



Опыт оценки радиационной стойкости ЭКБ производства КНР и рекомендации по обеспечению стойкости РЭА по одиночному тиристорному эффекту

А.В. Яненко

И.О. Лоскутов, А.Б. Напалкова, А.А. Калашникова, Д.В. Бобровский,
М.М. Новикова, А.А. Печенкин, А.Н. Цирков,

Андрей Викторович Яненко, к.т.н.
технический директор АО «ЭНПО СПЭЛС», avyan@spels.ru
ведущий научный сотрудник ЦЭПЭ НИЯУ МИФИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

АО «ЭНПО СПЭЛС»

11-я Международная конференция «Достижения Китайской электронной промышленности в производстве высоконадежной ЭКБ для применения в космической промышленности», г. Москва, ИКИ РАН, 26 мая 2026 г.

Содержание

1. Порядок оценки радиационной стойкости
2. Статистика оценки радиационной стойкости ЭКБ производства КНР в АО «ЭНПО СПЭЛС»
3. Рекомендации по обеспечению стойкости РЭА по одиночному тиристорному эффекту

Порядок оценки радиационной стойкости

- **Подход к оценке радиационной стойкости (РС) ЭКБ из КНР никогда не имел особенностей и отличий от подхода к оценке РС ЭКБ ИП**
- **Пять рекомендуемых способов оценки стойкости (МР МЛКТ 3.21.1-2017, Климат-7)**
 - ✓ По анализу конструктивно-технологических особенностей (например):
 - ❖ КМОП стойкие по эффектам структурных повреждений до 4Ус (7.И1)
 - ❖ КНИ(С), биполярные* стойкие по одиночным тиристорным эффектам...
 - ✓ По поставляемой документации**: при наличии ТУ или пакета документов на партию с протоколами испытаний, содержащих исчерпывающую*** информацию:
 - ❖ Партия (wafer lot) прослеживается по всему пакету документов на поставку
 - ❖ Электрические, температурные и функциональные режимы

* Бывают единичные исключения, связанные с ошибками проектирования топологии

** Если оценка РС проводится по ОСТ 134-1034, изм.1, то Кз (запаса) не менее 1 для протоколов испытаний в пределах партии; 1,0 или 3,0 для ТУ.

*** «Непрозрачность» протоколов на партию ЭКБ из КНР ограничивает применение этого способа.

Порядок оценки радиационной стойкости

- **Пять рекомендуемых способов оценки стойкости (МР МЛКТ 3.21.1-2017, Климат-7)**
 - ✓ Расчетно-экспериментальная оценка по результатам испытаний идентичных ЭКБ*:
 - ❖ Консервативность оценки: 2,0 для ЭПД**, 2,0 для ЭСП** и 1,0 для ОРЭ**
 - ✓ Предварительная оценка по результатам испытаний функционально-технологических аналогов**
 - ❖ Консервативность оценки: 3,0 для ЭПД**, 5,0 для ЭСП** и 2,5 для ОРЭ**
 - ✓ Испытания образцов ЭКБ применяемой партии.

* Если оценка РС по ЭПД и ЭСП проводится по ОСТ 134-1034, изм.1, то данный способ не применяется для ЭКБ ИП.

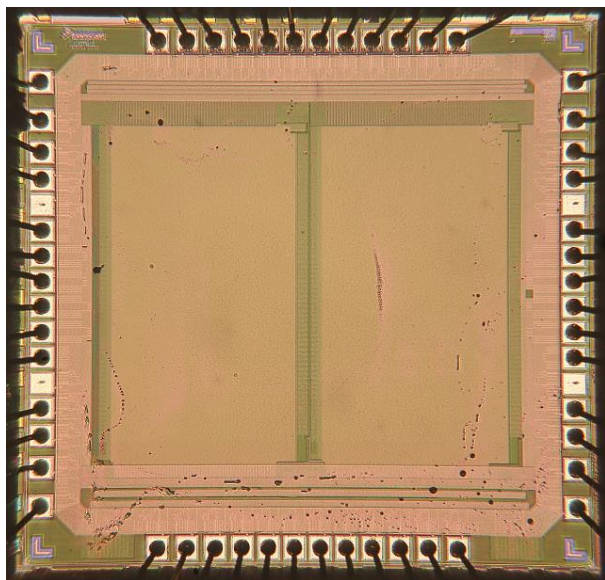
** ЭПД – эффекты поглощенной дозы, ЭСП – эффекты структурных повреждений, ОРЭ – одиночные радиационные эффекты.

Порядок оценки радиационной стойкости

- **Оценка стойкости по Климат-8**
 - ✓ Преимущественно испытания (расчетно-экспериментальная оценка)
 - ❖ Три новых ГОСТ РВ по методам испытаний (в обеспечение основополагающих ГОСТ ГКВС Климат-8 с требованиями и методами испытаний) вводятся в действие с июня 2026 года
 - ✓ Возможность проведения расчетно-аналитической оценки (бывшая РЭО) ограничена:
 - ❖ Критерии подтверждения идентичности более «жесткие», чем применяются сейчас, по сути ориентированы на российское производство и не могут быть применены к кристаллам импортного производства.
 - ❖ Методики проведения подробно не регламентированы в документах.

