

УДК 378:629.7
DOI 10.20339/AM.07-24.065

В.Т. Калугин,
д-р техн. наук, профессор,
руководитель НУК СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
А.Ю. Луценко,
канд. техн. наук, доцент,
первый заместитель декана факультета СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
И.К. Романова-Большакова*,
канд. техн. наук, доцент,
заместитель декана по магистратуре факультета СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
e-mail: irina.romanova@bmstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5757-350X>

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Отмечены требования современного этапа подготовки специалистов в области ракетно-космической техники (РКТ), включая реализацию требований по формированию интегрированных компетенций в области обеспечения качества и надежности изделий РКТ. Определены основные особенности требований к надежности РКТ, связь надежности и отказов и мероприятия по обеспечению надежности, проводимые в отрасли. Приведены характеристики надежности основных компонент космического корабля, в том числе систем управления, бортовой аппаратуры, программ, электронной компонентной базы, прочности, технологических процессов. Приводятся классификации испытаний и контроля надежности. На основании проведенных исследований определены основные направления подготовки инженеров в отрасли РКТ для формирования компетенций в области надежности с учетом требований отрасли. Приведены примеры реализации требований в программах дисциплин по УГСН 24 на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ключевые слова: Ракетно-космическая техника, надежность изделий РКТ и их основных компонент, мероприятия по обеспечению надежности, подготовка инженерных кадров РКТ, интегрированные компетенции.

FORMATION OF COMPETENCIES OF ENGINEERING PERSONNEL OF THE ROCKET, SPACE AND AVIATION INDUSTRIES IN THE FIELD OF RELIABILITY ASSURANCE OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Vladimir T. Kalugin, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of the NUC SM Bauman Moscow State Technical University
Alexander Yu. Lutsenko, Cand. Sc. (Engineering), Docent, First Deputy Dean of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University
Irina K. Romanova-Bolshakova*, Cand. Sc. (Engineering), Docent, Deputy Dean for Master's Degree of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University, e-mail: irina.romanova@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5757-350X>

The requirements of the modern stage of training specialists in the field of rocket and space technology (RST) are noted, including the implementation of the requirements for the formation of integrated competencies in the field of ensuring the quality and reliability of RST products. The main features of the RST reliability requirements, the relationship between reliability and failures, and reliability measures carried out in the industry are determined. The reliability characteristics of the main components of the spacecraft, including control systems, on-board equipment, programs, electronic component base, strength, and technological processes are given. Classifications of tests and reliability control are given. Based on the conducted research, the main directions of training engineers in the field of RST for the formation of competencies in the field of reliability, taking into account the requirements of the industry, are determined. Examples of the implementation of requirements in the programs of disciplines on UGSN 24 at the Faculty of Special Mechanical Engineering of the Bauman Moscow State Technical University are given.

Keywords: Rocket and space technology, reliability of RST products and their main components, measures to ensure reliability, training of RST engineers, integrated competencies

Введение

Формирование новых компетенций инженерных кадров ракетно-космической и авиационной отрасли, соответствующих новым задачам, требованиям и возможностям, включает такие аспекты, как подготовка специалистов по проблемам жизненного цикла, сквозное моделирование и проектирование, оптимальное проектирование, развитие цифровых технологий.

Особенностью современного этапа подготовки является реализация требований по формированию интегрированных компетенций, в том числе в области обеспечения качества изделий ракетно-космической и авиационной техники. Одним из решающих показателей качества изделий является их надежность. Поэтому тему данной статьи можно признать актуальной.

Понятийный аппарат по проблемам надежности хорошо разработан и является предметом стандартизации, в том числе: ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения, ГОСТ Р 27.013 Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности, ГОСТ Р 27.302 Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. Для целей настоящего исследования особую роль играет ГОСТ Р 27.303-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов.

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Согласно этому ГОСТу анализ видов и последствий отказов является систематизированным методом исследования объекта или процесса, в основе которого лежит выявление возможных отказов, а также влияния этих отказов на функционирование объекта или процесса, окружающую среду и персонал. Целью выполнения анализа является поддержка принятия решений, направленных на снижение вероятности отказов и значимости их последствий. Применение анализа способствует повышению безотказности, снижению воздействия на окружающую среду, снижению закупочных и эксплуатационных расходов, повышению деловой репутации и др.

Качество технической системы в широком смысле может быть охарактеризовано как минимум тремя группами свойств.

- ◆ Проектные показатели – надежность.
- ◆ Состояние в процессе эксплуатации.
- ◆ Способность к восстановлению после сбоев и поломок.

Основные термины, которыми мы оперируем, в соответствии со стандартами следующие.

- ◆ *Повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.
 - ◆ *Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Отказ может быть полным или частичным. Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние. Частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.
 - ◆ *Причина отказа* – совокупность обстоятельств (явлений, процессов, событий и состояний), приводящая к отказу.
 - ◆ *Механизм отказа* – процесс, приводящий к отказу (физический, химический, логический, психологический или их комбинация).
 - ◆ *Метод обнаружения* – способ, позволяющий выявить вид отказа или его зарождение.
 - ◆ *Средства контроля* – предусмотренные конструкцией объекта встроенные устройства или самостоятельное оборудование, которые способны предотвратить отказ, снизить вероятность его возникновения или изменить его последствия.
 - ◆ *Обработка (вида отказа)* – действия, направленные на изменение вероятности и/или последствий вида отказа.
- Понятие надежности является фундаментальным понятием, но подчиненным понятию эффективности, которая определяется как свойство системы выполнять заданные функции с требуемым качеством. Помимо надежности, эффективность определяется такими показателями, как точность, быстродействие, помехоустойчивость и др.

