МЕТРОЛОГИЯ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

УДК 629.783

Н.Н. Севастьянов, *канд. техн. наук*
(ОАО «Газпром космические системы», г. Королёв)

УПРАВЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Описывается применяемая ОАО «Газпром космические системы» методология управления надёжностью космических аппаратов (КА) с длительными сроками эксплуатации. Приводятся результаты работ по созданию спутников связи (СС) типа «Ямал», подтверждающие эффективность методологии, базирующейся на физических подходах к выявлению и предотвращению проблем надёжности. Исходя из опыта работ компании с отечественными и иностранными предприятиями формулируются рекомендации по реализации описанной методологии на этапах работ по созданию КА.

Ключевые слова: виды и процедуры рассмотрений, заказчик, квалификация, корректирующие и предупреждающие действия, надёжность, причины отказов, спутники связи.

N.N. Sevastyanov. Reliability Control in Spacecraft with Long Service Life. The article describes methodology used by Gazprom Space Systems to manage reliability of spacecraft with long service life. It presents results of work on the Yamal-type communication satellites, confirming the effectiveness of the described method based on physical approaches to identifying and preventing reliability problems. On the basis of the company's experience working with domestic and foreign enterprises, the paper formulates recommendations on the implementation of the described methodology at different stages of spacecraft production.

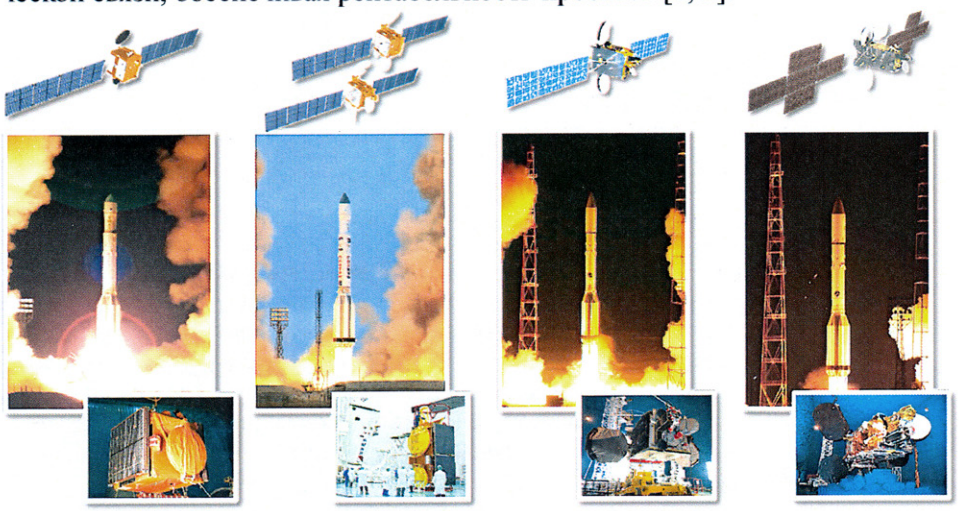
Key words: types and procedures of reviews, customer, qualifications, corrective and preventive actions, reliability, causes of failures, communication satellites.

Для Российской Федерации системы спутниковой связи и телевизионного вещания являются особенно важным средством передачи информации. Высокая эффективность систем спутниковой связи определили приоритетность их развития среди других направлений космической деятельности государственных и частных компаний.

В настоящее время на геостационарной орбите работают около 300 СС, ежегодно в мире запускается от 20 до 30 новых космических аппаратов, характеристики которых определяют эффективность работы систем спутниковой связи.

К числу основных требований, предъявляемых к СС, относятся требования высокого уровня безотказности и долговечности.

Такое положение определяется высокой стоимостью реализации проектов по созданию и эксплуатации систем спутниковой связи: в зависимости от их энерговооружённости затраты на создание современных СС оцениваются суммами от 100 до 250 млн долл., а с учётом запуска на орбиту и страхования эта величина может превышать 350 млн долл. Вложенные в спутниковые системы средства должны окупаться за счёт реализации услуг космической связи, обеспечивая рентабельность проектов [1, 2].



«Ямал-100» (90° в. д.)
Год запуска – 1999

«Ямал-201» (90° в. д.)
«Ямал-202» (49° в. д.)
Год запуска – 2003

«Ямал-300К» (90° в. д.)
Год запуска – 2012

«Ямал-401» (90° в. д.)
Год запуска – 2014

Рис. 1 Проекты, реализованные ОАО «Газпром космические системы» с применением методологии управления надёжностью

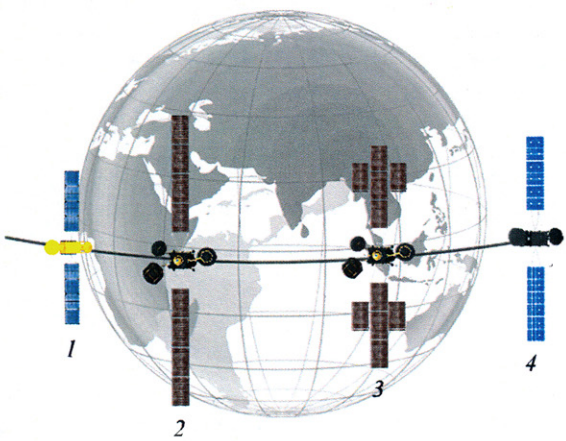


Рис. 2. Орбитальная группировка системы «Ямал»:
1 – «Ямал-202», 49° в. д.; *2* – «Ямал-402», 55° в. д.; *3* – «Ямал-401», 90° в. д.; *4* – «Ямал-300К», 183° в. д.

В современных условиях конкурентоспособность и рентабельность проектов предоставления услуг космической связи делают необходимым создание КА со сроком эксплуатации на геостационарной орбите (ГСО) свыше 15 лет.

ОАО «Газпром космические системы» (ГКС, до 2009 г. – ОАО «Газком»), являясь оператором спутниковой связи, разработчиком промышлен-

ных (коммерческих) космических комплексов связи и заказчиком СС для них, обеспечивает рентабельность выполняемых проектов по созданию КА с высоким уровнем долговечности, используя представляемую методологию.

