

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Сороколетов Евгений Павлович

ведущий инженер группы надёжности

ООО «Би Питрон»

г. Санкт-Петербург

АСПЕКТЫ НАДЁЖНОСТИ МОДУЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

***Аннотация:** в статье описываются современные принципы архитектурного построения космических аппаратов с точки зрения обеспечения их надёжности и приводится обзор основных вопросов надёжности, связанных с переходом от монолитной архитектуры к модульной.*

***Ключевые слова:** космический аппарат, надёжность, модульные структуры, многофункциональные системы.*

Изделия космической техники, в основной своей массе, являются наукоёмкими, технически и технологически сложными объектами с длительными циклами разработки, изготовления и испытаний. Это объясняется жесткими требованиями к качеству и уровню надёжности космических аппаратов (КА), функционирующим в условиях космического пространства. Среди основных агрессивных факторов: космический вакуум (давление от 10^{-5} Па до 10^{-11} в зависимости от «глубины» космоса), электромагнитное и корпускулярное излучение (радиационные пояса Земли, космические и галактические лучи), широкий диапазон температур окружающей среды (в среднем от 100 К до 400 К), метеорные тела, а также вибрационные и акустические воздействия и линейное ускорение до 10g при выводе КА на орбиту Земли.

Однако самая главная причина высоких требований к безотказности – отсутствие устоявшейся практики технических обслуживаний и ремонтов непилируемых КА и как следствие высокая цена отказа. Из редких примеров сервисного обслуживания КА на орбите Земли, без учета случаев на орбитальных станциях, можно отметить 5 миссий к орбитальному телескопу Хаббл и demonstra-

ция возможной дозаправки топливом во время миссии STS-41G [1]. Таким образом, несмотря на высокую стоимость создания и запуска космических аппаратов, обеспечение пилотируемой миссии к техническому объекту на орбите Земли и проведение экипажем технического обслуживания этого объекта влечет за собой еще большие экономические затраты, при этом, безусловно возрастает и цена риска такой экспедиции. Из этой ситуации закономерно образовалась современная концепция разработки архитектуры большинства спутников, которая просто не предусматривает, какого бы то ни было, ремонта во время эксплуатации изделия.

Классический вариант обеспечения высоких показателей надёжности КА заключается в многократном структурном резервировании, обширной по составу (но, из-за экономических ограничений, не по выборке) программе испытаний и консерватизме при выборе технологий и элементной базы системы. Под влиянием этой концепции поле множеств состояний технической системы было разделено на служебные и целевые. В конструктивном плане это означало переход от монолитной архитектуры КА к созданию унифицированных платформ с набором служебных систем с последующей установкой на платформу полезной нагрузки.

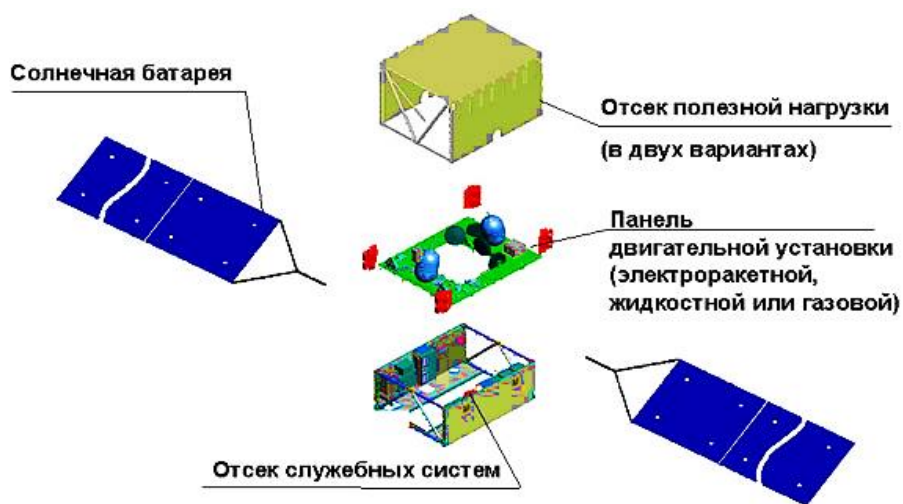


Рис. 1. Унифицированная космическая платформа «Ямал» (РКК Энергия)

Космические платформы есть у большинства производителей ракетно-космической техники и основная доля изделий для коммерческого сегмента космо-

навтики (навигация, мониторинг поверхности земли, связь, теле- и радиовещание) изготовлена на той или иной базе. Помимо производственно-экономических преимуществ, такое решение позволяет обеспечивать надёжность с помощью статистических методов, путем обработки и анализа истории эксплуатации парка типовых КА. Дальнейшее развитие этой парадигмы заключается в снижении в общей массе КА доли, занятой непосредственно платформой, что должно отразиться на стоимости выведения полезной нагрузки на орбиту [4].

