

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2010 О.А. Акулов, Е.В. Фролков, А.В. Шатунов

Главный испытательный центр (испытаний и управления космическими средствами)
МО РФ им. Г.С. Титова (войсковая часть 32103), г. Краснознаменск Московской обл.

Представлены результаты натурного эксперимента на КА «Можаец-4» по оценке воздействия факторов космического пространства на работоспособность микросхем статической оперативной памяти 537РУ16, применяемых в составе ОЗУ бортовой вычислительной системы (БВС) «Салют-5М». На основе результатов эксперимента представлены в виде соответствующей модели эмпирические соотношения для оценки и прогнозирования работоспособности БВС КА наблюдения, функционирующих на солнечно-синхронной орбите.

Работоспособность бортовых вычислительных систем, среднее отклонение интенсивности отказов, мощность дозы протонов, модель надежности

Анализ применения космических аппаратов (КА) наблюдения с длительными сроками активного существования за период последних десяти лет (1998 – 2008 г.г) показал, что одной из важнейших проблем функционирования КА является обеспечение функциональной устойчивости бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к естественным ионизирующим излучениям космического пространства. При этом среди всех видов отказов чаще всего происходят перемежающиеся отказы – многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера. На практике [1] интенсивность перемежающихся отказов на 2...3 порядка выше интенсивности других отказов (внезапных, постепенных и др.).

Источниками ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве являются, в основном, естественный радиационный пояс Земли (ЕРПЗ), солнечные космические лучи (СКЛ) и галактические космические лучи (ГКЛ). При этом радиационные условия могут значительно отличаться в зависимости от обстоятельств полета, которые обусловлены как характерными чертами планируемого полёта (орбита,

продолжительность, конструкция КА), так и различными факторами космического пространства (солнечная активность, магнитосфера Земли) [2].

В общем случае ионизирующее излучение оказывает различное воздействие на интегральные микросхемы (ИМС). С точки зрения отказов представляют интерес два физических эффекта: ионизация носителей заряда и тепловой нагрев. Анализ физических механизмов отказов сводится к рассмотрению процессов генерации носителей заряда в чувствительных микрообъемах структуры элементов ИМС при воздействии отдельных частиц ИИ и условий, при которых этот процесс вызывает временную неисправность элементов [3].

В настоящее время для современных и перспективных КА наблюдения с учетом специфики выполнения целевых задач, в основном, используются солнечно-синхронные орбиты (ССО). Учитывая структуру магнитосферы Земли, для КА, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах, основной радиационной составляющей является солнечное ионизирующее излучение, поскольку вблизи магнитных полюсов,

куда частицы приходят в основном параллельно магнитным силовым линиям, влияние магнитного отклонения на энергетический спектр частиц наименьшее. Солнечное ионизирующее излучение (СИИ), в состав которого входят солнечные космические лучи и солнечный ветер, является наиболее нестабильным компонентом ионизирующих излучений космического пространства. Объективно прогнозирование пространственно-временного распределения характеристик СИИ сталкивается с серьезными трудностями вследствие отсутствия фундаментальной физической теории солнечной активности [4].

Надежность сложных технических систем как бортовая вычислительная система (БВС), являющаяся центральным звеном бортового комплекса управления (БКУ) КА, определяется надежностью составляющих ее элементов и способом их соединения. Будем полагать, что с точки зрения выполнения вычислительных операций типовая БВС состоит из трех базовых узлов: вычислительного устройства, реализованного на k ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_1(t)$; блоков оперативного ЗУ, реализованного на m ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_2(t)$, и постоянного ЗУ, реализованного на n ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_3(t)$. При этом на практике $\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_3 \ll \lambda_2$, поэтому будем полагать, что надежность БВС определяется, в основном, надежностью ОЗУ в силу наибольшей степени интеграции данного вида микросхем.

