

Взаимосвязь мероприятий по обеспечению и контролю радиационной стойкости ЭКБ на этапах разработки, производства и эксплуатации

Никифоров А.Ю., Телец В.А., Бойченко Д.В.,
Елесин В.В., Московская Ю.М., Уланова А.В.

ЦЭПЭ НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС»

План:

- Распределенный характер системы разработки, производства и испытаний современной ЭКБ. Категории РС
- Обеспечение РС до начала ОКР (задание ТТ и выбор исполнителей ОКР)
- Радиационно-ориентированное проектирование изделий
- Оценка соответствия изделия требованиям РС на этапах предъявления и сдачи-приемки ОКР: испытания (предварительные, квалификационные), расчетно-экспериментальные оценки
- Запись информации по РС в ТУ и ТД
- Комплекс мероприятий по гарантированию РС продукции в производстве: входной контроль материалов, контроль стабильности ТП, контроль партий пластин, типовые испытания
- Обеспечение и контроль РС ЭКБ в процессе эксплуатации в РЭА: модель эксплуатации и уточняющий расчет радиационной нагрузки, рациональный выбор и сертификация ЭКБ по РС

Распределенный характер системы разработки, производства и испытаний современной «умной» ЭКБ (микроэлектроники, ТСВЧ, оптоэлектроники, микросистемной техники,...):

- Проектирование в дизайн-центрах – ДЦ (задача – более 300)
- Изготовление кристаллов на (контрактных) производствах («кремниевых фабриках») – отечественных и/или зарубежных
- Конструктивная реализация ЭКБ в виде ЭМ, СнК и СвК (до нескольких тысяч выводов)
- Испытания (в т.ч. радиационные) в распределенных (*как географически так и по ведомственной принадлежности*) ИЦ
- Распределенный характер разработки, производства и испытаний ЭКБ не вполне учтен системой стандартизации (в основном – прошлого века)

Категории РС ЭКБ:



Категория РС 3 (предельная РС - 5Ус...6Ус)



Категория РС 1 (базовая РС - 1Ус...2Ус)



Категория РС 2 (повышенная РС - борт 3Ус...4Ус)



Категория РС 0 – требований РС нет

Мероприятия по обеспечению РС до начала ОКР (конкурса):

- **задание ТТ по РС** - на основе КГВС «Климат» и межведомственной типовой формы записи;
- **выбор головного исполнителя ОКР** (с учетом технико-экономического состояния и доверенной конструктивно-технологической платформы - КТП):
 - **разработчик (ДЦ)** – в т.ч. по результатам демонстрации его «радиационной квалификации»;
 - **изготовитель (производство, БТП)** – в т.ч. по результатам его «радиационной характеристики».

ТТ по РС в ТЗ на ОКР (по ГОЗ и межзаводской кооперации):

- Задание требований стойкости ЭКБ по ГОСТ РВ 20 39.414.2* (включая амплитудно-временные и спектральные характеристики) по типовым формам записи;
- п.10 ТТ «При разработке технического проекта ОКР должны быть выбраны библиотеки элементов, схемно-топологические и конструктивные решения для обеспечения требований по стойкости к специальным факторам в соответствии с положениями ОСТ 11 0999 (в том числе, на основе результатов радиационных исследований тестовых структур, макетных образцов функциональных блоков и полуфабрикатов микросхем). Результаты представляются в отчетной документации технического проекта (в технически обоснованных случаях допускается предоставлять результаты до завершения разработки рабочей КД и ТД в виде отдельного технического отчета-обоснования).»

Характеризованная по РС конструктивно-технологическая платформа проектирования и производства ЭКБ

РС1: демонстрация примеров успешной реализации функциональных аналогов создаваемых изделий с заданным уровнем РС силами заявленной кооперации разработчика (ДЦ) и производства (БТП)

Характеризованная по РС конструктивно-технологическая платформа проектирования и производства ЭКБ

РС2: дополнительно демонстрация наличия:

- средств радиационно-ориентированного проектирования (РОП): «rad-hard by design» (RHBD) - совокупности средств проектирования (design kit), библиотек, СФ-блоков и радиационно-ориентированных моделей элементов, средств верификации и идентификации радиационно-чувствительных параметров моделей, методической и экспериментальной базы;
- средств мониторинга и контроля стабильности технологии по РС: типовых оценочных схем (ТОС) характеристики ТП, параметров-мониторов (ПМ) и схем контроля технологии (СКТ) для статистического мониторинга и контроля ТП по РС

Мероприятия по обеспечению РС в ходе ОКР: **РС1**

При использовании характеризованной по РС КТП проектирования и производства **дополнительных мероприятий не требуется.**