Одним из методов повышения надежности является резервирование – метод повышения надежности за счет избыточности, т.е. с применением дополнительных средств сверх минимально необходимых для выполнения технической системой заданных функций.

Особенности изделий РКТ в проблеме надежности

Современный космический аппарат (КА) представляет собой классический пример сложного технического комплекса (СТК) [1]. Сложность здесь подразумевает два важных аспекта.

Первый аспект – значительное число входящих в состав комплекса компонент, связанных между собой множеством связей различной природы. Действительно, КА включает целый ряд подсистем: систему автономной навигации, систему терморегулирования, систему энергоснабжения, систему телеметрических измерений, целевую аппаратуру. Каждая

из систем, в свою очередь, состоит из множества приборов, агрегатов, датчиков. Всего на борту насчитываются сотни устройств, имеющих большое число параметров, режимов работы, воспринимаемых команд.

Второй аспект подразумевает сложное поведение, которое трудно предсказать заранее [2], а описать аналитически практически невозможно. Неудивительно, что в реальных космических полетах происходят отказы, вызываемые различными причинами, среди которых – аппаратные сбои и ошибки в программном обеспечении.

Отличие в эксплуатации традиционных машин и механизмов, восстановление работоспособности которых обычно подразумевает диагностику и ремонт, в том, что для изделий РКТ, находящихся на орбите, такое практически невозможно. Поэтому восстановление работоспособности возможно лишь на основании структурной или функциональной избыточности имеющегося на борту оборудования и на программных средствах.

Обеспечение живучести космических аппаратов [1]. При разработке алгоритмов контроля и диагностики на основе инженерного анализа бортовой аппаратуры (БА) с учетом имеющихся резервов и предшествующего накопленного опыта эксплуатации выявляется список критических отказов и формируется оценка их важности, разрабатываются диаграммы состояния и временные циклограммы режимов управления. Известны ситуации, когда работоспособность КА в целом (хотя и с некоторым снижением качества) восстанавливается путем использования того или иного бортового оборудования для решения изначально не планировавшихся задач (например, после отказа гироскопических датчиков – измерителей перевода системы стабилизации на использование в качестве основного источника информации звездных датчиков). Достижение этого требует переработки бортовых алгоритмов и программ и загрузки измененного программного обеспечения на борту.

Но потери времени на обмен между КА и Землей, постоянные затраты на поддержание непрерывной работы средств наземного комплекса управления (НКУ) органически присущи данному методу. В некоторых случаях подключение персонала НКУ вообще не представляется возможным ввиду особенностей орбит КА (например, для низкоорбитальных спутников Земли с коротким интервалом видимости с каждого из наземных пунктов или автоматических межпланетных станций с длительным временем прохождения радиосигнала), что при быстром развитии аномальной ситуации на борту делает последующее вмешательство с Земли уже бесполезным.

Кардинальным решением проблемы является максимальная степень реализации концепции автономного

управления. Данный подход подразумевает перенос принятия решений на бортовые средства с оставлением за НКУ только постановки общих задач и целей функционирования и последующего контроля.

Бортовые базы знаний как средство обеспечения живучести. Классическая структура подразумевает следующие компоненты:

- 1) база знаний;
- 2) человеко-машинный интерфейс (диалоговый компонент);
- 3) машина вывода («решатель»);
- 4) средства приобретения знаний (компонент приобретения знаний);
- 5) подсистема объяснения (объяснительный компонент)

На основании изложенного можно выделить пять причин повышения требований к надежности изделий ракетно-космической техники.

1. Объекты РКТ относятся к сложным системам с точки зрения их состава и структуры. Особенностью любой сложной системы является наличие большого количества разнообразных элементов, находящихся во взаимосвязи и взаимовлиянии, поэтому повреждение одних элементов может крайне негативно сказаться на функционировании всей системы.

2. Особенностью изделий РКТ являются экстремальные условия их эксплуатации и сложность, а часто и невозможность проведения ремонтных работ.

3. Широкое применение средств автоматизации, автоматизированного и автоматического управления сложных технических систем, включая изделия РКТ на этапе проектирования, создания и эксплуатации, также накладывает особенности на формирование жизненного цикла изделия РКТ.

4. Экономический фактор, а именно высокая стоимость изделий РКТ, требует принятия проектных и эксплуатационных решений об оптимальном их составе с точки зрения расходов на изготовление и затрат на эксплуатацию.

5. Связь качества и надежности изделия РКТ в целом и соответствующих характеристик отдельных комплектующих и подсистем требует определения на всех этапах жизненного цикла в связи с вышеперечисленными факторами.

Надежность и отказы

Показатели безотказной работы в оценке надежности.

К пилотируемым космическим аппаратам (ПКА) предъявляются количественные требования по надежности, включающие в себя такой показатель, как вероятность безотказной работы (ВБР), под которой понимается веро-

ятность выполнения штатной программы полета ПКА [3]. В соответствии с требованиями ГОСТ 27.301-95 и других действующих нормативно-технических документов, оценка этого показателя и других показателей надежности проводится следующим образом:

1) на этапе эскизного проекта проводится проектный анализ надежности ПКА в целом и его составных частей. Результаты оценки включаются в тома эскизного проекта;

2) на этапе разработки рабочей документации проводится уточнение расчета надежности. Результаты оценки оформляются в виде отдельного документа – расчета надежности;

3) перед летными испытаниями проводится уточнение расчета надежности по результатам наземной экспериментальной отработки. Результаты оценки включаются в итоговый отчет о готовности ПКА к летным испытаниям;

4) уточнение расчета надежности после проведения летных испытаний. Результаты оценки включаются в отчет по результатам летных испытаний ПКА;

5) на этапе использования изделия по целевому назначению оценка его надежности проводится в рамках ежегодного анализа технического состояния и надежности по результатам полетов в истекшем году, а также при оценке готовности очередного образца изделия к предстоящему полету.