Методология, основы которой были заложены, апробированы и реализованы при создании КА «Ямал-102», получила развитие при разработке КА «Ямал-201» и «Ямал-202», а в наиболее полном виде использовалась применительно к КА «Ямал-300К» и «Ямал-401».

Проекты ГКС, базирующиеся на методологии управления надёжностью, показаны на рис. 1. К настоящему времени КА «Ямал-100» и «Ямал-201» выработали свой ресурс (10 и 12 лет соответственно) и выведены из группировки. Действующая группировка спутников связи и вещания «Ямал» представлена на рис. 2.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ НАДЁЖНОСТЬЮ

Отечественные системы управления надёжностью КА создаются и функционируют в соответствии с действующими нормативно-техническими документами (ГОСТы, ОСТы, положения).

Главными процессами в системах являются процессы задания и контроля требований к надёжности [1), 2)]. Рассогласование между фактическим и требуемым состоянием объекта управления (между достигнутым и требуемым уровнем надёжности) – основа для принятия управленческих решений и выработки корректирующих действий. Источниками информации о рассогласовании служат данные о результатах испытаний и эксплуатации КА. Согласно применяемой методология требуется создание исследовательских, отработочных и опытных образцов изделий для их испытаний (наземных и лётных) и затем – лётных образцов КА для эксплуатации.

Такая методология не в полной мере соответствует сегодняшнему уровню развития космической техники, характеру создания КА и жёстким экономическим ограничениям затрат на КА. В настоящее время практически каждый КА связи является уникальным изделием, которое проходит этапы проектирования, конструирования, изготовления и наземных испытаний, а затем выводится на рабочую орбиту и после лётных испытаний сдаётся в штатную эксплуатацию.

Недостатками методологии обеспечения надёжности, закреплённой действующими нормативными документами (НД), являются также преимущественное использование статистических подходов к управлению надёжностью изделий и концентрация усилий заказчика на заключительных приёмочных процедурах контроля при ограниченном применении физических подходов на этапах создания изделий.

Принятая в ГКС методология управления надёжностью КА базируется на следующих положениях [3]:

1. Целью управления является создание КА как промышленного объекта, отвечающего требованиям конкурентоспособности по функциональным

[1)]ГОСТ РО 1410-001-2009 Системы и комплекса космические. Порядок задания требований, оценки и контроля надежности.

[2)]ГОСТ Р 56526-2015. Требования к надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования.

характеристикам и надёжности. Цель управления достигается путём предотвращения проблем обеспечения надёжности на всех этапах и на всех уровнях иерархии создания и эксплуатации КА за счёт использования информации о свойствах изделий, получаемой последовательно при проектировании, разработке, изготовлении и испытаниях.

Основным положением методологии является использование физического подхода для анализа и управления надёжностью. В соответствии с этим в компании:

– каждый отказ рассматривается как прямое следствие конкретного недостатка разработки, изготовления или эксплуатации изделия, который не был своевременно выявлен и устранён (в отличие от принятого в действующих НД понимания отказа как случайного, или, точнее, «нечаянного» события):

– сформирована и актуализируется база данных о недостатках разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации составных частей КА и аппарата в целом до электрорадиоизделий (ЭРИ) и материалов включительно, послуживших причинами несоответствий и отказов; об эффективности принятых мер по устранению недостатков;

– до начала работ по проекту проводится моделирование бизнес-процесса создания КА в виде матрицы обеспечения и верификации контрактных требований к КА.

2. Матрица формируется на основе разрабатываемой на предконтрактном этапе схемы деления КА (уточняется на этапе эскизного проекта) и комплекса производственных операций, направленных на создание конечного продукта в виде КА, удовлетворяющего заданным требованиям.

В отечественной и зарубежной практике набор операций бизнес-процесса создания КА устанавливается соответствующими нормативно-методическими документами. Для предприятий РФ – это государственные стандарты систем ЕСКД, СРПП ВТ и межведомственные положения вида РК-98-КТ или РК-11-КТ, для европейских изготовителей КА – стандарты систем *ECSS* и *MIL*.

Согласно методологии ГКС перечень производственных операций бизнес-процессов, применяемых отечественными или зарубежными компаниями, дополняется комплексом контрольных операций, разбивающих бизнес-процесс на циклы локального контроля, которые позволяют получить необходимую информацию для принятия управленческих решений о характере требуемых корректирующих и предупреждающих действий заказчика и исполнителей на этапах выполнения работ.

3. При выпуске и анализе матрицы требования эффективного управления бизнес-процессом создания КА трансформируются в требования к качеству информации, которую получает заказчик при осуществлении контрольных операций (информация должна быть своевременной, полной и достоверной). Выполнение этих требований достигается за счёт адаптации состава и содержания производственных и контрольных операций матрицы применительно к особенностям проекта создания КА и специфики:

– вида и уровня требований к создаваемому КА (по характеристикам назначения и надёжности);

– разработчиков и изготовителей космического аппарата, его составных частей и комплектующих (наличие опыта работы, уровень технической и методической оснащённости).

4. Соответствующая описанным требованиям матрица представляет собой модель бизнес-процесса, адекватность которой обеспечивается за счёт соблюдения при её формировании следующих принципов:

– *декомпозиции*, в соответствии с которым основной бизнес-процесс создания КА представляется в виде набора иерархически выстроенных подпроцессов уровней разукрупнения КА, начиная с комплектующих ЭРИ и материалов, бортового оборудования, бортовых систем и бортового программного обеспечения, модуля полезной нагрузки, платформы и заканчивая КА в целом;

– *документирования*, согласно которому контрольные операции, входящие в процесс (так же, как и операции производственные), формализованы и зафиксированы в модели в виде наименований разрабатываемых в проекте документов, а программы работ по выполнению операций процесса документированы и содержатся в доступной для участников процессов базе данных (или базе знаний);

– *полноты и достаточности*, состоящего в том, что включению в состав модели того или иного элемента, операции или процесса предшествует анализ его влияния на основной бизнес-процесс. Если элемент не существен для выполнения основного бизнес-процесса, то его в модель не включают.