Для оценки и прогнозирования частоты перемежающихся отказов в ИМС, функционирующих в составе БВС на борту КА, существуют специальные расчётные методики, например интерактивный пакет программ COSRAD [5]. В качестве исходных данных для прогнозирования вероятности возникновения радиационных эффектов в ИМС используются параметры чувствительности микросхем: сечение насыщения, порог возникновения эффекта или чувствительный объем элемента,

устанавливаемые в результате испытаний ИМС на ускорителях тяжелых ионов.

В устройствах на цифровых ИМС кратковременные функциональные сбои под действием импульсного ионизирующего излучения существенно зависят от внутреннего состояния микросхемы. Особенно сложно моделирование кратковременных функциональных сбоев под воздействием отдельных тяжелых частиц, которые наблюдаются в БИС. При этом ионизационный эффект носит, как правило, локальный характер, поскольку реакция базовой логической ячейки связана в первую очередь с порогом срабатывания при вводе неравновесного заряда в ее наиболее чувствительный пассивный или активный элемент. Критический заряд, достаточный для сбоя элементарной ячейки, различен для БИС, изготовленных по разной технологии, определяется ее схемотехническим построением, геометрическими размерами чувствительных элементов, логическим состоянием и электрическим режимом их работы. Моделирование кратковременных сбоев под воздействием отдельных тяжелых частиц усложняется еще и потому, что при этом существенна роль факторов, связанных с вероятностью попадания частиц в разные по чувствительности к проявлению ионизационной реакции области микросхемы [6].

Отмечено [7], что характеристики радиационной стойкости ИМС в реальных условиях эксплуатации при низких интенсивностях излучения и определённые на моделирующих лабораторных установках могут отличаться более, чем в 3 раза. При этом доминирующие механизмы отказов в лабораторных условиях и в космосе могут быть различными. В этой связи одним из перспективных направлений по исследованию влияния ионизирующих излучений космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру является проведение натуральных экспериментов, в том числе эксперимент с КА «Можаец-4» [8].

На борту КА, функционирующего с 27 сентября 2003г на круговой орбите высотой ≈ 680 км и наклонением 98° , установлен комплекс научной аппаратуры «Призма-2», имеющий в своем составе блоки с испытываемыми микросхемами статической оперативной памяти 537PУ16 и управляющий микропроцессор в блоке согласования, посредством которого тестируются микросхемы с использованием тестовых кодов и подсчитывается число сбойных ячеек. Блоки имеют толщину алюминиевого корпуса 1, 2 и 3мм. Внешний вид комплекса представлен на рис. 1. Ценность данного эксперимента состоит также в том, что на указанных микросхемах построено ОЗУ БВС «Салют-5М», применяемой в составе БКУ современных КА наблюдения.

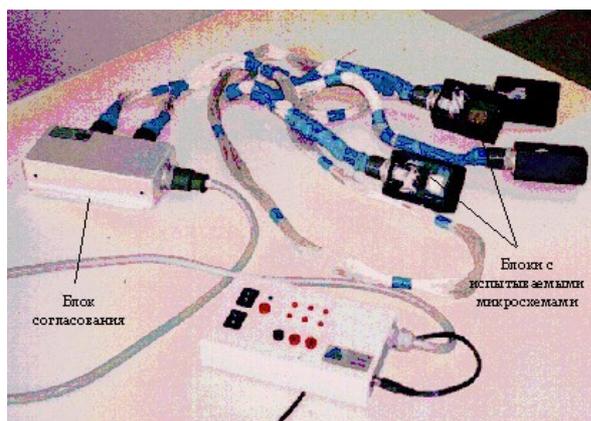


Рис. 1 – Внешний вид комплекса научной аппаратуры «Призма-2»

Результаты данного натурального эксперимента показали, что микросхемы оперативной памяти, используемые в БВС КА, значительно сильнее подвержены влиянию внешних факторов по сравнению с микропроцессором и постоянным запоминающим устройством.