Классификация отказов [3]. Можно сказать, что надежность ПКА является функцией количества отказов приборов в нем в процессе выполнения полета. Поэтому такой показатель надежности изделия, как ВБР, в общем случае необходимо определять как вероятность P безотказной работы изделия при условии, что за время полета в изделии может произойти некоторое количество r отказов приборов.

ГОСТ 27.002-2015 подразделяет отказы по причине возникновения на три группы:

- ◆ конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;
- ◆ производственный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;
- ◆ эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и/или условий эксплуатации.

Статистические модели отказов [4]. Теория надежности различает три характерных типа отказов.

- ◆ Прирабочные отказы – отказы, которые происходят в течение раннего периода эксплуатации машины вследствие несовершенной технологии производства.

Прирабочные отказы можно устранять путем предварительных испытаний машины перед вводом ее в эксплуатацию.

- ◆ Износные отказы – отказы, вызываемые износом отдельных частей изделия. Они являются признаком старения. Износные отказы могут быть ограничены путем своевременной замены изнашивающихся деталей во время регламентного обслуживания или ремонта изделия.
- ◆ Внезапные отказы в период нормальной эксплуатации изделия, которые могут возникнуть случайно и не могут быть устранены ни наладкой, ни наилучшим обслуживанием. Эти случайные отказы подчиняются определенным общим закономерностям, и их интенсивность в течение достаточно большого периода эксплуатации машины примерно постоянна.

Каждый из этих отказов характеризуется особым статистическим распределением во времени: прирабочные отказы – распределением Вейбулла, случайные (внезапные) – экспоненциальным распределением, износные – нормальным распределением Лапласа. При количественной оценке надежности изделия используются все перечисленные статистические методы и вероятностные расчеты.

Критические отказы [1]. Список критических отказов выявляется на основе инженерного анализа бортовой аппаратуры (БА) с учетом имеющихся резервов и предшествующего накопленного опыта эксплуатации.

Аппарат анализа надежности [5]. Аппарат анализа включает:

- ◆ функциональный анализ – на уровне оборудования и систем;
- ◆ анализ (расчет) надежности – на уровне оборудования, систем и КА;
- ◆ анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) – на уровне оборудования, систем и КА;
- ◆ анализ нагрузок на комплектующие элементы – на уровне оборудования;
- ◆ анализ худшего случая – на уровне оборудования;
- ◆ анализ обеспечения ресурса и сохраняемости – на уровне оборудования;
- ◆ анализ нештатных и аварийных ситуаций – на уровне КА;
- ◆ анализ безопасности – на уровне оборудования и систем.

Методы оценки и расчетов надежности [6]. В области РКТ применяются следующие методы.

- ◆ Метод структурных схем надежности.
- ◆ Расчет надежности систем при последовательном соединении элементов.
- ◆ Расчет надежности систем при параллельном соединении элементов.

- ◆ Смешанное соединение элементов.
- ◆ Вероятность безотказной работы системы «не менее m из n ».
- ◆ Методы решения задач статистической динамики.
- ◆ Логико-вероятностные методы.
- ◆ Исследования надежности структурно сложных систем.
- ◆ Нормирование надежности.
- ◆ Организационно-технические методы.
- ◆ Обеспечение надежности ракетно-космических комплексов на различных этапах жизненного цикла.
- ◆ Организационно-технические методы.
- ◆ Летная отработка изделий ракетно-космической техники.

Вероятностная природа показателей надежности [7]. Общей характеристикой показателей надежности является то, что они имеют вероятностную природу и характеризуют вероятность наступления определенного события или выполнения заданных требований. Возможны оценки надежности средним значением контролируемой случайной величины, дополненным доверительными границами. Оценки надежности дают достаточно полное представление о качестве (эффективности) функционирования технического объекта (системы) в определенных условиях эксплуатации — нормальных условиях. С понятием «надежность» связаны ресурсные испытания.

Вероятностные модели надежности [8]. Методы оценки надежности технических систем (аппаратура, устройства, оборудование и др.) были разработаны значительно ранее компьютерных систем и основывались на вероятностных марковских процессах с множеством числа состояний по теории массового обслуживания. Эти методы обеспечивали проверку надежности функционирования техники, приборов и устройств в различных областях (машиностроение, энергетика, космос, медицина и др.). На их работоспособность влияли неисправности и разные недоработки в конструкции, приводящие к разрушительным последствиям и к ущербу системы в целом.

Классификация моделей надежности программного обеспечения:

- ◆ оценочная модель Мусы;
- ◆ модель Мусы-Окумото;
- ◆ модель Гоело-Окумото;
- ◆ S-образная модель.

Причинно-следственные связи и оценка надежности. Установление причинно-следственных связей является одним из важных инструментов в понимании причин, вызывающих потери надежности, — например, определение математической зависимости между совокупностью внешних и внутренних факторов и вероятностью неразрушения конструкций [9].