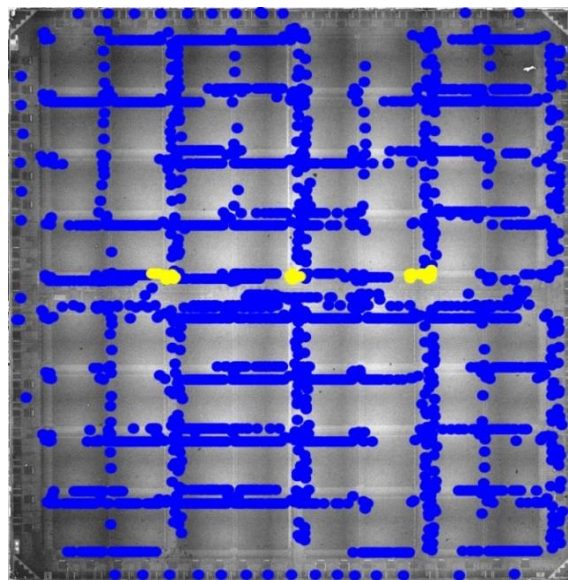
Хронология оценки РС микросхем MRAM ф.Orbita

Кристаллы MRAM памяти, которые «попадались» в MRAM ф. Orbita.



Freescale/2007/CONDOR/M35M
(128Kx8)

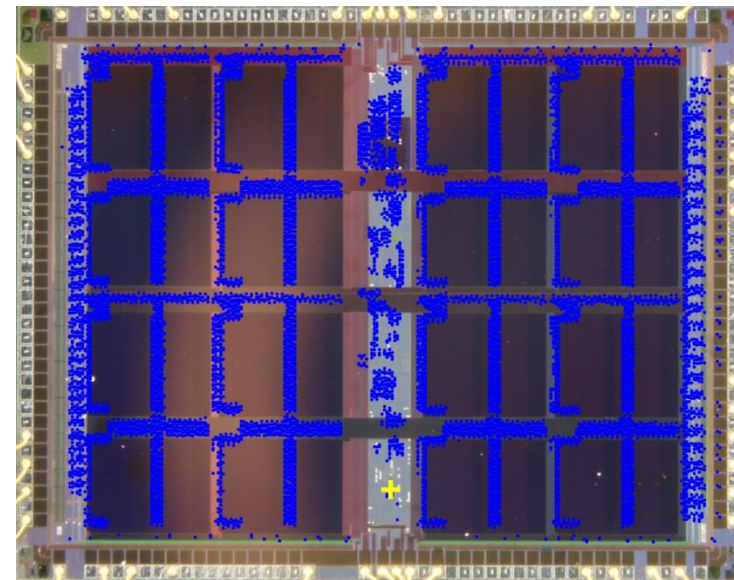
$L_{th}(SEL) > 60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$



EVERSPIN/2009/LYNX
(2M x 8)

$L_{th}(SEL) \approx 7 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$

При ТЭ может возникать
быстрый КО (<100 мс)



Freescale/2008/PANTHER 2ED/L72W
(4M x 8)

$L_{th}(SEL) \approx 6 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$

КО при выдержке 40 с в ТЭ ($I_{cc.org} = 2 \text{ A}$)

КО нет при выдержке 1 с ($I_{cc.org} = 2 \text{ A}$)

КО нет при $I_{cc.org} = 1 \text{ A}$.

Хронология оценки РС микросхем MRAM ф.Orbita

Период	freescale_2007_CONDOR	Код даты	Вид оценки РС	Примечание
III кв. 2022г	VDMR8M32RS68SS8V35	2050	ИСП(Д)	106 кед., метод 1 ОСТ 1034, 2 образца, интенсивность порядка 0,1 рад/с
III кв. 2023г	VDMR2M16RS54SS2V35	2235	РЭО(Д)	
III кв. 2023г	VDMR2M16RS54SS2V35	2235	РЭО(Ч)	По ранее испытанной 3DMR...
III кв. 2024г	VDMR2M16RS54SS2V35	2235	РЭО(Д)	
III кв. 2025г	VDMR8M32RS68SS8V35	2124	РЭО(Д)	
IV кв. 2022г	VDMR4M08RS44SS4V35	2050	РЭО(Д)	
IV кв. 2025г	VDMR8M32RS68SS8V35	2124	ИСП(Д)*	47 кед, метод 1 ОСТ 1034, 2 образца, интенсивность порядка 6,86 рад/с
IV кв. 2025г	VDMR8M32RS68SS8V35	2010	ИСП(Д)*	47 кед, метод 1 ОСТ 1034, 2 образца, интенсивность порядка 6,86 рад/с
IV кв. 2025г	VDMR2M16RS54SS2V35	2235	ИСП(Д)*	47 кед., Метод 1 ОСТ 1034, изм.1, 2 образца интенсивность порядка 6,34 рад/с

* Переход к практике испытаний каждой партии ЭКБ ИП на стойкость к воздействию ИИ КП по ЭПД

