

Анализ методов расчета эксплуатационной интенсивности отказов БИС

А. Строгонов, д. т. н.¹, М. Белых², Д. Пермяков³

УДК 621.3.049.774 | ВАК 05.27.01

Прогнозирование надежности – важный инструмент поиска оптимального решения для разрабатываемой системы и оценки характеристик надежности готового изделия в процессе эксплуатации. Неточная оценка отказоустойчивости радиоэлектронного оборудования может привести к излишне консервативным разработкам и / или дополнительным расходам в течение жизненного цикла изделия. Для прогнозирования интенсивности отказов радиоэлектронных систем и компонентов применяют различные справочники, среди которых наибольшей популярностью в России пользуются справочник Министерства обороны США MIL-HDBK-217F и отечественный справочник «Надежность ЭРИ». В статье приведены сведения об описанных в этих справочниках моделях и методах оценки интенсивности отказов БИС, рассмотрены примеры расчета эксплуатационной интенсивности отказов для некоторых ПЛИС.

Зависимость интенсивности отказов от времени работы ИС имеет вид кривой, которая характеризуется тремя периодами: периодом приработки, в котором интенсивность отказов вначале велика, а затем быстро падает; периодом нормальной работы, то есть основной работы, в котором значение интенсивности отказов, как правило, постоянно, и периодом старения (износа), в котором интенсивность отказов начинает вначале медленно, а затем быстрее возрастать (рис. 1). Интенсивность отказов λ характеризуется размерностью 1/ч. Учитывая постоянное значение λ для периода нормальной работы изделия, величина средней наработки на отказ теоретически определяется как $\bar{T}=1/\lambda$. В зарубежной литературе вместо \bar{T} часто используют параметр $MTTF$ – среднее время наработки на отказ.

Под «старением» в статистической теории надежности понимают явление постепенной утраты одного или нескольких свойств изделия в расчетных

условиях эксплуатации. Существует и другое определение термина «старение», например, когда под старением подразумевают ухудшение показателей надежности с течением времени, то есть старение может означать возрастание с течением времени интенсивности отказов.

Старение характеризуется скоростью потери работоспособности, определяемой как внутренними индивидуальными особенностями конструкции ИС, так и внешними условиями эксплуатации. В отличие от старения процесс постепенной утраты работоспособности в результате неблагоприятного сочетания внешних условий называется износом. Если старение характеризуется усредненной скоростью потери работоспособности, то износ может быть определен как старение со скоростью, превышающей номинальную.

Из литературных источников известно, что участок старения на ваннообразной кривой интенсивности отказов получают по результатам ускоренных испытаний ИС на долговечность. Для ИС, которые эксплуатируются в радиоэлектронной аппаратуре в условиях и режимах, оговоренных в ТУ, период старения не наблюдается.

Для предсказания срока службы электронных компонентов до 1980-х годов использовалась единственная модель с постоянной интенсивностью отказов (CFR). Модель с постоянной интенсивностью отказов легла в основу военного справочника по предсказанию надежности электронного оборудования, известного как Military-Handbook-217

¹ Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники, тел. +7 910 247-14-70, andreistrogonov@mail.ru.

² Воронежский государственный технический университет, аспирант кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники, тел. +7 920 524-58-90, belykh.maks@yandex.ru.

³ Воронежский государственный технический университет, аспирант кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники, тел. +7 915 569-70-25, Dima.P.S@yandex.ru.

или MIL-HDBK-217, который стал де-факто отраслевым стандартом.

В 1980-х и в начале 1990-х годов, с появлением БИС, стало накапливаться все больше данных, свидетельствующих о том, что CFR-модель больше не применима. В БИС, спроектированных без учета надежности, могут преобладать ранние отказы и отказы в период старения на ваннообразной кривой интенсивности отказов. Эти отказы уже нельзя описать CFR-моделью. В 1991 году две исследовательские группы, исследовательский институт IIT Research Institute/Honeywell SSED и команда университета Westinghouse University of Maryland, рекомендовали на основе своих исследований и выводов не применять CFR-модель к дальнейшим обновлениям справочника MIL-HDBK-217 без предварительного исследования. После 1994 года Министерство обороны США стало поощрять использование промышленных стандартов на основе серии ISO 9000. Последнее обновление справочника MIL-HDBK-217 было в 1995 году. В дальнейшем были предприняты попытки обновления различных справочников по предсказанию надежности, основанных на MIL-HDBK-217, таких как Bellcore/Telcordia (2006), RDF 2000 (2000), China 299B (1998), PRISM (2000) и др.

