

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

PREDICTING THE WORKING CAPACITY OF INTEGRATED CIRCUITS UNDER THE INFLUENCE OF HIGH-ENERGY RADIATION OF OUTER SPACE

С. В. Камин, А. Н. Качемцев, Н. Г. Корсакова

S. V. Katin, A. N. Kachemtsev, N. G. Korsakova

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «Научно-исследовательский институт измерительных систем
им. Ю. Е. Седакова»

Branch RFNC-VNIEEF, «Scientific-research Institute of measurement systems n. Y. E. Sedakov»

Обеспечение работоспособности современного оборудования, эксплуатируемого в условиях воздействия ионизирующих излучений и одиночных высокоэнергетических заряженных частиц, в течение всего срока активного существования космического аппарата невозможно без достоверной информации или обоснованного прогноза о стойкости элементной базы, примененной при его разработке и изготовлении. Рассмотрены варианты построения физических законов поражения для различных видов типов микросхем и радиоэлектронной аппаратуры. Приведены результаты сравнения прогнозов сохранения работоспособности с экспериментальными данными по продолжительности эксплуатации и наработке на отказ современной спутниковой аппаратуры.

Ensuring the efficiency of modern equipment exposed under the influence of ionizing radiation and single high-energy charged particles during the lifetime of the spacecraft active existence is impossible without sufficient information or a reasonable forecast of the stability of the element base used in its development and manufacture. Variants of construction of physical laws of defeat for different types of chips and the radio-electronic equipment are considered. The results of the comparison of the predictions of consistency with the experimental data for the duration of operation and the MTBF of modern satellite instrumentation.

Прогнозирование радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры и изделий микроэлектроники, применяемых при ее разработке, в условиях воздействия частиц высоких энергий является важнейшей задачей при обеспечении длительных сроков эксплуатации космических аппаратов и их оборудования. Исследованию одиночных событий при воздействии радиации различной природы посвящены многочисленные работы [1–6], монографии [7–8]. Разработана классификация эффектов [7], особенно хорошо изучены эффекты при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства [8]. Разработана теория обратимых сбоев, приводящих к потере информации в оперативных запоминающих устройствах (ОЗУ), использующих микросхемы сверхбольшой степени интеграции [8]. Теория основана на концепции чувствительного объема и критического заряда [8].

В ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю. Е. Седакова» несколько лет проходила разработка методики оценки и прогнозирования стойкости радиоэлектроники к воздействию ионизирующих излучений различной природы (ядерный взрыв, изотопный источник, моделирующие установки). Результаты этой работы докладывались на конференциях [9] и были запатентованы в части оценки стойкости к воздействию факторов космического пространства [10]. В патенте приведены результаты апробации метода построения физического закона поражения интегральных микросхем тяжелыми заряженными частицами космического пространства. Разработанный алгоритм позволяет получить достоверные оценки срока активного существования аппаратуры космического назначения с учетом актуальных моделей влияния ионизирующих излучений космического пространства на работоспособность приборов.

Аналогичные работы проводятся и другими исследователями, например, в работе [11] рассмотрены вопросы разработки радиоэлектронной аппаратуры, предназначенной для, так называемых, высоконадежных применений. Авторы рассматривают высоконадежными такие применения, для которых:

$$p(t) \approx 1 \text{ при } t \leq t_{AC} \quad (1)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы; t_{AC} – время активного существования аппаратуры.

По приведенным в работе [11] данным для, удовлетворяющей условиям (1), спутниковой аппаратуры необходимы значения $p(t) > 0,9$ за время активного существования космического аппарата от 5 лет и более. В работе сделаны точечные оценки средней наработки до отказа по методике, предложенной в [12]. Оценки производились для различных видов функции распределения: экспоненциального, Вейбулла (с различными параметрами формы) и DN-распределения. Показано, что оценка, полученная на основе DN-распределения, более консервативна, что согласуется с данными [12]. При параметре формы – 2,5 полученные оценки для DN-распределения и распределения Вейбулла практически совпадают, что позволяет использовать их для прогнозирования времени

безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры, содержащей сильно стареющие компоненты. При доверительной вероятности 0,99 для DN-распределения и 0,9999 для распределения Вейбулла полученные оценки практически совпадают с результатами испытаний.

