
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 629.7

И. В. ЗАХАРОВ, Г. В. КРЕМЕЗ, Е. В. ФРОЛКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ СЕРИИ „МОЖАЕЦ“

Представлены результаты выполненных на космических аппаратах „Можаяец-3“ и „Можаяец-4“ натуральных экспериментов, в которых исследовалось влияние факторов космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру. Представлены результаты исследования характеристик надежности элементной базы в натуральных условиях.

Ключевые слова: космический эксперимент, надежность, стойкость электронной компонентной базы.

Обеспечение работоспособности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в условиях воздействия комплекса ионизирующих излучений является сложной задачей. Смоделировать с высокой точностью влияние дестабилизирующих гелиогеофизических факторов на бортовую аппаратуру космических аппаратов (КА) в наземных условиях практически не представляется невозможным. В частности, в работе [1] отмечено, что значения радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) в реальных условиях эксплуатации при низкой интенсивности излучения и определенные на лабораторных установках могут различаться более чем в три раза. При этом доминирующие механизмы отказов в лабораторных условиях и в космосе могут быть различными.

В Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского начиная с 1995 г. проводятся работы, связанные с исследованием устойчивости функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Натурные эксперименты проводились с помощью комплексов научной аппаратуры „Призма-1“ и „Призма-2“ на малых КА серии „Можаяец“, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах высотой около 700 км и наклоном 98° [2].

Комплекс „Призма-1“ [2] включает три блока электронных приборов с различной толщиной корпуса и два блока датчиков радиационного контроля (размещены на внешней поверхности КА), а также блок сопряжения (расположен в приборном отсеке КА), обеспечивающий опрос испытываемых микросхем и передачу контролируемых параметров в систему телеметрии. Испытываемые приборы представляют собой генераторы тактовых импульсов (ГТИ), построенные на базе ИМС 140УД12.

Комплекс „Призма-2“ [2] содержит четыре блока испытываемых приборов с четырьмя микросхемами оперативной памяти 537РУ16 (размещены на внешней поверхности КА), датчики температуры и накопленной дозы (расположены совместно с испытываемой микросхе-

мой памяти в одном из блоков), а также блок согласования с бортовым комплексом управления (расположен в приборном отсеке КА „Можаяец-4“), обеспечивающий тестирование испытываемых микросхем и передачу контролируемых параметров в систему телеметрии.

За время полета КА „Можаяец-3“ испытываемые блоки проработали в активном режиме более 3000 часов: получено более 170 000 значений оцениваемых параметров. В качестве основного показателя, характеризующего работу микросхем, использовалась амплитуда выходного напряжения, за время функционирования выявлено ее снижение в пределах 5 %.

Наибольший разброс амплитуд зафиксирован при первых включениях аппаратуры, что соответствует этапу приработки. В дальнейшем разброс существенно снизился (в 2—6 раз), при этом тенденции к изменению значений амплитуды не прослеживаются, что также свидетельствует о стабильности выходных электрических параметров испытываемых ГТИ.

В ходе натурного космического эксперимента на КА „Можаяец-3“ была успешно апробирована технология сбора и анализа экспериментальных данных. Полученные результаты подтвердили устойчивость функционирования ИМС малой и средней степени интеграции в условиях космического пространства и позволили создать практический задел для постановки и проведения космического эксперимента на КА „Можаяец-4“.

В комплексе „Призма-2“ тестирование микросхем памяти осуществляется управляющим микропроцессором 1880BE31У, который считывает и затем выполняет команды программы. Программа реализует стандартные тесты проверки памяти: запись-считывание в ячейки оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) нулей, единиц, шахматного кода. Считанные коды сравниваются с эталонными, при несовпадении подсчитывается число ошибок, которое в дальнейшем через систему телеметрии передается потребителю.

Анализ работы комплекса „Призма-2“ за время функционирования КА „Можаяец-4“ показал изменения интенсивности перемежающихся отказов (сбоев) ячеек в блоках ОЗУ в достаточно широких пределах — от 0,03 до 0,47 в сутки.

На рис. 1 представлены результаты функционирования комплекса „Призма-2“ с января 2004 г. по сентябрь 2007 г.