Последняя версия справочника MIL-HDBK-217F (Notice 2, 1995 год) охватывает широкий спектр основных категорий электронных компонентов, используемых в современных военных системах, от ИС и дискретных полупроводников до пассивных компонентов, таких как резисторы и конденсаторы. Для каждой из этих областей в справочнике представлено простое уравнение для расчета интенсивности отказов.

Для расчета количественных показателей надежности ИС широко используют калькулятор MTBF Calculator компании ALD (Израиль), который поддерживает 26 наиболее известных справочников по предсказанию надежности электронного оборудования, в том числе MIL-HDBK-217F-2 Part count; MIL-HDBK-217F-2 Part stress; RIAC HDBK-217Plus; ALCATEL; BELLCORE выпуск 5; BELLCORE выпуск 6; BRITISH TELECOM HRD4; BRITISH TELECOM HRD5; CNET RDF93 02/95; FIDES Guide 2004; FIDES 2009; GJB/Z 299B Part count и GJB/Z 299B Part stress; HRD5 TELECOMM; IEC 62380; ITALTEL IRPH93; NPRD-95; Telcordia 1, 2; Siemens SN 29500-1; Siemens SN 29500-2005-1 (Siemens Norm), UTE C 80-810 (RDF2000) и др. MTBF Calculator содержит базу достоверных сведений по конструктивно-технологическим данным БИС различных зарубежных производителей.

Для расчета количественных показателей надежности ИС широко используют калькулятор MTBF Calculator компании ALD (Израиль), который поддерживает 26 наиболее известных справочников по предсказанию надежности электронного оборудования, в том числе MIL-HDBK-217F-2 Part count; MIL-HDBK-217F-2 Part stress; RIAC HDBK-217Plus; ALCATEL; BELLCORE выпуск 5; BELLCORE выпуск 6; BRITISH TELECOM HRD4; BRITISH TELECOM HRD5; CNET RDF93 02/95; FIDES Guide 2004; FIDES 2009; GJB/Z 299B Part count и GJB/Z 299B Part stress; HRD5 TELECOMM; IEC 62380; ITALTEL IRPH93; NPRD-95; Telcordia 1, 2; Siemens SN 29500-1; Siemens SN 29500-2005-1 (Siemens Norm), UTE C 80-810 (RDF2000) и др. MTBF Calculator содержит базу достоверных сведений по конструктивно-технологическим данным БИС различных зарубежных производителей.

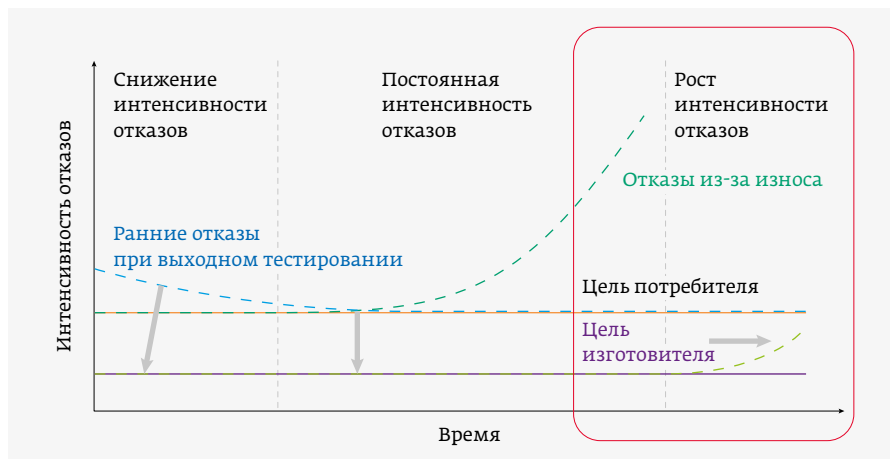


Рис. 1. Управление интенсивностью отказов в течение срока службы изделия

В MIL-HDBK-217 используются две модели для оценки λ : модель экспресс-оценки (parts count) и модель нагрузок (parts stress). Метод прогнозирования надежности parts count используется на ранних этапах проектирования электронного оборудования, когда недостаточно данных, но известно количество составных частей. Он дает более консервативные результаты и предполагает типичные условия эксплуатации системы.

