

Данное научное исследование (№15-05-0029) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015 г.

По стандарту ГОСТ 27.002-89 [1] надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость. Способность объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки называется безотказностью. Одним из показателей безотказности является интенсивность отказов (ИО) – это

условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Расчет показателей надежности является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных в ГОСТ РВ 20.39.302-98 [2].

В качестве примера для исследования моделей ИО полупроводниковых приборов рассмотрена технологическая группа «кремниевый выпрямительный диод» тип элемента «Д231», который предназначен для преобразования переменного напряжения с частотой 1,1 кГц в постоянное. В таблице 1 приведены электрические параметры диода Д231 при нормальных условиях из ТУ [3].

Электрические параметры диода по ТУ [3]

Таблица 1

Тип диода	Предельные значения параметров при T=25°C			Значения параметров при T=25°C			T <sub>н. макс.</sub> (T <sub>н.</sub> ), °C
	U <sub>обр. макс.</sub> (U <sub>обр. и. макс.</sub> ), В	I <sub>пр. макс.</sub> (I <sub>пр. и. макс.</sub> ), А	I <sub>прр.</sub> , А	f <sub>раб.</sub> (f <sub>макс.</sub> ), кГц	U <sub>прр.</sub> , В	I <sub>прр.</sub> , А	
Д231	(300)	10,0	100	1,1	1,0	10,0	3,0

В таблице 1 приведены следующие сокращения: U<sub>обр. макс.</sub> – максимально-допустимое постоянное обратное напряжение диода; U<sub>обр. и. макс.</sub> – максимально-допустимое импульсное обратное напряжение диода; I<sub>пр. макс.</sub> – максимальный средний прямой ток за

период; I<sub>пр. и. макс.</sub> – максимальный импульсный прямой ток за период; I<sub>прр.</sub> – ток перегрузки выпрямительного диода; f<sub>макс.</sub> – максимально-допустимая частота переключения диода; f<sub>раб.</sub> – рабочая частота переключения диода; U<sub>пр.</sub> при I<sub>пр.</sub> – постоян-

Груды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2015, том 1

ное прямое напряжения диода при токе I<sub>пр.</sub>; I<sub>обр.</sub> – постоянный обратный ток диода; T<sub>н. макс.</sub> – максимально-допустимая температура корпуса диода.

Габаритный чертеж диода «Д231» приведен на рисунке 1.

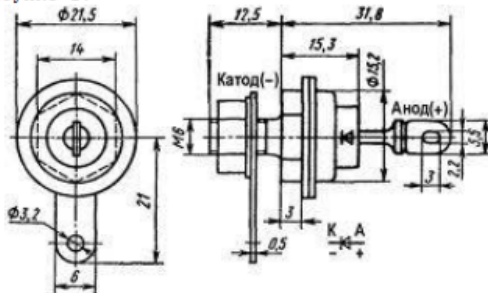


Рисунок 1 – Габаритный чертеж диода Д231

На рисунке 2 приведено распределение отказов по видам. Как видно, основная часть отказов (около 80%) приходится на постепенные (параметрические) отказы (по данным справочника «Надежность ЭРИ», редакции 2006 г. [4]). Все виды отказов присущие выпрямительным диодам учитыва-

ются в базовой интенсивности отказов (см. таблицу 2).

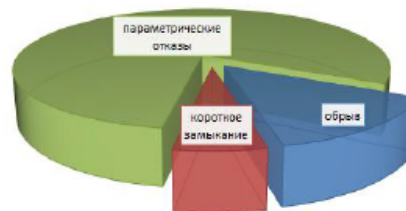


Рисунок 2 – Диаграмма распределения отказов по видам для выпрямительных диодов

В таблице 2 приведены характеристики надежности и справочные данные на диод Д231 [4], такие как базовая интенсивность отказов (λ<sub>0</sub>), минимальная наработка во всех режимах допускаемых по ТУ и в облегченном режиме (T<sub>н.н.</sub>), гамма-процентный ресурс (T<sub>р.γ</sub>), срок хранения (T<sub>кр.</sub>).