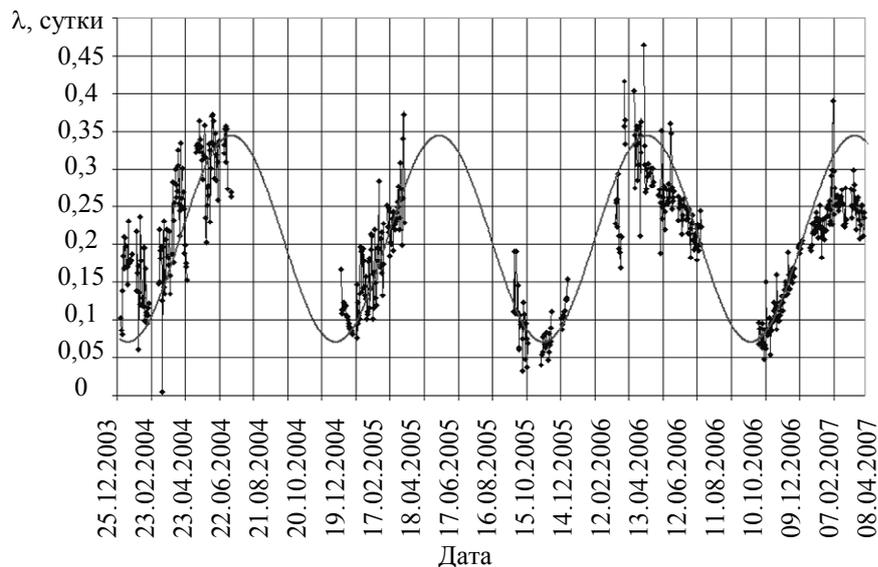


Рис. 1

Как видно из графика, изменения интенсивности λ носят сезонный характер: минимум приходится на январь—февраль, максимум — на июль. В предположении изменения значений λ по закону синуса среднюю величину интенсивности можно определить с помощью соотношений:

— для месячного интервала оценки

$$\lambda(i) |_{\Delta t=30 \text{ сут}} = 0,207 + 0,137 \sin(0,17\pi i - 0,625\pi),$$

где i — номер календарного месяца;

— для ежедневной оценки

$$\lambda(i) = 0,207 + 0,137 \sin(0,0055\pi i - 0,541\pi),$$

где i — номер календарного дня в году.

Также из графика видно, что наибольшие значения среднего отклонения (СО) интенсивности отказов приходятся на 2004 год и к 2007 г. постепенно снижаются. Данная тенденция может быть обусловлена спадом 23-го цикла солнечной активности, максимум которого пришелся на 2002 г.

Из сопоставления полученных результатов с различными показателями гелиогеофизической активности (ионизирующее излучение, геомагнитная активность, солнечная активность, рентгеновское и другие виды излучения), было установлено, что явной зависимости числа перемежающихся отказов микросхем от указанных характеристик не прослеживается.

Прямая зависимость числа отказов ячеек оперативной памяти от воздействия ионизирующего излучения не была выявлена, видимо, вследствие того что в статических запоминающих устройствах основную роль в возникновении сбоев играет величина суммарного заряда, накопленного за счет ионизации [3]. Поскольку существует критическое значение заряда, при достижении которого происходит переход ячейки ОЗУ в другое логическое состояние (из „0“ в „1“ или из „1“ в „0“), для характеристики устойчивости функционирования микросхем целесообразно использовать не интенсивность отказов, а ее среднее отклонение $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\lambda(t_j) - \bar{\lambda}|,$$

где n — число измерений за рассматриваемый интервал функционирования.

При анализе результатов экспериментов целесообразно использовать мощность дозы протонного излучения, поскольку оно, по оценкам многих исследователей [1, 3, 4], „ответственно“ за большинство солнечных радиационных эффектов.

Была обнаружена удовлетворительная корреляция $\Delta\lambda$ со значениями мощности дозы протонов. В качестве примера на рис. 2 представлены графики изменения среднего отклонения интенсивности отказов (1) и мощности P дозы протонов всех энергий (2) за 2005 г., рассчитанных на основе данных с КА серии POES [5] с использованием известного соотношения [6]:

$$P_D(t) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} k \int_{E_1}^{E_2} \varphi(E, t) S(E) dE,$$

где φ — поток частиц ионизирующих излучений, $S(E)$ — удельные потери в поглощающей среде, k — коэффициент перехода от потока частиц к дозе излучения.

