Ксения Г. Сизова[1], Петр К. Скоробогатов[2], Максим О. Прыгунов[3]
[1]Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Топаз»,
Учительская улица, 23, литера А, оф. 533, г. Санкт-Петербург, 195269, Россия
e-mail: ksizova@microtopaz.ru, https://orcid.org/0000-0003-0922-3430
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия
e-mail: pkskor@spels.ru, https://orcid.org/0000-0002-3146-0304
[3]Общество с ограниченной ответственностью «О2 Световые Системы»,
Новорощинская улица, 4, литера А, г. Санкт-Петербург, 196084, Россия
e-mail: maxim.prygunov@o2svet.ru, https://orcid.org/0000-0002-7895-3536

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ, ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЭА

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.05

Аннотация. Установлено соотношение понятий «качества», «надежности», «стойкости» продукции и «риска». Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт, а также международные, национальные и отраслевые стандарты в области обеспечения качества технологических систем различного назначения. Выявлено, что зарубежные отраслевые стандарты в области обеспечения качества космических систем оперируют термином «dependability» (в отечественной терминологии сходен с понятием «надежности»), включая в него понятие радиационной стойкости. Определена взаимосвязь между зарубежными отраслевыми, международными и национальными стандартами. Приведены общие сведения по основным методам анализа и оценки надежности и риска, представленным в отечественных и зарубежных нормативных документах. Предлагается применить имеющуюся развитую методологию анализа и оценки надежности и риска для задач обеспечения, прогнозирования и оценки радиационной стойкости РЭА космической техники на всех этапах жизненного цикла.

Ключевые слова: качество, надежность, радиационная стойкость, радиоэлектронная аппаратура, риск.

Для цитирования. ***СИЗОВА, Ксения Г.; СКОРОБОГАТОВ, Петр К.; ПРЫГУНОВ, Максим О.*** *ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ, ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЭА. Безопасность информационных технологий, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 52-64, 2018. ISSN 2074-7136. Доступно на: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1093>. Дата доступа: 15 feb. 2018. doi:http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.05.*

Ksenia G. Sizova[1], Petr K. Skorobogatov[2], Maksim O. Prygunov[3]
[1]Limited liability company "NPC "Topaz",
23 Uchitelskaya str., letter A, Saint-Petersburg, 195269, Russian Federation
e-mail: ksizova@microtopaz.ru, https://orcid.org/0000-0003-0922-3430
[2]National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
31, Kashirskoe sh., Moscow, 114509, Russian Federation
e-mail: pkskor@spels.ru, https://orcid.org/0000-0002-3146-0304
[3]Limited liability company "O2 Light Systems",
4 Novoroshhinskaja str., letter A, Saint-Petersburg, 196084, Russian Federation
e-mail: maxim.prygunov@o2svet.ru, https://orcid.org/0000-0002-7895-3536

Application of dependability and risk analysis methods in the process of implementation, prediction and evaluation of electronic equipment radiation hardness

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.05

Abstract. The relationship between the concepts of "quality", "dependability", "hardness" of products and "risk" is established. The domestic and foreign experience, as well as international,

national and industry standards in the field of quality assurance of electrotechnical systems for various purposes are considered. It was revealed that the foreign industry standards in the field of quality assurance of space systems use the term "dependability" (in the domestic terminology it is similar to the notion of "reliability"), including the concept of radiation resistance. The correlation among foreign industry, international and national standards is defined. General information on the main methods of analysis and assessment of dependability and risk, presented in domestic and foreign documents, are considered. The authors of the paper propose to apply the existing developed methodology of analysis and evaluation of dependability and risk for the tasks of ensuring, predicting and assessing the radiation hardness of space systems at all stages of the life cycle.

Keywords: quality, dependability, radiation hardness, electronic equipment, risk.

For citation. ***SIZOVA, Ksenia G.; SKOROBOGATOV, Petr K.; PRYGUNOV, Maksim O.*** *Application of dependability and risk analysis methods in the process of implementation, prediction and evaluation of electronic equipment radiation hardness. IT Security (Russia), [S.l.], v. 25, n. 1, p. 52-64, 2018. ISSN 2074-7136. Available at: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1093>. Date accessed: 15 feb. 2018. doi:http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.1.05.*

ВВЕДЕНИЕ

Под качеством продукции подразумевается совокупность свойств, обусловливающих ее способность удовлетворять своему назначению. Для оценки качества используются показатели, которые представляют собой количественные характеристики одного или нескольких свойств продукции, рассматриваемые применительно к определенным условиям ее эксплуатации. Каждая продукция обладает своей номенклатурой показателей качества.

Надежность является одним из основных свойств продукции, характеризующего способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения при сохранении во времени значений параметров в установленных пределах. Надежность продукции согласно отечественной терминологии – сложное свойство качества, которое зависит от безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости. Оценка показателей надежности дает достаточно полное представление о качестве функционирования продукции в нормальных условиях эксплуатации. Однако, при эксплуатации продукции в условиях воздействия внешних факторов окружающей среды свойство выполнять требуемые функции и сохранять во времени значения параметров в установленных пределах характеризуется показателями стойкости. Таким образом, надежность и стойкость являются показателями качества продукции по характеризуемым свойствам. А исходя из определений, стойкость является «частным случаем» понятия надежности, рассматриваемого в условиях внешних воздействий [1].