Модель parts stress основана на влиянии механических, электрических и внешних нагрузок и рабочих циклов, таких как температура, влажность, вибрация и др., на интенсивность отказов компонентов. Этот метод используется, когда большая часть проекта завершена и доступна подробная информация о нагрузках на компоненты. Этот подход применим и на более поздних этапах проектирования, когда доступно больше информации о системе, поэтому результат более точен, чем в методе parts count.

В основе прогнозирования надежности по MIL-HDBK-217F лежат две основные концепции:

- модель надежности с постоянной интенсивностью отказов (интенсивность отказов системы является суммой интенсивностей отказов входящих в нее

$$\text{компонентов: } \lambda = \sum_{i=1}^m (\lambda_{B_i});$$

- базовая интенсивность отказов компонента, модифицированная несколькими π -факторами (поправочными коэффициентами).

Например, интенсивность отказов может быть вычислена на основе следующей модели parts count:

$$\lambda = \lambda_B \pi_Q \pi_L, \tag{1}$$

где λ_B – базовая интенсивность отказов, полученная по результатам отбраковочных испытаний компонентов; π_Q, π_L – поправочные коэффициенты, π_Q – коэффициент,

зависящий от подготовки и качества процесса производства; π_L – коэффициент, зависящий от уровня отработки технологического процесса (учитывается, если ИС выпускается менее двух лет).

В основу всех моделей для оценки интенсивности отказов монолитных БИС положено понятие аддитивной модели: $\lambda = \lambda_T + \lambda_E$, где λ – общая интенсивность отказов для монолитных схем; λ_T – составляющая интенсивности отказов, обусловленная деградацией параметров во времени (определяется механизмами, которые ускоряются температурой и электрической нагрузкой). λ_T связывают с явлениями, которые подчиняются зависимости Аррениуса. λ_E – составляющая интенсивности отказов, обусловленная механическими нагрузками (воздействием среды), непосредственными или косвенными, например, нагрузками, вызванными тепловым расширением. Качество БИС оказывает непосредственное влияние на интенсивность отказов и учитывается в модели в виде коэффициента π_Q . Для учета воздействия условий эксплуатации вводится коэффициент π_E .

В справочнике выделяют следующие категории ИС: монолитные биполярные и МОП цифровые ИС малого и среднего уровня интеграции (менее 100 вентиляей); монолитные биполярные и МОП аналоговые ИС; монолитные биполярные и МОП цифровые ИС высокого уровня интеграции (содержащие 100 и более вентиляей); монолитные с МОП-структурой и биполярные запоминающие устройства.

Например, интенсивность отказов программируемых логических матриц (ПЛМ, PLA), программируемой матричной логики (ПМЛ, PAL), микропроцессоров оценивается моделью нагрузок:

$$\lambda = \pi_Q [C_1 \pi_T + C_2 \pi_E] \pi_L \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где π_Q – коэффициент, зависящий от подготовки и качества процесса производства; C_1 и C_2 – коэффициенты сложности элемента (конструкционные факторы), связанные с кристаллом и корпусом ИС; π_T – коэффициент, зависящий от температуры кристалла и технологии; π_E – коэффициент жесткости условий эксплуатации (в справочнике MIL-HDBK-217F различается 14 факторов окружающей среды); π_L – коэффициент, зависящий от уровня отработки технологического процесса (уровень качества).

Рассчитывать характеристики надежности зарубежных БИС можно и по АСРН2004 (отечественный справочник «Надежность ЭРИ», расчет по импортным группам ведется по MIL-HDBK-217F). АСРН2004 – автоматизированная система расчета надежности элементной базы отечественного и иностранного производства ФГУП «22 ЦНИИИ Минобороны России». В АСРН2004 доступен русифицированный справочник

зарубежного стандарта. Расчет ведется с использованием моделей нагрузок.