5. Концептуально соответствующая изложенным целям и принципам построения и реализации модель бизнес-процесса создания КА, реализованная в виде матрицы, представляет собою таблицу, где:

– в вертикальных столбцах по порядку следования указаны этапы выполнения проекта (эскизный проект, наземная экспериментальная отработка и выпуск конструкторской документации, изготовление, приёмочные испытания, обеспечение запуска и лётные испытания КА);

– в горизонтальных строках представлена схема деления КА на составные части (КА, модуль полезной нагрузки и платформа, бортовые системы модуля полезной нагрузки и платформы, бортовое оборудование).

Каждый вертикальный столбец, соответствующий определённому этапу проекта, разбивается на графы, указывающие виды документов, которые разрабатывает исполнитель на данном этапе. В комплексе этих документов выделяют те из них, которые непосредственно контролирует заказчик.

Горизонтальные строки таблицы отражают иерархические отношения оборудования и бортовых систем, а также модуля полезной нагрузки и платформы. Операции процессов, соответствующих комплектующим ЭРИ и материалов, согласно принципам декомпозиции представляют собой самостоятельные бизнес-процессы и оформляются в виде особых моделей.

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ НАДЁЖНОСТЬЮ КА МЕТОДАМИ РАССМОТРЕНИЙ

Для управления процессом создания КА заказчик должен:

– включить в договор (контракт) весь комплекс необходимых требований как к характеристикам назначения и надёжности КА, так и к методам их обеспечения и контроля;

– организовать эффективное взаимодействие с исполнителями проекта по выполнению и контролю контрактных требований.

В табл. 1 представлены виды разрабатываемых заказчиком контрактных документов на создание КА, а также приведены данные о характере включаемых в них требований к надёжности КА и методам их обеспечения и подтверждения.

Таблица 1

Наименование контрактного документа	Характеристика регламентируемых требований к обеспечению надёжности
Техническое задание (техническая спецификация)	Количественные и качественные требования к надёжности КА, систем, оборудования и ЭРИ
Требования, касающиеся квалификации и приёмки	Количественные и качественные требования к объёму, составу, методам и нормам испытаний для подтверждения квалификации (при наземной отработке) и контроля качества изготовления ЭРИ, оборудования, систем и КА
Программа обеспечения качества	Качественные требования к содержанию технических мероприятий, видам и глубине анализов и расчётов, выполняемых генеральным подрядчиком и подрядчиками на этапах создания КА, их составных частей и комплектующих для обеспечения надёжности и качества создаваемых объектов
Содержание работ	Качественные требования к порядку организации и выполнения работ, степени ответственности, к определению этапов и методов контроля хода и результатов работ, а также состава и содержания отчётных документов

Непосредственное взаимодействие заказчика и исполнителей в ходе выполнения проектов организуется в соответствии с описанной матрицей, а содержащиеся в матрице контрольные операции выполняются методами рассмотрений [4].

Под процедурой рассмотрения понимается метод получения заказчиком информации о ходе выполнения проекта для контроля за качеством работ и надёжностью создаваемых КА. Существенные признаки данной процедуры:

– перечень и программы рассмотрений, планируемых к выполнению на этапах проектов, устанавливаются в контрактных документах (как правило, в «Содержании работ»), графики рассмотрений согласовываются с графиками выполнения проекта;

– до начала рассмотрения исполнитель, ответственный за его организацию, подготавливает и представляет заказчику в установленный в контракте срок материалы, содержащие соответствующие виду рассмотрений результаты работ и характеристику ожидаемых или возможных проблем, а также предложения по путям и методам их решения;

– в рассмотрении участвуют специалисты заказчика, исполнителей и (при необходимости) экспертных организаций;

– выполнение решений по результатам рассмотрения является условием для продолжения работ по проекту.

В табл. 2 приведён перечень видов рассмотрений применительно к этапам создания КА, установленным отечественными НД. В таблице указаны аббревиатуры, соответствующие видам рассмотрений, определённых европейскими стандартами системы *ECSS* и получивших применение в практике ОАО «ГКС» и других предприятий – участников работ по проектам создания КА типа «Ямал».

Таблица 2

Этап проекта	Вид рассмотрения
1. Выпуск эскизного проекта	Установочная встреча или рассмотрение системных требований (*SRR – System Requirements Review*). Рассмотрение состояния квалификации оборудования (*EQSR – Equipment Qualification Status Review*) и бортовых систем. Рассмотрение общей готовности производства (*MRR*1 – *Manufacturing Readiness Review*). Предварительное рассмотрение проекта (*PDR – Preliminary Design Review*)
2. Наземная экспериментальная отработка (НЭО)	Рассмотрение результатов НЭО (квалификации) оборудования, бортовых систем, составных частей КА
3. Выпуск конструкторской документации	Критическое рассмотрение проекта (*CDR – Critical Design Review*), включающее в себя рассмотрения: – результатов разработки КД, ПМД и ЭД; – перечней и программ испытаний ЭРИ, режимов и условий их применения
4. Изготовление бортового оборудования	Рассмотрение готовности специализированных испытательных технических центров (ИТЦ) к испытаниям комплектующих ЭРИ. Рассмотрение результатов закупки и испытаний комплектующих ЭРИ в ИТЦ. Рассмотрение готовности к изготовлению лётного оборудования (*MRR*2 – *Manufacturing Readiness Review*). Рассмотрение качества изготовления в точке контроля обязательной (*MIP – Mandatory Inspection Point*). Рассмотрение готовности к испытаниям (*TRR – Test Readiness Review*). Рассмотрение результатов приёмочных испытаний (*TRB – Test Review Board*). Рассмотрение готовности к поставке (*DRB – Delivery Review Board*)
5. Сборка и испытания КА	Рассмотрение готовности к изготовлению КА, включая составные части КА (платформа и модуль полезной нагрузки). Последовательное рассмотрение результатов сборки платформы, модуля полезной нагрузки, КА. Последовательное рассмотрение готовности к испытаниям платформы, полезной нагрузки, КА. Последовательные рассмотрения готовности к каждому виду приёмочных испытаний КА и их результатов. Рассмотрение результатов приёмочных испытаний КА. Рассмотрение завершения изготовления (*FMCR – Flight Model Completion Review*) и приёмка КА на заводе-изготовителе (*CRR – Commissioning Result Review*)
6. Обеспечение запуска КА и лётные испытания	Рассмотрение готовности к запуску (*LRR – Launch Readiness Review*). Рассмотрение готовности КА к интеграции со средствами выведения (*FRR – Flight Readiness Review*). Рассмотрение результатов лётных испытаний или заключительная приёмка КА (*FQR – Flight Qualification Review*)