Показатели стойкости, как и показатели надежности, имеют вероятностный характер и отражают риск возникновения того или иного события. Понятие риска представляет собой сочетание вероятности события и его последствий. Таким образом, решение задач надежности и стойкости, а значит и задач в области качества продукции, происходит через определение риска. Соотношение понятий «качества», «надежности», «стойкости» и «риска» приведено на рисунке 1 [2].

При эксплуатации в условиях космического пространства (КП) радиоэлектронная аппаратура (РЭА) космического аппарата (КА) находится под воздействием большого количества внешних факторов. К числу наиболее опасных относится ионизирующее излучение (ИИ) КП. Для оценки способности РЭА выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм в процессе и после воздействия ИИ применяются показатели радиационной стойкости. Основной функцией РЭА является обработка данных, прием и (или) передача информации. В результате воздействия ИИ КП в РЭА возникают радиационные эффекты, которые снижают качество передаваемой информации, а также нарушают методы ее обработки. К показателям качества информации относятся понятия: достоверность, точность, устойчивость, своевременность, актуальность, доступность, достаточность, содержательность и репрезентативность. На

качество передаваемой информации существенно влияет характер функционирования РЭА КА, в первую очередь ее надежность и радиационная стойкость. Однако, исторически сложилось так, что в ракетно-космической отрасли страны данные аспекты рассматриваются обособленно.

Целью данной работы является анализ зарубежного и отечественного опыта в области обеспечения качества продукции (в частности, военной и космической техники), а также обзор нормативной базы в области менеджмента надежности и риска в процессе жизненного цикла технических устройств для рассмотрения возможности применения данных наработок в части развития методологии обеспечения, прогнозирования и оценки радиационной стойкости РЭА КА.

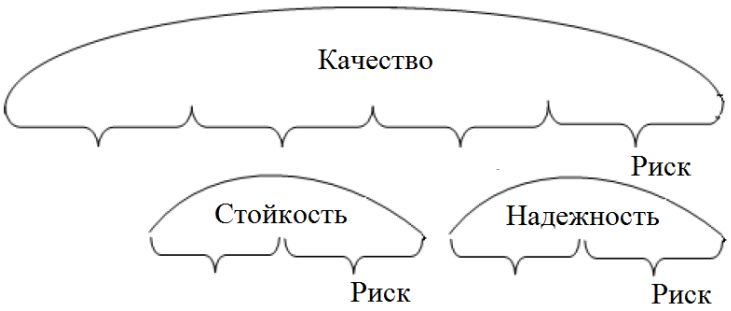

Рис. 1. Соотношение понятий «качества», «надежности», «стойкости» и «риска»
(Fig.1. Correlation of the concepts "quality", "dependability", "hardness" and "risk")

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ

За рубежом существует множество документов, регламентирующих процесс разработки, проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания продукции различного назначения с целью обеспечения заданных уровней качества. К примеру, Европейская кооперация по стандартизации в области космической техники (англ. *European Cooperation for Space Standardization*, *ECSS*) сформировала систему стандартов, охватывающую все аспекты создания и эксплуатации космических систем, включая разработку, управление и обеспечение качества продукции. На рисунке 2 приведена структура системы стандартов *ECSS* [3].

Данная система стандартов не разделяет аспекты надежности и радиационной стойкости, а оперирует одним понятием – «*dependability*». «*Dependability*» в стандартах *ECSS* приводится как собирательный термин, применяемый для описания комплексного свойства готовности (*availability*) и влияющих на него свойств безотказности (*reliability*), ремонтопригодности (*maintainability*), а также обеспеченности технического обслуживания и ремонта (*maintenance support*). Термин «*dependability*» в отечественной терминологии сходен с понятием «надежности» и используется в данной работе для качественного описания свойств продукции, а не как количественный параметр. Поэтому далее по тексту авторы будут оперировать именно понятием «надежности».

Стандарты *ECSS* гармонизированы с международными стандартами, в том числе со стандартами Международной электротехнической комиссии (англ. *International Electrotechnical Commission, IEC*), и регулярно актуализируются в соответствии с опытом практического применения [4-10]. *IEC* в свою очередь разрабатывает стандарты для управления системами оценки соответствия продуктов, систем и услуг в области электротехники, электроники и сопутствующих отраслей.

Стоит отметить, что зарубежные отраслевые стандарты, гармонизированные с международными, не ограничиваются только определением радиационной стойкости, как составляющей более общего понятия надежности, но также используют одни и те же методы для анализа и оценки надежности и радиационной стойкости. Такой подход обосновывается тем, что решение этих двух задач в целом происходит через определение рисков.