Хронология оценки РС микросхем MRAM ф.Orbita

Период	EVERSPIN_2009_LYNX	Код даты	Вид оценки РС	Примечание
I кв. 2023г	VDMR64M08R*54SS4V35	2109	ИСП(Ч)	15-кед. , 2 образца
IV кв. 2023г	VDMR64M08R*54SS4V35 (MR4A08BCYS35)	2109	ИСП(Чп)	Проверка схемы парирования
I кв. 2023г	VDMR64M08R*54SS4V35	2109	ИСП(Д)	37 кед., Метод 1 ОСТ 1034, 5 образцов
II кв. 2024г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	РЭО(Ч)	
II кв. 2024г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	РЭО(Д)	
III кв. 2024г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	РЭО(Ч)	
IV кв. 2024г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	ИСП(Д)	21 кед., Метод 1 ОСТ 1034, изм.1, 2 образца
IV кв. 2025г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	ИСП(Д)	21 кед., Метод 1 ОСТ 1034, изм.1, 2 образца
III кв. 2025г	VDMR64M08RS54SS4V35	2236	РЭО(Ч) *	

* Практика расчетно-экспериментальной оценки ЭКБ ИП на стойкость к воздействию ИИ КП по ОРЭ сохраняется (по требованиям в рамках Климат-7)

Хронология оценки РС микросхем MRAM ф.Orbita

Период	freescale_2008_PANTHER	Код даты	Вид оценки РС	Примечание
I кв. 2024г	VDMR20M40RS84SS5V35	2247	ИСП(Д)	15·кед. , 2 образца
II кв. 2024г	VDMR20M40RS84SS5V35	2247	РЭО(Д)	
II кв. 2024г	VDMR20M40RS84SS5V35	2247	ИСП(Ч)	
II кв. 2024г	VDMR20M40RS84SS5V35	2247	ИСП(Чс)*	Проверка сохранения работоспособности при ТЭ

* В практику оценки стойкости вводится отделение испытаний на сохранение работоспособности (с использованием лазерных испытательных установок с получением подробной информации о характеристиках тиристорных структур, которая необходима для проектирования схем защиты от катастрофического отказа при возникновении одиночного тиристорного эффекта.

Статистика оценки радиационной стойкости ЭКБ производства КНР в АО «ЭНПО СПЭЛС»

С сентября 2016 года выпущено более **300** протоколов оценки стойкости (испытаний, расчетно-экспериментальной оценки) для более **180** типов ЭКБ китайского производства (разработки)

Результаты оценки стойкости к воздействию ИИ КП по ЭПД

Год	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	Итого
Соответствие	2	1	4	9	2	4	20	8	10	15	7	82
Несоответствие							3	4	4	4		15
Определительные								5	6	2	1	14
РЭО соответствие			8	1	1	1		8	3	1		23
РЭО несоответствие									2*			2

* MRAM ф.Orbita, не хватило запаса по стойкости

Порядка 70% соответствует заданным требованиям стойкости к воздействию ИИ КП по ЭПД

Статистика оценки радиационной стойкости ЭКБ производства КНР в АО «ЭНПО СПЭЛС»

Результаты оценки стойкости к воздействию ИИ КП по ЭСП

Год	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	Итого
Соответствие				1			1		1	2		5

Результаты оценки стойкости к воздействию ИИ КП по ОРЭ

Год	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	Итого
Соответствие			4	8	1	2	10	8	10	8	8	59
Несоответствие *			1	1			2	1	6	4		15
Определительные			1	1			3	1	3	4	1	14
РЭО соответствие				6	2	2	5	3	2	1	3	24
РЭО несоответствие				4					4	3		11

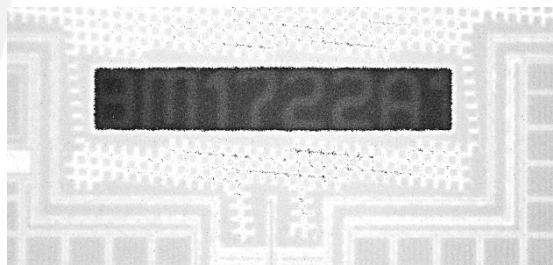
Порядка 67% соответствует заданным требованиям стойкости к воздействию ИИ КП по ОРЭ

Интересное наблюдение

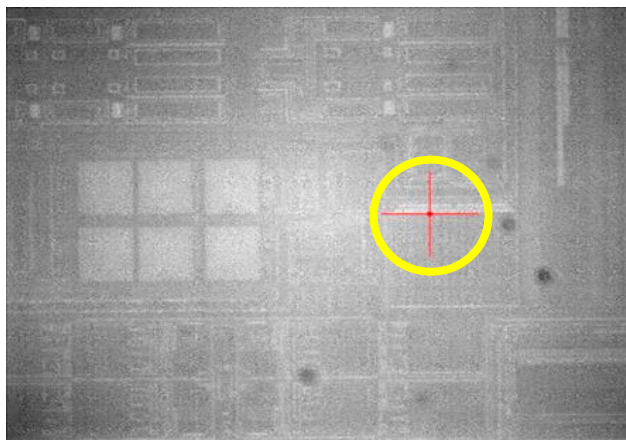
Схожие по топологии области в BMTI и Xilinx

Области, чувствительные к воздействию по одиночному ТЭ ($L_{th} > 60$ ед.лпэ)