Мероприятия по обеспечению надежности

Общие мероприятия по обеспечению надежности [3].

В процессе использования по целевому назначению надежность ПКА, как и других изделий ракетно-космической техники (РКТ), обеспечивается системой качества на этапах изготовления и подготовки образцов изделия к полету и комплексом работ по анализу и устранению отказов и неисправностей, выявленных в процессе полетов предыдущих образцов изделия, исключающих возможность их повторения.

Необходимость предотвращения отказов изделия, приводящих к невыполнению программы полета или опасным для экипажа последствиям, обусловила в соответствии с требованиями ОСТ 134-1002-94 включение в состав требований надежности качественных требований безотказности в виде требований устойчивости к отказам, когда один отказ не должен приводить к прекращению программы полета ПКА, а два отказа не должны приводить к опасным для экипажа последствиям — травмам или гибели.

Вопрос оптимизации запасов надежности при создании изделий РКТ не ставится — в обязательном порядке все показатели надежности должны быть не ниже требуемых. Критерием оптимальности является то, что все системы и агрегаты не должны превышать закладываемых в их конструкцию ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению.

Однако ставится задача многокритериальной оптимизации показателей надежности. В [10] показаны разработанные методы на примере создания композитных материалов для изделий РКТ.

Структурная избыточность [1]. Отличие в эксплуатации традиционных машин и механизмов, восстановление работоспособности которых обычно подразумевает диагностику и ремонт, в том, что для изделий РКТ, находящихся на орбите, такое практически невозможно. Поэтому восстановление работоспособности возможно лишь на основании структурной или функциональной избыточности имеющегося на борту оборудования и на программных средствах.

Временные циклограммы [1]. Диаграммы состояния и временные циклограммы режимов управления разрабатываются при разработке алгоритмов контроля и диагностики.

Оптимизация запасов надежности [10]. Вопрос оптимизации запасов надежности при создании изделий РКТ не ставится — в обязательном порядке все показатели надежности должны быть не ниже требуемых. Критерием оптимальности является то, что все системы и агрегаты не должны превышать закладываемых в их конструкцию ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению.

Документы по надежности [11]. Проблема надежности КА в рамках проектирования решается на всех этапах, начиная с формирования технического задания и кончая выпуском технической документации.

Проблема решается на основе таких документов, как программа обеспечения надежности (ПОН) изделия в целом, его составных частей и элементов, а также согласованного документа порядка подтверждения требований по надежности на всех этапах создания.

Документы имеют типовые формы и модели, а именно: модели, типовые ПОН, модели подтверждения надежности.

Задание требований по надежности [11]. Задание требований по надежности системы и ее элементов включает:

- ♦ выбор номенклатуры показателей надежности;
- ♦ нормирование надежности (установление требуемых количественных значений показателей надежности элементов системы);
- ♦ нормирование доверительных вероятностей или средних квадратичных отклонений, которым нормативные значения показателей надежности системы должны быть подтверждены к моменту завершения государственных испытаний;
- ♦ формирование для элементов системы организационных и технических требований по обеспечению надежности;
- ♦ установление порядка подтверждения требований по надежности по стадиям создания элементов системы.

Надежность основных компонент КА

Важность надежности систем управления [12]. Как показывает практика, одной из главных причин аварий, потери дорогостоящих аппаратов, в которых воплощен труд многотысячных коллективов, являются сбои и ошибки функционирования систем управления (СУ), в том числе проблемы с программным обеспечением СУ.

Бортовая аппаратура и надежность [1]. В течение всего срока активного существования (САС) необходимо решать задачу определения множества управляющих воздействий, необходимых для поддержания требуемой для реализации конкретной бортовой функции конфигурации бортовых средств. При этом обязательным является парирование отказа единичного устройства без потери качества или функциональности.

В случае диагностики отказа происходит реконфигурация аппаратуры с использованием «горячего» или «холодного» резерва либо перевод КА в один из специальных «безопасных» режимов, в которых развитие аварийной ситуации, способное привести к катастрофической потере работоспособности, исключается.

Надежность аппаратуры [13]. Разработана технология оценки надежности элементов и модулей перспективной специальной и научной аппаратуры космического назначения, длительно функционирующей в условиях космического пространства. Технология представляет собой совокупность положений, правил, методик, математических моделей, алгоритмов и методов оценки надежности элементов и модулей новых образцов перспективной специальной и научной аппаратуры космического назначения, реализованных с использованием программно-технических средств. Технология позволяет выполнять в автоматизированном режиме:

- ♦ сбор и обработку информации о надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения по результатам натурной отработки;
- ♦ расчет надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения по результатам натурной отработки;
- ♦ контроль и поддержку принятия решений по обеспечению надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения;
- ♦ администрирование и хранение информации о надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения.

Надежность управления КА [14]. Надежность управления КА определяется следующими компонентами:

- ♦ оперативностью и надежностью формирования и передачи на борт и с борта КА командно-программной информации;
- ♦ оперативностью и надежностью проведения операций для выявления и диагностирования отказов подсистем КА на наземном комплексе управления.

Управляющие воздействия [1]. В течение всего САС необходимо решать задачу определения множества управляющих воздействий, необходимых для поддержания требуемой для реализации конкретной бортовой функции конфигурации бортовых средств. При этом обязательным является парирование отказа единичного устройства без потери качества или функциональности.