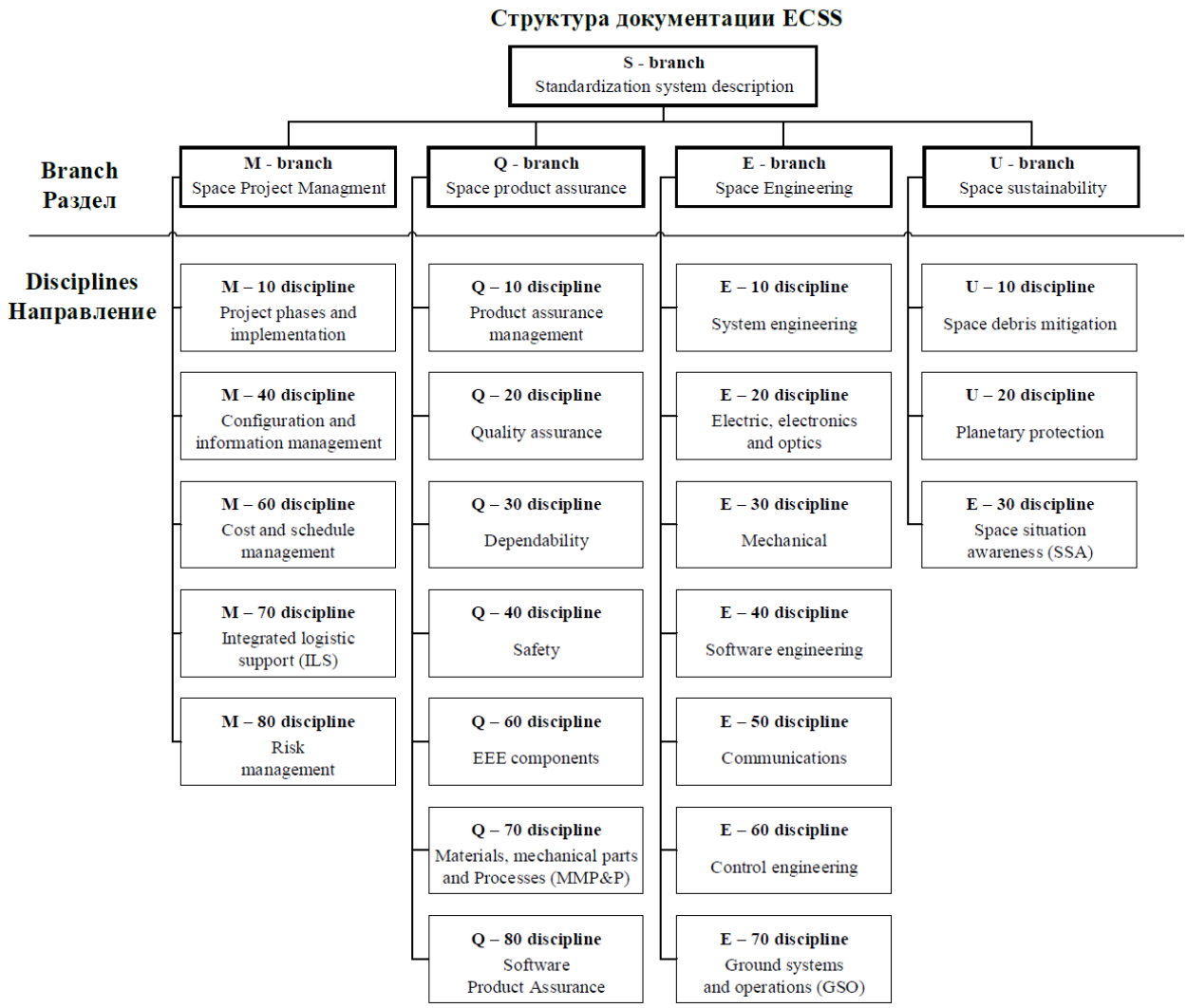

Рис. 2. Структура системы стандартов ECSS
(Fig.2. ECSS standards system structure)

АНАЛИЗ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ РФ

Лучшая практика применения методов анализа и оценки рисков нашла отражение в международных стандартах *IEC* по управлению риском, многие из которых приняты в РФ как национальные стандарты. Национальным комитетом *IEC* от Российской Федерации (РФ) является Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (ФАТРиМ), одной из задач которого является определение норм и требований по обеспечению качества электротехники, электроники отечественного производства.

В структуре национальных стандартов РФ можно выделить две группы стандартов общего назначения «Менеджмент риска» и «Надежность в технике», которые имеют развитую структуру и проверенную методологию. Группа стандартов «Менеджмент риска» описывает процесс управления риском, охватывая при этом различные аспекты работы с ним: от идентификации и анализа риска до оценки его допустимости и определения потенциальных возможностей снижения риска посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий. В свою очередь группа стандартов «Надежность в технике» предназначена для нормативного обеспечения методов, мероприятий и средств, направленных на достижение уровня надежности объектов, тем самым устанавливает общие методические принципы управления надежностью.

Необходимо подчеркнуть, что в данной работе проанализированы именно те национальные стандарты, которые идентичны/гармонизированы с международными

стандартами *IEC*, поскольку целью авторов являлось рассмотрение возможности обоснованного применения зарубежного опыта для обеспечения и повышения качества отечественной продукции различного назначения. В таблице 1 представлен перечень основных национальных и соответствующих им международных стандартов по менеджменту надежности и риска.

