

K.G. Sizova¹, P. K. Skorobogatov²

¹ Limited liability company "NPC "Granat", e-mail: ksizova@npcgranat.ru

² National Research Nuclear University MEPhI,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31, e-mail: pkskor@spels.ru

Safety of information in electronic equipment influenced by the charged space particles

Key words: safety of information, radiation hardness, electronic equipment

A version of the existing evaluation method of electronic equipment to the influence of charged space particles causing single event effects for the purpose of improving the accuracy of calculation in the field of information safety is suggested. On the basis of the existing and modified methods radiation tolerance of real payload spacecraft responsible for the security of transmitted information are defined. The results of comparison are introduced. Significant differences not only in quantitative but also in qualitative character of tolerance indicators are revealed. It is demonstrated that the modified method allows to take into account the functional complexity of the hardware and the application efficiency of the sophisticated single event effects protection tools. To confirm the applicability of the modified method of equipment tolerance evaluation method to the influence of charged space particles causing single event effects proposals to the procedure of ground tests of the payload and the space experiment are developed.

К.Г. Сизова¹, П.К. Скоробогатов²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Гранат», e-mail: ksizova@npcgranat.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: pkskor@spels.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Ключевые слова: сохранность информации, радиационная стойкость, радиоэлектронная аппаратура

Предлагается вариант развития существующего метода оценки радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию тяжелых заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам в целях повышения точности расчета в части обеспечения сохранности передаваемой информации. На базе существующего и модифицированного методов определены показатели стойкости реальной полезной нагрузки космического аппарата, ответственные за сохранность передаваемой информации. Приведены результаты их сравнения. Выявлены их существенные отличия не только в количественном, но и в качественном характере. Показано, что модифицированный метод позволяет учитывать функциональную сложность аппаратуры и эффективность применения современных средств парирования сбоев и отказов. Для подтверждения применимости модифицированного метода оценки стойкости аппаратуры к воздействию тяжелых заряженных частиц по одиночным сбоям и отказам разработаны предложения по проведению наземных испытаний полезной нагрузки и космического эксперимента.

Введение

В условиях воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) космических аппаратов (КА) могут возникать одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) - случайные сбои и отказы. К ТЗЧ КП, способным вызвать ОРЭ, относятся заряженные ионы и высокоэнергетичные протоны (ВЭП). Возникновение ОРЭ в РЭА влияет на сохранность передаваемой информации. Для обеспечения сохранности информации в аппаратуре применяются разнообразные схемотехнические и программно-алгоритмические средства парирования ОРЭ. Это значительно усложняет алгоритмы функционирования аппаратуры.

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Оценка стойкости РЭА к воздействию ТЗЧ КП по ОРЭ осуществляется расчетно-экспериментальным методом [1]. С момента утверждения документа [1] функциональная сложность РЭА существенно возросла, что вызывает затруднения при оценке стойкости современных систем и может привести к снижению точности результатов расчета. Неточный расчет может привести к непредвиденным сбоям и отказам РЭА во время эксплуатации, что повлияет на сохранность передаваемой информации. Либо может привести к необоснованному использованию средств парирования, что повысит сложность и стоимость аппаратуры.

Таким образом, существует необходимость развития существующего метода оценки радиационной стойкости РЭА КА с целью повышения его точности. Это позволит обеспечить и подтвердить сохранность информации.

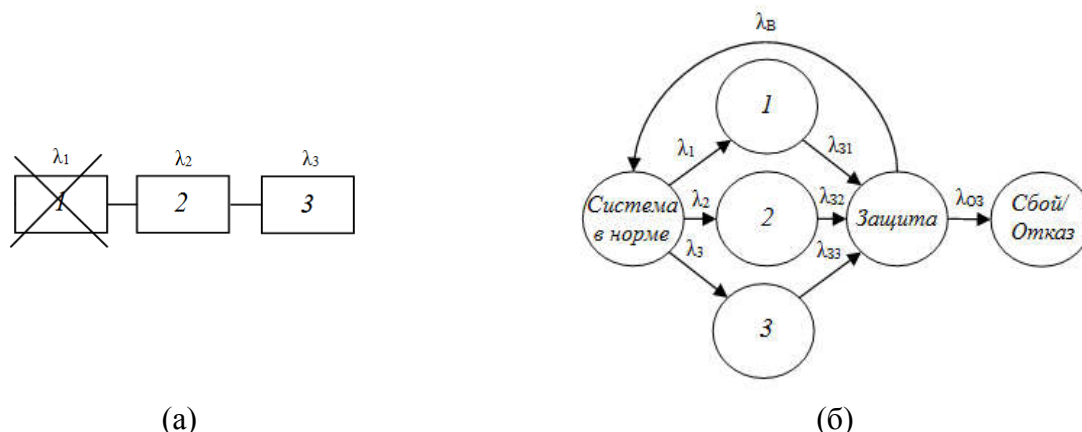
Существующий метод оценки основан на предположении, что стойкость аппаратуры определяется самым «слабым» звеном в последовательной структурной схеме соединения элементов системы. Такой подход корректен при определении стойкости функционально простых, нерезервированных систем без учета восстановления их работоспособности. В качестве средства парирования отказов в данном случае может учитываться только резервирование - введением параллельных соединений в последовательную структурную схему. Под сохранностью информации подразумеваются такие понятия, как среднее время простоя в год, вероятность сбоя, время восстановления работоспособности системы и так далее. Существующий метод не позволяет в полной мере оценить данные характеристики. Все это позволяет провести очевидные параллели с расчетом эксплуатационных показателей РЭА и использовать для развития метода оценки стойкости к ОРЭ современный математический аппарат теории надежности и соответствующие программные средства.

Описание метода

В работе [2] проведен сравнительный анализ методов расчета показателей надежности РЭА. Показано, что для расчета стойкости к ОРЭ сложно-функциональной восстанавливаемой РЭА КА в дополнение к существующему методу целесообразно использовать методы марковского анализа. Особенность марковских цепей в том, что они позволяют определять большее количество показателей стойкости, характеризующих сохранность информации.

Качественное сравнение существующего и предлагаемого метода может быть показано на примере. Пусть имеется система из трех элементов, защищенных схемой парирования последствий определенного вида ОРЭ. Существующий метод предписывает построение структурной схемы данной системы, которая приведена на рис. 1, (а). В такой конфигурации возникновение ОРЭ в любом из элементов однозначно отразится на функционировании системы. Доступных инструментов для оценки эффективности применения средств парирования, за исключением резервирования, здесь не предусмотрено. При использовании предлагаемого метода строится граф состояний системы при возникновении ОРЭ в ее элементах. Из рис. 1, (б) видно, что это позволяет учитывать стратегию восстановления любого элемента при использовании схемы парирования. Также математический аппарат, заложенный в марковские цепи, позволяет определять разнообразные показатели стойкости: коэффициент готовности, вероятность сбоя, время простоя и т.д.

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



где 1, 2, 3 - элементы системы,
 λ_i - частота ОРЭ элементов i .

где «система в норме» - работоспособное состояние системы;
1, 2, 3 - состояния возникновения ОРЭ в 1, 2, 3 элементе системы;
«защита» - состояние срабатывания защиты от последствий ОРЭ;
«сбой/отказ» - неработоспособное состояние всей системы;
 λ_i - частота ОРЭ элементов i ; λ_{3i} - частота срабатывания защиты элементов i ;
 $\lambda_{\text{в}}$ - частота восстановлений; λ_{03} - частота отказа срабатывания защиты.

Рис. 1. – Описание функционирования системы с помощью существующего (а) и модифицированного (б) методов

Использование математического аппарата теории надежности также дает возможность оценки эффективности применения помехоустойчивого кодирования в цифровых интегральных схемах (ИС) для защиты от одиночных сбоев в целях обеспечения сохранности передаваемой информации. При этом канал передачи данных описывается как двоичный симметричный канал. Появляется возможность оценки вероятности пропуска символа, основанной на информации о корректирующей способности применяемого помехоустойчивого кода. Например, вероятность сбоя в случае применения кода Хэмминга может быть определена с помощью выражения [3]:

$$P_{\text{ХЭМ}} = 1 - \{1 + (1 - p_1)^{n+k} - [1 - p_1(1 - p_1)^{n+k-1}]^{n+k}\}^N,$$

где n, k – число информационных и дополнительных разрядов, p_1 - вероятность появления одиночных сбоев в одной ячейке ИС, N – общее количество ячеек ИС.

Таким образом, модифицированный метод позволяет проводить не только структурный, но и функциональный расчет стойкости восстанавливаемой системы. Это позволяет адекватно оценить достаточность средств парирования, примененных для обеспечения сохранности передаваемой информации.

Сравнительный анализ существующего и модифицированного метода проводился на примере оценки стойкости к ОРЭ полезной нагрузки (ПН) наноспутника космической системы автоматической идентификации судов (АИС). Аппаратура ПН содержит приемник АИС, блоки управления, телеметрии и доплеровской фильтрации (рис. 2).

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

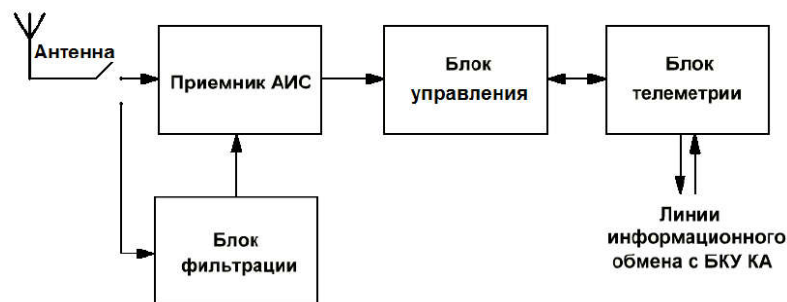


Рис. 2 – Блок-схема ПН (БКВ - бортовой комплекс управления)

Комплекующие электрорадиоизделия (ЭРИ) выбирались на этапе проектирования ПН на основе данных по их радиационной стойкости из [4, 5]. Приемник АИС использован в готовом исполнении (изготовитель – ОАО «Транзас», СПб). В табл. 1 приведены показатели стойкости использованных в ПН ЭРИ к ОРЭ, определенные существующим методом для случаев движения КА по солнечно-синхронной (ССО) и низкой круговой орбите (НКО).

Табл. 1 – Результаты оценки показателей стойкости комплектующих ЭРИ

Типономинал	ССО (высота 550 км, наклонение 98°)			НКО (высота 400 км, наклонение 51,5°)		
	Частота сбоев, 1/день	Частота отказов, 1/день	ВБР при САС = 1 год	Частота сбоев, 1/день	Частота отказов, 1/день	ВБР при САС = 1 год
RM24C128	2,28 10 ⁻⁵ (SEFI/Хранение)	1,1 10 ⁻¹³ (SEL)	> 0,999 (SEL)	1,29 10 ⁻⁴ (SEFI/Хранение)	2,76 10 ⁻¹⁴ (SEL)	> 0,999 (SEL)
	4,23 10 ⁻⁵ (SEU/Запись-чтение)	6,12 10 ⁻¹³ (KO)	> 0,999 (KO)	2,38 10 ⁻⁴ (SEU/Запись-чтение)	1,48 10 ⁻¹³ (KO)	> 0,999 (KO)
	5,99 10 ⁻² (SEFI/Запись-чтение)			8,59 10 ⁻³ (SEFI/Запись-чтение)		
Atmega168-20AU	1,92 10 ⁻³ (SEU, SEFI)	1,88 10 ⁻³ (SEL), 2,4 10 ⁻¹³ (KO)	0,503 (SEL), > 0,999 (KO)	3,45 10 ⁻⁴ (SEU, SEFI)	3,45 10 ⁻⁴ (SEL), 8,52 10 ⁻¹⁴ (KO)	0,881 (SEL), > 0,999 (KO)
STM32F105	4,33 10 ⁻⁴ (SEU, SEFI)	3,9 10 ⁻¹ (SEL), 2,94 10 ⁻⁹ (KO)	< 0,001 (SEL), > 0,999 (KO)	7,71 10 ⁻⁵ (SEU, SEFI)	6,67 10 ⁻² (SEL), 3,32 10 ⁻¹⁴ (KO)	<0,001 (SEL), > 0,999 (KO)
AD8432ACPZ	1,81 10 ⁻⁸ (SET)	2,419 10 ⁻⁹ (KO)	0,999 (KO)	4,16 10 ⁻⁹ (SET)	6,19 10 ⁻¹⁰ (KO)	0,999 (KO)
SA612AD	3,13 10 ⁻⁸ (SET)	2,419 10 ⁻⁹ (KO)	0,999 (KO)	7,38 10 ⁻⁹ (SET)	6,19 10 ⁻¹⁰ (KO)	0,999 (KO)
ГК217УН-160М-15Е-6/GR-2	1,18 10 ⁻¹² (SET)	1,18 10 ⁻¹² (KO)	0,999 (KO)	2,95 10 ⁻¹³ (SET)	2,95 10 ⁻¹³ (KO)	0,999 (KO)
ISO1050	9,84 10 ⁻¹⁰	9,84 10 ⁻¹⁰	0,999 (SEL,	2,27 10 ⁻¹⁰	2,27 10 ⁻¹⁰	0,999 (SEL,

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

	(<i>SEU</i>)	¹⁰ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	<i>KO</i>)	(<i>SEU</i>)	¹⁰ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	<i>KO</i>)
<i>LM317</i>	8,35 10 ⁻¹⁰ (<i>SET</i>)	8,35 10 ⁻¹⁰ (<i>KO</i>)	0,999 (<i>KO</i>)	1,97 10 ⁻¹⁰ (<i>SET</i>)	1,97 10 ⁻¹⁰ (<i>KO</i>)	0,999 (<i>KO</i>)
<i>LM25574</i>	9,072 10 ⁻¹ (<i>SET</i>)	2,48 10 ⁻³ (<i>SEL</i>), 2,51 10 ⁻⁵ (<i>KO</i>)	0,404 (<i>SEL</i>), 0,990 (<i>KO</i>)	1,45 10 ⁻¹ (<i>SET</i>)	4,58 10 ⁻⁴ (<i>SEL</i>), 1,83 10 ⁻⁵ (<i>KO</i>)	0,846 (<i>SEL</i>), 0,993 (<i>KO</i>)
<i>ADF4116</i>	4,88 10 ⁻⁹ (<i>SEU</i>)	4,88 10 ⁻⁹ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	0,999(<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	1,18 10 ⁻⁹ (<i>SEU</i>)	1,18 10 ⁻⁹ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	0,999(<i>SEL</i> , <i>KO</i>)
<i>TLV70033</i>	6,04 10 ⁻¹ (<i>SET</i>)	1,04 10 ⁻⁹ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	0,999(<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	9,82 10 ⁻² (<i>SET</i>)	2,46 10 ⁻¹⁰ (<i>SEL</i> , <i>KO</i>)	0,999(<i>SEL</i> , <i>KO</i>)
<i>CVCO33CL-0125-0200</i>	1,18 10 ⁻¹² (<i>SET</i>)	1,18 10 ⁻¹² (<i>KO</i>)	0,999 (<i>KO</i>)	2,95 10 ⁻¹³ (<i>SET</i>)	2,95 10 ⁻¹³ (<i>KO</i>)	0,999 (<i>KO</i>)
Примечания: ВБР - вероятность безотказной работы; САС - срок активного существования; <i>KO</i> - катастрофический отказ; <i>SEL</i> (англ. <i>Single event latchup</i>) - тиристорный эффект; <i>SEU</i> (англ. <i>Single event upset</i>) - одиночное переключение, <i>SEFI</i> (англ. <i>Single event functional interrupts</i>) - одиночное функциональное прерывание, <i>SET</i> (англ. <i>Single event transients</i>) - одиночные эффекты переходной ионизационной реакции.						

Поскольку некоторые ЭРИ подвержены ОРЭ, в ряде блоков для обеспечения сохранности информации в ПН были предусмотрены схемы парирования:

- в блоке управления реализовано *CRC* (англ. *Cyclic redundancy check*) кодирование и повторная передача для снижения влияния последствий *SEU*-эффектов на работоспособность ПН, сторожевой таймер для парирования *SEFI*-эффектов, схема отключения питания для парирования *SEL*-эффектов, а также сеансный режим работы для снижения влияния *KO*;

- в блоке телеметрии реализовано полное резервирование, *CRC* кодирование и дублирование данных для снижения влияния последствий *SEU* - эффектов во время чтения и *SEFI* - эффектов при чтении и записи, а также схема парирования *SEL*-эффектов;

- в блоке фильтрации реализована схема парирования *SEL*-эффектов;

- в цепи питания ПН для защиты от *SET*-эффекта установлены *TVS* (англ. *Transient voltage suppression*) диоды (*SET*-эффект не поддается аналитическому расчету и в данной работе не рассматривается).

После расчета показателей стойкости ЭРИ и принятия мер по парированию последствий ОРЭ в отдельных блоках проведена оценка показателей стойкости аппаратуры в целом существующим методом. Требования по стойкости, предъявляемые к ПН: ВБР $\geq 0,999$; частота сбоев $< 1 \cdot 10^{-6}$ сбоев в сутки.

Для оценки показателей стойкости ПН к воздействию ТЗЧ КП по ОРЭ существующим методом разработаны структурные схемы ее блоков, приведенные в работе [2]. Одна из разработанных структурных схем блока управления представлена на рисунке 3.

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

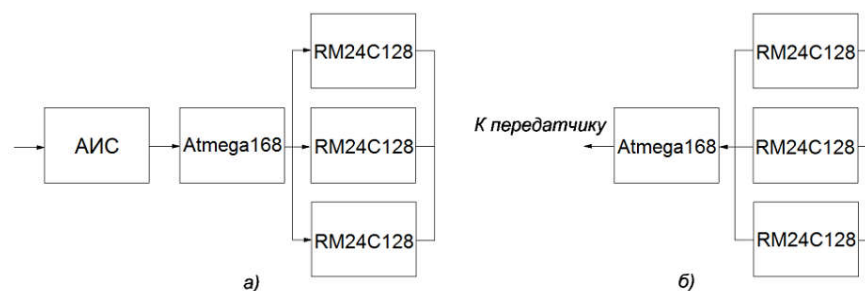


Рис. 3 – Структурная схема блока управления (а - прием сигналов и их запись в память, б - чтение сигналов из памяти и их отправка в радиочастотный тракт)

В результате расчета существующим методом выявлено, что на работоспособность и функционирование аппаратуры будут влиять следующие ОРЭ: *SEU*-, *SEFI*-, *SEL*-эффекты и КО. Вследствие того, что метод не учитывает эффективность применения защиты от ОРЭ и особенности функционирования системы в целом, оценка стойкости ПН существующим методом показала неудовлетворительный результат. Расчет показал, что ПН откажет менее чем через сутки после вывода КА на орбиту. Соответственно, и правильность передаваемой ПН информации оказывается под сомнением.

Для оценки показателей стойкости аппаратуры модифицированным методом построены графы состояний ПН для каждого вида ОРЭ. Расчет стойкости произведен в программном обеспечении (ПО) *RAM Commander* [6], которое автоматически генерирует систему дифференциальных уравнений, основываясь на виде построенного графа. Алгоритм расчета, реализованный в ПО, описан в нормативном документе [7].

В качестве примера на рисунке 4 приведен один из построенных графов, описывающий поведение ПН в условиях ССО при возникновении *SEL*-эффектов. Графы для остальных видов ОРЭ приведены в работе [2]. Для защиты элементов ПН используется схема парирования на дискретных элементах. Она кратковременно снимает напряжение питания с блока, в котором возникает *SEL*-эффект, и возвращает систему в исправное состояние.