Важность надежности программ [12]. *Одной из важных причин в проблемах функционирования систем управления являются недостатки, ошибки и низкий уровень отказоустойчивости бортового программного обеспечения, на которое возлагается в настоящее время, как правило, непосредственное решение задач управления.*

Еще более усложняется ситуация, когда речь идет об управляющих программах, функционирующих в режиме реального времени, от правильного функционирования которых напрямую зависит реализация важнейших миссий, безопасность, а иногда — человеческие жизни. К надежности подобного программного обеспечения, называемого

критическим, предъявляются особо высокие требования. Именно такого рода программное обеспечение используется в аэрокосмической отрасли. К сожалению, ошибки в программах приводили и приводят к катастрофам и авариям.

Электронная компонентная база [15]. Оценить коэффициенты влияния входного контроля (ВК) и дополнительных испытаний (ДИ) на показатели надежности партий электронной компонентной базы (ЭКБ) можно на основе статистики отказов ЭКБ при проведении испытаний в испытательных центрах. Для этого существует методика, изложенная в [5], согласно которой требуется оценить верхнюю доверительную границу для интенсивности отказов.

Применение справочников [15]. В настоящее время при проектной оценке надежности данных изделий ракетно-космической техники (РКТ) активно используются соответствующие справочники.

Прочность и надежность [9]. Для достижения высоких показателей надежности на этапе проектирования необходимо обеспечить базовое свойство изделия – его прочность – с высокой вероятностью неразрушения. Высокая вероятность неразрушения обеспечивается в том числе введением в расчеты на прочность коэффициентов безопасности, а также нормируемых значений запаса прочности.

Анализ производства с точки зрения надежности [16]. В связи с этим анализ основных этапов производства электрорадиоизделий (ЭРИ) ИП является важным фактором для обеспечения надежности отечественной бортовой аппаратуры (БА). Под обеспечением надежности БА понимается совокупность координируемых действий, являющихся частью системы управления надежностью и ориентируемых на достижение, поддержание и подтверждение требуемых уровней надежности.

Испытания и контроль надежности

Технология оценки надежности [13]. Для решения этой задачи разработана технология оценки надежности элементов и модулей перспективной специальной и научной аппаратуры космического назначения, длительно функционирующей в условиях космического пространства. Технология представляет собой совокупность положений, правил, методик, математических моделей, алгоритмов и методов оценки надежности элементов и модулей новых образцов перспективной специальной и научной аппаратуры космического назначения, реализованных с использованием программно-технических средств. Технология позволяет выполнять в автоматизированном режиме:

- ♦ сбор и обработку информации о надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения по результатам натурной отработки;

- ♦ расчет надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения по результатам натурной отработки;
- ♦ контроль и поддержку принятия решений по обеспечению надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения;
- ♦ администрирование и хранение информации о надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения.

Испытания и классификация испытаний [17]. В настоящее время не существует единой классификации испытаний, одинаково пригодной для изготовления и разработки различных типов КА. На предприятиях характер и очередность проводимых испытаний различны, они зависят от определенного типа проектируемого КА и определяются принятой технологией производства. В зависимости от назначения испытания разделяются на пять основных групп.

1. Оценочные испытания.
2. Испытания во внешних условиях.
3. Контроль качества.
4. Испытания на надежность.
5. Специальные испытания.

Оперативный контроль [14]. Контроль технического состояния космического аппарата и диагностика возникающих на нем отказов составляют неотъемлемую часть общего процесса управления КА. Целью контроля, в широком смысле, является определение технического состояния приборов, систем, агрегатов, КА в целом и обеспечение оператора необходимой контрольно-диагностической информацией для принятия решения по управлению КА на борту (в бортовом комплексе управления) или на Земле (в наземном комплексе управления). Целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса технических систем на основе методов получения и оценки диагностической информации, построения диагностических моделей и алгоритмов принятия решений.

Одним из способов анализа технического состояния космических аппаратов по данным телеметрической информации является широкое применение современных информационных технологий обработки данных [18].

Неразрушающий контроль [19]. Активно используется в аэрокосмической промышленности.

CALS(ИПИ)-технологии являются базовыми технологиями обеспечения и контроля надежности изделий РКТ [20]. Цель использования CALS (ИПИ)-технологий для обеспечения и контроля НБ изделий РКТ на этапе проектирования – информационное обеспечение разработки и выполнения программ обеспечения надежности безопасности на этапе проектирования.

Роль информационных технологий на этапе проектирования первостепенна, состав и объем информационного

обеспечения автоматизированного проектирования наиболее значительны.

Этап комплексных электрических испытаний [21]. Особенностью этого этапа является необходимость автоматизации анализа проблем, связанных с обеспечением надежности сложной технической системы при наземной экспериментальной отработке на этапе комплексных электрических испытаний (КЭИ) космических аппаратов (КА).

Проблема отличия реальных и расчетных параметров надежности [22]. Высокая погрешность между расчетными данными показателей надежности (безотказности) и эксплуатационными РУ, а также частое наступление отказов в ходе эксплуатации до завершения СА обусловлены несколькими факторами: усложнение РУ космической аппаратуры; нарушения при выполнении обязательных мероприятий нормативно-технической документации (НТД), согласованных в техническом задании (ТЗ); низкое качество электрорадиоизделий, а также низкая эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя (в особенности невыполнение п.4.1 ГОСТ Р ИСО 9001-2015) и системы менеджмента надежности как части СМК.

Три метода оценки соответствия показателей надежности заданным требованиям [23]. Согласно ГОСТ РВ 20.57.304–98 оценка соответствия показателей надежности САРП заданным требованиям может проводиться одним из трех методов: экспериментальным, расчетно-экспериментальным или расчетным.