Таблица 1. Перечень основных национальных и соответствующих им международных стандартов по менеджменту надежности и риска.

Обозначение национального стандарта РФ		Наименование национального стандарта РФ	Обозначение соответствующего международного стандарта	Наименование международного стандарта
Основополагающие стандарты				
ГОСТ Р 51901.1-2002		Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем	IEC 60300-3-9:1995	Dependability management - Part 3: Application guide - section 9: Risk analysis of technological systems
ГОСТ Р 51901.2-2005 (отменен без замены)		Менеджмент риска. Системы менеджмента надежности	IEC 60300-1:2003	Dependability management – Part 1: Dependability management systems
ГОСТ Р 51901.3-2007		Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности	IEC 60300-2:2004	Dependability management - Part 2: Guidelines for dependability management
ГОСТ Р МЭК 62198-2015 (на замену ГОСТ Р 51901.4-2005)	Проектный менеджмент. Руководство по применению менеджмента риска при проектировании	IEC 62198:2013	Project risk management - Application guidelines	
ГОСТ Р 51901.5-2005	Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности	IEC 60300-3-1:2003	Dependability management – Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology	

Продолжение таблицы 1

Обозначение национального стандарта РФ	Наименование национального стандарта РФ	Обозначение соответствующего международного стандарта	Наименование международного стандарта
ГОСТ Р 51901.6-2005	Менеджмент риска. Программа повышения надежности	IEC 61014:2003	Programmes for reliability growth
ГОСТ Р 27.301-2011	Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения	IEC 60300-3-1:2003	Dependability management – Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability – Guide on methodology
Руководящие положения и инструменты			
ГОСТ Р 51901.11-2005	Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство	IEC 61882:2001	Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide
ГОСТ Р 51901.12-2007	Менеджмент риска. Метод анализа видов и	IEC 60812:2006	Analysis techniques for system

	последствий отказов		reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)
ГОСТ Р 27.302-2009 (ГОСТ Р 51901.13-2005 отменен без замены)	Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей	IEC 61025:2006	Fault tree analysis (FTA)
ГОСТ Р 51901.14-2007	Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы	IEC 61078:2006	Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram and Boolean methods
ГОСТ Р 51901.15-2005	Менеджмент риска. Применение марковских методов	IEC 61165:2006	Application of Markov techniques
ГОСТ Р 51901.16-2005	Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки	IEC 61164:2004	Reliability growth - Statistical test and estimation methods
ГОСТ 27.310-95	Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения	IEC 60812:2006 в части определений, общих положений и методов анализа	Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)

Среди основополагающих стандартов особо следует выделить ГОСТ Р 51901.1 [11] и ГОСТ Р 51901.5 [11], отражающие в себе современный практический опыт выбора и применения методов анализа и оценки надежности и риска. Методы, содержащиеся в данных нормативных документах, разнообразны и включают в себя как качественные, так и количественные средства для анализа и оценки, а их применение регламентируется однозначно и детализировано. Во введении к стандарту [12] также отмечается, что приведенные в нем методы анализа и оценки надежности могут быть использованы для определения вероятностных характеристик риска.

В таблице 2 приведены сведения по основным методам анализа надежности и риска, представленные в отечественных и зарубежных документах, а также обозначены рекомендации по их применению на различных этапах проекта. В столбце «Название метода» таблицы 2 приведено краткое название метода и его английская аббревиатура. В столбце «Согласно ГОСТ Р 51901.1 (таблица 1)» приведены краткие характеристики методов, используемых при анализе и оценке риска в соответствии с [11]. В столбцах «Согласно ГОСТ Р 51901.5 (таблица 1)» приведены краткие описания методов, используемых для решения общих задач анализа и оценки надежности в соответствии с [11], как качественного, так и количественного характера. При этом, если метод рекомендован для решения поставленной задачи, в последнем столбце таблицы 2 содержится отметка - «применим». В случае если метод рекомендован для решения только некоторой части задачи или может использоваться для решения всей задачи только в комбинации с другими методами, то в столбце ставилась отметка - «поддержка».

Таблица 2. Сведения по основным методам анализа надежности и риска

Название метода	Согласно ГОСТ Р 51901.1 (таблица 1)	Согласно ГОСТ Р 51901.5 (таблица 1)		Рекомендации по применению
		Качественный характер	Количественный характер	
Исследование опасности и работоспособности/ HAZOP (ГОСТ Р 51901.11)	Идентификация опасности и анализ показателей	Анализ причин и последствий отклонений	-	Поддержка на поздних этапах разработки