Что касается изделий научно-исследовательского сегмента космонавтики, широта и разноплановость ставящихся задач, вкупе с их уникальностью и единичностью исполнения, создают проблемы к прямому проецированию концепции универсальной платформы. Анализ надёжности таких систем также затруднен в силу ярко выраженной многофункциональности и многозадачности большинства исследовательских КА. Эта особенность проявляется в вынужденном переходе от конструкционного анализа к функциональному, когда изучению подвергается каждая функция в отдельности, а надёжность системы в целом характеризуется вектором показателей надёжности всех функций [3, с. 91]. Другая особенность состоит в том, что несмотря на широкую многофункциональность полезной нагрузки КА, в большинстве своем эти функции не выполняются одновременно [2]. При этом, некоторые элементы и блоки КА могут быть как чисто монозадачными, так и принимать участие в выполнении сразу нескольких функций. Поэтому для таких систем встает вопрос учета собственного времени работы.

Выход был найден в углублении декомпозиции КА и его разделении на условно-независимые модули, снабженные собственным служебными подсистемами (энергоснабжение, вычислительное устройство, блок памяти и др.) и собственной полезной нагрузкой. Таким образом достигается унификация не в рамках сегмента рынка, а в рамках одного проекта. Ярким примером может служить платформа MCSB Modular Common Spacecraft Bus и проект LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer), запущенный 7 сентября 2013 г. Его

конструкция состоит из отдельных модулей, посаженных на общую шину, а в задачи входит изучение атмосферы Луны и тестирование лазерной связи [5].



Рис. 2. КА LADEE в частично разобранном виде

Другой пример модульной архитектуры – лабораторный комплекс из стандартизированных модулей NanoRacks, удостоенных в июле 2013 премии ISS Innovation Award of the Year [6]. Таким образом, проведение экспериментов на борту МКС было оптимизировано за счет замены разнородного оборудования на типовые модульные кубы размерами $100 \times 100 \times 100$ мм. Помимо снижения времени, затрачиваемых астронавтами на рутинные задачи, это изобретение уменьшило стоимость самих опытов. За 3 года на борту МКС на этом лабораторном стенде был проведен 91 опыт [7].

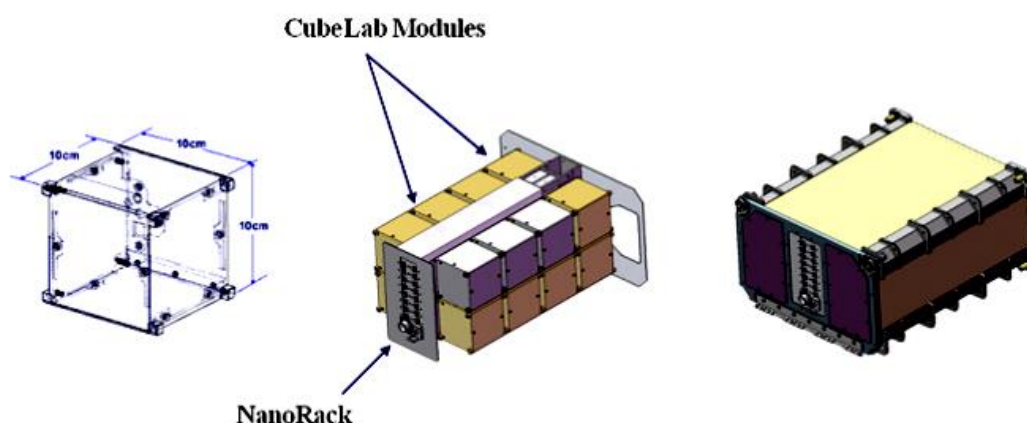


Рис. 3. Лабораторный стенд NanoRacks

В целом, этот проект стал «стационарным» воплощением модульной архитектуры многочисленных низкобюджетных сверхмалых КА CubeSat, бурно развивающихся в последнее десятилетие [4].