Один из возможных расчетных случаев применения разработанной в [11] модели представлен на рис. 1, где показана зависимость вероятности безотказной работы навигационного устройства от времени его пребывания на орбите.

Исходя из, представленных на рис. 1, данных следует, что условие (1) выполняется на протяжении эксплуатации оборудования $\sim 10^5$ часов. Проведение таких испытаний в условиях испытательного центра практически не возможно. Разработано большое число различных методик, позволяющих моделировать реальные условия эксплуатации [8], в том числе замена реального воздействия близким по характеру воздействия. Количество образцов также может быть ограничено, как и количество испытаний. Однако, исходя из анализа условий эксплуатации иногда можно предположить по принципу практической уверенности [13], что если вероятность события (например, отказа) при испытаниях мала, то при однократном испытании можно ожидать его отсутствие – положительный результат испытаний. Применение этого принципа к испытаниям на ра-

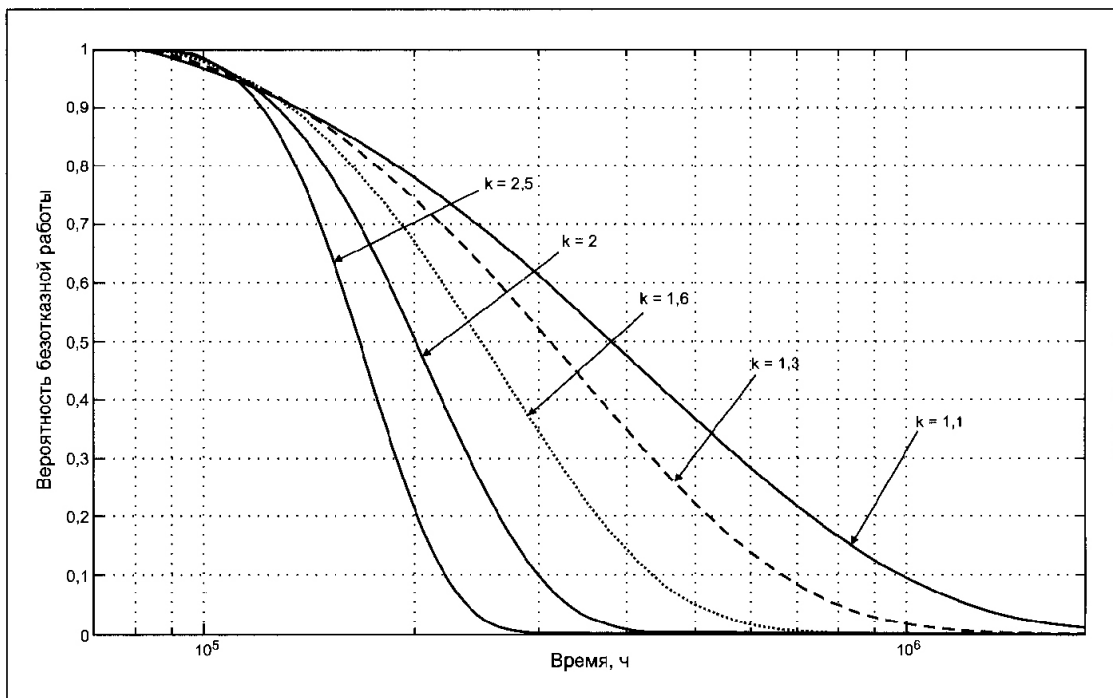


Рис. 1. Зависимость работоспособности навигационного оборудования от времени эксплуатации [11]

диационную стойкость вполне оправдано, поскольку в подавляющем большинстве случаев количество испытаний сложной высокоинтегрированной электронной компонентной базы ограничивается единицами экспериментов. Таким образом, положительные результаты испытаний микросхем должны содержать и вероятность ее сбоя или отказа.

В [14] предложен способ прогнозирования работоспособности интегральных микросхем и радиоэлектронного оборудования на основании анализа конструкции объекта и результатов его испытаний даже в случае отсутствия представительной выборки образцов при испытаниях. Развитием модели является переход от статистического к физико-технологическому подходу к прогнозированию работоспособности микросхем и сложнофункциональных изделий, то есть речь должна идти о построении физического закона поражения, под которым понимают зависимость между вероятностью сохранения работоспособности объектами интенсивностью зарегистрированных нештатных ситуаций (сбоев, отказов).

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов контроля работоспособности микросхем (процессоры, контроллеры, память) является тестирование. По результатам прохождения тестов судят о работоспособности и прогнозируют сроки эксплуатации таких изделий. Критериальными параметрами для микросхем в данном случае являются сохранение работоспособности и отсутствие искажения информации.

Введем индекс работоспособности микросхемы T , который будем вычислять следующим образом: результаты одного конкретного теста τ_i могут иметь три состояния – тест пройден, тест пройден с ошибками, тест не пройден. Присвоим каждой из этих ситуаций цифровой индекс, тогда τ_i имеет вид

$$\tau_i = \begin{cases} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

Следовательно, индекс работоспособности микросхемы T можно записать в виде

$$T = \frac{\sum \tau_i}{N} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где N – количество проведенных тестов в каждом цикле измерений.

Отличием условий облучения при длительной эксплуатации космических аппаратов является тот факт, что плотность потока частиц высоких энергий определяется орбитой и изменяется только при изменении активности источников частиц. На больших временных интервалах ее интенсивность флюенсчастиц можно считать постоянной во времени, а интегральные характеристики работоспособности микросхем (частота сбоев) – прямо пропорциональны времени воздействия. Исходя из этого, физический закон поражения может быть построен в виде зависимости вероятности сохра-

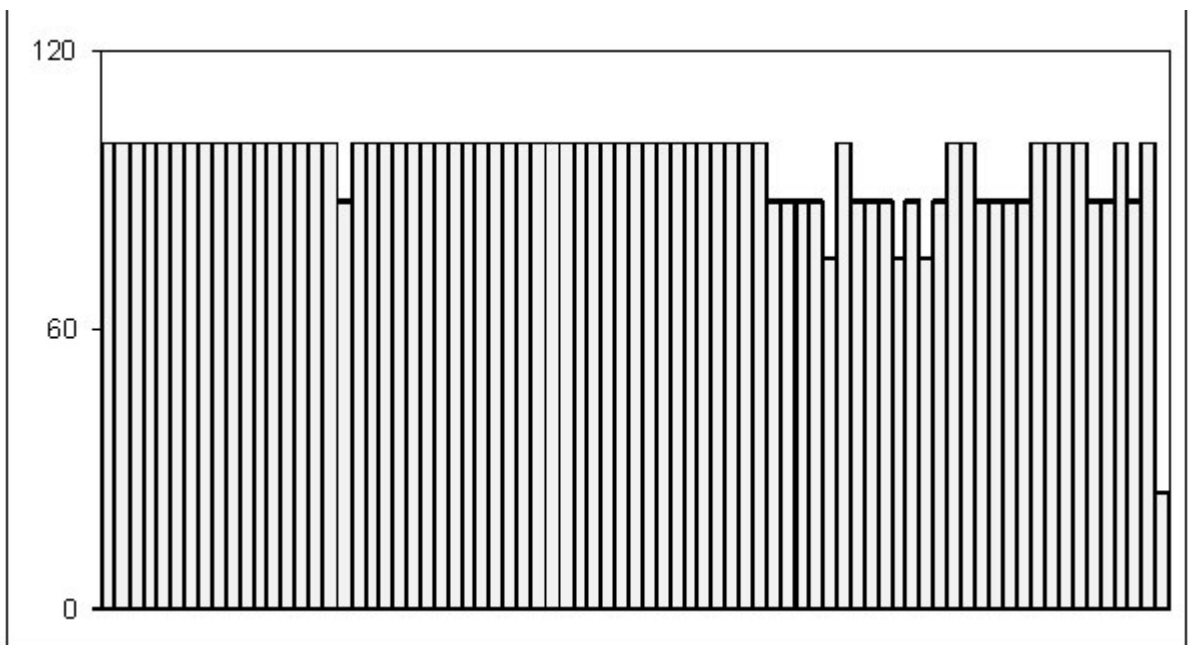


Рис. 2. Диаграмма функционирования по результатам тестирования

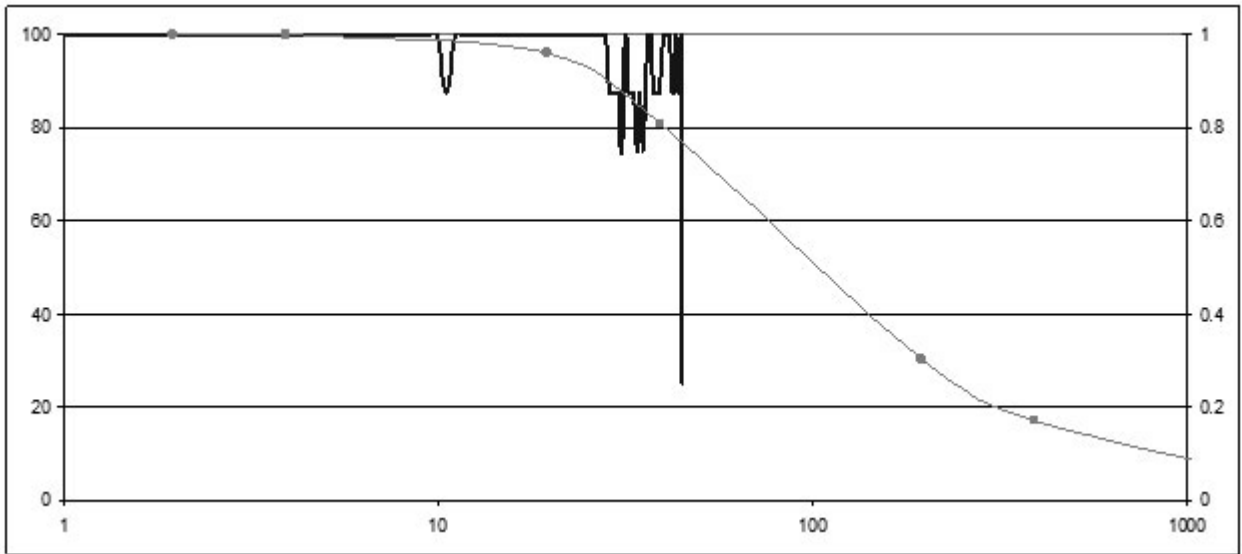


Рис. 3. Физический закон поражения и результаты испытаний

нения работоспособности от времени. Формально мы получаем зависимость вероятности безотказной работы от времени, как это показано на рис. 1, но в отличие от [11] разработанная методика непосредственно связана с характеристиками воздействия и моделью формирования отказа микросхемы.

Для примера приведены результаты анализа работоспособности микросхем процессора, памяти, примопередатчика стандарта RS-422, которые тестировались в процессе испытаний на стационарном источнике. Фиксировалось количество ошибок при проведении однотипных тестов. Результаты приведены в виде гистограммы на рис. 2. По вертикальной оси отложен индекс работоспособности T (3), по горизонтальной – порядковый номер цикла тестирования.

На рис. 3 приведены результаты сопоставления прогноза работоспособности микросхем по разработанной методике и испытаний. По левой вертикальной оси отложен индекс работоспособности T (3), по правой – вероятность безотказной работы. По горизонтальной оси – время работы. Тонкая линия – физический закон поражения, жирная линия – индекс работоспособности, рассчитанный по формулам (2) и (3). Сравнение рисунков 1 и 3 позволяет сделать вывод о хорошем совпадении результатов, полученных для различных объектов по различным методикам, что можно интерпретировать как проявление фундаментальных закономерностей, заложенных в методологии физического закона поражения.

Авторы выражают признательность сотрудникам НИИИС и ВНИИЭФ за помощь в проведении исследований и содержательные обсуждения.

Список литературы

1. Shin-ichiro Abe / Impact of Nuclear Reaction Models on Neutron-Induced Soft Error Rate Analysis / Shin-ichiro Abe, Ryotaro Ogata, and Yukinobu Watanabe // IEEE Transactions on nuclear science, vol. 61, N. 4, august 2014. С. 1806–1812.
2. Шукайло В. П. Влияние дозовых нагрузок на сечение одиночного сбоя СОЗУ КНИ Simox от высокоэнергетических нейтронов / Шукайло В. П., Шамаев Е. Ю., Ворожцова И. В. и др. // Сборник докладов X Межотраслевой конференции по радиационной стойкости. – Саров, октябрь 2012. С. 86–96.
3. Криницкий А. В. Воздействие отдельных ядерных частиц на интегральные схемы // Современная электроника, № 4, 2008. С. 60–62.
4. Бетелин В. Б. Перспективы использования субмикронных КМОП СБИС в сбоеустойчивой аппаратуре, работающей под воздействием атмосферных нейтронов / Бетелин В. Б., Баранов С. В., Бобков С. Г. // Микроэлектроника, т. 38, N. 1, 2009. С. 48–52.
5. Чумаков А. И. Сбои и отказы в ИС при воздействии отдельных высокоэнергетических нейтронов / Чумаков А. И., Афонин А. В., Гонтарь В. В. и др. // Сборник докладов IX Межотраслевой конференции по радиационной стойкости. – Снежинск, октябрь 2010. С. 32–37.

6. Зольников В. К. Методы обеспечения радиационной стойкости КМОП БИС к ТЗЧ / Зольников В. К., Смерек В. А., Скляр В. А. и др // Сборник докладов X Межотраслевой конференции по радиационной стойкости. – Саров, октябрь 2012. С. 186–191.

7. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – Москва: Радио и связь, 1994. – 180 с.

8. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных микросхемах космического применения. – Москва: Бином, 2012. С. 304.

9. Довбыш Л. Е. Разработка метода построения физического закона поражения радиоэлектронной аппаратуры тяжелыми зараженными частицами космического пространства по результатам испытаний ЭКБ / Довбыш Л. Е., Качемцев А. Н., Киселев В. К. и др // Сборник докладов IX Межотраслевой конференции по радиационной стойкости. – Снежинск, октябрь 2010. С. 68–82.

10. Качемцев А. Н. Способ испытаний полупроводниковых БИС технологии КМОП/КНД на стойкость к эффектам единичных сбоев от воздей-

ствия тяжелых заряженных частиц космического пространства / Качемцев А. Н., Киселев В. К., Торохов С. Л. // Патент РФ, № 2495446, приоритет 17.10.2011, опубликован Бюл. № 28, 10.10.2013.

11. Губанов А. Г. К вопросу прогнозирования вероятности безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры для высоконадежных применений / Губанов А. Г., Пылаев Ю. К., Сидорова М. М. // Компоненты и технологии, 2016, № 9, С. 114–119.

12. Стрельников В. П. Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры // Математичні машини і системи, 2007. № 3, 4, С. 227–238.

13. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. – Москва: Высшая школа, 2000. С. 316.

14. Качемцев А. Н. Способ определения стойкости электронных компонентов и блоков радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений / Качемцев А. Н., Киселев В. К., Корсакова Н. Г. // Патент РФ, № 2504862, приоритет 20.01.2011, Опубликовано Бюл. № 2, 20.01.2014