Название метода	Согласно ГОСТ Р 51901.1 (таблица 1)	Согласно ГОСТ Р 51901.5 (таблица 1)		Рекомендации по применению
		Качественный характер	Количественный характер	
Анализ видов и последствий (критичности) отказов/ FME(C)A (ГОСТ Р 51901.12, ГОСТ 27.310)	Идентификации главных источников опасности и анализ показателей	Анализ воздействия отказов	Вычисление интенсивностей отказов (и критичности) системы	Применим (для систем, у которых преобладают единичные отказы) на стадиях определения, проектирования и разработки
Анализ дерева неисправностей/ FTA (ГОСТ Р 51901.13, ГОСТ Р 27.302)	Идентификации опасности и анализ показателей	Анализ комбинации неисправностей	Вычисление показателей безотказности, работоспособности относительного вклада подсистем в системы	Применим (если поведение системы зависит от времени или последовательности событий) на стадиях определения, проектирования и разработки
Анализ дерева событий/ ETA (ГОСТ Р 54142)	Идентификация опасности и анализ показателей	Анализ последовательности отказов	Вычисление интенсивностей отказов	Применим на стадиях определения, проектирования и разработки
Анализ структурной схемы надежности/ RBD (ГОСТ Р 51901.14)	Совокупность приемов анализа показателей	Анализ путей работоспособности	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности	Применим (для систем, у которых можно выделить независимые блоки) на стадиях определения, проектирования и разработки
Марковский анализ (ГОСТ Р 51901.14)	Идентификация опасности и анализ показателей	Анализ последовательности отказов	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности	Применим для функционально сложных систем на стадиях проектирования и разработки
Статистические методы надежности (ГОСТ Р 51901.6)	Совокупность приемов анализа показателей	Анализ воздействия неисправностей	Определение количественных оценок показателей безотказности с неопределенностью	Поддержка

Продолжение таблицы 2

Название метода	Согласно ГОСТ Р 51901.1 (таблица 1)	Согласно ГОСТ Р 51901.5 (таблица 1)		Рекомендации по применению
		Качественный характер	Количественный характер	
Прогнозирование интенсивности отказов (ГОСТ Р 51901.16)	Совокупность приемов анализа показателей	Возможно применение для анализа стратегии технического обслуживания	Вычисление интенсивностей отказов и наработки на отказ (MTTF)	Применим (для последовательных систем без резервирования) на ранних стадиях проектирования и на стадии производства при необходимости улучшения качества
Анализ сети Петри (ГОСТ Р 51901.5)	Идентификация опасности	Анализ последовательности отказов	Подготовка описания системы для марковского анализа	Применим
Анализ человеческого фактора (ГОСТ Р 51901.5)	Идентификация опасности и анализ показателей	Анализ воздействия действий эффективности человека на работу системы	Вычисление вероятностей ошибок человека	Поддержка на всех стадиях разработки системы
Анализ прочности и напряжений (ГОСТ Р 51901.5)	Анализ вероятностей отказа	Применим как средство для предотвращения неисправности	Вычисление показателей безотказности	Поддержка (для электромеханических компонентов)
Таблица истинности (анализ функциональной структуры) (ГОСТ Р 51901.5)	Идентификация опасности и анализ вероятностей событий	Возможен	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надежности	Поддержка на ранних этапах разработки

Из представленных выше данных видно, что на сегодняшний день существует достаточное число национальных нормативных документов, гармонизированных с международными стандартами, имеющих хорошо развитые и опробованные инструменты для оценки и анализа надежности и риска [13, 14]. Сами по себе группы стандартов общего назначения «Менеджмент риска» и «Надежность в технике» содержат отработанный механизм обеспечения заданного уровня качества продукции на различных уровнях детализации системы и этапах ее жизненного цикла.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ВЫВОДЫ

Несмотря на наличие развитой методологии анализа и оценки надежности и риска на уровне национальных стандартов, а также мировой опыт применения данной методологии к решению задач обеспечения, прогнозирования и оценки в целом качества продукции, понятие радиационной стойкости в отечественной ракетно-космической отрасли до сих пор рассматриваются обособленно и независимо. При этом для развития области радиационной стойкости не используются существующие наработки в смежных областях знаний, а в части стандартизации вопросы обеспечения, прогнозирования и оценки надежности и радиационной стойкости рассматриваются как отдельные независимые направления.

ПРИМЕНИМОСТЬ

Подходы к изучению проблемы надежности основываются на теории вероятностей (сочетание вероятности события и его последствий характеризует риск), одним из центральных понятий которой являются понятия случайного события и случайной величины. Бытовое представление о случайности, как о недетерминированной

переменной провоцирует неверное предположение о сущности определяемых процессов или величин. Главной характеристикой упомянутых событий и величин является их вероятностная сущность, а не случайность (недетерминированность).

Основным фактором, влияющим на работу космической техники, являются радиационные эффекты, вызываемые воздействием ОЯЧ КП. Эти эффекты являются детерминированными по своей природе, но случайными по области их возникновения. Таким образом, полагая, что одиночные сбои и отказы, вызванные воздействием ОЯЧ КП в отдельно взятых элементах системы, имеют случайный и независимый характер, допустимо применять отработанный понятийный и математический аппарат теории надежности, подходящий для описания подобного рода событий и характера реакций на эти события системы в целом.