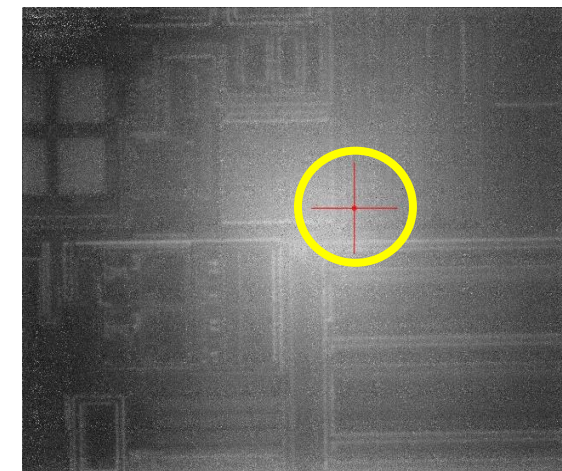
BQ5VSX95TBG1136



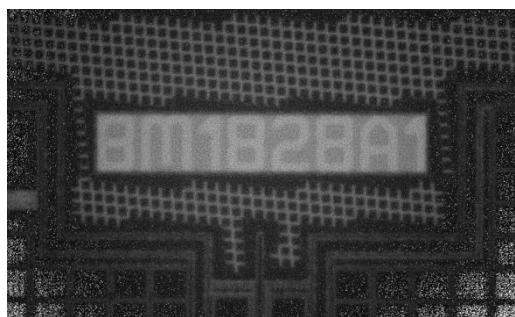
ИК фото маркировки
BM1722A1



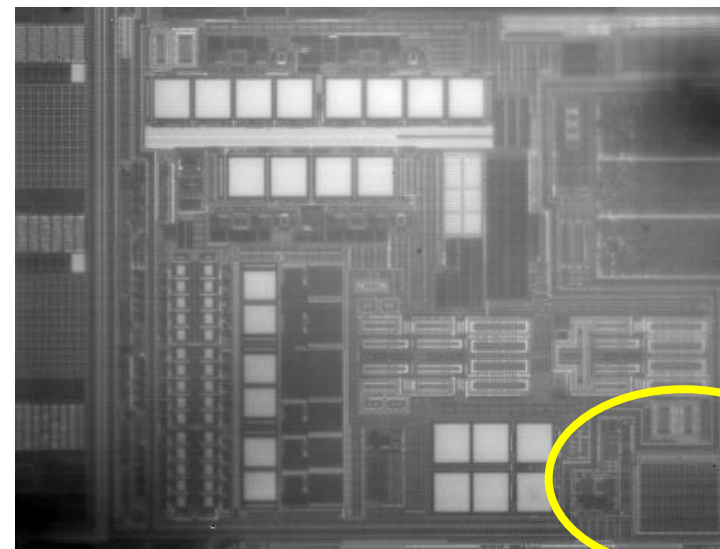
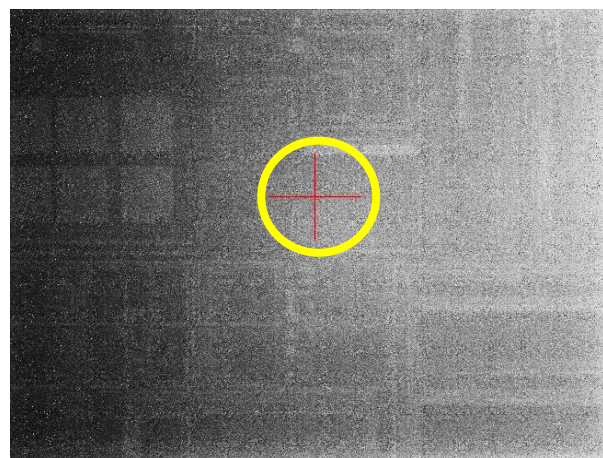
XC5VLX30-1FF324I



BQ5VSX240TBG1738



ИК фото маркировки
BM1828A1



Статистика оценки радиационной стойкости ЭКБ производства КНР в АО «ЭНПО СПЭЛС»

ЭКБ с низкой стойкостью к воздействию ТЗЧ по ОРЭ отказов

Объект	Функциональное назначение	Код производителя
BQR2V3000RH-CCGA717	ПЛИС типа FPGA	BMTI
B9122RH BMTI	16-разрядный ЦАП	BMTI
ZA517/B-100Mhz-3.3V CAST C	Кварцевый генератор	
JFM4VSX55RT	ПЛИС	
VDMR20M40RS84SS5V35	Память типа MRAM	ORBITA
MAX3485ESA	Приемопередатчик RS-485/RS-422	UMW
VDMR64M08R*54SS4V35	Память типа VDIC-MRAM	ORBITA
DS18B20U	Цифровой термометр	UMW
MR4A16BCMA35	Память типа MRAM	
VDNF64G08RS50MS8V25-III	Флэш-память типа NAND	ORBITA
GD25Q256EWI	Флэш-память	GigaDevice
BQ7K325TBG676	ПЛИС	BMTI