На рис. 2 представлены результаты функционирования комплекса «Призма-2» с января 2004 г. по сентябрь 2007 г. Как видно из графика, изменение интенсивности перемежающихся отказов ячеек ОЗУ имеет циклический сезонный характер: минимум приходится на январь-февраль, максимум – на июль. Предполагая изменение значений интенсивности отказов ячеек в

зависимости от периода функционирования по закону синуса, прогнозируемую среднюю величину можно определить с помощью соотношений:

для месячного интервала оценки

$$I(i)|_{\Delta t=30 \text{ сут}} = 0,207 + 0,137 \sin(0,17p \cdot i - 0,625p), \quad (1)$$

где \overline{i} – номер календарного месяца; $i = \overline{1; 12}$;

для ежедневной оценки

$$I(i) = 0,207 + 0,137 \sin(0,0055p \cdot i - 0,541p), \quad (2)$$

где \overline{i} – номер календарного дня в году; $i = \overline{1; 365}$.

Также из графика видно, что наибольший разброс интенсивности отказов ячеек – наибольшие значения среднего отклонения (СО), приходится на 2004 год и к 2007 году постепенно снижается, о чем свидетельствуют представленные на рис. 3 графики изменения СО интенсивности отказов ОЗУ в процессе функционирования комплекса и потока радиоизлучения Солнца $F_{10,7}$. Данная тенденция может быть обусловлена спадом 23 цикла солнечной активности, максимум которого пришёлся на 2002 год.

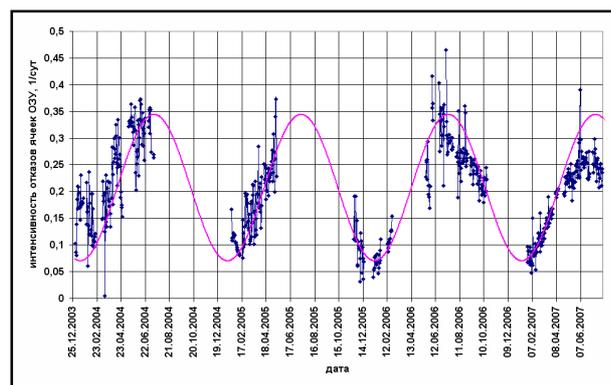


Рис. 2 – График изменения интенсивности отказов ячеек в ОЗУ комплекса «Призма-2» с января 2004 г. по сентябрь 2007 г.

По сопоставлению полученных результатов с различными показателями гелио-геофизической активности (характеристики ионизирующего излучения, характеристики геомагнитной

активности, характеристики солнечной активности, характеристики рентгеновского и других видов излучений) было установлено, что явной зависимости числа перемежающихся отказов микросхем от указанных характеристик не прослеживается.

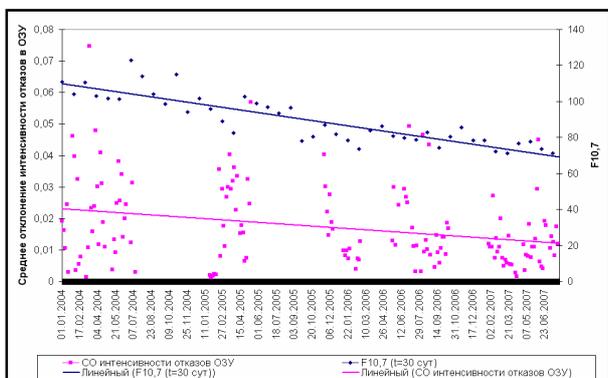


Рис. 3 – Графики изменения CO интенсивности отказов ячеек и потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$

Учитывая сложный характер механизмов возникновения отказов в ИМС в условиях воздействия ионизирующих излучений, существование прямой зависимости числа отказов ячеек оперативной памяти от воздействия ионизирующего излучения не является обязательным, ввиду того, что в статических ЗУ основную роль в образовании перемежающихся отказов играет величина суммарного заряда, собранного из ионизационного трека носителей [3]. При этом зависимость вероятности ошибки от этого заряда имеет порог, которому соответствует величина критического заряда. При превышении суммарного тока данной величины происходит переход ячейки оперативной памяти в другое логическое состояние (из «0» в «1» или из «1» в «0»). Таким образом, предлагается использовать в качестве характеристики качества функционирования микросхем не интенсивность отказов, как обычно принято, а среднее отклонение (CO) интенсивности отказов ОЗУ, которая

является мерой нестабильности работы микросхемы.