Учитывая, что содержание разработанных ОАО «ГКС» программ рассмотрений и практические рекомендации по их выполнению подробно изложены в работе [4], приведём примеры, раскрывающие цели конкретных рассмотрений, ключевые элементы их содержания, а также примеры эффективного выполнения.

ПРИМЕРЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЁЖНОСТЬЮ НА ЭТАПАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТОВ

Рассмотрение состояния квалификации бортового оборудования КА (*EQSR*)

Рассмотрение состояния квалификации оборудования проводится на ранних этапах проектирования космического аппарата и заключается в оценке степени соответствия планируемого к применению в КА оборудования заданным условиям эксплуатации и требованиям к функциональным характеристикам и надёжности (прежде всего по ресурсу). В зависимости от результатов анализа состояния оборудования, наличия лётного опыта его использования в рассмотрении должна быть определена категория его квалификации и, при необходимости, объём дополнительных анализов и испытаний, позволяющих сделать вывод о возможности применения данного оборудования в рамках проекта.

По результатам *EQSR* каждое оборудование должно быть отнесено к одной из следующих категорий квалификации [3]:

– ***A*** – новое оборудование, специально спроектированное или квалифицированное применительно к данному проекту;

– ***B*** – оборудование, являющееся модификацией оборудования, разработанного и квалифицированного в рамках других проектов, и требующее изменений конструкции, технологии изготовления, комплектующих ЭРИ и материалов;

– ***C*** – оборудование, разработанное и квалифицированное применительно к другим проектам, не требующее изменений конструкции, технологии изготовления, комплектующих ЭРИ и материалов согласно данному проекту, но в отношении которого установлены более жёсткие технические требования, в том числе по надёжности, или более жёсткие условия эксплуатации;

– ***D*** – оборудование, разработанное и квалифицированное применительно к другим проектам, конструкция, технология изготовления, комплектующие элементы и материалы которого могут быть использованы без изменений и условия его применения соответствуют требованиям данного проекта.

В ходе *EQSR* анализируется предоставляемая поставщиком информация о требованиях, заданных при разработке оборудования, объёме и результатах его проектирования и квалификации, опыте эксплуатации (включая данные об имевшихся недочётах и отказах), изменения конструкторской (КД) и технической (ТД) документации, их причинах и мотивированности.

Эффективность *EQSR* состоит в том, что оно позволяет оптимизировать процесс адаптации оборудования применительно к требованиям создаваемого КА, обосновать необходимый и достаточный объём анализов и испытаний, подтверждающих соответствие оборудования заданным требованиям.

Виды испытаний, применяемых для квалификации отечественного оборудования категорий ***A***, ***B*** и ***C***, приведены в табл. 3 (оборудование категории ***D*** не нуждается в дополнительных испытаниях).

Таблица 3

Категория квалификации оборудования	Виды испытаний				
	Лабораторные отработочные испытания (ЛОИ)	Конструкторско-доводочные испытания (КДИ)	Типовые испытания (ТИ)	Ресурсные испытания (РИ)	На радиационную стойкость (РС)
A	н	+	н	н	н
B	н	+	н	н	н
C	–	–	–	н	н

Примечание: «+» – испытания проводятся обязательно; «–» – испытания не проводятся; «н» – испытания проводятся при необходимости, устанавливаемой в *EQSR*.

Отличия от приведённых в табл. 3 видов испытаний применительно к оборудованию иностранного производства состоят в том, что их цели и задачи более дифференцированы. В связи с этим отработочным испытаниям вида ЛОИ соответствуют испытания лабораторной модели оборудования иностранного производства (*LM*), а испытаниям вида КДИ – испытания инженерной (*EM*), инженерно-квалификационной (*EKM*) и квалификационной (*KM*) моделей. Кроме того, для такого оборудования характерным является использование протолётных моделей (*PLM*), которые по построению, применяемым ЭРИ, материалам, процессам изготовления и контроля качества соответствуют лётному оборудованию (*LM*), но подвергаются испытаниям на повышенные по сравнению к лётным моделям уровни нагрузок (расширенные температурные диапазоны, увеличенная продолжительность действия нагрузок и т. п.).

Предварительное рассмотрение проекта (*PDR*)

Целью *PDR* является оценка концепции построения, реализуемости и соответствия ожидаемых характеристик создаваемых КА, их составных частей, систем и оборудования требованиям контракта; конкретизация планов их проектирования, изготовления и испытаний. По результатам завершения *PDR* разрешается переход к детальной разработке КА, его составных частей, систем и оборудования.

В рамках *PDR* детально анализируются предоставляемые исполнителями проектные материалы, содержащие:

– техническое описание проекта и обоснование выбора основных технических решений, характеристик систем, схемы деления КА и его составных частей;

– представление общей конфигурации КА, его внешней и внутренней компоновки, функциональных и электрических схем систем;

– интерфейсы КА с указанием применяемых средств выведения и наземных средств управления;

– обоснование условий эксплуатации КА, систем, агрегатов и приборов на различных этапах наземной подготовки и лётной эксплуатации;

– бюджеты КА с учётом всех режимов эксплуатации;

– проектные программы обеспечения надёжности и безопасности КА;

– проектные анализы и расчёты, в том числе анализ нештатных ситуаций (НШС); видов, последствий и критичности отказов (АВПКО); оценка электромагнитной совместимости (ЭМС) систем КА; стойкости систем и приборов к электростатическому разряду (ЭСР); расчёты аэродинамики,

теплообмена, разделения и отделения КА от средств выведения, нагрузок на КА и его прочности, баллистики выведения КА, надёжности КА и др.;

– матрицы соответствия характеристик КА требованиям технического задания.