Создание новых автоматизированных систем контроля и диагностики [18]. Аналитический обзор научных публикаций показал, что крайне актуальным является создание новых автоматизированных систем контроля и диагностики для повышения отказоустойчивости и увеличения срока эксплуатации КА. Наряду с прочими моделями, методами и технологиями ИНС (искусственная нейронная сеть) являются наиболее перспективными средствами решения задач интеллектуального анализа телеметрической информации.

Профессиональный стандарт в области надежности РКТ

Профессиональный стандарт «Специалист по надежности ракетно-космической техники» 25.013 [24] определяет особую задачу организации работ по обеспечению надежности ракетно-космической техники и ее конкретизацию как обоснование, планирование и сопровождение работ по обеспечению надежности изделий РКТ в организациях ракетно-космической промышленности. Анализ показал, что в профессиональном стандарте учтены все работы, которые описаны в предыдущем разделе данной статьи.

Стандарт включает следующие обобщенные трудовые функции:

- ♦ задание, оценка и обеспечение надежности изделий РКТ на всех этапах жизненного цикла;
- ♦ разработка и экспертиза нормативно-технической документации и методик задания требований, оценки и контроля надежности изделий РКТ;
- ♦ организация работ и руководство работами по обеспечению надежности изделий РКТ.

При формировании собственно утверждаемых образовательных стандартов организации должны образовываться компетенции, отвечающие следующим трудовым функциям:

- ♦ задание требований к надежности изделий РКТ и оценка достигнутых значений надежности изделий РКТ на всех этапах жизненного цикла;
- ♦ контроль выполнения требований по надежности изделий РКТ;
- ♦ разработка комплексных документов по наземной экспериментальной отработке изделий РКТ;
- ♦ разработка программ обеспечения надежности (ПОН) изделий РКТ;
- ♦ анализ видов последствий и критичности отказов РКТ и проведение работ с критичными элементами и критичными технологическими процессами на всех этапах жизненного цикла изделий РКТ;
- ♦ разработка методик задания и нормирования требований к надежности изделий РКТ;
- ♦ разработка методик проектного анализа надежности, обоснования программ обеспечения надежности изделий РКТ;
- ♦ разработка методик планирования и обработки результатов испытаний, контроля надежности изделий РКТ;
- ♦ экспертиза и разработка нормативно-технической документации по надежности изделий РКТ;
- ♦ организация работы и руководство работой подразделений надежности в организациях ракетно-космической промышленности;
- ♦ методическое сопровождение работы аварийных комиссий по результатам эксплуатации изделий РКТ;
- ♦ обоснование решений о допуске к летным испытаниям изделий РКТ.

Анализ перечня направлений по видам экономической деятельности (ОКВЭД) показал, что эти направления в той или иной степени соответствуют трудовой деятельности выпускников факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а именно:

- ♦ 30.30 Производство летательных аппаратов, включая космические, и соответствующего оборудования;
- ♦ 51.22 Деятельность космического транспорта;

- ♦ 63.11.1 Деятельность по созданию и использованию баз данных и информационных ресурсов;
- ♦ 72.19 Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук прочие.

Таблица

**Дисциплины для формирования компетенций
в области надежности РКТ факультета
«Специальное машиностроение»**

Кафедра	Дисциплина
СМ1 «Космические аппараты и ракеты-носители»	Нештатные ситуации пилотируемых космических аппаратов. Нештатные ситуации летательных аппаратов. Основы проектирования летательных аппаратов. Проектирование и конструирование летательных аппаратов. Надежность ракетно-космических систем
СМ2 «Аэрокосмические системы»	Надежность и эффективность изделий РКТ. Проектирование с учетом случайных факторов
СМ3 «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов»	Методы контроля при управлении полетом космических аппаратов. Системы обмена информацией с летательными и космическими аппаратами кафедры СМ3. Командно-программное управление космическим полетом
СМ8 Стартовые ракетные комплексы	Информационно-аналитические системы эксплуатации и мониторинга технологического оборудования. Надежность оборудования комплексов. Основы технической эксплуатации комплексов КА. Эксплуатация систем управления и контроля стартовых и технических комплексов
СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения»	Выходной технологический контроль ракетно-космической техники. Испытания ракетно-космической техники. Методы и средства неразрушающего контроля. Надежность производственных и технологических систем
СМ13 Ракетно-космические композитные конструкции	Взаимосвязь конструкторских и технологических решений. Работа конструкций в экстремальных условиях. Современные проблемы авиа- и ракетно-космической науки, техники и технологии

Учебные планы и дисциплины

Их реализация при подготовке специалистов на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Задачи, стоящие в области обеспечения надежности, рассмотренные в первой части статьи, а также соответствующие трудовые функции, определенные профессиональным стандартом 25.013, находят комплексное решение при подготовке специалистов по направлению УГСН 24 на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (табл.).

Разработка межкафедральных курсов по вопросам надежности изделий РКТ на основе программ дисциплин, читаемых кафедрами факультета, будет способствовать дальнейшему совершенствованию подготовки и формированию интегрированных компетенций в области создания, проектирования и эксплуатации сложных объектов РКТ.

Заключение

Современные требования к повышению качества и надежности изделий РКТ должны быть реализованы в том числе через соответствующую подготовку инженерных кадров, которая должна в силу сложности поставленных задач формировать интегрированные компетенции обеспечения надежности в области производства и эксплуатации изделий РКТ на протяжении жизненного цикла.