Эксплуатационная интенсивность отказов отечественных компонент (по группе «Россия») в справочнике «Надежность ЭРИ» оценивается моделью:

$$\lambda_{Э} = \lambda_6 \cdot K_Э \cdot K_{пр} \cdot \prod_{i=1}^n K_i \cdot 10^7, \quad (3)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов; n – число учитываемых факторов; K_i – поправочные коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; $K_Э$ – коэффициент эксплуатации (степень жесткости условий эксплуатации); $K_{пр}$ – коэффициент приемки.

Модель (3), используемая в отечественном справочнике «Надежность ЭРИ», схожа с моделью оценки компоненты, используемой не только в MIL-HDBK-217F, но и в других зарубежных справочниках по прогнозированию надежности электронного оборудования, например, Telcordia SR-332 (Bell Communication Research/Telcordia Technologies Inc.).

В справочнике «Надежность ЭРИ» 2004/2006 используется обобщенная группа «Микросхемы интегральные полупроводниковые цифровые (логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты ПЛМ, регистры сдвига, БМК и др.)».

Рассчитаем, например, интенсивность отказов цифровой БИС, изготовленной по КМОП-технологии, с количеством системных вентиляей 31 тыс. (10 тыс. логических вентиляей) на стадии проектирования (условное обозначение ПЛИС1, аналог зарубежной FPGA EPF10K10AQC208). Предположим, что БИС можно отнести к группе ЭРИ «Цифровые КМОП-технологии». Сложность элементов по справочнику задается из диапазона 10 000–50 000, тип корпуса – пластмассовый, напряжение питания до 10 В, вид приемки 5 (ВП). Пусть в РЭА используется одна БИС. Температура окружающей среды $T_c = 25$ °С.

Для нашего случая по справочнику «Надежность ЭРИ 2004»:

$$\lambda_{Э} = \lambda_6 \cdot K_Э \cdot K_{пр} \cdot K_{СТ} \cdot K_{корп} \cdot K_V. \quad (4)$$

Для заданной сложности БИС в АСРН выбирается базовая интенсивность отказов для усредненных режимов применения $\lambda_6 = 0,197 \cdot 10^{-7}$ (1/ч) (электрическая нагрузка, равная 0,4 от номинальной; температура окружающей среды 30 °С).

Значения коэффициента $K_{СТ}$ вычисляются по формуле $K_{СТ} = Ae^{B(T+273)}$, где A и B – постоянные коэффициенты модели ($A = 99,96 \cdot 10^{-4}$, $B = 20,79 \cdot 10^{-3}$ для диапазона сложности 10 000–50 000 и температуры 25 °С).

Значение коэффициента $K_{корп} = 3,0$ выбирается в зависимости от типа корпуса. Предположим, БИС выпускается

Осциллографы реального времени АКИП-4135

АКИП - современные
средства измерений



- 4 аналоговых канала + 16 цифровых (опция)
- Полоса пропускания 500 МГц / 1 ГГц / 2 ГГц
- Частота дискретизации 5 ГГц (10 ГГц в режиме ESR) на канал
- Память 500 МБ
- Низкий уровень собственных шумов обеспечивающий установку коэффициента отклонения в диапазоне от 500 мкВ/дел до 10 В/дел
- Декодирование сигналов: стандартно - I²C, SPI, UART/RS232, CAN, LIN, опционально - CAN FD, FlexRay, I²S, MIL-STD-1553B, SENT, Manchester
- Опция генератора сигналов произвольной формы до 25 МГц
- Встроенный веб-сервер с поддержкой удаленного управления через порт LAN

PRIST.RU

Наименование	Кол.п	По...	Дет...	$\lambda_0 \cdot 10^7, 1/\text{ч}$	$\lambda_0 \cdot 10^7, 1/\text{ч}$	$\lambda_0 \cdot 10^7, 1/\text{ч}$	K1	K2	K3	K4	K5	K6	
Аппаратура	1			-	2,898	2,898							
ПЛИС	1			0,197	2,898	2,898	K _{СТ} = 4,9	K _{КОРП} = 3,0	K _V = 1,0	K _A = 1,0	K _{ПР} = 1,0		

Рис. 2. Результат расчета характеристик надежности в АСРН2004 (по группам «Россия» и «цифровые КМОП-технологии»)

в пластмассовом корпусе. Значение коэффициента $K_V=1,0$ выбирается для напряжения источника питания до 10 В и КМОП-технологии.