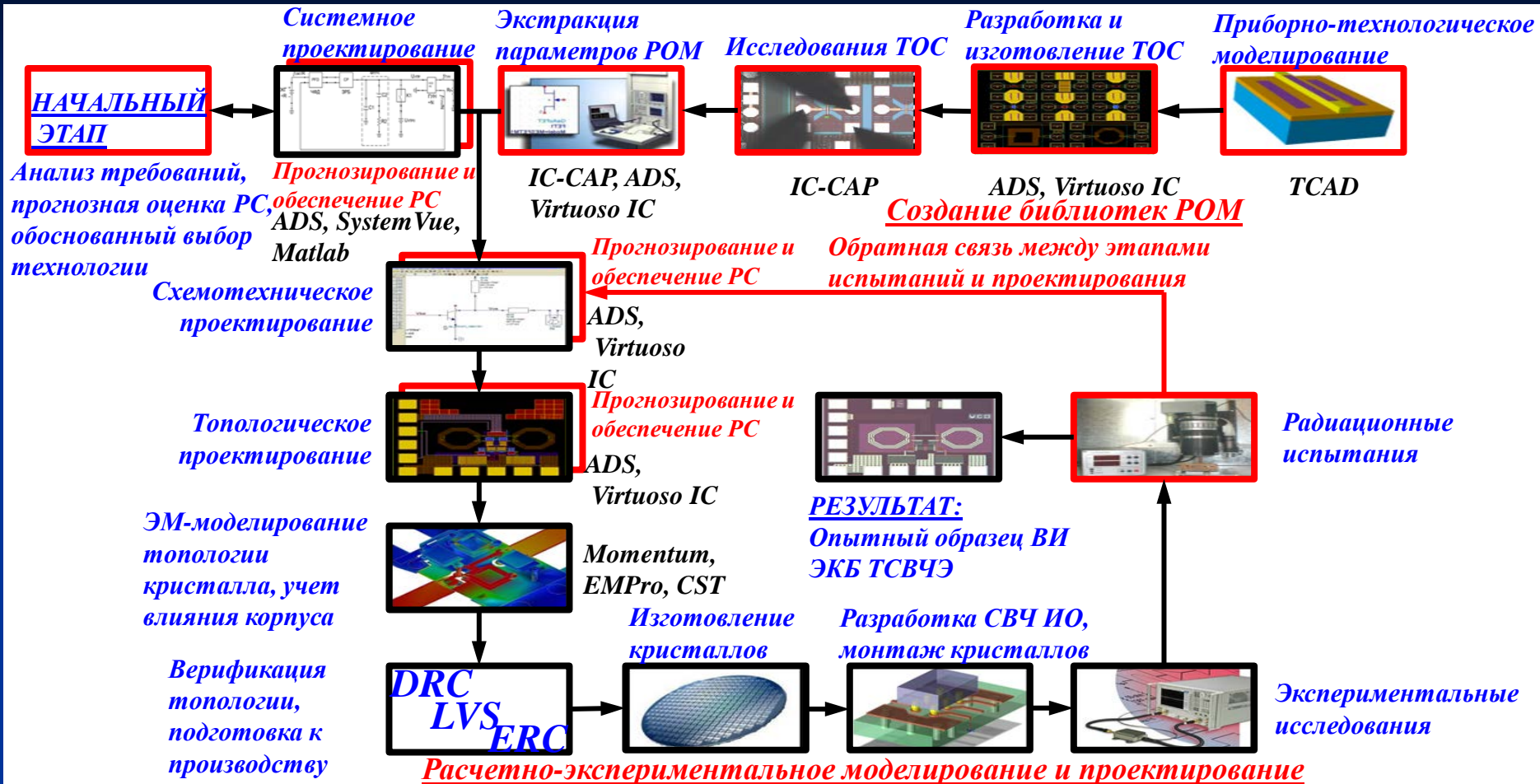
Риски несоответствия изделий требованиям РС:

- **несчастные случаи** (*ошибки проектирования - ТЭ, КО, утечки - при отсутствии запаса по РС*);
- **нестабильность техпроцесса по РС** (*наличие разброса по РС при отсутствии входного контроля материалов, статистического мониторинга и контроля ТП по РС*).

Мероприятия по обеспечению РС в ходе ОКР: РС2

- базовая технология радиационно-ориентированного проектирования (РОП) - «rad-hard by design» (RHBD) на основе знаний радиационных эффектов и механизмов отказов, РС библиотек, СФ-блоков и радиационно-ориентированных моделей элементов, топологических, схемотехнических и системных методов обеспечения РС – в т.ч. **данных характеристики БТП**
- радиационные исследования тестовых структур, полуфабрикатов и экспериментальных образцов изделий для отработки топологических и схемных решений изделий, выявления слабых мест и потенциальных ошибок проектирования, прогнозирования (гарантирования!) результатов последующих радиационных испытаний опытных образцов.

Базовый маршрут РОП для ТСВЧ ЭКБ



Локализация паразитных тиристорных структур по результатам лазерных испытаний интерфейсных ИС:

КМОП 0,6 мкм (XFAB)

Тип 1 –
стойкость по
 $7.I_6 = 0,03 \times 1U_c$

Тип 2 –
стойкость по
 $7.I_6 = 0,1 \times 1U_c$

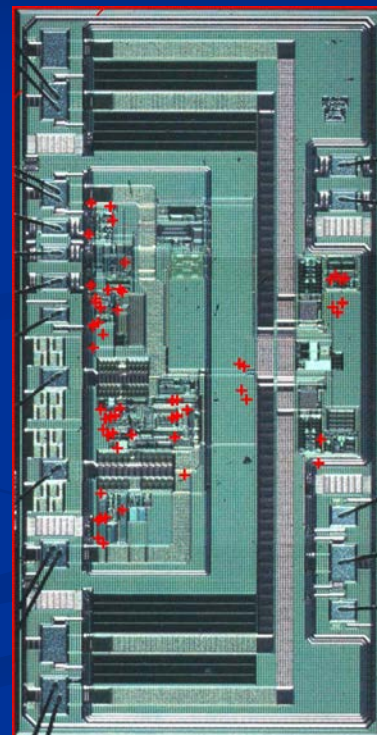
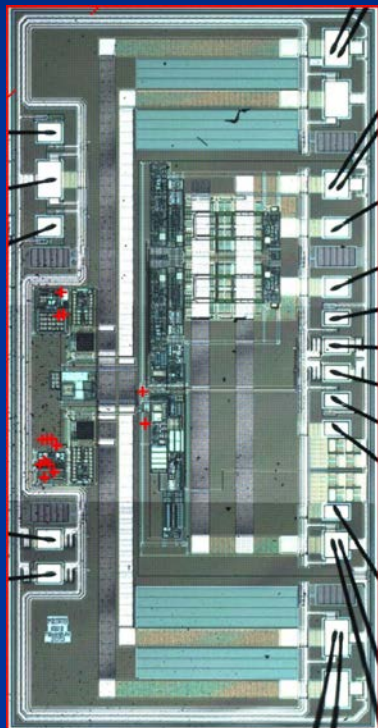
Локализация областей ТЭ с помощью
сфокусированного пикосекундного лазера