Развиваемая в компании идеология надёжностно-ориентированного проектирования, конструирования и изготовления КА, состоящая в том, что каждое принимаемое проектное, конструкторское или технологическое решение подвергается анализу по критерию надёжности, наиболее полно реализуется именно на этапе проектирования, путём широкого использования методов АВПКО.

В практике компании общие подходы к выполнению АВПКО применяются при анализе бортового оборудования, бортовых систем, КА и даже космических комплексов. При этом, в отличие от сложившейся в отрасли практики, результаты АВПКО используются не только для формирования перечней критичных элементов (КЭ) и разработки программ их дополнительного контроля (с целью снижения вероятности критичных отказов), но и для оптимизации проектных и конструкторских решений и снижения уровня критичности последствий возможных отказов. Практически подтверждена эффективность методов АВПКО и для совершенствования процессов эксплуатации сложных наземных систем связи.

Отмеченное существенное влияние элементной базы на степень надёжности бортового оборудования и КА обусловило необходимость создания подсистемы управления надёжностью, применяемых комплектующих ЭРИ.

Условия для внедрения данной подсистемы закладываются в конкретный проект на ранних этапах проектирования и глубоко анализируются в процессе *PDR*.

В настоящее время указанная подсистема включает в себя:

– ограничение номенклатуры разрешаемых к применению типов ЭРИ по категории качества путём выпуска соответствующего перечня ЭРИ, разрешённых для применения в КА конкретного типа;

– исключение из партий ЭРИ изделий со скрытыми производственными дефектами исходя из результатов дополнительных испытаний в специализированных ИТЦ по программам, в рамках которых предусматриваются отбраковочные испытания, диагностический «неразрушающий» контроль и выборочный «разрушающий» физический анализ;

– контроль правильности применения ЭРИ во вновь разрабатываемых или модернизируемых типах оборудования, выполняемый на этапах выпуска конструкторской документации и НЭО оборудования;

– обеспечение прослеживаемости ЭРИ на этапах закупки, испытаний в ИТЦ и при использовании в составе оборудования (применительно к активным ЭРИ – с точностью до схемных позиций);

– учёт и глубокий физико-технический анализ причин каждого отказа ЭРИ, происшедшего при их испытаниях в ИТЦ и применении в составе оборудования КА.

Доказана высокая эффективность данной подсистемы. Так, например, высокая результативность дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ подтверждается тем, что после проведения контроля качества партий отечественных ЭРИ, закупленных для 2 КА типа «Ямал», из 323529 шт. было забраковано

4339 шт. (1,34%). При этом как потенциально ненадёжные ЭРИ определены 3524 шт. (1,08%), а несоответствующие нормам ТУ – 815 шт. (0,25%).

Рассмотрение готовности к изготовлению бортового оборудования и КА (*MRR*)

Рассмотрение этого вида проводится применительно к бортовому оборудованию и КА и, как правило, выполняется дважды:

– на этапе проектирования (эскизного проекта) с целью анализа технологической вооружённости подрядных организаций и их способности к изготовлению объектов требуемого качества в установленные согласно контракту сроки;

– после завершения разработки конструкторской документации перед непосредственным изготовлением лётного объекта с целью выявления и устранения предпосылок возникновения производственных дефектов, обусловленных возможными скрытыми недостатками применяемых технологических процессов, оснастки, оборудования, условий производства, комплектующих, а также уровнем подготовленности персонала.

Рассмотрение проводится путём анализа ТД, документов, подтверждающих выполнение требований ТД, а также путём непосредственной проверки состояния условий производства и персонала на рабочих местах изготовления и испытаний оборудования, систем и КА.

Обобщённые результаты работ по анализу состояния производства отечественных предприятий космической отрасли подтверждают особую актуальность выполнения *MRR*. Так, в ходе работ в рамках проектов создания КА по заказам ОАО «ГКС» выявлены многочисленные недостатки готовности производств предприятий кооперации, а именно:

– недостаточные меры защиты от разрядов статического электричества (характерно для 64% общего числа проверенных отечественных предприятий), приводящих к пробоям полупроводниковых приборов и микросхем;

– отсутствие аттестации штампов для формовки выводов микросхем (40%), что обуславливает возможные повреждения выводов, нарушение герметичности корпусов и микросхем и последующие коррозионные их повреждения;

– несоблюдение производственной гигиены и параметров внешней среды (15%).

Устранение выявленных недостатков позволило исключить предпосылки возникновения производственных дефектов и отказы оборудования.

Критическое рассмотрение проекта (*CDR*)

Целью *CDR* является обеспечение возможности для заказчика удостовериться в завершении проектирования и квалификации оборудования, бортовых систем и КА в целом.

Осуществление *CDR* позволяет утвердить рабочую конструкторскую документацию (РКД) по разработке и проектированию КА и его составных частей, подсистем и оборудования. На данном этапе выполнения проекта должны быть закончены отработочные испытания оборудования и подтверждены характеристики оборудования и бортовых систем, определённые на этапе *PDR* или в спецификациях (завершена квалификация).

В процессе *CDR* должны быть последовательно (с возможным временным интервалом в соответствии с графиком выполнения этапа по выпуску КД) рассмотрены:

– РКД (чертежи и схемы, необходимые для формирования и разработки комплекта технологической документации и обеспечения процесса изготовления оборудования и КА);

– программно-методическая документация, обеспечивающая возможность проведения испытаний оборудования, бортовых систем и КА;

– эксплуатационная документация, охватывающая периоды работы с оборудованием, бортовыми системами и КА на наземных этапах жизненного цикла, а также при запуске и эксплуатации КА на ГСО.