Характеристики надежности и справочные данные

Таблица 2

Изделие	λ <sub>0</sub> · 10 <sup>6</sup> , 1/ч	T <sub>н.н.</sub> тыс. ч		T <sub>р.γ</sub> тыс. ч (γ=95%)	T <sub>кр.</sub> лет
		Во всех режимах, допускаемых ТУ	В облегченном режиме		
Д231	0,1	25	40	50	25

Математическая модель для расчета эксплуатационной ИО диодов, согласно справочнику [4], имеет вид:

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot K_p \cdot K_\theta \cdot K_\tau \cdot K_\sigma \cdot K_{тр} \quad (1)$$

где: λ<sub>0</sub> – базовая интенсивность отказов, 1/ч.; K<sub>p</sub> – коэффициент режима, отн. ед.; K<sub>тр</sub> – коэффициент приемки, отн. ед.; K<sub>θ</sub> – коэффициент экс-

плуатации, отн. ед.; K<sub>θ</sub> – коэффициент, определяемый функциональным назначением прибора, отн. ед.; K<sub>σ</sub> – коэффициент, определяющий отношение рабочего напряжения к максимально допустимому напряжению по ТУ, отн. ед.

По справочнику [4] определяем значения коэффициентов модели (1) (см. таблицу 3).

Таблица 3

№ п.п	Обозначение коэффициента	Условия расчета	Значение
1	K <sub>p</sub>	t=25 °C, I <sub>раб</sub> /I <sub>макс</sub> =0,5	0,1486
2	K <sub>тр</sub>	Уровень качества «ВП»	1
3	K <sub>θ</sub>	Группа эксплуатации 1.1 по ГОСТ РВ 20.39.304-98	1
4	K <sub>σ</sub>	Функциональный режим работы: аналогового сигнала	1,5
5	K <sub>σ</sub>	(U <sub>обр. раб</sub> /U <sub>обр. макс</sub> ) · 100%=50%	0,7

Теперь для сравнения проведем оценку ИО по другим справочникам: «Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F (далее в тексте 217F)», «Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models (далее в тексте 217Plus)».

Математическая модель интенсивности отказов по 217F [5]:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad (2)$$

Значения коэффициентов модели (2) для диода «Д231»

Таблица 4

№ п.п.	Обозначение коэффициента	Условия расчета	Значение
1	$\pi_T$	Температура окружающей среды - 25 °С, температура перехода - 60 °С	0,0455
2	$\pi_S$	$(U_{обр.раб}/U_{раб.макс})=0,5$	0,19
3	$\pi_Q$	Уровень качества «JANTX»	1
4	$\pi_E$	Группа эксплуатации 1.1 по ГОСТ РВ 20.39.304-98	1
5	$\pi_C$	Контакты паяные	1

Математическая модель ИО по 217Plus [6]:

$$\lambda_p = [\pi_G(\lambda_{ов} \cdot \pi_{DCO} \cdot \pi_{ТО} \cdot \pi_S + \lambda_{ев} \cdot \pi_{DCN} \cdot \pi_{ТВ} + \lambda_{тсв} \cdot \pi_{СК} \cdot \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \cdot \pi_{SJDТ} + \lambda_{ВОС}] \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

где:  $\lambda_{ов}$  - базовая рабочая интенсивность отказов,  $\lambda_{ев}$  - базовая интенсивность отказов, зависящая от условий эксплуатации,  $\lambda_{тсв}$  - базовая интенсивность отказов, учитывающая температурную цикличность,  $\lambda_{SJB}$  - базовая интенсивность отказов паянного соединения,  $\lambda_{ВОС}$  - интенсивность отказов при электрической перегрузке,  $\pi_G$  - коэффициент, зависящий от года производства,  $\pi_{DCO}$  - коэффициент интенсивности эксплуатации,  $\pi_S$  - коэффициент электрической нагрузки,  $\pi_{DCN}$  - коэффициент учитывающий соотношение интенсивность эксплуатации - состояние покоя,  $\pi_{ТО}$  - ко-

эффициент рабочей температуры,  $\pi_{ТВ}$  - коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды,  $\pi_{СК}$  - коэффициент интенсивности циклов,  $\pi_{DT}$  - коэффициент, учитывающий разницу температур,  $\pi_{SJDТ}$  - коэффициент, учитывающий разницу температур паянного соединения.

Значения коэффициентов модели (2) приведены в таблице 4.