Для группы аппаратуры 1.1 $K_3=1,0$. Для заданных значений эксплуатационная интенсивность отказов составляет $\lambda_3 = 290 \cdot 10^{-9}$. Вычисленные значения коэффициентов по справочнику АСРН составят: $K_{СТ}=4,9$, $K_{КОРП}=3,0$, $K_V=1,0$, $K_3=1,0$, $K_{ПР}=1,0$ (рис. 2). Если интенсивность отказов перевести в так называемые ФИТ = $\lambda \cdot 10^9$ (1 ФИТ (FIT – Failure in Time) = 1 отказ на 10^9 приборо-часов или 1 отказ на 10^9 ИС в час), то получим 290 ФИТ. В зарубежной технической литературе, как правило, используют масштабный множитель 10^9 и единицы измерения интенсивности отказов в ФИТах, для того чтобы показать сверхмалые интенсивности отказов. В справочнике «Надежность ЭРИ» 2004/2006 используют масштабный множитель 10^6 , а в программе в АСРН2004 множитель при расчете интенсивности может задать пользователь на свое усмотрение. По современным меркам это достаточно большая величина интенсивности отказов оцениваемой БИС на стадии проектирования.

Оценим интенсивность отказов ПЛИС EPF10K10AQC208 с использованием модели parts count и справочника MTBF Calculator для условий эксплуатации G_B и температуры 25°C. MTBF Calculator автоматически относит ПЛИС EPF10K10AQC208 к типу ПЛМ (ПМЛ), указывает на КМОП-технологию изготовления. Выбирается диапазон вентилях от 256К до 1М (>256К to 1М), который соответствует диапазону 5001 to 20000 вентилях согласно справочнику MIL-HDBK-217F (страница А-2, раздел 5.1 Floating Gate Programmable Logic Array, технология MOS, корпус DIP 40 pin).

Базовая интенсивность отказов согласно рис. 3 составляет $\lambda_B=0,0095 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$ или 9,5 ФИТ.

Коэффициент, зависящий от уровня обработки технологического процесса изготовления ИС, может быть определен по следующей модели:

$$\pi_L = 0,01e^{(5,35-0,35Y)}$$

где Y – продолжительность промышленного выпуска ИС данного типа в годах. Расчетные значения коэффициентов отработанности технологического процесса

Generic Failure Rate λ_g (Failures/10⁶ Hours) for Micro
(Defaults: π_T Based on Ea Shown, Solder or Weld Seal DIPs/PAGAs (Nc

Section #	Part Type	Environ. → T _J (°C) →	GB	GF	GM	NS
			50	60	65	60
5.1	Bipolar Technology					
	Gate/Logic Arrays, Digital (Ea = .4)					
	1 - 100 Gates	(16 Pin DIP)	.0036	.012	.024	.024
	101 - 1000 Gates	(24 Pin DIP)	.0060	.020	.038	.037
	1001 to 3000 Gates	(40 Pin DIP)	.011	.035	.066	.065
	3001 to 10,000 Gates	(128 Pin PGA)	.033	.12	.22	.22
5.1	Linear Microcircuits (Ea = .65)					
	1 - 100 Transistors	(14 Pin DIP)	.0095	.024	.039	.034
	101 - 300 Transistors	(18 Pin DIP)	.017	.041	.065	.054
	301 - 1000 Transistors	(24 Pin DIP)	.033	.074	.11	.092
	1001 - 10,000 Transistors	(40 Pin DIP)	.050	.12	.18	.15
	Programable Logic Arrays (Ea = 4)					
Up to 200 Gates	(16 Pin DIP)	.0061	.016	.029	.027	
201 to 1000 Gates	(24 Pin DIP)	.011	.028	.048	.045	
1001 to 5000 Gates	(40 Pin DIP)	.022	.052	.087	.082	
5.1	MOS Technology					
	Gate/Logic Arrays, Digital (Ea = .35)					
	1 - 100 Gates	(16 Pin DIP)	.0057	.015	.027	.027
	101 - 1000 Gates	(24 Pin DIP)	.010	.026	.045	.043
	1001 to 3000 Gates	(40 Pin DIP)	.019	.047	.080	.077
	3001 to 10,000 Gates	(128 Pin PGA)	.049	.14	.25	.24
5.1	Linear Microcircuits (Ea = .65)					
	1 - 100 Transistors	(14 Pin DIP)	.0095	.024	.039	.034
	101 - 300 Transistors	(18 Pin DIP)	.017	.041	.065	.054
	301 - 1000 Transistors	(24 Pin DIP)	.033	.074	.11	.092
	1001 - 10,000 Transistors	(40 Pin DIP)	.05	.12	.18	.15
	Floating Gate Programmable Logic Array, MOS (Ea = .35)					
Up to 500 Gates	(24 Pin DIP)	.0046	.018	.035	.035	
501 - 2000 Gates	(28 Pin DIP)	.0056	.021	.042	.042	
2001 - 5000 Gates	(28 Pin DIP)	.0061	.022	.043	.042	
5001 to 20000 Gates	(40 Pin DIP)	.0095	.033	.064	.063	