Новое слово в науке: перспективы развития

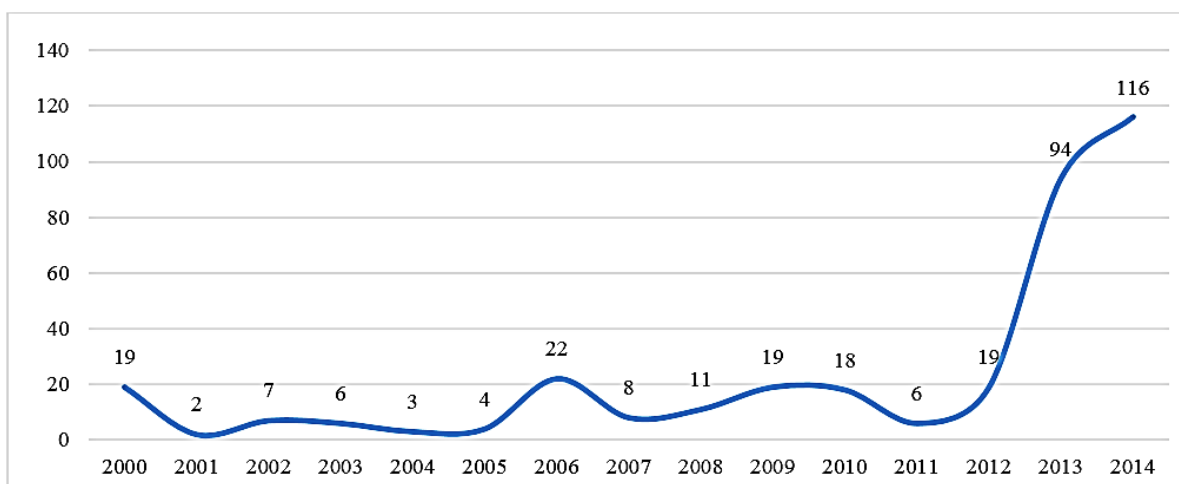


Рис. 4. Число запусков сверхмалых КА массой до 10 кг
(в том числе неудавшиеся, аварийные и с борта МКС)

Проекты, реализованные по схеме CubeSat, также довольно часто характеризуются монофункциональностью на уровне модуля конструкции. Принципиальное отличие этой концепции от других заключается в решении дилеммы стоимость/надёжность с другого стороны, когда из бытовой радиоэлектроники строится КА с низким ресурсом работы на орбите, для которого подбираются немасштабные, и короткие по времени исследования или тесты.

Можно отметить интерес к модульным конструкциям и в других областях экономики, среди которых модульные смартфоны Project Ara (Google и Motorola), Eco-Mobius (ZET) и PhoneBlocks или, например, модульный компьютер Razer Project Christine.

Таким образом, переход от монолитной архитектуры к модульной дает возможность повысить технико-экономические параметры КА, при этом рост научных исследований в теории надёжности касательно таких структур неявно отстает от роста технологий, что является ограничивающим фактором для роста производства. Подводя итог, можно определить основные направления анализа надёжности модульных структур:

- учет собственного времени работы модулей (блоков);
- учет скрытого резервирования между модулями;

- оценка влияния надежности одного блока на работоспособность системы в целом;
- сравнение надёжности многофункциональных блочных систем;
- анализ надёжности модульных систем с переменной структурой и динамической реконфигурацией.

Список литературы

1. Long A.M., Richards M.G., Hastings D.E., «On-Orbit Servicing: A New Value Proposition for Satellite Design and Operation», Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 44, № 4. July-August 2007.
2. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.В., Шалай В.В. Малые космические аппараты. Пикоспутники и наноспутники. Малые космические аппараты: справочное пособие [в 3 кн.] (книга 1) – Омск: изд-во ОмГТУ, 2010.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
4. Сороколетов Е.П., Анализ концепций управления качеством и надежностью малых космических аппаратов. – XIII Международная научная конференция «Трибология и надежность»: (11–13 сентября): сборник трудов / Российский нац. ком. по трибологии, М-во образования и науки Российской Федерации. Санкт-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики [и др.]; [под ред. К.Н. Войнова]. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2013. – 266 с.
5. Nasa. Электронный ресурс. Режим доступа: www.nasa.gov/mission_pages/ladee/main/.
6. Nasa. Электронный ресурс. Режим доступа: www.nasa.gov/content/nanoracks-honored-with-space-station-innovation-award/stationresearch/
7. Кубические нанолaborатории признаны лучшей разработкой для МКС. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://lenta.ru/news/2013/07/17/nanolabs/>