Порядок и методы оценки стойкости бортовой РЭА космических аппаратов (КА) к воздействию ОЯЧ КП по одиночным сбоям и отказам регламентирован в отраслевом нормативном документе [15]. В соответствии с положениями данного документа, вывод о стойкости РЭА к воздействию ОЯЧ КП по одиночным эффектам производится на основе:

1 этапа – качественного анализа – анализа возможности возникновения сбоев и отказов элементов системы и последствий их влияния на работоспособность и функционирование РЭА с учетом применения средств защиты, алгоритмов и программ, используемых для обнаружения и устранения сбоев, срыва тиристорного эффекта и пробоя, времени восстановления штатного функционирования, влияния перерыва в работе составных частей РЭА на работоспособность и функционирование КА;

2 этапа – количественного анализа – результатов расчета частоты сбоев РЭА и вероятности ее отказа по данным о параметрах чувствительности элементов системы к одиночным эффектам.

Сначала подробнее остановимся на рассмотрении инструментов, приведенных в документе [15], для решения задач 2 этапа. Расчетно-экспериментальный метод, предлагаемый к использованию в [15] для проведения количественного анализа, корректен при определении стойкости функционально простых, нерезервированных систем без учета восстановления их работоспособности. При этом ни сам документ [12], ни документы, на которые он ссылается не располагает в своем составе необходимыми методологией и математическим аппаратом для оценки стойкости современной РЭА, представляющей собой, многофункциональную систему со сложными стратегиями восстановления.

Для преодоления этих трудностей в работе [16] было реализовано применение количественных методов оценки надежности для определения показателей стойкости к воздействию отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) КП по сбоям и отказам. Как упоминалось выше, возможность применения такого подхода обуславливалась тем, что области надежности и радиационной стойкости в части решения прикладных задач опираются на одни и те же фундаментальные математические и естественнонаучные принципы, а именно на определение вероятности события и его последствий - риска. Это дало основание для использования при решении задач теории стойкости хорошо развитого теории надежности и позволило сосредоточить основные усилия на учете особенностей возникновения сбоев и отказов в РЭА, вызываемых воздействием ОЯЧ КП, и их последствиях. Таким образом, применение данного подхода позволило в полной мере учесть современные тенденции в проектировании РЭА и получить более полную характеристику ее стойкости.

Возвращаясь к условиям выполнения требований нормативного документа [15] в части 1 этапа оценки, стоит отметить, что несмотря на указание о необходимости проведения качественного анализа, документ не включает в себя конкретные методы и подходы к реализации, а также не ссылается на иные инструменты для решения данной задачи. Таким образом, данный этап остается не формализован. Как и в случае с проведением количественного анализа, проводимого в работе [16], возможно предположить использование показанной аналогии между надежностью и радиационной

стойкостью, распространяя ее на методы качественного анализа, приведенные в таблице 2. Такой подход позволит формализовать процесс и в полной мере соблюсти требования [15] при помощи использования основ, заложенных в действующих национальных стандартах, не прибегая при этом к усложнению и увеличению количества отраслевой нормативной базы.

Таким образом, имеющиеся наработки в области надежности и риска могут быть использованы при решении частных задач стойкости к воздействию ОЯЧ КП по эффектам сбоя и отказа. При этом их использование позволяет получать более полную характеристику стойкости РЭА.

Кроме того, дальнейший анализ национальных и международных стандартов показал, что имеющаяся методология, может применяться не только при анализе систем, где события носят случайный характер, но и, как минимум, рассматривать другие виды радиационных эффектов, имеющих «накопительный» характер (например, дозовые эффекты ионизации и структурных повреждений) в процессе качественного анализа с помощью понятия риска. А при более глубоком изучении вопроса применения понятийного и математического аппарата теории надежности было обнаружено, что можно провести параллель между механизмами определения показателей стойкости к дозовым эффектам и характеристиками прочности, т.е. использовать данную аналогию также в процессе количественного анализа. Данное предположение основывается на том, что как и в случае с дозовыми эффектами отказ элемента по параметрам прочности возникает тогда, когда уровень внешних воздействий (механических, климатических, электрических и т.д.) превысит запас его прочности. На данный момент подробный анализ этого предположения не производился, но в РФ достаточно давно принят комплекс нормативно-технических и руководящих документов по расчетам и испытаниям на прочность в отрасли машиностроения, общие положения которого приведены в [14]. Это говорит о солидной методической базе в данной области знаний и предоставляет возможность к рассмотрению указанной взаимосвязи. Таким образом, имеющиеся наработки в области прочностной надежности могут быть использованы для дополнения и развития методологии в части количественного анализа и оценки показателей радиационной стойкости к воздействию ИИ КП по дозовым эффектам.

Помимо всего прочего, развитие национальных стандартов группы «Надежность в технике» шло параллельно и во взаимосвязи с развитием нормативных документов, разработанных для изделий военной техники - комплексов государственных военных стандартов (КГВС) «Мороз», «Климат» и руководящих военных документов в области надежности. Разработка такой нормативной базы была направлена на совершенствование методологии нормирования надежности и оценки соответствия требованиям надежности по всем уровням разукрупнения вооружения и военной техники (ВВТ): от электрорадиоизделий (ЭРИ) и РЭА военного назначения до целых комплексов и образцов ВВТ. Также с 2005 года в РФ появились нормативные документы системы стандартизации «Надежность военной техники», которая позиционирует себя, как подсистема системы стандартов «Надежность в технике». Система стандартов «Надежность военной технике» имеет много общего с нормативными документами группы «Надежность в технике» и элементами КГВС «Мороз» [18].

