

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77:539.1.043

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ (АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ) НА ДОЗОВУЮ СТОЙКОСТЬ МИКРОСХЕМ

© 2019 г. О. А. Калашников\*

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, АО “ЭНПО Специализированные электронные системы”, Каширское ш., 31, Москва, 115409 Россия*

*\*E-mail: oakal@spels.ru*

Поступила в редакцию 18.01.2019 г.

После доработки 27.02.2019 г.

Принята к публикации 27.02.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования влияния электрического режима (активный и пассивный) на дозовую радиационную стойкость микросхем различных конструктивно-технологических базисов и функциональных классов. Анализ представленных результатов позволил оценить эффективность “холодного” резервирования и возможность моделирования эффектов низкой интенсивности облучением в пассивном режиме.

DOI: 10.1134/S0544126919050041

#### ВВЕДЕНИЕ

В современной космической аппаратуре с целью повышения надежности и сбоеустойчивости широко используется резервирование – дублирование (троирование и т.д.) блоков. Одним из наиболее распространенных вариантов резервирования является “холодный” резерв, при котором пока работает основной блок, резервные блоки не запитаны, а когда основной блок выходит из строя, подключается резервный. При этом подразумевается, что условия “холодного” резерва с точки зрения сохранения работоспособности существенно более мягкие, чем рабочие условия эксплуатации.

Одним из основных факторов, приводящих к отказам электронной аппаратуры космического назначения, является поглощенная доза, связанная с воздействием электронов и протонов космического пространства [1]. Технология “холодного” резервирования основана на предположении, что дозовая деградация электронных компонентов в пассивном режиме (без подачи питания) происходит существенно медленнее, чем в активном. Это предположение находило неоднократное экспериментальное подтверждение, однако большинство исследований по сравнению стойкости электронных компонентов в активном и пассивном режимах проводилось достаточно давно и в основном не ставило целью широкий охват электронной компонентной базы [2]. Поэтому, учи-

тывая развитие микроэлектронных технологий, актуальным представляется исследование влияния режима при облучении на стойкость широкого круга электронных компонентов (в первую очередь – микросхем), изготовленных в различных конструктивно-технологических базисах.

#### 1. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачей исследований была оценка влияния электрического режима (активный и пассивный) на дозовую радиационную стойкость микросхем различных конструктивно-технологических базисов (КМОП, биполярные, БиКМОП, гибридные) и функциональных классов. Для задания режимов работы микросхем при облучении изготовлены специальные оснастки. В активном режиме микросхемы облучались при номинальном напряжении питания, в пассивном – в этой же оснастке без подачи на нее питания (режим, моделирующий “холодный резерв” в аппаратуре). В обоих случаях периодически проводился контроль работоспособности микросхем, причем продолжительность процедур контроля была как минимум на порядок ниже интервалов облучения.

Исследовались образцы одной и той же партии, выборка разделялась на две группы. Все остальные условия исследований, кроме электрических режимов при облучении (интенсивность облучения, температура окружающей сре-

ды, условия контроля работоспособности) были одинаковыми для обеих групп. Исследования проводились в испытательном центре (ИЦ) “ЭНПО СПЭЛС” на следующих установках: ускоритель У-31/33, работающий в режиме тормозного излучения, изотопная установка “Гамма-Панорама” с источником  $Cs^{137}$ , а также рентгеновский источник РИК-0401 [3, 4].

Проанализированы результаты облучения в активном и пассивном режимах 83 типов микросхем. В ряде случаев отказ не был зафиксирован ни в активном, ни в пассивном режиме до предельного уровня облучения, эти данные исключены из рассмотрения, а остальные (по результатам исследований 50 типов микросхем) приведены в табл. 1.

## 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для удобства оценки различий между активным и пассивным режимами представим данные из таблицы в виде диаграмм относительного влияния режима (ОВР). На рис. 1 представлены диаграммы ОВР отдельно по трем конструктивно-технологическим базисам. По оси абсцисс отложены отношения доз отказа микросхем в пассивном и активном режимах ( $D_{\text{ПАССИВ}}/D_{\text{АКТИВ}}$ ), по оси ординат – доля типов от общего количества (в процентах), попадающих в соответствующий диапазон отношений доз отказа. В случаях, когда в одном из режимов отказ не наблюдался, в качестве доз отказа принимались предельные достигнутые уровни.