При *CDR* радиоэлектронного оборудования КА необходимо проверить, что исполнителями приняты все меры по обеспечению правильного применения комплектующих ЭРИ.

Такая работа является одной из составляющих выстраиваемой на этапе проектирования подсистемы обеспечения надёжности элементной базы.

Эффективность работ по контролю за правильностью применения ЭРИ определяется тем, что (по экспертным оценкам) 0,1% ЭРИ, использованных с нарушением допустимых режимов работы, обуславливают увеличение вероятности отказа аппаратуры в среднем в 5 – 7 раз.

Выполненные специалистами компании проверки в проектах по созданию двух КА типа «Ямал» позволили выявить и исключить нарушения режимов работы или схем включения 21 типа комплектующих ЭРИ в 17 типах бортовой аппаратуры КА.

Рассмотрение в точке контроля обязательной (*MIP*)

Точка контроля обязательная (ТКО) – это характерная точка в технологическом процессе изготовления материальной части, результаты контроля в которой позволяют подтвердить, что все предыдущие процессы и операции изготовления и контроля качества выполнены в соответствии с требованиями КД, ТД и НД.

Перечень ТКО, формируемый на этапе разработки КД генеральным подрядчиком с учётом предложений подрядчиков и согласованный с заказчиком, охватывает объекты всех уровней разукрупнения КА (комплектующие ЭРИ, бортовое оборудование, составные части КА). В нём должны быть указаны те этапы работ с материальной частью, когда проводится *MIP*. В соответствии с этим требования о проведении *MIP* применительно к конкретной материальной части КА включаются в технологические процессы её создания как отдельная операция. В ТКО предъявляется материальная часть, проконтролированная (принятая) службой качества (ОТК) предприятия-изготовителя.

Участие заказчика в работе по рассмотрению качества изготавливаемой материальной части в ТКО является обязательным.

В процессе *MIP* подлежат проверке:

– технология, оборудование, персонал и условия изготовления материальной части на соответствие требованиям КД и ТД;

– применённые комплектующие изделия, комплектующие ЭРИ и материалы на соответствие требованиям КД по номенклатуре и качеству;