Устранение ошибок
проектирования и
новые испытания



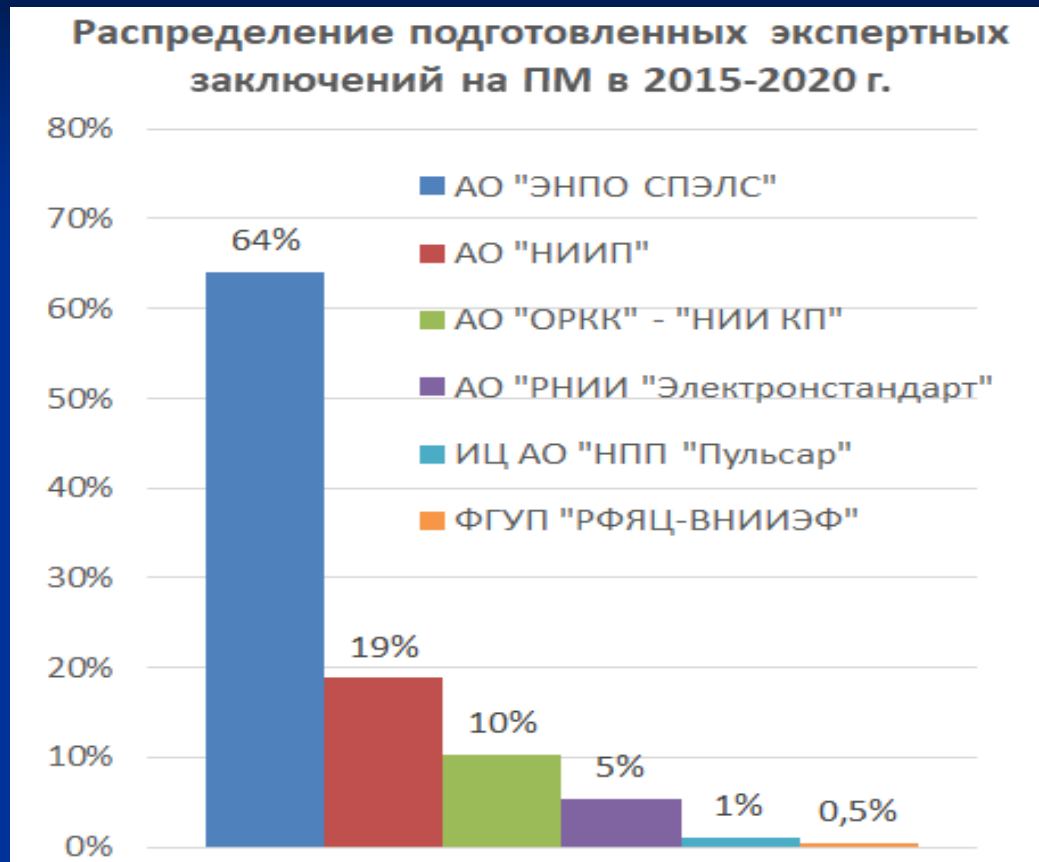
Доработанные варианты типов
1 и 2 – стойкость по $7.I_6 > 6U_c$!



Оценка соответствия РС ЭКБ требованиям ТЗ на ОКР

- Оценка РС ЭКБ по ГОСТ РВ 20.57.415, ОТУ на группы однородной продукции с рациональным использованием всего арсенала допустимых испытательных методов и установок;
- Рациональные объем и состав испытаний, использование расчетно-экспериментальных методов оценки по ГОСТ РВ 20.57.415 (в т.ч. на основе результатов проведенных исследований ТС, полуфабрикатов и аналогов):
 - в диапазонах характеристик радиационных воздействий, которые не обеспечиваются испытательными установками;
 - когда заданный уровень РС заведомо обеспечивается конструкцией изделий, примененными материалами и системными решениями;
 - при наличии «опорных» положительных результатов радиационных исследований и испытаний ТС и изделий-аналогов, которые могут быть обоснованно распространены на оцениваемое изделие (по соответствию информативным критериям эквивалентности).

ЦЭПЭ НИЯУ МИФИ – уполномоченная ЭО ДРЭП Минпромторга России



Пример некорректных дозовых испытаний

Неинформативные зависимости параметров-критериев годности от уровня воздействия (в соответствии с ТЗ на ОКР и ПМ).

Значение $7.C_4 \times 1Y_C$	Контролируемые параметры				
	$I_{DD},$ мА	$I_{DD(PD)},$ мкА	$E_L,$ МР	$E_{LD},$ МР	
	Норма ТЗ				
	не более 2	не более 1	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	н
0	1,06	0,51	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	н
0,056	1,06	0,51	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	
0,112	1,13	0,55	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	
0,168	1,28	0,61	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	
0,224	1,42	0,68	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	
0,281	1,76	0,76	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	
0,337	1,90	0,86	не менее -4 не более 4	не менее -1 не более 1	

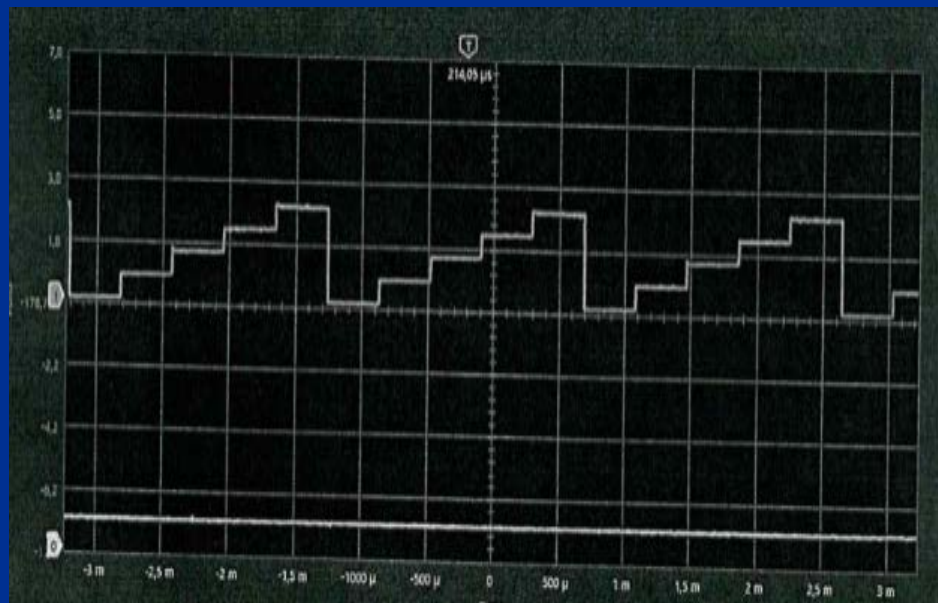
Пример некорректных испытаний на УБР и ВПР

УБР и ВПР микросхемы определяют по наиболее удобному сигналу для наблюдения осциллографом на расстоянии 20 м.