Видно, что для различных конструктивно-технологических базисов характер распределения различается. Для КМОП-микросхем (рис. 1, а) в подавляющем большинстве случаев пассивный режим при облучении менее жесткий, чем активный. У биполярных микросхем (рис. 1, б) однозначного влияния электрического режима на стойкость не наблюдается: у пяти микросхем стойкость в пассивном режиме выше, чем в активном, у других пяти – ниже.

Диаграмма ОВР для БиКМОП и гибридных микросхем (рис. 1, в) ожидаемо представляет собой нечто промежуточное между двумя предыдущими. Причем можно предположить, что эффекты в КМОП и биполярных элементах этих микросхем компенсируют, нейтрализуют друг друга, и это приводит к тому, что отношение доз отказа в пассивном и активном режимах для таких микросхем оказывается в среднем меньше, чем для КМОП или биполярных микросхем – диаграмма ОВР “сжимается”, значения концентрируются в диапазоне 0.5–2.

Таким образом, “холодный резерв” эффективен для КМОП-микросхем, а для биполярных, БиКМОП и гибридных микросхем может не только не приводить к положительному результату, а наоборот – резервные блоки могут выходить из строя раньше, чем рабочие.

## 3. ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБЛУЧЕНИЕМ В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ

Существует предположение о возможном сходстве радиационного поведения микросхем в пассивном режиме (по сравнению с активным) с радиационным поведением при низкой интенсивности (по сравнению со средней) [5]. В случае справедливости этого предположения открываются большие возможности по моделированию эффектов низкой интенсивности с помощью испытаний в пассивном режиме, что сэкономило бы много времени. В рамках нашего исследования мы не проводили облучения с низкой интенсивностью, поэтому нет непосредственных данных, позволяющих сравнить радиационное поведение и уровни дозовой стойкости микросхем, облученных при средней интенсивности в активном и пассивном режимах и при низкой интенсивности. Некоторые микросхемы, указанные в таблице, ранее облучались при низкой интенсивности, но эти данные использовать для сравнения не вполне корректно, так как облучались другие партии микросхем, да и условия исследований (температура окружающей среды во время облучения, состав контролируемых параметров) могли различаться.

Однако определенные возможности по сопоставлению результатов исследований в пассивном режиме и при низкой интенсивности все-таки есть. Для этого мы построили такие же диаграммы, как и на рис. 1, но уже по результатам сравнения уровней стойкости при низкой интенсивности (не выше 0.05 рад/с) и средней интенсивности (от 1 до 100 рад/с). Назовем их диаграммами относительного влияния интенсивности (ОВИ), по оси абсцисс отложены отношения доз отказа микросхем при низкой и средней интенсивностях ( $D_{\text{НИ}}/D_{\text{СИ}}$ ). Диаграммы построены по результатам исследований в ИЦ “ЭНПО СПЭЛС” более чем ста типов микросхем различных конструктивно-технологических базисов.

На рис. 2 показаны полученные диаграммы ОВИ (справа) вместе с ранее представленными диаграммами ОВР (слева) [6]. Видно, что характер распределения на диаграммах ОВР и ОВИ для одинаковых конструктивно-технологических базисов различается. Разумеется, надо учитывать не-

**Таблица 1.** Результаты облучения в активном и пассивном режимах 83 типов микросхем

Наименование	Доза отказа, крад (Si)	
	активный режим	пассивный режим
<b>КМОП</b>		
AD7243BRZ	14	>18
AD7801BRZ	7.3	>18
AD7805BRZ	7.3	>18
AD9513BCPZ	120	>900
ADG408BRZ	0.5	>110
ADG721BRMZ	6	>110
ADG774ABRQZ	8	28
ADM208ARZ	23	>200
ADM3312EARUZ	13	67
ADM708TARZ	15	>100
ADSP-2188NBST-320	77	>110
AT29LV256-20JI	3	40
AT45DB642D-TU	5	35
ATmega8515-16PU	22	9.4
DS1230AB-70IND+	11	30
EPC2LI20N	9.3	>100
EPCS64SI16N	28	>130
IR2213 PBF	52	53
LM2743MTC/NOPB	19	86
M27C256B-12F6	14	30
MX29LV040CQI-90G	17	80
MAX1617AMEE+	11	17
STK11C88-3N35I	12	84
TN80C196KC-20	1.4	20
HUF75645P3 PBF (МОП транзистор)	18	45
PE4312MLBA-Z (КМОП КНС)	6.2	>100
<b>Биполярные</b>		
AD797ARZ	5	>100
AD8052ARZ	>100	28
AD8131ARZ	>100	28
AD825ARZ	15	22
AD8348ARUZ	140	140

Таблица 1. Окончание

Наименование	Доза отказа, крад (Si)	
	активный режим	пассивный режим
CDC2351QDB	28	>360
LM2937IMP-5.0/NOPB	6.4	4.8
MIC49500-1.2WU	32	11
OP183GS	63	>110
OP213FSZ	5	17
<b>БиКМОП/гибридные</b>		
AD22105ARZ	25	50
ADF4108BCPZ	60	>150
ADF4360-7BCPZ	64	>120
REF195ESZ	3.6	7.1
SN74LVTH244ADW	33	>1300
SP232EEN-L	4.6	120
TEN12-2412	44	47
TEN20-2410	8	49
TEN25-2412	27	18.5
TEN60-2411	40	70
TEN5-2411	3.6	3.6
TEN8-2413	45	>100
THD12-2412	58	75
TMR-2411	38	4

большое количество исследованных типов микросхем, недостаточное для полноценного статистического анализа, но определенные выводы сделать, тем не менее, можно.

Единственное сходство между диаграммами ОВР и ОВИ для КМОП-микросхем (рис. 2, а) в том, что подавляющее большинство результатов сосредоточено в диапазоне “>1”, тогда как в диапазоне “<1” их практически нет. Видно, что как пассивный режим при облучении является менее жестким, чем активный, так и низкая интенсивность облучения менее критична, чем средняя. Но степень влияния интенсивности не столь велика, как степень влияния режима: в пассивном режиме уровни стойкости, как правило, в несколько раз (часто более чем на порядок) выше, чем в активном, тогда как уровни стойкости при низкой и средней интенсивностях различаются незначительно — обычно не более чем в 1.5–3 раза.

Для биполярных (рис. 2, б), БиКМОП и гибридных (рис. 2, в) микросхем диаграммы ОВР и ОВИ более похожи друг на друга [7]. Большая часть данных по биполярным микросхемам на обеих диаграммах сосредоточены в диапазоне 0.2–1. Это говорит о том, что в большинстве случаев пассивный режим при облучении является более жестким, чем активный, и низкая интенсивность облучения, как правило, более критична, чем средняя. Хотя имеется и значительная часть противоположных данных — с повышенной стойкостью в пассивном режиме и при низкой интенсивности. Для БиКМОП и гибридных микросхем значительная часть данных на обеих диаграммах располагаются в диапазоне 0.5–2.

Таким образом, можно говорить о том, что потенциально пассивный режим при облучении может быть использован для моделирования эффектов низкой интенсивности. Но сравнение

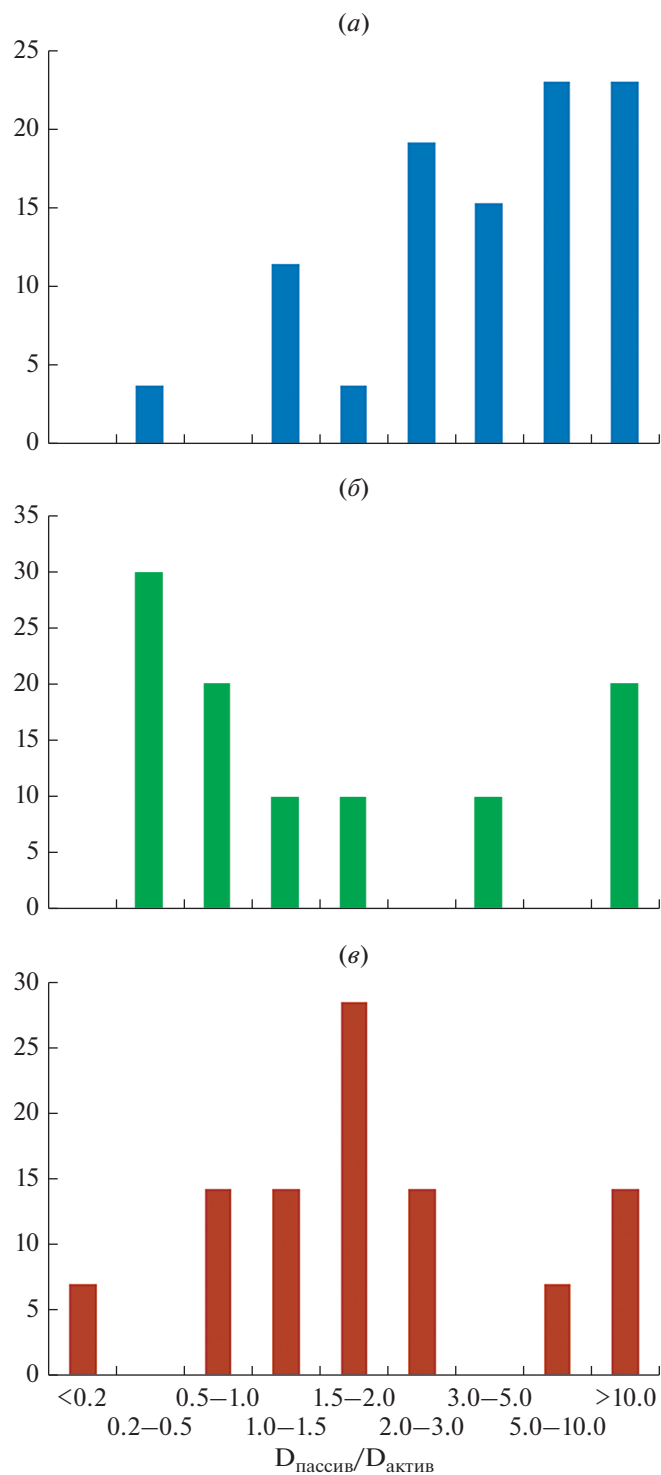
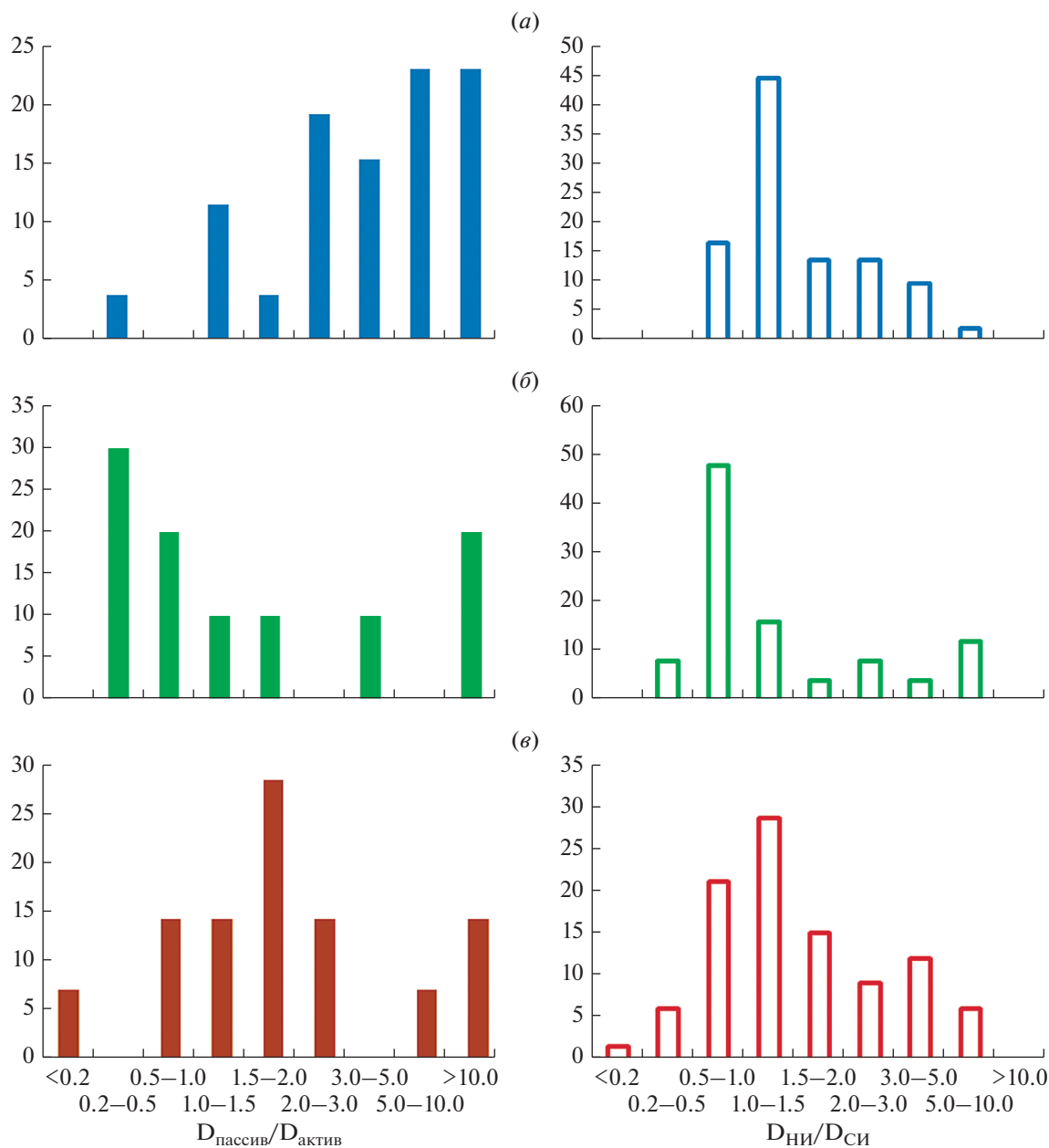


Рис. 1. Диаграммы относительного влияния режима: а – КМОП; б – биполярные; в – БиКМОП/гибридные.

диаграмм ОВИ и ОВР может дать лишь общее представление о сходствах или различиях влияния режима и интенсивности на уровни дозовой стойкости. Важно иметь не обобщенную информацию о радиационном поведении совокупности

микросхем, а о поведении каждого отдельного типа микросхем в разных условиях. Поэтому для достоверного подтверждения или опровержения гипотезы необходимо проведение специальных исследований по прямому сравнению радиационного



**Рис. 2.** Диаграммы относительного влияния режима (слева) и интенсивности (справа): *a* – КМОП; *б* – биполярные; *в* – БиКМОП/гибридные.

поведения микросхем, облученных (1) при средней интенсивности в активном режиме, (2) при средней интенсивности в пассивном режиме и (3) при низкой интенсивности в активном режиме. Такие исследования в ИЦ “ЭНПО СПЭЛС” уже начались.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния электрического режима (активный и пассивный) на дозовую радиационную

стойкость микросхем различных конструктивно-технологических базисов (КМОП, биполярные, БиКМОП, гибридные) и функциональных классов. По результатам исследований более чем 50 типов микросхем установлено, что характер влияния режима при облучении на дозовую стойкость существенно зависит от технологии. Если для КМОП-микросхем традиционное представление о том, что в пассивном режиме стойкость выше, оказывается верным, то стойкость биполярных, БиКМОП и гибридных микросхем в пассивном режиме может оказаться как выше, так и ниже,

чем в активном, что обязательно следует учитывать, при использовании технологии “холодного” резервирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы // М.: Радио и связь, 2004.
2. Belykov V.V., Pershenkov V.S., Zebrev G.I., Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K. Methods for the prediction of total-dose effects on modern integrated semiconductor devices in space: A review // Russian Microelectronics. 2003. V. 32. № 1. P. 25–38.
3. Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Kozlov A.A., Kol'tov D.O., Krinitskii A.V., Pechenkin A.A., Tararaksin A.S., Yanenko A.V. Single-event-effect prediction for ICs in a space environment // Russian Microelectronics. 2010. V. 39. № 2. P. 74–78.
4. Kalashnikov O.A., Nikiforov A.Y. TID behavior of complex multifunctional VLSI devices // Proc. 29th Int. Conf. on Microelectronics, MIEL 2014, Belgrade, Serbia, May 2014. P. 455–458.
5. Boychenko D.V., Kalashnikov O.A., Karakozov A.B., Nikiforov A.Y. Rational methodological approach to evaluation of dose resistance of CMOS microcircuits with respect to low intensity effects // Russian Microelectronics. 2015. V. 44. № 1. P. 1–7.
6. Калашников О.А. Расчетно-экспериментальное моделирование дозовых радиационных функциональных отказов цифровых СБИС // Безопасность информационных технологий. 2016. Т. 3. С. 34–39.
7. Барбашов В.М., Трушкин Н.С. Особенности моделирования информационных отказов цифровых КМОП СБИС при воздействии радиации // Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 23. № 3. С. 34–40.