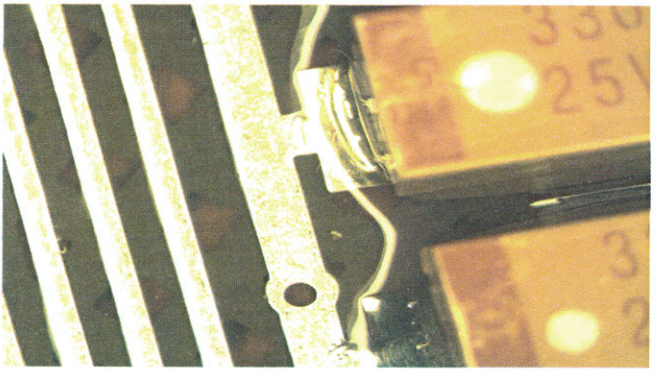


Рис. 3. Недостаточное количество припоя при подпайке конденсатора

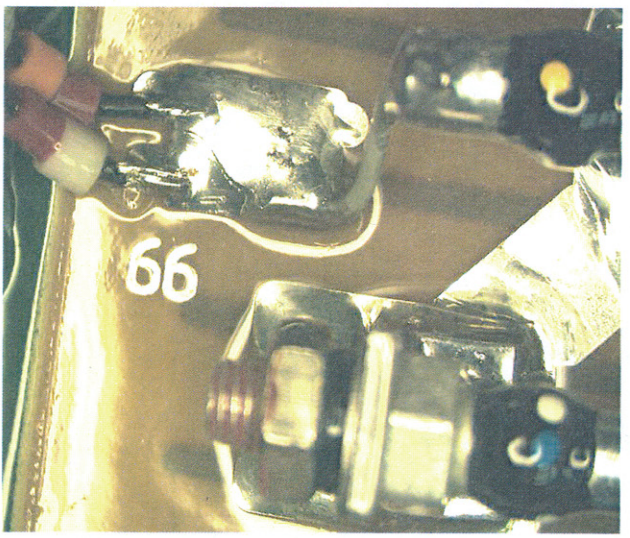


Рис. 4. Излом поверхности пайки

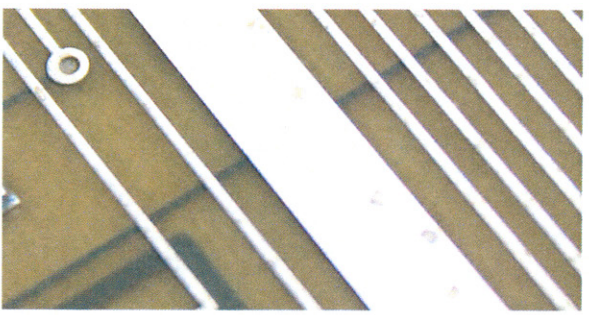


Рис. 5. Дефект металлизации печатной платы

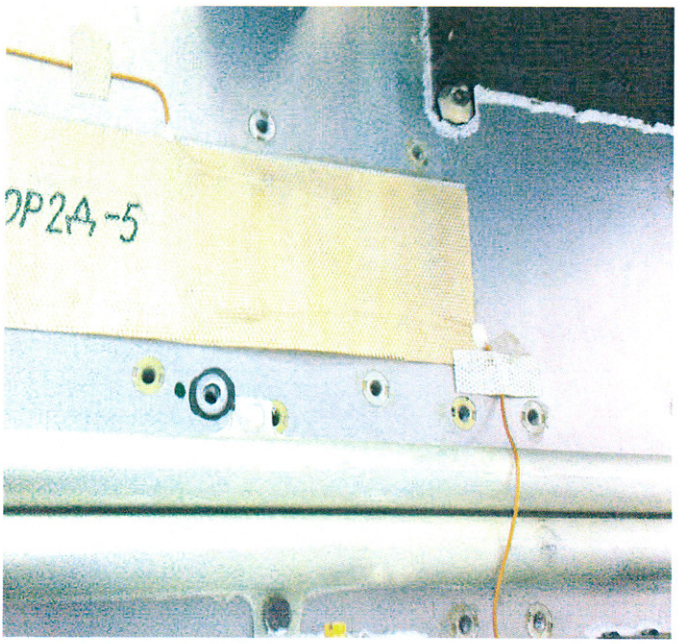


Рис. 6. Отслоение нагревателя на панели КА

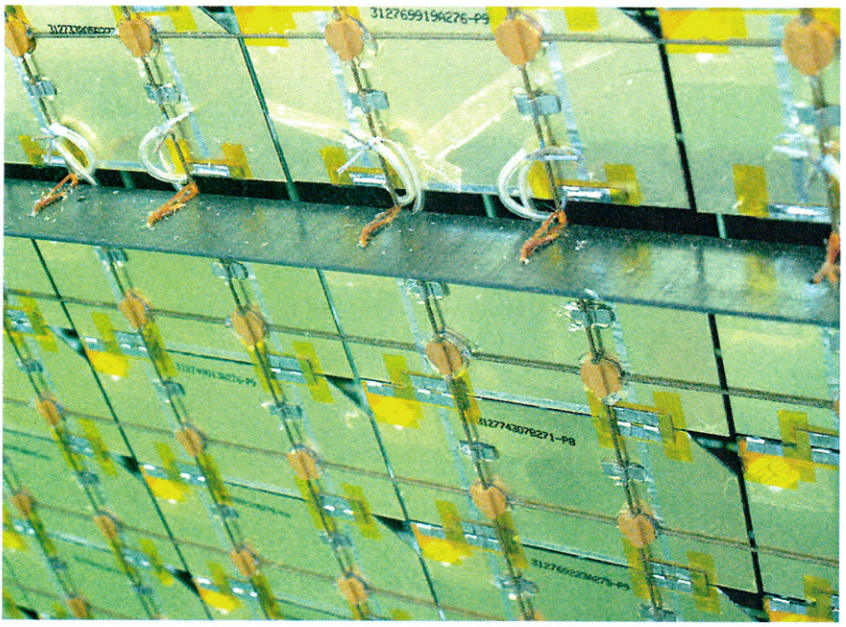


Рис. 7. Трещины на поверхности стекла фотопреобразователей солнечной батареи

– полнота отражения в технологических паспортах операций технологического процесса и операционного контроля;

– качество изготовленной материальной части, которое должно быть подтверждено фотографированием, выполненным в присутствии заказчика.

Эффективность данного вида рассмотрений подтверждается следующими результатами.

В ходе выполнения рассмотрений в ТКО при контроле качества изготовления бортового оборудования одного КА типа «Ямал» из 174 проверенных сборочных единиц было возвращено на доработку для устранения производственных дефектов 24 единицы (14%), а при контроле 167 сборочных единиц приборов другого КА типа «Ямал» возвращено 27 единиц (16%). Окончательно было забраковано 4 сборочные единицы, и потребовалось их повторное изготовление.

На рис. 3 – 7 приведены примеры типовых видов производственных дефектов, выявленных в результате проведения *MIP* в рамках проектов создания КА типа «Ямал».

Процесс рассмотрения в ТКО позволяет не только устранить не выявленные исполнителями производственные дефекты в проверенной материальной части, но и выполнить функции обратной связи в подсистемах проверки готовности производства лётных образцов изделий, а также в подсистеме обеспечения безотказной работы элементной базы.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. В методологии управления надёжностью КА с длительными сроками эксплуатации, применяемой ОАО «Газпром космические системы» и базирующейся на опыте компании, полученном при создании КА типа «Ямал», учитываются передовые положения отечественных и зарубежных нормативно-методических документов.

2. Основы методологии следующие:

– использование физического подхода для анализа и управления надёжностью КА в целях своевременного выявления причин и предпосылок вероятных проблем;

– построение и использование адаптивной к условиям выполнения проекта модели бизнес-процесса создания КА в виде матрицы обеспечения и верификации контрактных требований к КА, позволяющей учесть особенности создаваемых КА и возможности исполнителей (участников) проектов;

– дополнение операций процесса создания КА операциями контроля и анализа хода работ, реализуемыми в виде рассмотрений, состав и программы выполнения которых устанавливаются при заключении контрактов на проведение работ и уточняются по результатам их выполнения.

3. Применяемые ОАО «Газпром космические системы» методические новации и пути их реализации (посредством формирования требования контрактных документов, построения адаптивных моделей бизнес-процессов создания КА, проведения рассмотрений на этапах проектирования и изготовления КА по документированным программам) доказали свою эффективность и могут быть рекомендованы для широкого использования, в том числе для включения в организационно-методические документы отраслевого уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Севастьянов Н.Н.* Особенности космического производства. – Стандарт, 2011, № 8(103).

2. *Севастьянов Н.Н.* Система спутниковой связи и телевидения «Ямал»: состояние и перспективы. – Новые высокие технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи, 2000, т. 10, кн. 3.

3. СТП ГК 12.01.07-2013. Система менеджмента качества. Методология управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. ОАО «Газпром космические системы», 2013, 119 с.

4. *Севастьянов Н.Н., Андреев А.И.* Основы управления надёжностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. Учеб. пособ. Томск: ТГУ, 2015, 265 с.

ЦНИИМАШ
TSNIIMASH

КОСМОНАВТИКА и РАКЕТОСТРОЕНИЕ

ПЕРВЫЙ В КОСМОСЕ 60
1957-2017

3 (96) 2017

В следующем выпуске журнала будут опубликованы статьи, касающиеся вопросов статической и динамической прочности, вибро- и газодинамики конструкций летательных аппаратов, их моделирования и расчёта, а также управления надёжностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации.