Развертка осциллографа устанавливается на уровне 1...2 мс/дел, 1...2 В/дел, при типовых временах от 100нс, и критериях по выходному напряжению от 100 мкВ.

Требования согласованной ПМ по критериям при определении УБР и ВПР проигнорированы.

УБР Выходной сигнал ЦАП.
Критерий 100мкВ – «СБОЯ НЕТ».

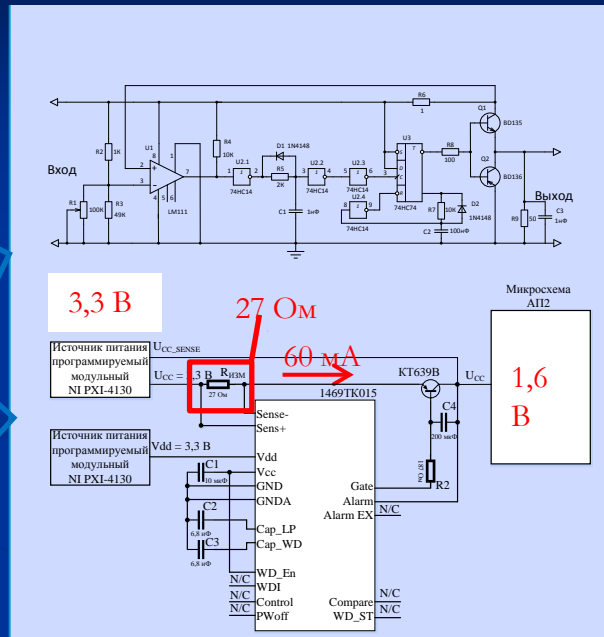


Пример некорректного парирования ТЭ при ТЗЧ

Пункт ТЗ «Исследования схемы парирования ТЭ в составе аппаратуры, проверка сохранения работоспособности после выдержки в ТЭ»

Предложенная схема парирования ТЭ:

- строится на компонентах ИП с неизвестной РС.
- не учитывает динамики токов потребления и блокирует работоспособность изделия со схемой парирования.
- не учитывает температурный диапазон и диапазон напряжений питания



НЕ РАБОТАЕТ

Порядок записи в ТУ требований и справочных данных по РС

- Типовая форма записи в ТУ требований и данных по РС (*в процессе разработки*): по аналогии записи в ТТ - в разделах требований, справочных данных и рекомендаций по применению.
- Фактические значения уровней РС, полученные в результате испытаний, указываются в форме подтвержденных запасов РС (относительно сквозного целого базового уровня) и справочных зависимостей.
- При записи уровней требований по результатам испытаний необходим (двух-трех кратный) запас по (при его наличии);
- Для РС2 необходимо в ТУ (ТД) указать ТОС для контроля партий пластин, режимы и условия контроля партий пластин по РС.

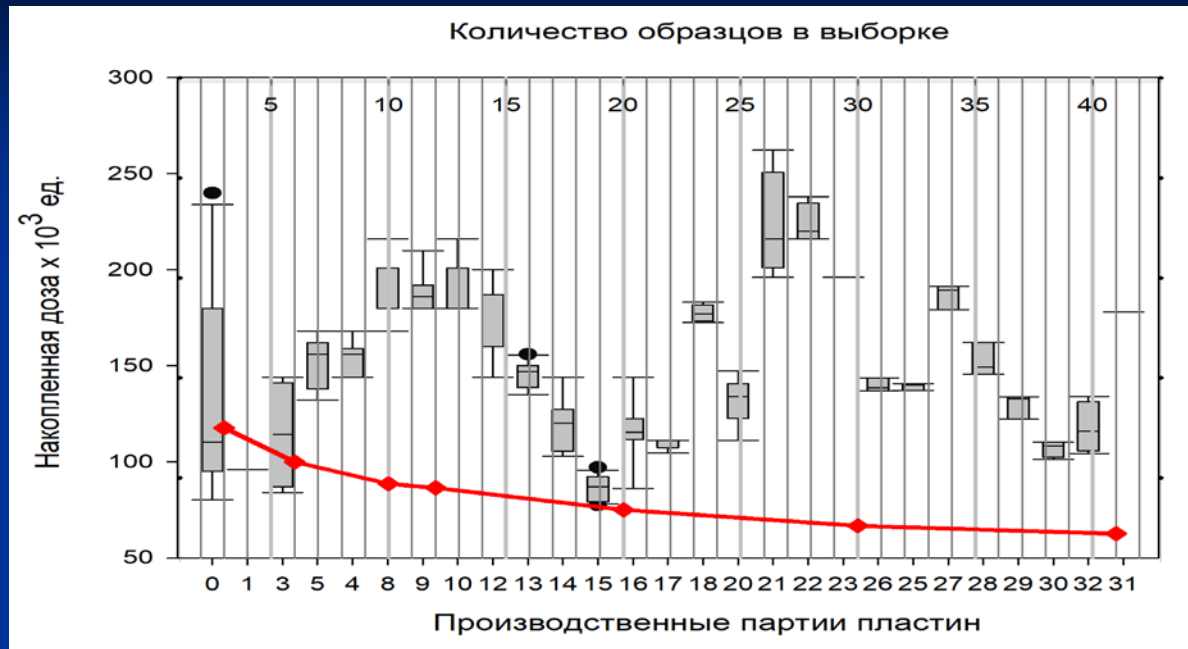
Обеспечение и контроль РС на этапе производства (РС2)

- Охарактеризованность базового техпроцесса по РС;
- Входной контроль параметров исходных материалов;
- Статистический мониторинг и контроль стабильности ТП по РС *(по ПМ и СКТ, определенным по результатам характеристики БТП)*;
- Контроль партий пластин по РС - сплошной или выборочный (периодический) - в зависимости от запасов и разбросов показателей РС по ТОС: ТС или готовым изделиям *(объект, схема включения, режимы работы, ПКГ - выбирают в ходе ОКР и указывают в ТУ/ТД)*;
- Типовые испытания на РС - при внесении радиационно-чувствительных изменений (если в изменение БТП – перехарактеризация).