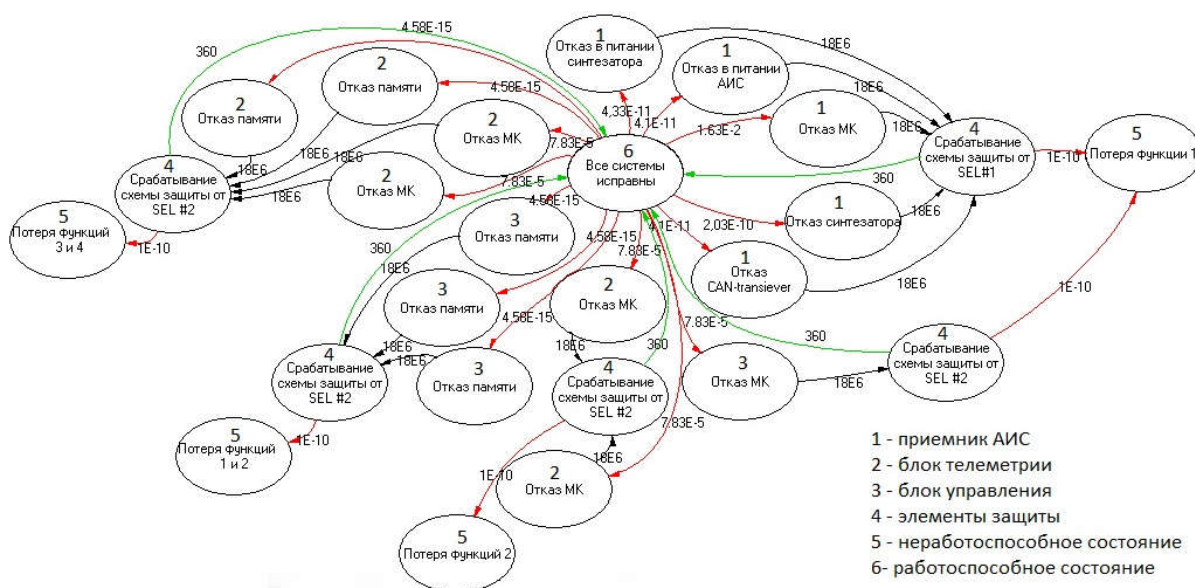


Рис. 4 – Граф состояний ПН при возникновении в элементах *SEL*-эффекта (функции: 1 - прием и запись сигналов судов в память; 2 - считывание сигналов из памяти и передача

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

их в радиочастотный тракт; 3 - запись телеметрии; 4 - считывание телеметрии из памяти и передача ее в радиочастотный тракт)

Сравнительный анализ «общих» показателей стойкости ПН, полученных существующим и модифицированным методами, представлен в табл. 2, 3.

Табл. 2 – Сравнение результатов оценки показателей стойкости ПН по одиночным сбоям

Тип эффекта	Модифицированный метод		Существующий метод	
	Частота сбоев на ССО, 1/день	Частота сбоев на НКО, 1/день	Частота сбоев на ССО, 1/день	Частота сбоев на НКО, 1/день
<i>SEU</i>	$4,09 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$4,53 \cdot 10^{-3}$
<i>SEFI</i>	$1,50 \cdot 10^{-16}$	$2,69 \cdot 10^{-17}$	$3,12 \cdot 10^{-1}$	$4,57 \cdot 10^{-2}$

Табл. 3 – Сравнение результатов оценки показателей стойкости ПН к одиночным отказам

Тип эффекта	Модифицированный метод				Существующий метод			
	Время безотказной работы, день		Частота отказов, 1/день		Время безотказной работы, день		Частота отказов, 1/день	
	ССО	НКО	ССО	НКО	ССО	НКО	ССО	НКО
<i>SEL</i>	> 365	> 365	$8,70 \cdot 10^{-17}$	$2,05 \cdot 10^{-17}$	< 1	< 1	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$
КО*	438*	600*	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$7,53 \cdot 10^{-7}$	480*	660*	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$
Примечание: *При условии, что приемник АИС работает 2 часа в сутки.								

Сравнительный анализ показал, что различия в частотах ОРЭ, полученных различными методами, могут достигать нескольких порядков. Только в случае КО результаты расчета близки, поскольку устойчивость ПН обусловлена резервированием, которое учитывают оба метода.

Стоит отметить, что помимо «общих» показателей стойкости модифицированный метод позволяет определять дополнительные параметры системы, позволяющие характеризовать понятие сохранность информации. Полученные в результате оценки модифицированным методом «дополнительные» показатели стойкости ПН для ССО приведены в таблице 4.

Табл. 4 – «Дополнительные» показатели стойкости ПН в условиях ССО

Тип эффекта	Вероятность отсутствия ОРЭ	Коэффициент готовности	Время простоя, час	Производительность
<i>SEU</i>	0,9777	0,9777	57,64	0,8874
<i>SEFI</i>	0,9999	0,9999	$1,90 \cdot 10^{-6}$	0,9999
<i>SEL</i>	0,9999	0,9999	$3,46 \cdot 10^{-6}$	1
КО*	0,9999*	0,9999*	3,92*	0,9999*
Примечание: *При условии, что приемник АИС работает 2 часа в сутки.				

Подтвердить применимость модифицированного метода для оценки стойкости РЭА КА к воздействию ТЗЧ КП по ОРЭ планируется в ходе наземных испытаний ПН и космического эксперимента. Наземные испытания ПН планируется проводить на ускорителе протонов ФГБУ «ПНТЯФ». В процессе воздействия будет производиться подсчет количества ОРЭ, происходящих в аппаратуре, и наблюдаться отклик системы на сбой или отказ ее элементов во время выполнения той или иной функции. Натурные испытания ПН в условиях КП будут проведены в ходе миссии КА, планируемой к проведению на ССО в 2017 г. Предполагается телеметрический контроль параметров ПН и подсчет количества ОРЭ. Данные эксперимента будут сравниваться с

К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

результатами их оценки существующим и модифицированным методами и результатами наземных испытаний в составе аппаратуры. Это позволит судить о корректности результатов, полученных на базе модифицированного расчетно-экспериментального метода оценки стойкости ПН.

Заключение

Предложен модифицированный метод оценки стойкости РЭА КА к воздействию ТЗЧ КП по ОРЭ, позволяющий учитывать режимы функционирования бортовой аппаратуры и влияние современных средств защиты на ее работу. Показано, что показатели, полученные при помощи существующего и модифицированного методов, различаются на несколько порядков. Получены дополнительные показатели стойкости, характеризующие понятие сохранности информации. В случае подтверждения достоверности предложенного метода возможно качественное повышение точности оценки радиационной стойкости РЭА. Это позволит делать выводы о сохранности информации, передаваемой РЭА, а также о достаточности примененных мер парирования ОРЭ в целях обеспечения защиты информации. Запланированы работы по экспериментальному подтверждению применимости предложенного метода в ходе наземных испытаний РЭА и космического эксперимента. Результаты работы могут послужить основой для разработки новых нормативных документов, расширяющих возможности методов оценки стойкости РЭА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. РД 134-0139-2005 «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости аппаратуры к воздействию заряженных частиц по одиночным сбоям и отказам».
2. Сивачева, Ксения Геннадьевна. Методы оценки радиационной стойкости радиоэлектронных средств космического аппарата [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/6223.pdf/view> (дата обращения 23.06.2016).
3. Хетагуров Я. А. Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования/Я. А. Хетагуров, Ю. П. Руднев – М.: Энергия, 1974. - 272 с.
4. Отраслевая информационно-справочная система по стойкости ЭКБ к естественным ИИ КП [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.kosrad.ru/index.php/ru/> (дата обращения 23.06.2016).
5. Информационно-справочная система ИСС РКП [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://84.17.21.78:81/rkp> (дата обращения 23.06.2016).
6. Пакет для проведения инженерных расчетов [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://www.bee-pitron.ru/ru/left/electric/reliability/ramcommander/index.shtml> (дата обращения 23.06.2016).
7. ГОСТ Р 51901.15–2005 «Менеджмент риска. Применение марковских методов».

REFERENCES:

1. RD 134-0139-2005. *Apparatura, pribory, ustrojstva i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. Metody ocenki stojkosti apparatury k vozdejstviyu zaryazhennykh chastic po odinochnym sboyam i otkazam* [Apparatus, instruments, devices and equipment of spacecraft. Equipment resistance assessment methods to charged particles of space for single errors and failures], vved. 2005-07-01, 2005, 74 p.
2. Sivacheva K.G. *Metody ocenki radiacionnoj stojkosti radioehlektronnykh sredstv kosmicheskogo apparata* [Radiation resistance assessment methods of spacecraft equipment], <http://elib.spbstu.ru/dl/2/6223.pdf/view> (access time 23.06.2016).
3. Hetagurov YA. A., Rudnev YU. P. *Povyshenie nadezhnosti cifrovyyh ustrojstv metodami izbytochnogo kodirovaniya* [Improving the reliability of digital devices using redundancy coding methods], Moscow: Energiya, 1974, 272 p.
4. *Otraslevaya informacionno-spravocchnaya sistema po stojkosti EHKB k estestvennym II KP* [Informational system on electronic components radiation hardness], <http://www.kosrad.ru/index.php/ru/> (access time 23.06.2016).
5. *Informacionno-spravocchnaya sistema ISS RKP* [Information system ISS RKP], <http://84.17.21.78:81/rkp> (access time 23.06.2016).
6. *Paket dlya provedeniya inzhenernykh raschetov* [Software for engineering calculations], <http://www.bee-pitron.ru/ru/left/electric/reliability/ramcommander/index.shtml> (access time 23.06.2016).
7. GOST R 51901.15–2005. *Menedzhment riska. Primenenie markovskikh metodov* [Risk management. Application of Markov techniques], vved. 2006-02-01, Moscow: Standartinform, 2005, 13 p.