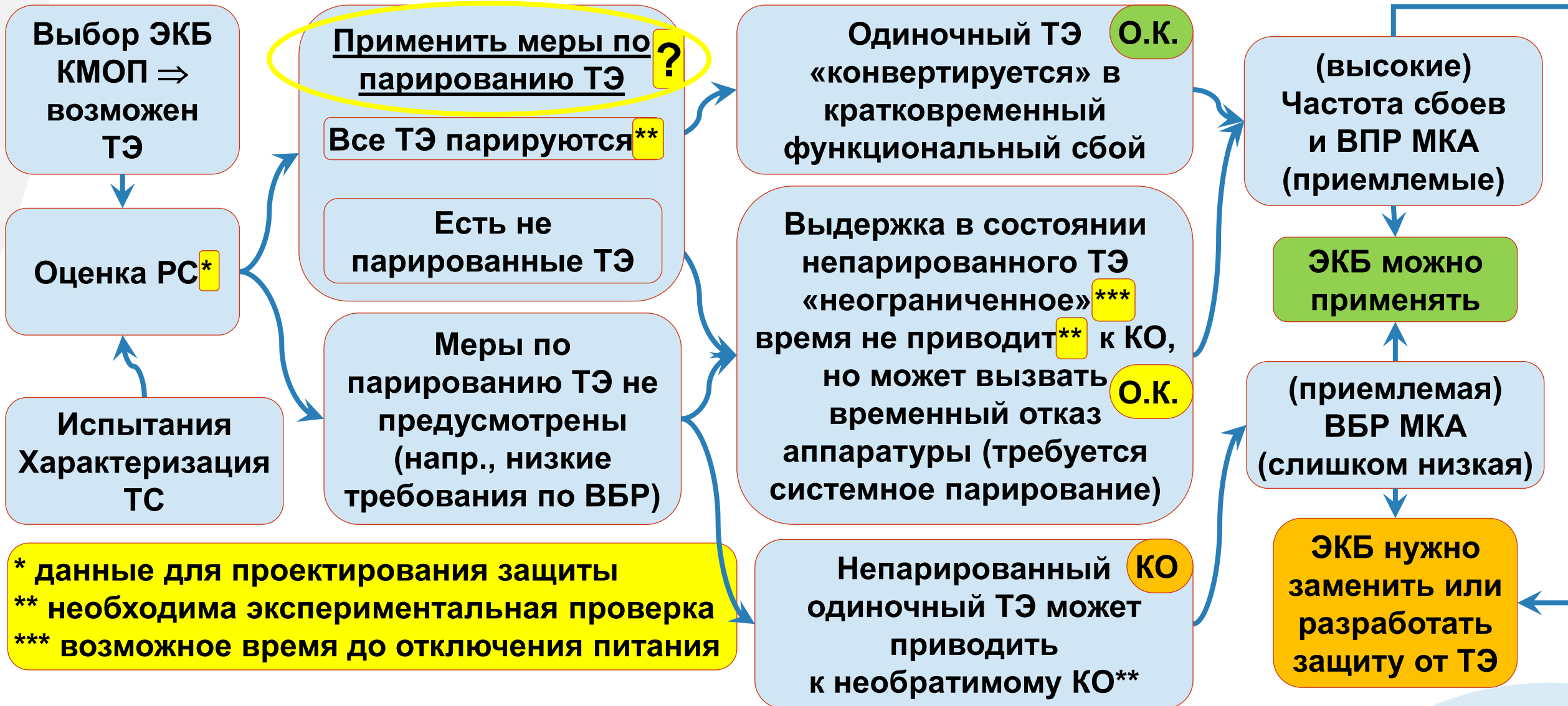
Низкая стойкость наблюдается в разных функциональных группах, что говорит о необходимости разработки **тотальной** защиты от тиристорного эффекта

Рекомендации по обеспечению стойкости РЭА по одиночному тиристорному эффекту

2025 год . Обеспечение и подтверждение устойчивости бортовой аппаратуры к одиночному тиристорному эффекту

1. Особенности одиночного ТЭ в КМОП ИС
2. Методы защиты от ТЭ
3. Обеспечение устойчивости к одиночному ТЭ. Информация для проектирования защиты от ТЭ.
4. Проверка эффективности защиты от ТЭ
5. Общий подход при обеспечении и подтверждении устойчивости к одиночному ТЭ

Общий подход при обеспечении и подтверждении устойчивости к одиночному ТЭ



Общий подход при обеспечении и подтверждении устойчивости к одиночному ТЭ*

- **Рассмотренный ранее подход подразумевает**
 - ✓ Испытания всех ЭРИ, в которых потенциально может возникнуть ТЭ, с целью:
 - ❖ Получение параметров чувствительности по одиночному ТЭ
 - ❖ Получение параметров ТС* (распределение напряжений удержания, токов в состоянии ТЭ) для проектирования систем защиты
 - ❖ Выдержка в состоянии ТЭ нужное время для выявления КО*
 - ✓ Испытания схем защиты от ТЭ с целью:
 - ❖ Выявление непарируемых ТЭ и выдержка в состоянии ТЭ нужное время для выявления КО*
 - ❖ Получение параметров чувствительности по непарируемым** ТЭ и возникающим КО.