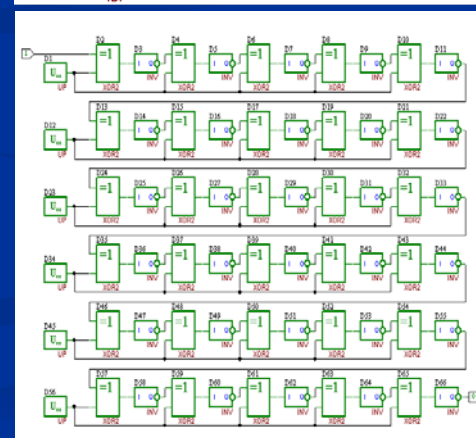
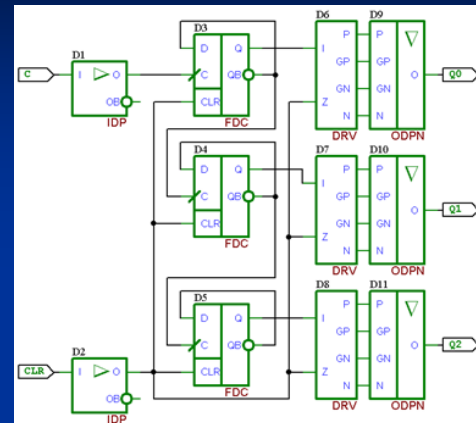
Технологический контроль партий пластин (PC2)



Контроль партий пластин КМОП БМК (ТОС) в производстве

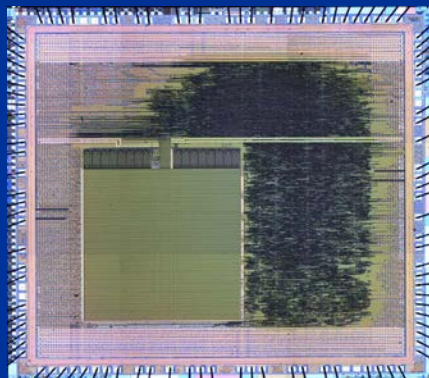


- Выбор ТОС и методики: с этапа ОКР!
- Коррекция коэффициента увеличения дозовой нагрузки каждой ПП на основе статистических критериев оценивания

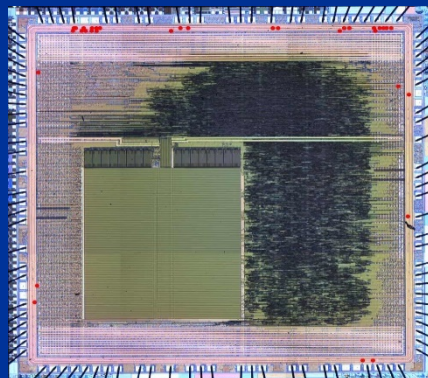


Типовые испытания на РС при радиационно-чувствительных коррекциях ТП*, конструкции, схемотехнике и/или топологии изделия

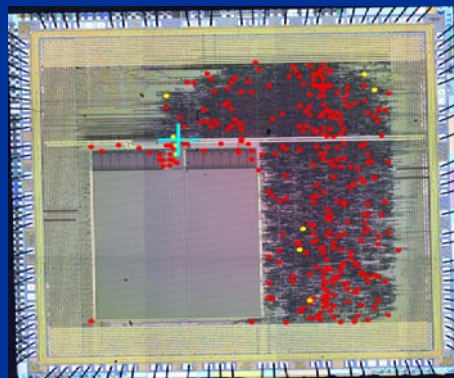
Интерфейсный контроллер, технология КНИ 0,5 мкм, фабрика 1Х1



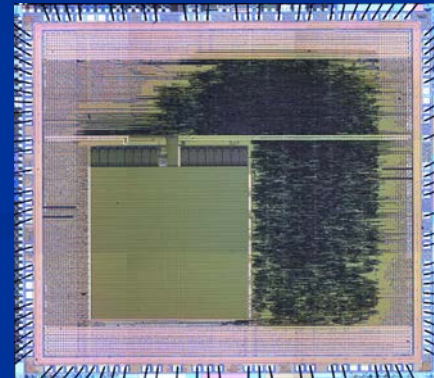
ТЭ – 60 МэВ см²/мг
Доза: 200 000 ед.



ТЭ – 1 МэВ см²/мг
Доза: 500 000 ед.



ТЭ – 6 МэВ см²/мг
Доза: 450 000 ед.



ТЭ – 60 МэВ см²/мг
Доза: 1 000 000 ед.



Модификация топологии
сбой техпроцесса



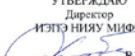
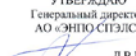


Модификация топологии
настройка техпроцесса



Настройка техпроцесса

Обеспечение и контроль РС ЭКБ на этапе эксплуатации


- анализ и уточнение (расчет) модели эксплуатации ЭКБ в РЭА и влияние защиты;
- выбор и анализ критичной номенклатуры ЭКБ для сертификационных испытаний;
- идентификация, входной контроль и сертификационные испытания закупочных партий ЭКБ на соответствие модели эксплуатации в РЭА

УТВЕРЖДАЮ Директор ИЭНЭ НИЯУ МИФИ  В.А.Телец « 01 » 03 2017 г.	УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор АО «ЭНПО СПЭЛС»  Д.В.Бойченко « 01 » 03 2017 г.
СОГЛАСОВАНО Заместитель директора ФГУП «МНИИРИП»  А.В.Кузьмин « 02 » 03 2017 г.	СОГЛАСОВАНО Начальник филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобрнауки России  И.А.Соловёв « » 2017 г.