Важно отметить, что отраслевая нормативная документация по стойкости в целом, нацелена на подтверждение соответствия РЭА заданным требованиям уже на последних стадиях проектирования и разработки, исключая начальные этапы жизненного цикла. Тем не менее развитие технологий и электронной техники требуют того, чтобы анализ и оценка радиационной стойкости РЭА выполнялась непрерывно, начиная с самых ранних этапов разработки [6, 7]. Таким образом, существующие национальные стандарты в области управления надежностью и риском (в том числе и в части ВВТ) могут быть использованы в качестве базиса в процессе обеспечения, прогнозирования и оценки радиационной стойкости изделий космической техники на стадиях определения,

проектирования, разработки, производства, эксплуатации и технического обслуживания различных уровней системы и в условиях разной детализации проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач обеспечения радиационной стойкости технических систем, предназначенных для ответственных применений, одинаково важны и глубокие теоретические исследования, наличие алгоритмов и методов, их программная реализация, а также эффективная система стандартизации продукции и организации взаимодействия при ее разработке и производстве. Отечественные отраслевые документы в области радиационной стойкости рассматривают отдельные этапы жизненного цикла РЭА, но при этом в них отсутствует система, сопровождающая процессы разработки, проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания продукции. К сожалению, на данный момент нет прямого способа применения имеющихся отработанных инструментов теории надежности и риска, а также их методов и программных средств, для развития методологии анализа и оценки радиационной стойкости. Тем не менее международные и национальные стандарты РФ по менеджменту надежности и риска технологических систем с оглядкой на зарубежный опыт могут применяться при выборе и обосновании решений, позволяющих обеспечить выполнение обязательных требований, в том числе и по радиационной стойкости РЭА. Это особенно важно при наличии в отраслевых нормативных документах решений не эффективных или не применимых к новым технологиям.

Таким образом, предлагается:

- допуская возможность разумного применения методов анализа и оценки надежности и риска при решении задач обеспечения, прогнозирования и оценки радиационной стойкости РЭА космической техники, проецировать имеющуюся методологию на весь жизненный цикл РЭА, что позволит не просто определять радиационную стойкость, а также и управлять ею;
- использовать, дополнять и развивать теорию радиационной стойкости в части решения прикладных задач методологией и имеющимися программными средствами теории надежности и риска;

Важным представляется производить дальнейший анализ международных, национальных, зарубежных и отечественных отраслевых стандартов, а также мирового опыта в области обеспечения качества технологических систем различного назначения, с целью актуализации или разработки новой отечественной нормативной базы для формирования системы стандартов в области обеспечения, прогнозирования и оценки радиационной стойкости на всех этапах жизненного цикла продукции с учетом опыта, полученного в смежных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1 Управление обеспечением стойкости сложных технических систем В. Н. Бакулин, С. Ю. Малков, В. В. Гончаров, В. И. Ковалев. — Москва, 2006. — С. 304.
2 Струков А.В. Анализ международных и российских стандартов в области надежности, риска и безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: -http://szma.com/standarts_analysis.pdf (дата обращения 01.10.2017).
3 ECSS, “Description, implementation and general requirements”, ECSS-S-ST-00C, ECSS Secretariat, ESTEC, The Netherlands (July 2008).
4 ECSS, “Standardization objectives, policies and organization”, ECSS-P-00C, ECSS Secretariat, ESTEC, The Netherlands (March 2013).
5 Standards for Space Radiation Environments and Effects” E. Daly, P. Nieminen, A. Mohammadzadeh et al.|RADECS Proceedings of the 7th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2003.
6 Poivey C. Radiation Hardness Assurance for Space Systems Component Selection, System Hardening and Counter-Measures/RADECS-2003 Short Course notes (2003).
7 Emerging Radiation Hardness Assurance (RHA) issues: A NASA Approach for Space Flight Programs K. A.

LaBel, A. H. Johnston, J. L. Barth, R. A. Reed et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 45, n 6, pp. 2727-2736, Dec. 1998.
8 Radiation assurance for the space environment. J.L. Barth, K.A. LaBel, C. Poivey IEEE Cat. No.04EX866, International Conference on Integrated Circuit Design and Technology, May 2004.
9 Radiation Hardness Assurance for Space Systems C. Poivey IEEE NSREC Short Course, Phoenix, July 2002.
10 Hardness assurance for space system microelectronic. R. L. Pease, D. R. Alexander. Rad. Phys. Chem., vol. 43, n ½, pp. 191 – 204, Jan. 1994.
11 ГОСТ Р 51901.1-2002. «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем».
12 ГОСТ Р 51901.5-2005 «Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности».
13 Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner J. F. W. Peeters, R. J. I. Basten, T. Tinga. Reliability Engineering & System Safety, vol. 172, pp. 36-44, December 2017.
14 Reliability of non-repairable phased-mission systems with propogated failures G. Levitin, L. Xing, S. V. Amari, Y. Dai. Reliability Engineering & System Safety, vol. 119, pp. 218-228, November 2013.
15 РД 134-0139-2005. Методы оценки стойкости аппаратуры к воздействию заряженных частиц по одиночным сбоям и отказам.
16 Сизова К.Г., Скоробогатов П.К., Ветринский Ю.А. Методология оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию отдельных заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. ВАНТ. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. Вып. 1.
17 ГОСТ 25.001-78 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении».
18 Писарев В.Н. К вопросу о стандартизации в области надежности военной техники. Труды международного симпозиума надежность и качество, 2016, с. 293-295.

