue curve of the material to the Palmgren-Miner damage accumulation law.

Keywords: nanosatellite, stochastic vibrations, stress-strain state, spectral density, operational vibration, finite elements, stationary random process, fatigue damage, durability, Palmgren-Miner law