В качестве параметра солнечного ионизирующего излучения использована мощность дозы протонов, поскольку, по оценкам многих исследователей [2, 3, 7], протоны ответственны за большинство радиационных эффектов солнечного происхождения.

Результаты анализа полученных в ходе космического эксперимента данных показали удовлетворительную корреляцию CO интенсивности отказов ОЗУ со значениями мощности дозы протонов, что говорит о линейной зависимости среднего отклонения числа отказов от мощности дозы протонов. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены графики изменения среднего отклонения интенсивности отказов и мощности дозы протонов всех энергий за 2004 г. и 2005 годы, рассчитанных на основе данных с КА серии POES [9] с использованием известного соотношения [10]:

$$P_{Dx}(t) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} k \int_{E_1}^{E_2} j_i(E,t) S(E) dE, \quad (3)$$

где $S(E)$ – удельные потери в поглощающей среде, МэВ·см⁻¹;

k – коэффициент перехода от потока к дозе, $k = 1,6 \cdot 10^{-8}$.

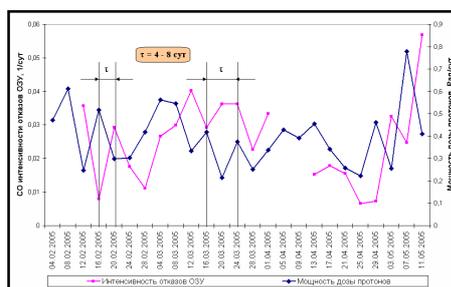


Рисунок 4 – Графики изменения CO интенсивности отказов ячеек и мощности дозы протонов в 2004 году

Нишний предел интегрирования в (3) определяется пороговой энергией $E_1 = \sqrt{x/a}$, верхний предел E_2 – значениями энергий заряженных частиц, для которых

определены и имеют смысл значения коэффициентов a и r , зависящих от материала и вида частицы.

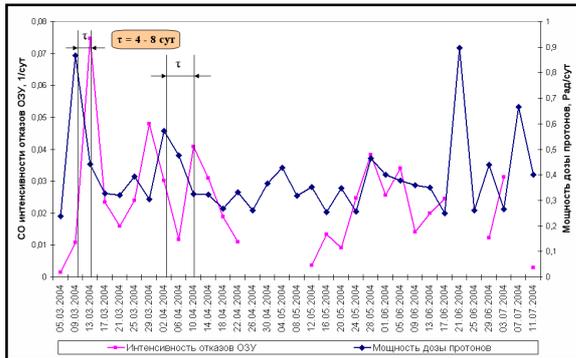


Рис. 5 – Графики изменения SO интенсивности отказов ячеек и мощности дозы протонов в 2005 году

При этом, как видно на графиках, задержка воздействия ионизирующего излучения составляет порядка 4 – 8 суток, что может быть обусловлено временем достижения критического заряда, достаточного для сбоя ячейки ОЗУ. Кроме того, сравнительный анализ значений мощности дозы протонов по данным с КА серии POES со значениями индекса геомагнитной активности, в частности A_p -индекса, показал удовлетворительную корреляцию указанных величин ($r = 0,76$). Поэтому показатели геомагнитной активности также могут использоваться при оценке функционирования РЭА в условиях отсутствия непосредственно данных о потоках частиц ионизирующих излучений $\varphi_p(E)$ с КА.