Литература

1. *Тюгашев А.А.* Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2 (14). P. 9–16.
2. *Романова-Большакова И.К.* Многокритериальная оптимизация выбора индикаторов состояния и надежности объектов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем. Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 204–217.
3. *Милованов В.А.* Проведение расчетов надежности космических аппаратов с использованием статистических закономерностей проявления отказов приборов, блоков и узлов в процессе эксплуатации // Космическая техника и технологии. 2021. № 4 (35). С. 53–65. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-4-53-65
4. *Трефилова Т.А., Бирюкова Г.А.* Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 4. С. 42–44.

References

1. *Tyugashev, A.A.* Approach to ensuring the fault tolerance of spacecraft on the basis of design automation of intelligent onboard software. *Reliability and quality of complex systems*. 2016. No. 2 (14). P. 9–16.
2. *Romanova-Bolshakova, I.K.* Multicriteria optimization of the choice of the indicators of the state and reliability of objects. *Development and debugging technologies of complex technical systems*. Proceedings of the VIII All-Russian scientific-practical conference. Moscow, 2022. P. 204–217.
3. *Milovanov, V.A.* Spacecraft reliability calculations using the statistical regularities of failures of devices, units and assemblies during operation. *Space Engineering and Technology*. 2021. No. 4 (35). P. 53–65. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-4-53-65
4. *Trefilova, T.A., Biryukova, G.A.* Measures to ensure reliability at the stages of design, production and operation of the products (in Russian). *Electronics and Electrical Equipment of Transport*. 2020. No. 4. P. 42–44.

5. Губарев А.В., Котьяева А.Д. Анализ принципов и методов обеспечения надежности космических аппаратов на этапах жизненного цикла // *NovalInfo*. 2022. 135. С. 8–9.
6. Куренков В.И. Методы обеспечения надежности и экспериментальная отработка ракетно-космической техники. Самара, Изд-во СГАУ, 2012. 257 с.
7. Лисейкин, В.А., Моисеев Н.Ф., Сайдов Г.Г., Фролов О.П. Основы теории испытаний экспериментальная отработка ракетно-космической техники / под ред. д-ра техн. наук В.К. Чванова. М.: Машиностроение – Полет/Виарт Плюс, 2015. 253 с.
8. Пакулин Н.В., Лаврищева Е.М., Рыжов А.Г., Зеленев С.В. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов // Труды Института системного программирования РАН. 2018. 30 (3): 99–120. URL: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8)
9. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций / Ю.П. Похабов, Д.О. Шендалёв, А.Ю. Колобов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22. № 1. С. 166–176. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176
10. Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности // Ремонт, Восстановление, Модернизация. 2015. № 6. С. 33–38.
11. Геча В.Я., Барбул Р.Н., Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. 19 (2): 3–8. URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8>
12. Тюгашев А.А., Тюгашев А.А., Ермаков И.Е. Пути повышения надежности и качества программного обеспечения в космической отрасли // Управление большими системами. 2012. Вып. 39. С. 288–299.
13. Гончаров В.В., Бакланов В.И., Бурцев А.С. и др. Технология оценки надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры, длительно функционирующей в условиях космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 612–617.
14. Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П. и др. Высокопроизводительная нейросетевая система мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным // Программные системы: теория и приложения. 2017. 8: 3 (34). С. 109–131.
15. Кулибаба А.Я., Сашов А.А., Суконкин М.К., Штукарев А.Ю. Анализ влияния входного контроля и дополнительных испытаний на надежность электронной компонентной базы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. 7 (3): 87–92. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.87.92
16. Матюшев Р.А., Патраев В.Е. Методы обеспечения надежности электрорадиоизделий, применяемых в бортовой аппаратуре космических аппаратов длительного функционирования зарубежных стран // Решетневские чтения: Материалы XVI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (7–9 ноября 2012 г., Красноярск). Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2012. С. 188–189.
17. Кубрак М.В., Леонов С.Н. Современные системы испытаний ракетно-космической техники // Материалы XXI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (8–11 ноября 2017 г., Красноярск). Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2017. С. 343–345.
18. Мухачев П.А., Садретдинов Т.Р., Притыкин Д.А., Соловьев С.В., Иванов А.Б. Современные математические методы анализа технического состояния космических аппаратов по данным телеметрической информации // Автоматика и телемеханика. 2021. № 8. С. 3–38.
19. Неразрушающий контроль в аэрокосмической и оборонной промышленности. Анализ размера и доли рынка – тенденции роста
5. Gubarev, A.V., Kotyaeva, A.D. Analysis of the principles and methods of the spacecraft reliability assurance at the life cycle stages (in Russian). *NovalInfo*. 2022. 135. P. 8–9.
6. Kurenkov, V.I. Methods of reliability assurance and experimental testing of rocket and space technology. Samara: Publ. House SGAU, 2012. 257 p.
7. Liseikin, V.A., Moiseyev, N.F., Saidov, G.G., Frolov, O.P. Fundamentals of the test theory experimental development of rocket and space technology / edited by Dr. of Technical Sciences V.K. Chvanov. Moscow: Mashinostroenie – Polet/Viart Plus, 2015. 253 p.
8. Pakulin, N.V., Lavrisheva, E.M., Ryzhov, A.G., Zelenov, S.V. Analysis of the methods for the reliability assessment of the equipment and systems. Practice of methods application. *Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2018. 30 (3): 99–120. URL: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8)
9. To the question of establishing the safety coefficients and safety margins at a given probability of non-destruction of power structures / Yu.P. Pokhabov, D.O. Shendalyov, A.Yu. Kolobov et al. *Siberian Aerospace Journal*. 2021. Vol. 22. No. 1. P. 166–176. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176
10. Malysheva, G.V., Romanova, I.K. Optimization of the choice of parameters characterizing the state of the object when solving reliability problems. *Repair, Restoration, Modernization*. 2015. No. 6. P. 33–38.
11. Gecha, V.Ya., Barbul, R.N., Sidnyaev, N.I., Butenko, Ju.I. Methodology of spacecraft reliability assessment during design and engineering development. *Reliability*. 2019. 19 (2): 3–8. URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8>
12. Tyugashev, A.A., Tyugashev, A.A., Ermakov, I.E. Ways to improve the reliability and quality of software in the space industry. *Management of Large Systems*. 2012. Iss. 39. P. 288–299.
13. Goncharov, V.V., Baklanov, V.I., Burtsev, A.S. et al. Reliability assessment technology for the elements of the radio-electronic equipment long-term functioning in the conditions of the space. *Izvestia of Vuzov. Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61. No. 7. P. 612–617.
14. Abramov, N.S., Talalaev, A.A., Fralenko, V.P. et al. High-performance neural network system for monitoring the state and behavior of spacecraft subsystems based on telemetry data. *Software Systems: Theory and Applications*. 2017. 8: 3 (34). P. 109–131.
15. Kulibaba, A.Ya., Sashov, A.A., Sukonkin, M.K., Shtukarev, A.Yu. Analysis of the input control and additional testing influence on the reliability of the electronic component base (in Russian). *Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems*. 2020. 7 (3): 87–92. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.87.92
16. Matyushev, R.A., Patraev, V.E. Methods of ensuring the reliability of electroradio products used in the onboard equipment of spacecrafts of long-term operation of foreign countries. *Reshetnev Readings: Proceedings of the XVI International Scientific Conference in memory of the General Designer of Rocket and Space Systems Academician M.F. Reshetnev (November 7–9, 2012, Krasnoyarsk)*. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University Press, 2012. P. 188–189.
17. Kubrak, M.V., Leonov, S.N. Modern testing systems of rocket and space technology. *Proceedings of the XXI International Scientific Conference in memory of the General Designer of rocket and space systems Academician M.F. Reshetnev (November 8–11, 2017, Krasnoyarsk)*. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University Press, 2017. P. 343–345.
18. Mukhachev, P.A., Sadretdinov, T.R., Pritykin, D.A., Solovyov, S.V., Ivanov, A.B. Modern mathematical methods of the spacecraft technical state analysis by the telemetric information data. *Automation and Telematics*. 2021. No. 8. P. 3–38.
19. Non-Destructive Testing in the Aerospace and Defense Industry. Market size and share analysis – growth trends and forecasts