Рис. 3. Фрагмент таблицы базовой интенсивности отказов из справочника MIL-HDBK-217F (для оценки интенсивности отказов выбирается раздел Floating Gate Programmable Logic Array, технология MOS)



Акционерное общество

ЭРКОН

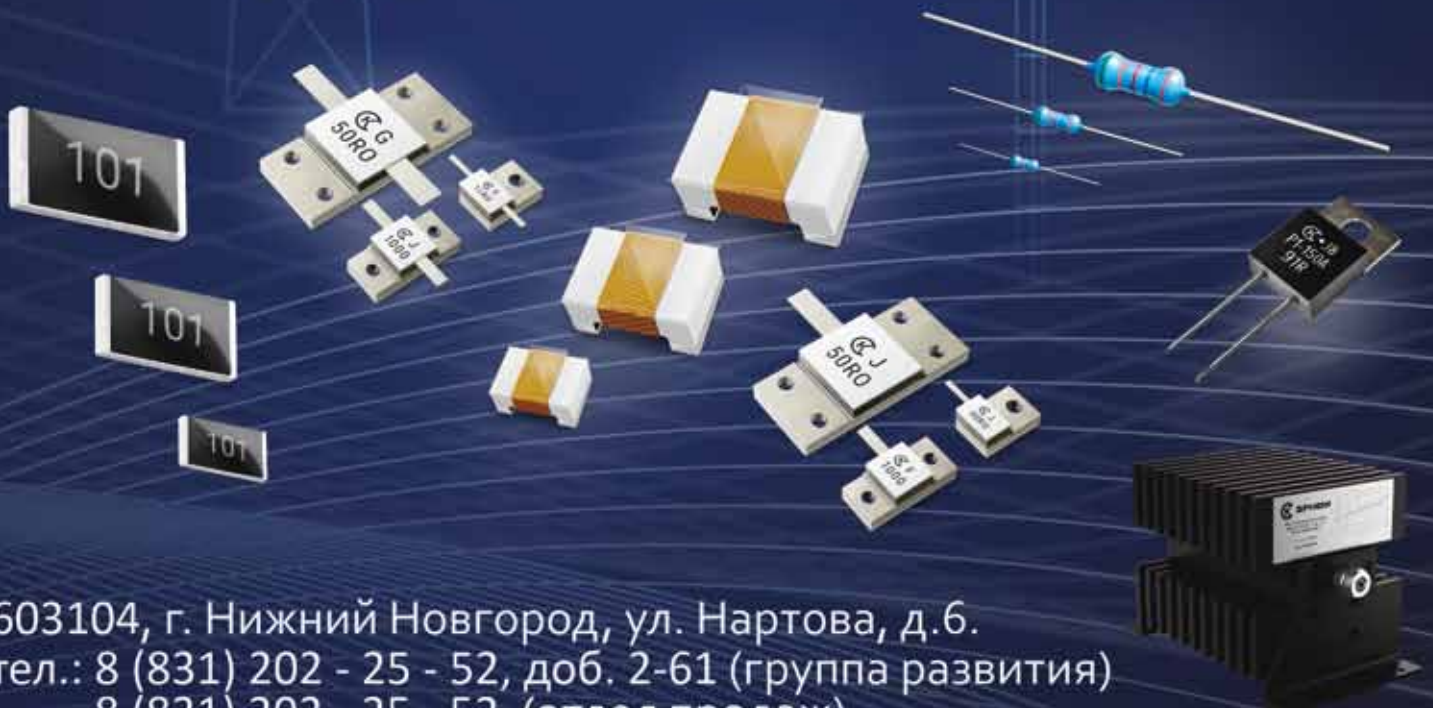
Научно-производственное объединение

ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА
И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ
РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ
И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ

- Современная производственная база
- Высокое качество
- Индивидуальный подход к потребителю

НОВИНКИ

Аттенюаторы (поглотители) ПР1-25 (500 Вт и 150 Вт от 3 до 40 дБ)
Резистор сверхвысокочастотный Р1-160 (до 40 ГГц)
Мощные резисторы Р1-170 (от 10 до 1000 Вт)



603104, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6.
тел.: 8 (831) 202 - 25 - 52, доб. 2-61 (группа развития)
8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)

E-mail: info@erkon-nn.ru
www.erkon-nn.ru

Таблица 1. Коэффициенты отработанности технологического процесса изготовления ИС

Годы производства, Y	π_L
≤0,1	2,0
0,5	1,8
1,0	1,5
1,5	1,2
≥2,0	1,0

изготовления ИС π_L приведены в табл. 1, в табл. 2 показаны коэффициенты уровня качества π_Q .

Предположим, что ПЛИС EPF10K10AQC208 с уровнем качества В выпускаются более двух лет (ПЛИС соответствуют классу В стандарта MIL-M-38510). Таким образом, $\pi_L = 1$ (табл. 1), $\pi_Q = 1$ (табл. 2). Оценка интенсивности отказов для ПЛИС EPF10K10AQC208 с использованием модели parts count составит в этом случае 9,5 ФИТ (рис. 4). Интенсивность отказов с использованием статистики χ^2 с 60%-ным уровнем значимости по результатам ускоренных испытаний, проведенных компанией Altera для FLEX10KA (2014 год), с технологическими проектными нормами 300 / 350 нм составляла 54 ФИТ.

* * *

Следует отметить, что основная погрешность при расчете интенсивности отказов БИС на основе справочника MIL-HDBK-217F объясняется устаревшими сведениями о базовой интенсивности отказов, не соответствующими характеристикам надежности современных БИС, изготавливаемых по технологическим проектным нормам порядка десятков нанометров и менее.

Таблица 2. Коэффициенты уровня качества

Уровень качества	Класс отбраковки	π_Q
S	Приобретенные в полном соответствии с классом S стандарта MIL-M-38510 MIL-I-38535 и приложение В (класс U)	0,25
B	Приобретенные в полном соответствии с классом В стандарта MIL-M-38510 MIL-I-38535 и приложение В (класс Q)	1,0
B-1	Соответствуют требованиям раздела 1.2.1 MIL-STD-883	2,0
Для коммерческих ИС и неизвестных программ отбраковочных испытаний		10

Усилия по обновлению и возрождению MIL-HDBK-217F начались в 2004 году. Планировалось к концу 2009 года разработать версию G. В 2006 году Центр анализа информации о надежности (RIAC) представил новую методологию, основанную на программном инструменте PRISM, и новый справочник HDBK-217Plus. Эта методология известна как RIAC217Plus, которая включает модели библиотек прогнозирования интенсивности отказов компонентов и модели уровня системы. Оценка интенсивности отказов системы производится путем использования моделей интенсивности отказов каждого компонента в отдельности. Затем эти данные по отдельным

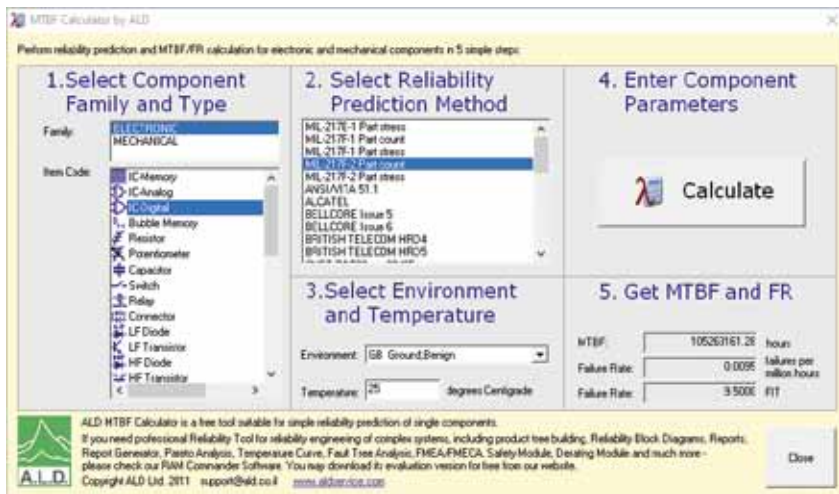


Рис. 4. Оценка интенсивности отказов для ПЛИС EPF10K10AQC208 в MTBF Calculator с использованием модели parts count