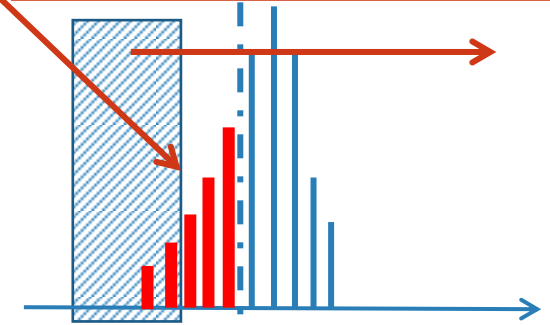
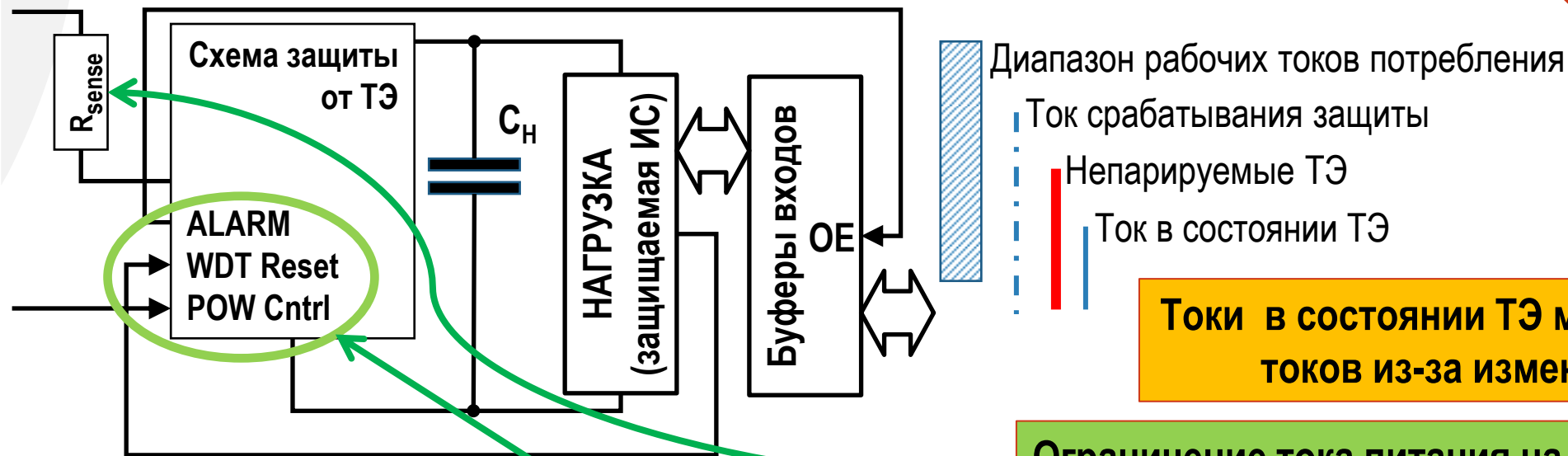
*Тиристорный эффект (ТЭ): включение паразитной тиристорной структуры (ТС), которое потенциально может приводить к катастрофическому отказу (КО) при длительной выдержке в состоянии ТЭ (может варьироваться от 10 мкс до 300 с для разных микросхем)

**Парирование ТЭ: процесс выявления состояния ТЭ и снижения напряжения питания до уровня ниже напряжения удержания для выключения ТС.

Наиболее популярный метод индивидуальной защиты микросхем от последствий ТЭ и сопутствующие проблемы

При фиксированном пороге срабатывания защиты существует возможность развития непарированных ТЭ

Режимные токи могут расти со временем от поглощенной дозы



Токи в состоянии ТЭ могут быть меньше рабочих токов из-за изменения режима работы