Нижний предел интегрирования определяется пороговой энергией ионизирующих частиц, верхний предел — значениями энергии заряженных частиц, для которых определены значения коэффициентов, зависящих от материала и вида частицы.

При этом, как видно из рисунка, задержка эффекта воздействия ионизирующего излучения $\tau \approx 4-8$ 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 индексов геомагнитной активно-

сти показал удовлетворительную корреляцию указанных величин. Поэтому показатели геомагнитной активности также могут использоваться при оценке функционирования РЭА в условиях отсутствия непосредственно данных о потоках $\phi(E)$ с КА.

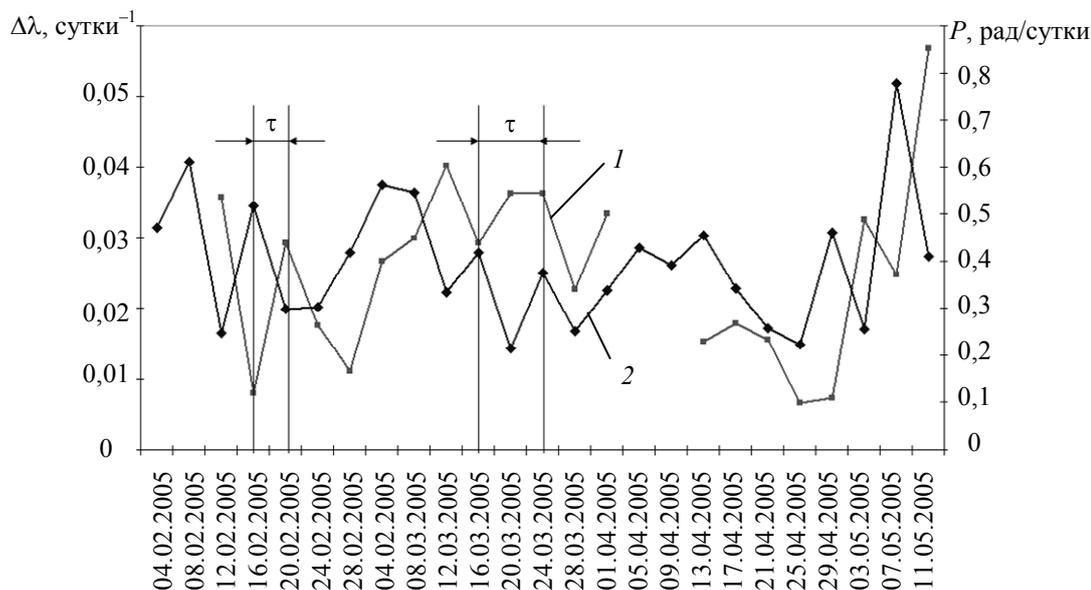


Рис. 2

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.

Полученные авторами эмпирические соотношения могут быть использованы при оценке и прогнозировании состояния бортовых вычислительных систем КА, функционирующих на солнечно-синхронной орбите, при планировании работ в рамках технологических циклов управления космическими аппаратами [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 78—81.
3. Чернышев А. А. Перемежающиеся и устойчивые отказы в цифровых интегральных микросхемах при воздействии ионизирующего излучения // Зарубежная электронная техника. 1986. № 7. С. 3.
4. Кузнецов В. Д., Болдырев С. И., Зайцев А. В. Прогноз космической погоды в околоземном пространстве // Научная сессия МИФИ. 2007. Т. 7. С. 29—31.
5. [Электронный ресурс]: <<http://ngdc.noaa.gov>>.
6. Модель космического пространства. Т. III. Расчетная модель / Под ред. С. Н. Вернова. М.: Изд-во МГУ, 1983. 636 с.
7. Захаров И. В., Иваненко А. Ю., Кремез Г. В., Фролков Е. В., Шпак А. В. Повышение функциональной устойчивости бортовых вычислительных систем малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 65—67.

Сведения об авторах

- Иван Вячеславович Захаров** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: x.vapo-z80@yandex.ru
- Георгий Вальтерович Кремез** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: gvkremez@mail.ru
- Евгений Владимирович Фролков** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: e_frolkov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-вычислительных
систем и сетей

Поступила в редакцию
26.12.13 г.