и прогнозы (2023–2028 гг.). URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/non-destructive-testing-in-aerospace-defense-market>

20. Киселёв А.И., Альбрехт А.В., Медушевский Л.С., Кузьмич А.А. Современные технологии обеспечения и контроля надежности и безопасности изделий РКТ // Двойные технологии. 2012. № 2 (59). С. 25–30.

21. Белова В.В. Возможности применения современных программных комплексов моделирования надежности систем для решения задач оценки надежности изделий ракетно-космической техники на этапе электрических испытаний // Космонавтика и ракетостроение. 2013. 1 (70): 118–122.

22. Королев П.С., Кунизhev И.Р. Анализ подходов к оценке надежности радиотехнических устройств непилотируемых космических аппаратов с использованием системы менеджмента качества // Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» Т. 1. М.: Медиа Паблшер, 2020. С. 167–169.

23. Кирьянчиков В.А. Расчет показателей надежности системы анализа результатов пусков ракет космического назначения // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8. С. 41–46.

24. Профстандарт. Специалист по надежности ракетно-космической техники, инженер-конструктор. М., 2022. URL: <https://classinform.ru/profstandarty/25.013-spetsialist-po-nadezhnosti-raketno-kosmicheskoi-tekhniki.html>

(2023–2028). URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/non-destructive-testing-in-aerospace-defense-market>

20. Kiselev, A.I.; Albrecht, A.V., Medushevskiy, L.S., Kuzmich, A.A. Modern technologies of ensuring and controlling the reliability and safety of the RCT products. *Dual technologies*. 2012. No. 2 (59). P. 25–30.

21. Belova, V.V. Possibilities of application of modern software systems reliability modeling complexes for solving problems of reliability assessment of rocket and space technology products at the stage of electrical testing. *Cosmonautics and rocket science*. 2013. 1 (70): 118–122.

22. Korolev, P.S.; Kunizhev, I.R. Analysis of the approaches to the reliability assessment of radio engineering devices of unmanned spacecraft using the quality management system. *Proceedings of the XIV International Branch Scientific and Technical Conference “Technologies of Information Society”*. Vol. 1. Moscow: Media Publisher, 2020. P. 167–169.

23. Kiryanchikov, V.A. Calculation of reliability indicators of the system for analyzing the results of space rocket launches. *Izvestiya SPbGETU “LETI”*. 2016. No. 8. P. 41–46.

24. Profstandart. Specialist in reliability of rocket and space equipment, design engineer. Moscow, 2022. URL: <https://classinform.ru/profstandarty/25.013-spetsialist-po-nadezhnosti-raketno-kosmicheskoi-tekhniki.html>