Ограничение тока питания на уровне срабатывания уменьшает риск КО вследствие ТЭ

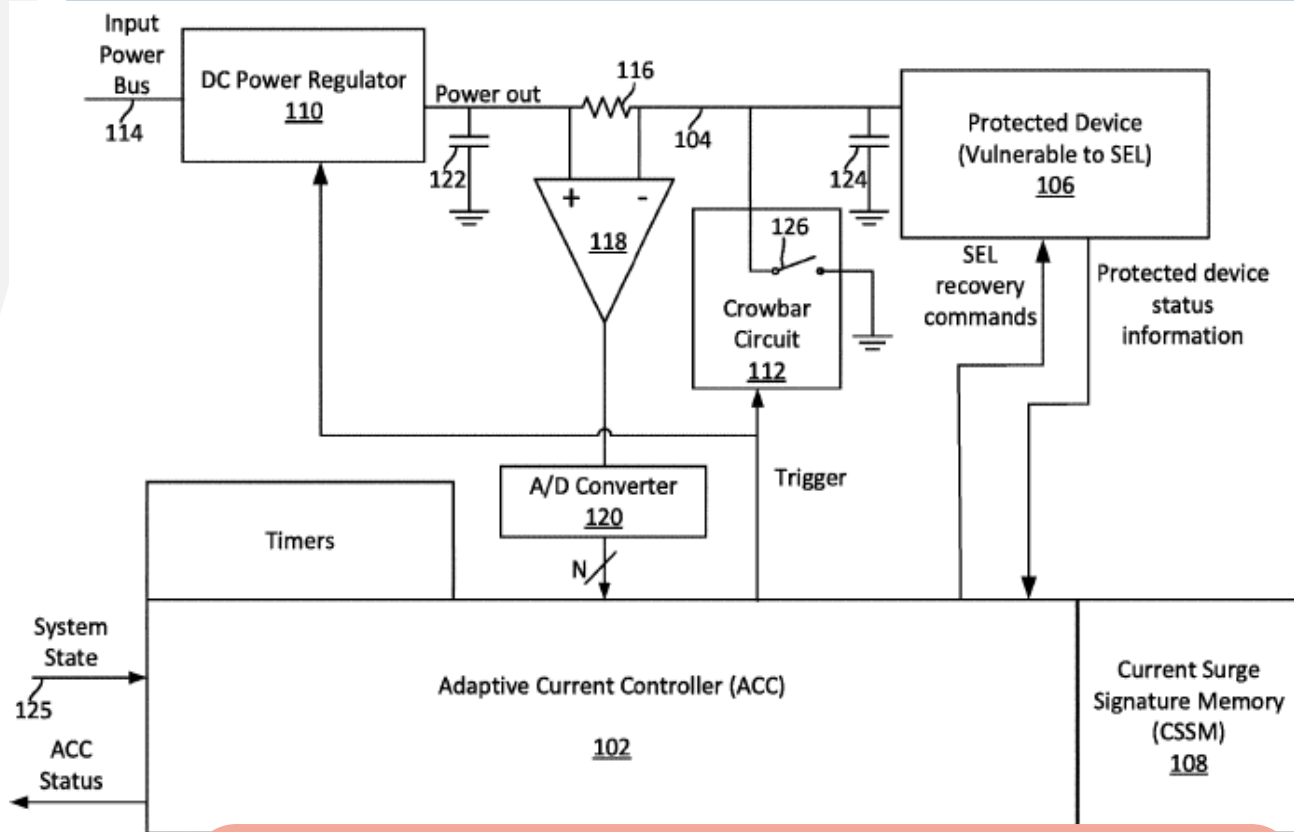
Возможное решение проблемы «непарированных» ТЭ – введение дополнительного фактора для срабатывания защиты – по контролю функционирования.

Двух-факторная защита срабатывает при потере функционирования при ТЭ (реализуется, например, на ИС 1469TK015 и 1469TK025)

Наиболее популярный метод индивидуальной защиты микросхем от последствий ТЭ и сопутствующие проблемы

Проблема	Проявление	Возможное решение
Распределение токов питания в состоянии ТЭ	Возможно некоторое (иногда сотни) количество непарированных ТЭ	Применение второго фактора (WDT – сторожевой таймер)
«Подпитка» ТЭ по входам	Напряжение питания не падает ниже напряжения удержания, ТЭ не срывается	Управляемые буферы по входам. Дополнительный ключ к «земле». Сеансный режим питания.
Ток нагрузки подмешивается к току питания (входному току)	Невозможно детектировать ТЭ	Нужна другая схема парирования с сенсором в цепи земли микросхемы
Ток срабатывание и диапазон токов питания «дрейфует» от поглощенной дозы	Возможно увеличение количества непарируемых ТЭ или переход в циклическое парирование	Применение интеллектуальных схем защиты с адаптируемым порогом регистрации ТЭ

Интеллектуальные системы с возможностью адаптации тока срабатывания защиты



- ❖ Дополнительная ЭКБ должна быть радиационно-стойкой.
- ❖ Усложняется схемотехника и программное обеспечение

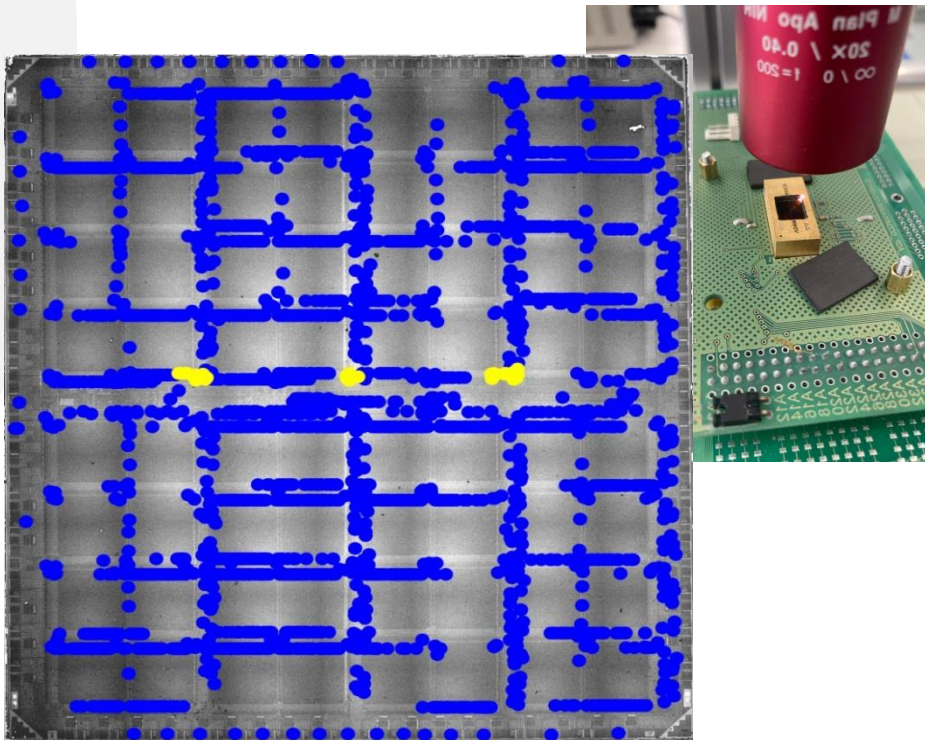
Снижение числа «непарированных» ТЭ возможно путем поддержания постоянного минимального «зазора» между рабочими токами и током срабатывания схемы защиты за счет «подстройки» этого значения.