МР МЛКТ 3.21.1-2017

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ В ПРОЦЕССЕ
КОМПЛЕКТОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

СОГЛАСОВАНО
Заместитель начальника
5494 ВП МО РФ

А.Е.Ханпов
« 02 » 03 2017 г.

Москва – 2017 г.

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Митишинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов»

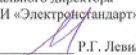

ПОЛОЖЕНИЕ

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Состав и порядок проведения сертификационных
испытаний

РЭК 05.002/4/1 – 2015

2015 год

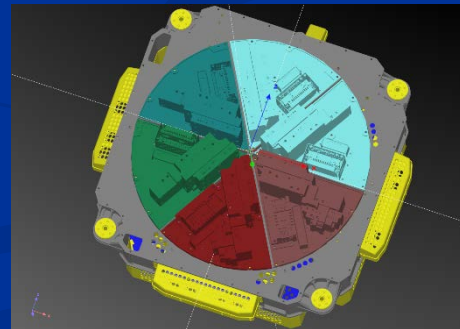
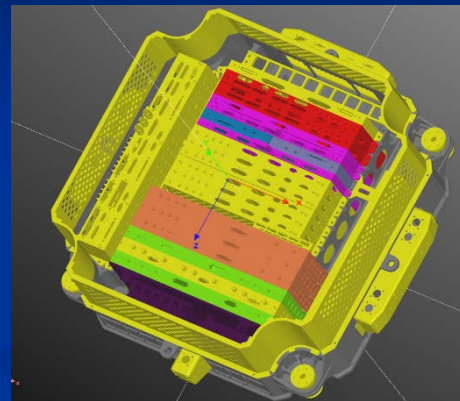
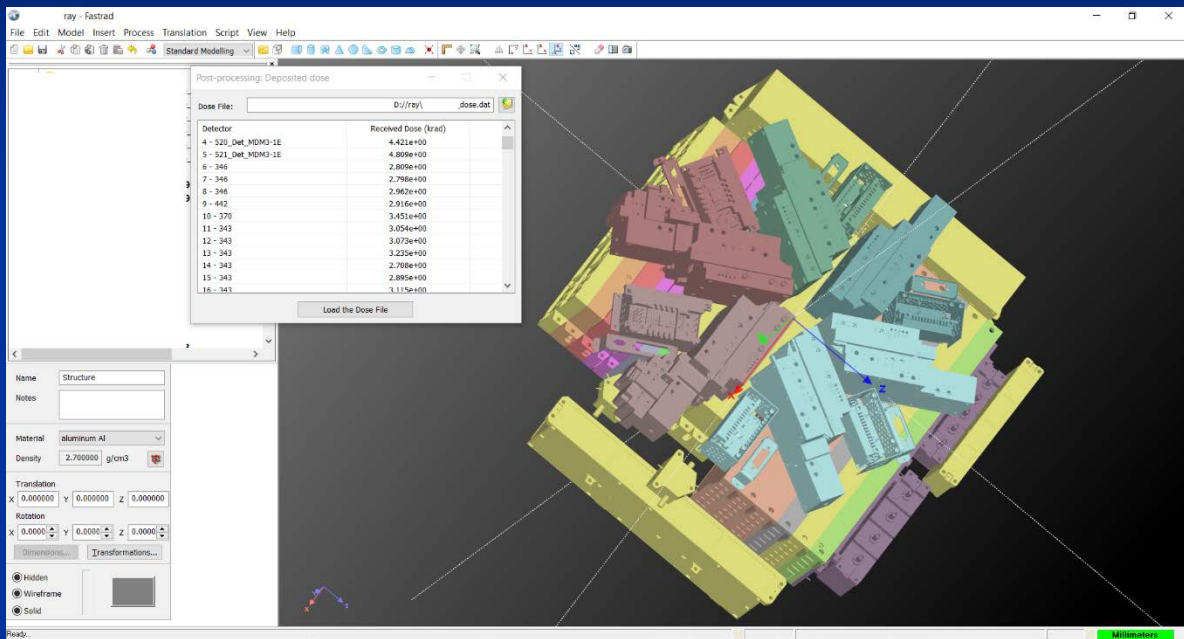
СОГЛАСОВАНО Первый заместитель генерального директора АО «РНИИ «Электронистандарт»  Р.Г. Левский « » 20 г.	СОГЛАСОВАНО Директор ИЭНЭ НИЯУ МИФИ  В.А. Телец « » 20 г.	УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор АО «ЭНПО СПЭЛС»  Д.В. Бойченко « » 20 г.
СОГЛАСОВАНО от разработчика (изготовителя) образца ВВСТ или его составной части « » 20 г.	СОГЛАСОВАНО ¹⁾ от заказчика СИ « » 20 г.	

ТИПОВАЯ ОБЩАЯ ПРОГРАММА-МЕТОДИКА

сертификационных испытаний и оценки стойкости электронной компонентной базы
инострannого производства, предназначенных для комплектования « »,
(наименование образца ВВСТ)
на воздействие специальных факторов

ЖКНЮ.ИЦ1800.01.0001-ОМИ

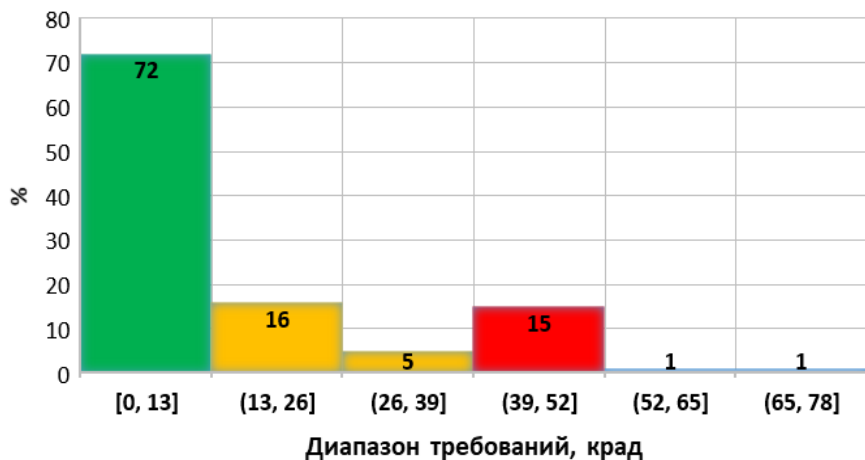
Уточняющий (относительно модели эксплуатации) расчет дозовой нагрузки на ЭКБ в аппаратуре



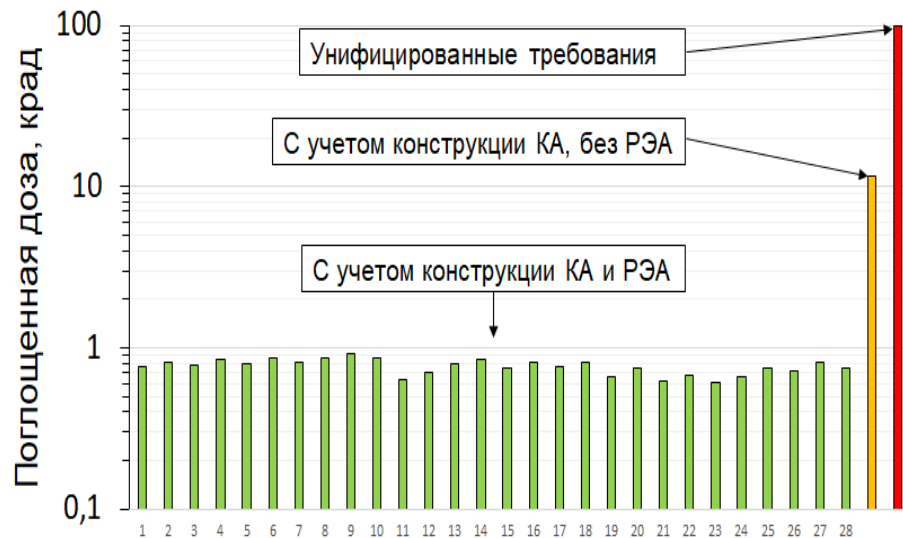
Расчет локальных дозовых нагрузок для БРЭА,
содержащей более 1000 активной ЭКБ

Реальная дозовая нагрузка на ЭКБ в аппаратуре может быть ниже указанной в модели эксплуатации

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В БРЭА (БОЛЕЕ 100 ТИПОВ БРЭА ЗА 20 ЛЕТ ПО ДАННЫМ АО "ЭНПО СПЭЛС")

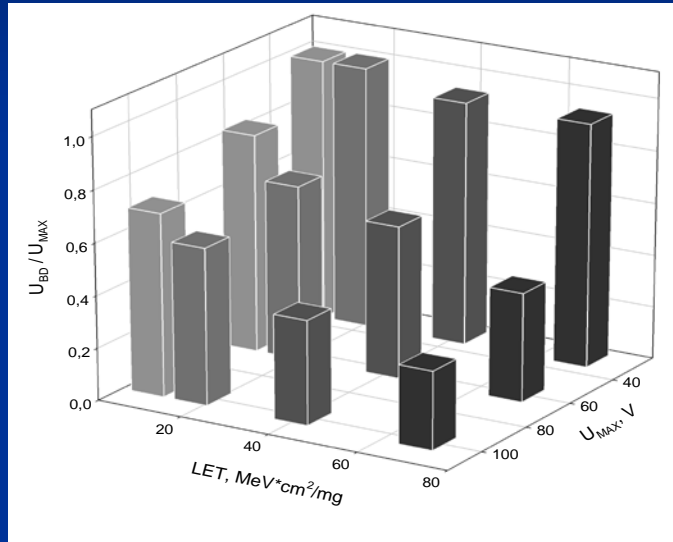


Распределение поглощенных доз в местах монтажа ЭКБ в РЭА с учетом трехмерной конструкции РЭА и КА



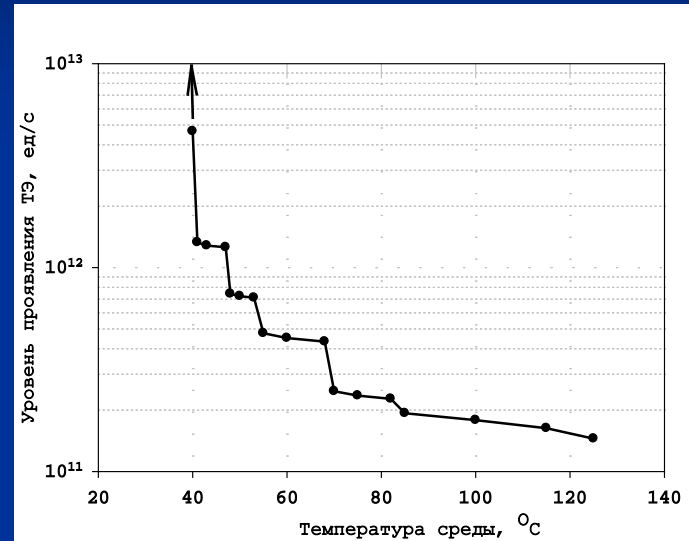
Влияние режимов и условий работы ЭКБ на РС при испытаниях в ОКР и эксплуатации в аппаратуре

МОП транзисторы (trench-gate):



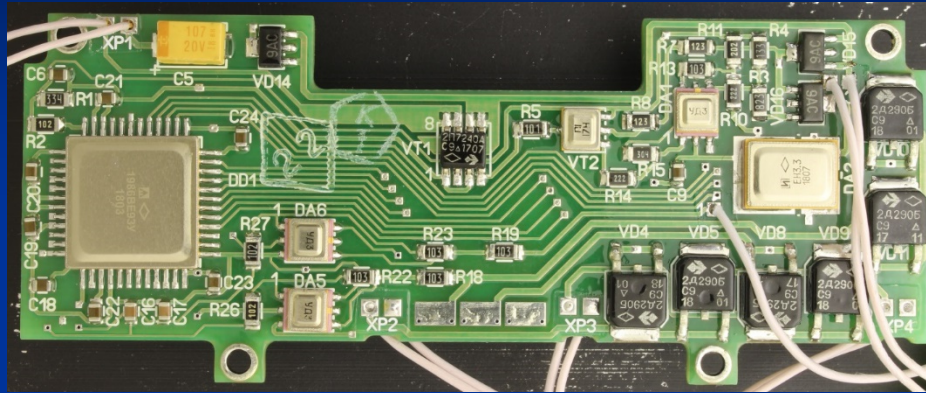
Требуемая стойкость к воздействию ТЗЧ обеспечивается снижением рабочего напряжения сток-исток до уровня около 0,3 от максимального значения.

Датчик температуры:



Требуемая стойкость к воздействию мощности дозы по критерию тиристорного эффекта обеспечивается при снижении рабочей температуры до +40С.

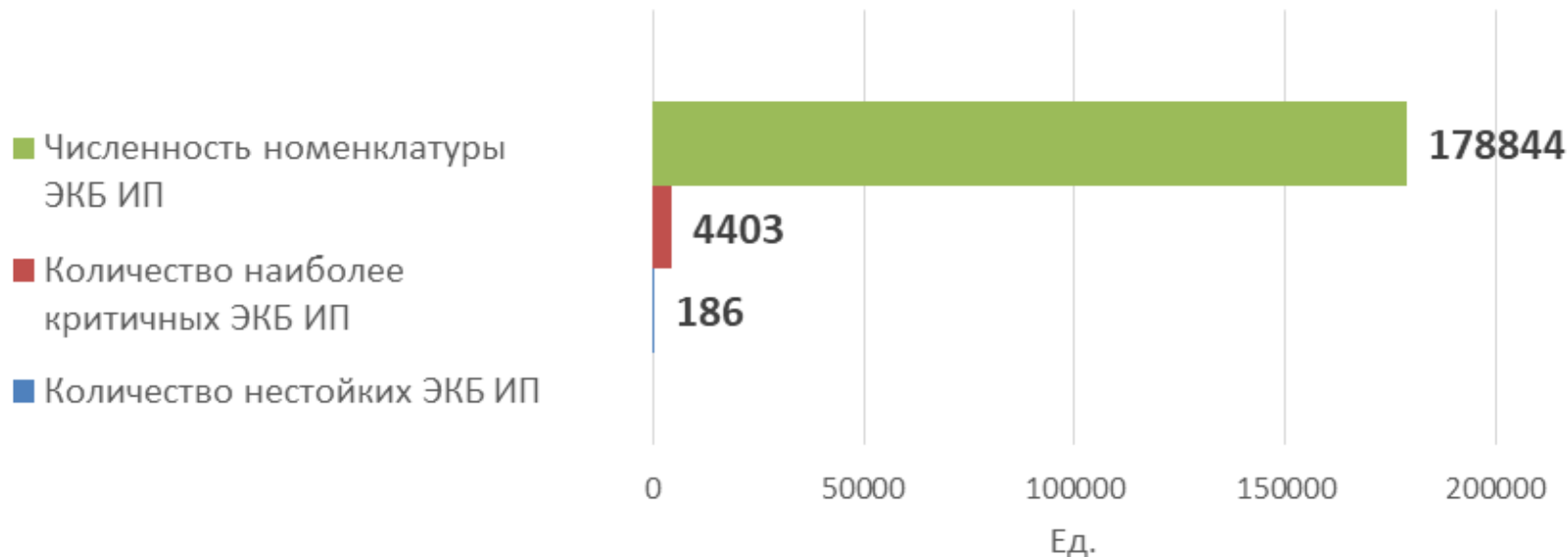
Пример влияния особенностей применения: отказ автомата на уровне 7.И₆ 0,04*1Ус при стойкости всех комплектующих по ТУ 2Ус



Причина: отказ микроконтроллера 1986BE93У, который запитан от линейного стабилизатора 1325ЕН3.3У: при уровне $7.I_6 0,04 \cdot 1 \text{ Ус}$ происходит кратковременный ($< 1 \text{ мс}$) сбой выходного напряжения стабилизатора до уровня питания (допускается ТУ), который приводит к отказу микроконтроллера. По рекомендации ИЦ проведена замена линейного стабилизатора на параметрический, после чего уровень стойкости к воздействию $7.I_6$ стал 2 Ус

Прогнозный анализ номенклатуры ЭКБ ИП по РС

Численность номенклатуры ЭКБ ИП (904 перечня)
принятых на экспертизу с 2015 по 2020 г.



Выводы:

Эффективность системы обеспечения и контроля РС ЭКБ определяется комплексом радиационно-ориентированных мероприятий, выполняемых на каждом этапе разработки, производства и эксплуатации и рациональными «трансфером» данных и результатов с каждого этапа на последующие этапы жизненного цикла изделий:

- Проектирование изделий в ОКР использует информационный массив данных о правилах проектирования, моделях, библиотеках, СФ-блоках и характеристики выбранной конструктивно-технологической платформы в части РС;

Выводы:

- Оценка соответствия требованиям ТЗ при сдаче-приемке ОКР опирается на данные о «заложенных» в изделие методах и решениях по обеспечению РС, а также результаты исследований ТС, полуфабрикатов, экспериментальных образцов и аналогов изделий, что позволяет выбрать рациональный состав и объем радиационных испытаний и расчетно-экспериментальных оценок РС;
- Гарантирование РС изделий в процессе производства опирается на данные характеристики БТП, результаты статистического мониторинга и контроля ТП, контроля партий пластин по ТОС, выбранным в ОКР, а также результатами типовых испытаний (при внесении радиационно-чувствительных коррекций);
- Эффективное применение изделий в аппаратуре опирается на информацию ТУ (требования РС, рекомендации по применению, справочные данные и зависимости), модель эксплуатации и уточняющий расчет радиационной нагрузки на ЭКБ в аппаратуре, выбор и прогнозный анализ РС номенклатуры ЭКБ и сертификационные испытания закупочных партий наиболее критичных представителей номенклатуры ЭКБ в режимах и условиях аппаратуры.