На рис. 6 с учетом представленных результатов показана схема модели надежности типовой БВС с учетом принятых обозначений для расчёта интенсивности отказов РЭА, в частности ОЗУ, по отношению к перемежающимся отказам. Определение вероятности безотказной работы и других комплексных показателей надежности осуществляется с использованием известных соотношений [1] в зависимости от принятых схем резервирования.

Таким образом, в результате эксперимента на КА «Можаец-4» получены зависимости, характеризующие циклическое сезонное изменение интенсивности отказов микросхем оперативной памяти в процессе функционирования комплекса «Призма-2». С использованием методов регрессионного анализа установлены зависимости среднего отклонения интенсивности отказов от мощности дозы протонов.

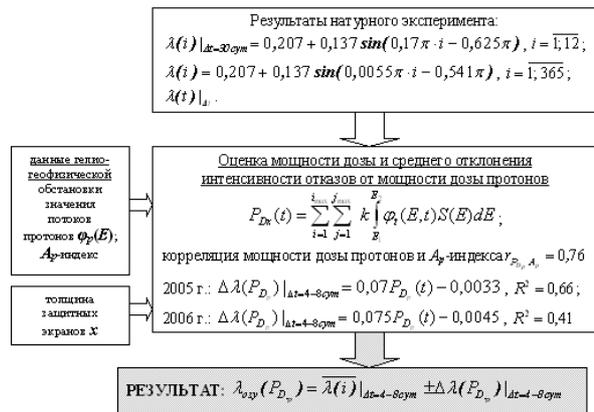


Рисунок 6 – Схема модели для оценки надежности типовой БВС по отношению к перемежающимся отказам

Использование в качестве характеристики работоспособности микросхем среднего отклонения интенсивности отказов обусловлено сложным механизмом возникновения перемежающихся отказов. Полученные эмпирические соотношения при оперативном учете гелио-геофизической информации могут быть использованы при оценке и прогнозировании состояния БВС КА наблюдения, функционирующих на солнечно-синхронной орбите, при планировании работ в рамках технологических циклов управления космическими аппаратами.

Библиографический список:

1. Козлов Д.И. Управление космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли.

Компьютерные технологии / Д.И. Козлов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1998. – 367 с.

2. Кузнецов Н.В., Панасюк М.И. Космическая радиация и прогнозирование сбое- и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ): серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». – 2001. – Вып. 1 – 2. – С. 3 – 8.

3. Чернышев А.А. Перемежающиеся и устойчивые отказы в цифровых интегральных микросхемах при воздействии ионизирующего излучения / А.А. Чернышев [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1986. – №7. – С. 3 – 157.

4. Кузнецов В.Д., Болдырев С.И., Зайцев А.В. Прогноз космической погоды в околоземном пространстве // Научная сессия МИФИ. – 20-7. – Т. 7. – С. 29 – 31.

5. Интегрированный пакет программ COSRAD (<http://cosrad.sinp.msu.ru>).

6. Никифоров А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах / А.Ю. Никифоров [и др.]. – М.: Радио и связь, 1994. – 180 с.

7. Новые наукоемкие технологии в технике // Энциклопедия. Т. 16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Л.С. Новикова и М.И. Панасюка. – М.: ЭНЦИТЕХ, 2000. – 296 с.

8. Фатеев В.Ф., Кремез Г.В., Фролков Е.В. Исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов посредством экспериментальных комплексов «Призма-1» и «Призма-2» // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2005. Т.48, №2. С. 78 – 81.

9. <http://ngdc.noaa.gov>.

10. Модель космического пространства. Том III. Расчетная модель / Под ред. С.Н. Вернова. – М.: Издательство МГУ, 1983. – 636 с.

References

1. Kozlov D.I. Management of space vehicles for earth remote sensing. Computer technology / D.I. Kozlov [others] – М.:Mechanical Engineerind, 1998.-367p.