REFERENCES:

[1] Upravlenie obespecheniem stojkosti slozhnyh tehnicheskih sistem [Management of the durability of complex technical systems] V. N. Bakulin, S. Ju. Malkov, V. V. Goncharov, V. I. Kovalev, Moscow: FIZMATLIT, 2005, 304 p. (in Russian).
[2] Strukov A.V. Analiz mezhdunarodnyh i rossijskih standartov v oblasti nadezhnosti, riska i bezopasnosti [Analysis of international and Russian standards in the field of reliability, risk and safety]. – URL: - http://szma.com/standarts_analysis.pdf (access time 01.10.2017). (in Russian).
[3] ECSS, “Description, implementation and general requirements”, ECSS-S-ST-00C, ECSS Secretariat, ESTEC, The Netherlands (July 2008).
[4] ECSS, “Standardization Policy”, ECSS-P-00A, ECSS Secretariat, ESTEC, The Netherlands (April 2000).
[5] Standards for Space Radiation Environments and Effects” E. Daly, P. Nieminen, A. Mohammadzadeh et al. RADECS Proceedings of the 7th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2003.
[6] Poivey C. Radiation Hardness Assurance for Space Systems Component Selection, System Hardening and Counter-Measures RADECS-2003 Short Course notes (2003).
[7] Emerging Radiation Hardness Assurance (RHA) issues: A NASA Approach for Space Flight Programs K. A. LaBel, A. H. Johnston, J. L. Barth, R. A. Reed et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 45, n 6, pp. 2727-2736, Dec. 1998.
[8] Radiation assurance for the space environment J.L. Barth, K.A. LaBel, C. Poivey IEEE Cat. No.04EX866, International Conference on Integrated Circuit Design and Technology, May 2004.
[9] Radiation Hardness Assurance for Space Systems C. Poivey IEEE NSREC Short Course, Phoenix, July 2002.
[10] Hardness assurance for space system microelectronics R. L. Pease, D. R. Alexander. Rad. Phys. Chem., vol. 43, n ½, pp. 191 – 204, Jan. 1994.
[11] GOST R 51901.1-2002. Menedzhment riska. Analiz riska tehnologicheskih sistem [Risk management. Risk analysis of technological systems], 2002, 21 p. (in Russian).
[12] GOST R 51901.5-2005 Menedzhment riska. Rukovodstvo po primeneniju metodov analiza nadezhnosti [Risk management. Guide for application of analysis techniques for dependability], 2005, 43 p. (in Russian).
[13] Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner J. F. W. Peeters, R. J. I. Basten, T. Tinga. Reliability Engineering & System Safety, vol. 172, pp. 36-44, December 2017.
[14] Reliability of non-repairable phased-mission systems with propagated failures G. Levitin, L. Xing, S. V. Amari, Y. Dai. Reliability Engineering & System Safety, vol. 119, pp. 218-228, November 2013.
[15] RD 134-0139-2005. Metody ocenki stojkosti apparatury k vozdejstviyu zaryazhennyh chastic po odinochnym sboyam i otkazam [Equipment resistance assessment methods to charged particles of space for single errors and failures], vved. 2005-07-01, 2005, 74 p. (in Russian).
[16] Sivacheva K.G., Skorobogatov P. K., Vetrinskij Y. A. Metodologija ocenki stojkosti radiojelektronnoj apparatury k vozdejstviju otdel'nyh zarjazhennyh chastic kosmicheskogo prostranstva p oodinochnym sbojam i otkazam [Evaluation methodology of the spacecraft electronic equipment radiation hardness to single event effects], Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment, 2017, no 1, pp 5 – 11. (in Russian).

[17] GOST 25.001 – 78. Raschety i ispytanija na prochnost' v mashinostroenii. [Desing calculations and strength testing in machinebuilding. Standards, technical documentation and manuals. General regulations], vved. 1980-01-01, Moscow: Standartinform, 2005, 4 p. (in Russian).

[18] Pisarev V.N. K voprosu o standartizacii v oblasti nadezhnosti voennoj tehniki [The issue of standardization in the field of military equipment reliability]. Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality», 2016, pp 293-295. (in Russian).

Поступила в редакцию – 01 декабря 2017 г. Окончательный вариант –05 февраля 2018 г.
Received – December 01, 2017. The final version – February 05, 2018.