компонентам суммируются, чтобы оценить интенсивность отказов системы в целом. Метод 217Plus реализован, например, в системе анализа надежности RAM Commander компании ALD.

В 2015 году вышла последняя версия справочника 217Plus, которая доступна через сайт Quanterion (<https://www.quanterion.com>). Она содержит новые модели интенсивности отказов, охватывающие компоненты фотоники, и обновления двенадцати оригинальных моделей интенсивности отказов компонентов 217Plus на основе новых сведений о надежности. Однако версия HDBK-217Plus: 2015 (Notice 1) и табличный калькулятор уже не являются свободно распространяемыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Obsolescence of the MIL-HDBK-217: A critical review. <https://www.researchgate.net/publication/318893417>.
2. MIL-HDBK-217F, Notice 2, December 1991. Military handbook. Reliability prediction of electronic equipment.
3. **White M., Bernstein J. B.** Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation. DOI:10.13140/RG.2.1.2490.1281. Report number: 08-52/08 Affiliation: NASA, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, University of Maryland // www.researchgate.net/publication/277598241
4. **Жаднов В. В.** Сравнительный анализ методов оценки надежности полупроводниковых интегральных микросхем // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2013. № 16. С. 132–137.
5. **Горлов М. И., Королев С. Ю., Кулаков А. В., Строгонов А. В.** Расчет надежности интегральных схем по конструктивно-технологическим данным. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1996. 80 с.
6. **Строгонов А. В.** Характеристики надежности современных ПЛИС // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 4. С. 52–58.
7. **Строгонов А. В.** Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 3. С. 90–96.
8. **Строгонов А. В., Цыбин С. А., Городков П. С.** Расчет количественных показателей надежности цифровых БИС с использованием справочника MIL-HDBK-217F и программы MTBF Calculator фирмы ALD // Компоненты и технологии. 2015. № 1. С. 104–110.
9. **Строгонов А. В.** Расчет эксплуатационной интенсивности отказов у потребителя с помощью справочников MIL-HDBK-217F и АСРН2004 на примере ПЛИС // Компоненты и технологии. 2018. № 9. С. 132–135.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 920 руб.

ПЛИС И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ. ПРОГРАММНЫЕ ОШИБКИ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Под ред. Ф. Кастеншмидт, П. Реха

При поддержке АО «Конструкторско-технологический центр «ЭЛЕКТРОНИКА»

Пер. с англ. и научная редакция С. А. Цыбина, к. т. н., АО «КТЦ «ЭЛЕКТРОНИКА»,

А. В. Быстрицкого, к. т. н., АО «КТЦ «ЭЛЕКТРОНИКА»,

А. В. Строгонова, д. т. н., ФГБОУ ВО «ВГТУ», П. С. Городкова, ФГБОУ ВО «ВГТУ»

В книге приводится понятие устранимых ошибок, возникающих в ПЛИС типа ППВМ (FPGA – Field Programmable Gate Array) и графических процессорах. Рассматриваются радиационные эффекты в ПЛИС, отказоустойчивые методы для ПЛИС, применение серийно выпускаемых ПЛИС в авиации и космонавтике, экспериментальные данные о воздействии радиации на ПЛИС, встроенные в ПЛИС процессоры под воздействием радиации и внесение ошибок в ПЛИС.

Книга будет полезна не только инженерно-техническим работникам, занимающимся применением серийно выпускаемых ПЛИС в авиации, космонавтике, в приборостроении для транспорта и других критически важных областях народного хозяйства, но и магистрантам, обучающимся по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», а также аспирантам, проходящим обучение по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 326 с.,
ISBN 978-5-94836-513-8

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru