

УДК 681.322.467

© Анашин В.С.  
Anashin V. S.**ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЭА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ВЫСОКИХ САС ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗОЙ****PROBLEMS OF SUPPLY OF REE OF HIGH TAE SPACE SYSTEMS  
WITH HIGHLY RELIABLE ELEMENT BASE**

**Аннотация.** Рассмотрены возможные подходы к обеспечению космических систем элементной базой требуемых характеристик за счет индивидуального их выбора из партий элементов "индустриально-го класса". Предложены способы отбора МОП ЭКБ гарантированного уровня дозовой стойкости и отбраковки потенциально ненадежной (аномально нестойкой) ЭКБ по степени изменения критериальных параметров, основанные на модификациях метода неразрушающего контроля индивидуальных характеристик дозовой стойкости МОП ЭКБ путем экстраполяции изменений критериальных параметров при низкоинтенсивном облучении с последующим низкотемпературным отжигом.

Предложен алгоритм проведения отбора и отбраковки МОП ЭКБ.

**Annotation.** The possible approach to supply of space systems with element base of required characteristics due to their individual selection from sets of "industrial" elements are considered. The ways of selection of MOS ECB of dose resistance guaranteed level and rejection of potentially unreliable (abnormally unresistant) ECB on a degree of criterion parameter changes are suggested. They are based on modifications of MOS ECB dose resistance individual characteristic undestroying control method by extrapolation of criterion parameter changes under low-intensive irradiation with subsequent low-temperature annealing.

The algorithm of MOS ECB selection and rejection carrying out is offered.

**Ключевые слова.** Срок активного существования, критериальный параметр, предельная накопленная доза, неразрушающее определение индивидуальных характеристик, низкоинтенсивное облучение, низкотемпературный отжиг.

**Key words.** Term of active existence, criterion parameter, the margin accumulated dose, undestroying determination of individual characteristics, low-intensive irradiation, low-temperature annealing.

Ионизирующие излучения космического пространства (ИИ КП) являются главенствующим дестабилизирующим фактором, ограничивающим срок активного существования (САС) космических аппаратов (КА), на их долю падает от 30 до 50% квалифицированных отказов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), хотя реально этот процент выше из-за того, что вызываемая деградация материалов является стимулятором других типов отказов. Обеспечение требуемых САС КА достигается применением электронной компонентной базы (ЭКБ) с гарантированно достаточным уровнем стойкости к ИИ КП. В случае использования ЭКБ высокой степени качества (QMLQ, QMLV и т.п.) гарантии предоставляются изготовителем ЭКБ. В ряде случаев использование ЭКБ

"космического" уровня качества из-за организационно-финансовых сложностей (разрешительная процедура, длительные сроки поставки, крайне высокая стоимость) представляется нецелесообразным и даже невозможным (ЭКБ "космической" приемки закрывает не весь возможный функциональный ряд). Тем самым разработчик бортовой аппаратуры вынужден принимать решение о возможности применения ЭКБ, уровень стойкости которой не только не гарантирован изготовителем, но и зачастую неизвестен. Вместе с тем отсутствие гарантированных данных изготовителя об уровне стойкости свидетельствует не о ее низком технологическом качестве, а о том, что требуемые дополнительные мероприятия (кстати, весьма дорогостоящие) не были проведены.

---

Анашин Василий Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – начальник научно-производственного комплекса, заместитель главного конструктора ФГУП НИИ космического приборостроения, тел. (495) 673-99-26.

Anashin Vasily Sergeevich – the candidate of technical sciences, the assistant to general director – the chief of research-and-production complex, the assistant to the main designer of FSUE SRI of Space Device Engineering, tel.(495)673-99-26.

В современных условиях для комплектации спутниковых систем используется ЭКБ различных классов приемки отечественного и зарубежного производства, как правило, высокой степени интеграции. Из приведенных на рис. 1 характеристик ЭКБ видно, что полное соответствие требованиям можно получить лишь для ЭКБ качества QML Q, V, которые отличаются крайне высокой ценой и низкой доступностью; ЭКБ отечественного производства приемки 5,9. Зарубежные промышленные ЭКБ после дополнительных отбраковочных испытаний (ДОИ), включая отбор элементов повышенной дозовой стойкости и отбраковку потенциально (аномально) ненадежных, также применимы в бортовой РЭА.

Накопленная доза за САС в конкретном месте применения элемента должна быть меньше (с учетом коэффициента запаса), чем его предельная накопленная доза (ПНД), гарантированная производителем или определенная по наземным испытаниям, при этом величина запаса зависит от способа и точности определения ПНД элемента [экспертно-расчетный, справочный, экспериментальный (по типу, по партии, индивидуальный и т.п.)] и от точности метода расчета локальных дозовых условий в месте применения элемента.

Как правило, индивидуальные характеристики (в том числе дозовая стойкость) внутри партии имеют некоторый разброс тем больший, чем мягче ограничения технологических процессов, использующихся в производстве, чем меньше число контролируемых параметров в процессе производства. Это дает возможность выбор из партии элементов с более высокими характери-

стиками, чем средние по партии. Ввиду серьезных стоимостных различий (10 – 1000 раз), а также ограничений по поставке современная зарубежная ЭКБ класса QML Q и V (и аналогичных), для которой характерен жесткий технологический контроль и, как следствие этого, малый разброс характеристик, практически недоступна для отечественного разработчика. Для отечественных (все классы исполнения, включая "5" и "9") и зарубежных ЭКБ (классы Industrial, Commercial и аналогичные) разброс характеристик внутри партии значителен и, следовательно, для использования в РЭА КА необходимо проведение процедур дополнительных отбраковочных испытаний и определение (подтверждение) стойкости к ИИ КП.

Ранее [1–5] был представлен метод неразрушающего определения (прогноза) индивидуальных характеристик дозовой стойкости КМОП ЭКБ путем экстраполяции изменений критериальных параметров при облучении с последующим отжигом, модификации которого могут служить основой для экономичного обеспечения РЭА КА высоких САС высоконадежными элементами за счет:

- неразрушающего определения индивидуальных характеристик дозовой стойкости;
- отбора ЭКБ гарантированного уровня дозовой стойкости;
- отбраковки потенциально ненадежной (аномальной) ЭКБ по степени изменения критериальных параметров.

Суть методов заключается в контроле критериального параметра (минимального напряжения питания,

ЭКБ	Технико-технологический уровень	Классы	Полного номенклатурного набора	Характеристики			Доступность			Возможность применения в БА	Возможность применения без ДОИ	Цель испытаний по стойкости к ИИ КП
				документированность	в т.ч. по стойкости	достоверность	административная	временная	финансовая			
Отечест.		Приемка 1										
		Приемка 5,9									*	
Заруб.		COTS (INDUSTRIAL)									**	
		QML Q, V (SPACE, MIL)										

▨ - высокий; ▩ - средний; ▧ - низкий; ■ отсутствует.

\*Подтверждение характеристик и отбор; \*\* Определение характеристик и отбор

Рис. 1 Обобщенные требования к ЭКБ КА

при котором сохраняется работоспособность МОП ЭКБ) в процессе низкоинтенсивного  $\gamma$  облучения в пределах «безопасной» дозы (по его изменению прогнозируется доза отказа) и низкотемпературного отжига для восстановления характеристик. В результате проводимых испытаний в соответствии с приведенным на рис. 2 алгоритмом любой  $i$  элемент характеризуется:

$D_n^i$  – прогнозным значением дозы отказа;

$\Pi_{\text{нн}}^i$  – значением критериального параметра в нормальных (начальных) условиях;

$\Pi_{\text{об } j}^i$  – значением критериального параметра в  $j$  точках при облучении;

$\Pi_{\text{от } k}^i$  – значением критериального параметра в  $k$  точках при отжиге.

Отбор элементов требуемой дозовой стойкости производится при выполнении неравенства:

$$D_n^i > K_3 D_{\text{треб}} \quad (1)$$

где  $D_{\text{треб}}$  – требуемая предельная накопленная доза;

$K_3 \geq 1$  – коэффициент запаса.

Коэффициент запаса определяется экспертно, зависит от требований к надежности отбора (вероятности отбора некондиционных элементов), учитывает погрешности измерений критериальных параметров и точность прогноза дозы отказа. Рекомендуемое значение равно 1.15.

Отбраковка элементов с аномальным поведением производится на основании анализа изменений кри-

териальных параметров в процессе облучения и отжига относительно «средней» величины, при выполнении неравенств:

$$\left| \Pi_{\text{об } j}^i - \Pi_{\text{об } j}^{\text{cp}} \right| \leq \Delta; \quad (2)$$

$$\left| \Pi_{\text{от } k}^i - \Pi_{\text{от } k}^{\text{cp}} \right| \leq \delta, \quad (3)$$

где  $\Pi_{\text{об } j}^{\text{cp}}$  и  $\Pi_{\text{от } k}^{\text{cp}}$  – «средние» значения критериальных параметров партии элементов, измеренные на  $j$ -м шаге облучения и  $k$ -м шаге отжига соответственно;

$\Pi_{\text{об } j}^i$  и  $\Pi_{\text{от } k}^i$  – значения критериальных параметров  $i$ -го элемента, измеренные на  $j$ -м шаге облучения и  $k$ -м шаге отжига соответственно;

$\Delta$  и  $\delta$  – допустимые отклонения от «среднего» значения по партии при облучении и отжиге соответственно.

Способы вычисления «среднего» значения могут быть достаточно разнообразными (среднеарифметическое, средне-геометрическое и т.п.), в том числе зависеть от результатов измерений на предыдущих шагах измерений; способы определения отклонений должны согласовываться с методом «выскакивающих измерений» [6]. Рекомендуется браковка изделий, отклонение характеристик которых превышает  $3\sigma$ .

Несмотря на то, что предлагаемый метод прогноза позволяет уточнять  $D_n^i$ , в случае частичного невосстановления начальных параметров после облучения и отжига, целесообразной является отбраковка изделий, имеющих значительное невосстановление

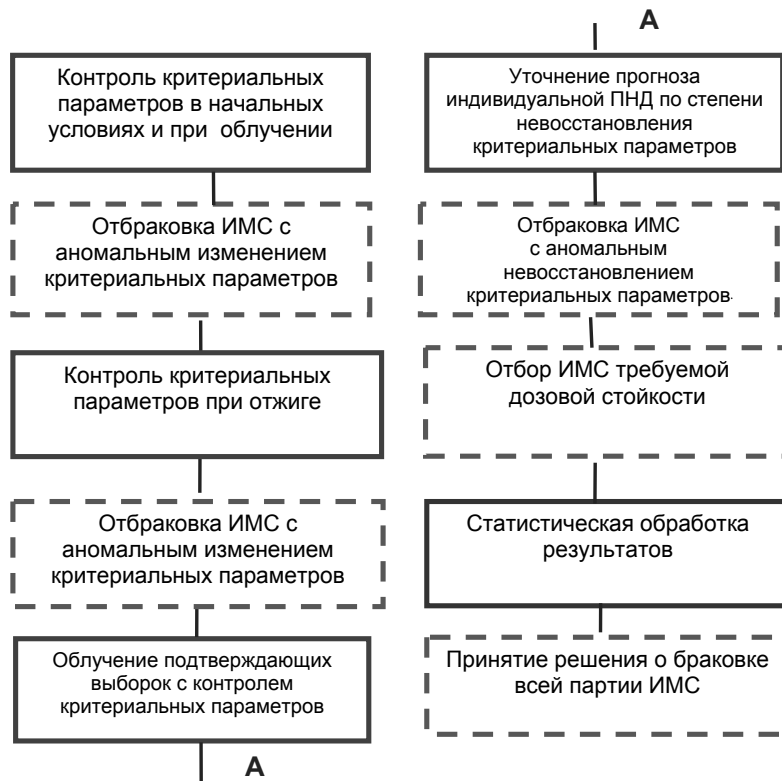


Рис. 2. Алгоритм проведения отбора и отбраковки МОП ЭКБ

$$\frac{\Pi_{\text{ф}}^i}{\Pi_{\text{ну}}^i} > K_{\text{вн}}, \quad (4)$$

где  $\Pi_{\text{ну}}^i$  – значение критериального параметра в начальных условиях;

$\Pi_{\text{ф}}^i$  – "финишное" значение критериального параметра после отжига,

$K_{\text{вн}}$  – коэффициент невосстановления, определяется экспертно, рекомендуемое значение 1,15.

Браковка всей партии испытываемой ЭКБ возможна по результатам статистического анализа дрейфа индивидуальных значений критериальных параметров в процессе облучения, отжига и т.п. при выполнении неравенства

$$\frac{n_a + n_{\text{нв}}}{N} \geq K, \quad (5)$$

где  $n_a$  – количество элементов с аномальным поведением во время облучения и отжига;

$n_{\text{нв}}$  – количество элементов, не восстановивших характеристики после отжига,

$N$  – общее количество элементов в испытываемой партии;

$K$  – заданный критериальный процент кондиционных элементов.

Коэффициент  $K$  определяется экспертно, рекомендуемое значение 0,15.

Большое число аномальных элементов, как правило, свидетельствует о неустановившемся технологическом процессе производства, применять такие партии ИМС в бортовой РЭА без оценки надежностных характеристик достаточно опасно, по возможности следует заме-

нить партию ИМС на новую и провести аналогичные испытания. При их неудовлетворительных результатах целесообразно ставить вопрос о смене поставщика (производителя).

Практическая значимость предложенных методов обеспечения комплектации РЭА КА ЭКБ с гарантированными характеристиками стойкости к ИИ КП в области дозовых эффектов состоит в следующем:

- в неразрушающем определении индивидуальной стойкости к ИИ КП МОП ЭКБ, позволяющем производить выбор образцов ЭКБ с заданным значением предельной накопленной дозы (ПНД) для установки их в РЭА КА с требуемым запасом;
- в выявлении и отбраковке "аномальных" образцов ЭКБ, позволяющих обеспечить необходимый уровень надежности РЭА КА и ее стойкости к ИИ КП;
- в расширении номенклатуры ЭКБ, потенциально применимой в РЭА КА в основном за счет отбора элементов COTS, имеющих к тому же и значительно более низкую стоимость (за счет отбора класса INDUSTRIAL).

Предложенные методы отбора и отбраковки прошли широкую апробацию в ФГУП НИИ КП для КМОП ЭКБ различных функциональных классов (от элементов простой логики до микроконтроллеров и заказных СБИС) и топологических норм (от 3,0 мкм до 0,35 мкм) и были использованы для обеспечения комплектации аппаратуры контроля ИИ КП для КА «ГЛОНАСС», КА «Спектр».

#### Литература:

1. В.С. Анашин "Развитие экспериментально-аналитического метода неразрушающего контроля стойкости КМОП ЭКБ к дозовым эффектам от воздействия ИИ КП". // Двойные технологии №4, 2008.
2. В.С. Анашин, В.Д. Попов "Неразрушающий экспериментально-аналитический метод определения индивидуальной дозовой радиационной стойкости КМОП БИС". // Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий. Материалы X международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. – М.: Радио и связь, 2005.
3. В.С. Анашин "Опыт ФГУП НИИ КП неразрушающего контроля радиационной стойкости КМОП БИС". // Элементная база космических систем. Материалы конференции. – М.: Московское общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2004.
4. В.С. Анашин, В.Д. Попов "Сплошной контроль КМОП ЭКБ по уровню радиационной стойкости методом экстраполяции малодозового изменения критериального параметра". Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2003. Научно-технический сборник. – М.: МИФИ, 2003.
5. В.С. Анашин, В.Д. Попов "Экспериментально-аналитический метод неразрушающего контроля характеристик радиационной стойкости КМОП БИС" // Двойные технологии № 3 (Секция "Инженерные проблемы стабильности и конверсии" Российской инженерной академии), 2005.
6. Зайдель А.Н. "Ошибки измерения физических величин" – Л.: Наука, 1974

Материал поступил в редакцию 23. 10. 2008г.