2. Kuznetsov N.V., Panasyuk M.I. Space radiation and forecasting of failure and fail-safe features of integrated microchips in onboard equipment of space vehicles.//Questions of atomic science and mechanic (VANT): «Physics of radiation influence on electronic» series-2001.-Issue 1-2.-P.3-8/

3. Chernyshev A.A. Interleaved and stable denial in digital integrated microchips upon influence of ionizing radiation / A.A.Chernyshev [others]//Foreign electronics.-1986.-№7.-P.3-157/

4. Kuznetsov N.V., Boldyrev S.I., Zaitsev A.V. Space weather forecasting in near space//Science session MIPHI.-20-7.-T.7-P.29-31.

5. Integrated software COSRAD (<http://cosrad.sinp.msu.ru>).

6. Nikiforov A.U. Radiation effects in CMOS memory circuits/ A.U.Nikiforov [others]. –М.:Radio and Communication, 1994.-180p.

7. New science-driver technologies in engineering//Encyclopedia T.16. Influence of space environment on space vehicle materials and equipment/Edited by L.S. Novikov and M.I. Panasyuk –М.:ENCITEH,2000.-296p.

8. Fateev V.F., Kremez G.V., Frolkov E.V.-Working efficiency research of electronic component for space vehicle onboard equipment upon experimental complexes «Prizma-1» and «Prizma-2» //Izvestiya VUZov. Instrument engineerind. V.48. №2. P.78-81/

9. <http://ngdc.noaa.gov>.

10. Space model. Vol.III. Design model / Edited by S.N. Vernov – М.:MGU, 1983.-636p.

**APPROACH TO THE ASSESSMENT AND FORECASTING FOR ONBOARD
COMPUTER SYSTEMS OF MONITORING SPACE VEHICLES DURING ITS USAGE
BASED ON FULL-SCALE EXPERIMENTS**

© 2010 O.A. Akulov, E.V. Frolkov, A.V. Shatunov

Major Testing Center (research and control over space assets) MO RF by G.S. Titov
(Troop unit 32103), Krasnoznamensk, Moskovskaya Obl.

In the article there are results of a full-scale experiment on KA «Mozhaets-4» presented of an assessment of space factors influence on working efficiency of microchip static operation memory 537PY16, which are used in the onboard computer system RAM «Salut-5M». Based on experiment results empirical relationships are presented in an appropriate model for assessment and forecasting for working efficiency of onboard computer system KA for monitoring, which is functioning on sun-synchronous orbit.

Operating capacity of onboard computer system, average deviation of failure rate, proton dose rate, reliability model

Информация об авторах

Акулов Олег Анатольевич, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-испытательного управления, Главный испытательный центр (испытаний и управления космическими средствами) МО РФ им. Г.С. Титова, oakulov@yandex.ru. Область научных интересов: методология подготовки и проведения испытаний космических средств

Фролков Евгений Владимирович, к.т.н., начальник научно-испытательной лаборатории, Главный испытательный центр (испытаний и управления космическими средствами) МО РФ им. Г.С. Титова, e_frolkov@mail.ru. Область научных интересов: функциональная устойчивость автоматизированных систем управления КА

Шатунов Александр Владимирович, инженер-испытатель отдела главного испытательного центра (испытаний и управления космическими средствами) МО РФ им. Г.С. Титова, Область научных интересов: функциональная устойчивость автоматизированных систем управления КА

Akulov Oleg Anatolievich, Doctor of Engineering, docent, leading researcher of Research and testing department Major Testing Center (research and control over space assets) MO RF by G.S. Titov, oakulov@yandex.ru. Research interests: methodology of space assets test preparation and execution.

Frolkov Eugene Vladimirovich, candidate of Engineering, Head of research and testing laboratory Major Testing Center (research and control over space assets) MO RF by G.S. Titov, e_frolkov@mail.ru. Research interests: functional stability of automated control systems KA.

Shatunov Alexander Anatolievich, unit test engineer Major Testing Center (research and control over space assets) MO RF by G.S. Titov, Research interests: functional stability of automated control systems KA.