В соответствии с лицензионным договором (включение в РИНЦ, подписка, открытый доступ) и дополнительным соглашением № 1 между ФГУП ЦНИИмаш и Научной электронной библиотекой (НЭБ) в 2016 г., начиная с выпуска 1, статьи журнала «Космонавтика и ракетостроение» будут размещаться в электронном виде в базе данных НЭБ, которые могут передаваться заявителям на условиях НЭБ с соблюдением всех авторских и прочих прав сторон (http://elibrary.ru, тел. 8-495-544-24-94).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-36913 от 20.07.2009 г. Учредитель – ФГУП ЦНИИмаш.

Журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий Российской Федерации, в которых могут публиковаться основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

Редколлегия оставляет за собой право отклонить публикацию статьи без обоснования причин и соответствующей переписки с её автором.

Плата за публикацию статей не взимается.

Журнал распространяется по подписке через почтовые отделения (индекс по каталогу «Роспечать» 20859) или непосредственно через редакцию по адресу: 141070, г. Королёв, Московская область, ул. Пионерская, д. 4, ЦНИИмаш. Тел.: (495) 513-41-49, (495) 513-59-10.

КОСМОНАВТИКА и РАКЕТОСТРОЕНИЕ

3(96)

COSMONAUTICS AND ROCKET ENGINEERING

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

О.А. ГОРШКОВ – главный редактор

Н.Г. ПАНИЧКИН – зам. главного редактора

Ю.Н. СМАГИН – зам. главного редактора

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н.А. Анфимов,
Д.Л. Быков,
А.В. Головко,
Л.В. Докучаев,
Б.А. Землянский,
Г.Ф. Карабаджак,
С.Н. Карутин,
В.Ю. Клюшников,
Ю.М. Липницкий,
М.М. Матюшин,
А.А. Медведев,
И.А. Пономарева,
О.П. Скоробогатов,
В.А. Титов,
Г.Р. Успенский,
В.В. Хартов.

O.A. GORSHKOV – Editor-in-Chief

N.G. PANICHKIN – Assistant Editor-in-Chief

Yu.N. SMAGIN – Assistant Editor-in-Chief

EDITORIAL BOARD:

N.A. Anfimov,
D.L. Bykov,
A.V. Golovko,
L.V. Dokuchaev,
B.A. Zemlyansky,
G.F. Karabadzhak,
S.N. Karutin,
V.Yu. Klyushnikov,
Yu. M. Lipnitsky,
M.M. Matyushin,
A.A. Medvedev,
I.A. Ponomareva,
O.P. Skorobogatov,
V.A. Titov,
G.R. Uspensky,
V.V. Khartov.

ЦНИИмаш · 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЁТОМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Бондаренко А.Ю., Лиходед А.И., Малинин А.А., Сидоров В.В. Исследование вибродинамики конструкций при кинематическом и силовом внешних воздействиях..... 5

Арсенов О.Ю., Ерышев А.А., Кондрашин М.А. Применение имитационного моделирования при проектировании перспективных наземных комплексов управления космическими аппаратами..... 14

Гречко А.С., Колосов В.А., Кузнецов И.И., Шохов Г.В. Программно-математическое обеспечение баллистического расчёта траектории движения ракеты-носителя с многоразовой первой ступенью вертикальной посадки... 21

Колозезный А.Э. Развитие экспериментальной базы отработки статической прочности изделий ракетно-космической техники с учётом её использования в гражданских отраслях машиностроения..... 28

Сазонов В.С. Баллистический анализ условий столкновения опасных небесных тел с Землёй в целях предотвращения космической катастрофы..... 35

Куденцов В.Ю., Трушляков В.И., Шатров Я.Т. Разработка бортовой системы детоксикации несимметричного диметилгидразина в баке горючего отработавшей ступени ракеты-носителя..... 47

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОПРОСОВ МЕХАНИКИ, АЭРОДИНАМИКИ, ТЕПЛООБМЕНА, ПРОЧНОСТИ И ДИНАМИКИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Антонец А.В. Близкое к точному полное аналитическое решение уравнений конических течений совершенного газа около острых круговых конусов при сверхзвуковом полёте под нулевым углом атаки..... 59

Буслов Е.П., Лоцманов А.В., Онучин Е.С., Фельдштейн В.А. Баллистический предел стенки гермоотсека космического аппарата с защитным экраном в высокоскоростном диапазоне соударения с частицей..... 74

УДК 629.7

Апетьян В.Э., *Сухомлинов Л.Г.*, *Шиврин М.В.* Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния подкреплённых шпангоутами стеклопластиковых цилиндрических оболочек при локальных нагрузках..... 81

Горский В.В. Методика численного решения уравнений двумерного ламинарно-турбулентного пограничного слоя на проницаемой стенке затупленного тела вращения..... 90

Тихонычев П.С. Метод автоматического построения пространственных слоистых сеток для расчёта прогрева и уноса теплозащитных материалов, основанный на механической аналогии..... 99

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЯЗИ, СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ И КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Беляев М.Ю., *Рулев Д.Н.*, *Юрина О.А.* Вариант подхода к планированию наблюдений потенциально опасных ледников на земной поверхности с борта орбитальной станции..... 107

Коловский И.К., *Подолякин В.Н.*, *Шмаков Д.Н.* Анализ движения космического аппарата «Гонец-М» № 37152 на «замороженной» орбите..... 116

Платонов В.Н., *Сумароков А.В.* Обеспечение точностных характеристик стабилизации перспективного космического аппарата при проведении площадных съёмок поверхности Земли..... 125

МЕТРОЛОГИЯ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Севастьянов Н.Н. Управление надёжностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации..... 133

ОБЗОРЫ

Сизов А.А., *Чадаева Ч.В.* Проблема опасности электроразрядных процессов при функционировании космических аппаратов..... 149

КОСМОНАВТИКА: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

К вершинам в космической баллистике. К 80-летию со дня рождения Н.М. Иванова. *Редколлегия*..... 162

Адрес редакции:
141070, г. Королёв,
Московская область, ул. Пионерская, 4,
Центральный научно-исследовательский
институт машиностроения

© Космонавтика и ракетостроение,
вып. 3(96). ЦНИИмаш, 2017 г.