Интеллектуальные схемы защиты строятся на базе МК, датчиков тока, АЦП, управляемых регуляторов напряжения и управляемых ключей (ЭКБ должна обладать высокой стойкостью).

Программное обеспечение определяет среднее значение тока питания (с учетом его изменений во времени), выявляет резкие отклонения, не характерные для нормальной работы, и парирует ТЭ.

При достаточно высоком быстродействии возможна реализация детектирования ТЭ по скорости изменения тока питания.

Сеансный режим – подсказка китайских испытателей



Результат локализации ТЭ с КО на лазерном испытательном стенде: три области размером не более 150 x 300 мкм.

Проверка эффективности схемы защиты от ТЭ для MRAM емкостью 64 Мбит (ф. Orbita).

- ❑ Пороговые ЛПЭ ТЭ (КО) $\approx 7 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ (Ионы)
- ❑ Сечение насыщения ТЭ $\leq 5\cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ (Ионы)
- ❑ Сечение насыщения КО $\leq 1\cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ (Ионы, $t_{\text{пар}} < 100 \text{ мс}$)

Применена комбинированная защита от ТЭ:

- ❖ парирование ТЭ по току 100 мА за 100 мкс
- ❖ сеансный режим 3 мс включено / 3 мс выключено

Возможность КО при ТЭ сохраняется

Сечение насыщения КО

$\leq 6,6\cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ (Лазер, $100 \text{ мкс} < t_{\text{пар}} < 3 \text{ мс}$)

Дополнительные испытания микросхемы на ускорителе ионов позволили снизить верхнюю консервативную оценку сечения насыщения КО.

❑ $\leq 5,7\cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ (Ионы, $100 \text{ мкс} < t_{\text{пар}} < 3 \text{ мс}$)

Снижаем затраты на исследования ТЭ без увеличения риска КО (дифференцированный подход к проектированию тотальной защиты)

Группа	Рекомендуемая защита	Вероятный «исход» ТЭ
Экстремально низкий ток потребления «<1мА»	Токоограничивающий резистор в цепь питания максимальной величины	Само-парирование ТЭ. Наибольшее быстродействие. Экспериментальная проверка не обязательна.
Низкий ток потребления «>1мА», «<10мА»	Токоограничивающий резистор в цепь питания максимальной величины Интеллектуальная система парирования (датчики тока, температуры) с групповой защитой	Высокая степень защиты от КО в случае ТЭ. Возможность отложенного принятия решения о выключении питания. Экспериментальная проверка не обязательна.
Средний ток потребления «> 10 мА», «<100мА»	Токоограничивающий резистор в цепь питания максимальной величины + серийные быстродействующие ИМС или интеллектуальные* системы индивидуальной защиты.	Защита от КО в случае ТЭ. Высокая скорость срабатывания. Двухфакторный контроль ТЭ и адаптивный ток срабатывания*. Рекомендуется экспериментальная проверка.
Высокий ток потребления «>100 мА»	Серийные быстродействующие ИМС или интеллектуальные системы индивидуальной защиты.	Обязательная экспериментальная проверка на выявление непарированных ТЭ и риски КО
Регуляторы напряжения «проходной ток нагрузки»	Индивидуально спроектированная защита с контролем тока по цепи «земли»	Обязательная экспериментальная проверка на выявление непарированных ТЭ и риски КО

Заключение. Выводы.

- ❑ Подходы к оценке радиационной стойкости ЭКБ производства Китая соответствует принятым подходам к оценке РС ЭКБ ИП
- ❑ Около 70% анализируемой ЭКБ соответствовали заданным требованиям по стойкости к воздействию ИИ КП по ЭПД и ОРЭ
- ❑ Низкая стойкость к воздействию ИИ КП по ОРЭ отказов (ТЭ, КО) наблюдается в различных функциональных группах.
- ❑ Для тотальной защиты ЭКБ от воздействия ИИ КП по ОРЭ отказов рационально применять дифференцированный подход при выборе метода защиты от катастрофического отказа при развитии одиночного ТЭ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !



Яненко Андрей Викторович

Кандидат технических наук

НИЯУ МИФИ - АО «ЭНПО СПЭЛС»

Консорциум «Доверенные и экстремальные электронные системы»

Контакты: avyan@spels.ru

Телефон:(495)984-67-44, доб.: 207

Факс.:(499)324-20-94

Мобильный:(916)228-97-13