Коэффициент  $\pi_G$  рассчитывается как:

$$\pi_G = e^{(-\beta(Y-1993))}$$

где  $\beta$  - константа, зависит от типа диода; Y - год производства диода.

Коэффициент  $\pi_{DCO}$  рассчитывается как:

$$\pi_{DCO} = \frac{DC}{DC_1}$$

Коэффициент  $\pi_{ТО}$  рассчитывается как:

**Груды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2015, том 1**

$$\pi_{ТО} = \exp\left(\frac{-Ea_{оп}}{0,00008617} \left(\frac{1}{T_{AO} + T_R + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

где:  $Ea_{оп}$  - рабочая энергия активации, зависит от типа диода;  $T_R$  - величина превышения рабочей температуры  $T_{AO}$ .

Коэффициент  $\pi_S$  рассчитывается как:

$$\pi_S = \frac{V_S^{2,43}}{0,185}$$

где:  $V_S = U_{раб}/U_{ном}$ .

Коэффициент  $\pi_{DCN}$  рассчитывается как:

$$\pi_{DCN} = \frac{1 - DC}{DC_1}$$

Коэффициент  $\pi_{ТВ}$  рассчитывается как:

$$\pi_{ТВ} = \exp\left(\frac{-Ea_{нопор}}{0,00008617} \left(\frac{1}{T_{AE} + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

где:  $Ea_{нопор}$  - энергия активации в состоянии покоя, зависит от типа диода.

Коэффициент  $\pi_{СК}$  рассчитывается как:

$$\pi_{СК} = \frac{CR}{CR_1}$$

Коэффициент  $\pi_{DT}$  рассчитывается как:

$$\pi_{DT} = \left(\frac{T_{AO} + T_R - T_{AE}}{DT_1}\right)^2$$

Коэффициент  $\pi_{SJDТ}$  рассчитывается как:

$$\pi_{SJDТ} = \left(\frac{T_{AO} + T_R - T_{AE}}{44}\right)^{2,26}$$

Значения базовых ИО по [6] для выпрямительного диода приведены в таблице 5. Рассчитанные коэффициенты модели (3) приведены в таблице 6.

Значения базовых интенсивностей отказа для выпрямительного диода

Таблица 5

$\lambda_{ов}$	$\lambda_{ев}$	$\lambda_{тсв}$	$\lambda_{SJB}$	$\lambda_{ВОС}$
0,0000616	0,0000308	0,000098	0,00021	0,00036

Значения коэффициентов для выпрямительного диода

Таблица 6

№ п.п.	Обозначение коэффициента	Условия расчета	Значение
1	$\pi_G$	B=0,223 Y=2014	0,0093
2	$\pi_{DCO}$	DC <sub>1</sub> =0,23	0,625
3	$\pi_{ТО}$	Ea <sub>оп</sub> =0,3 T <sub>R</sub> =150 °С	0,031
4	$\pi_S$	V <sub>S</sub> =U <sub>раб</sub> /U <sub>ном</sub> =0,5	1
5	$\pi_{DCN}$	DC <sub>1</sub> =0,77	0,6
6	$\pi_{ТВ}$	Ea <sub>нопор</sub> =0,4	1
7	$\pi_{СК}$	CR <sub>1</sub> =736,84	0,5
8	$\pi_{DT}$	DT <sub>1</sub> =80	0,0039
9	$\pi_{SJDТ}$	T <sub>1</sub> =60 °С Рабочая температура T <sub>AO</sub> =50 °С Температура в режиме покоя T <sub>AE</sub> =25 °С	4,42

В таблице 7 приведены результаты расчета ИО по приведенным выше моделям (1) - (3), при этом все условия расчета взяты одинаковыми.

Как видно из таблицы 7, расхождение в результатах вполне закономерно: справочник «Надежность ЭРИ» редакции 2006 г., предназначенный для оценки надежности изделий военной техники и специального назначения, дает заведомо завышен-

ную ИО по сравнению с американским стандартом 217F. Значение, полученное по справочнику 217Plus, является самым маленьким, так как модель (3) позволяет получить значение, наиболее приближенное к реальному в связи с учетом помимо условий применения и циклограммы работы - это режимов работы, хранения и ожидания, что и приводит к большому различию значений ИО.

Результаты расчета ИО

Таблица 7

	«Надежность ЭРИ»	217F	217Plus
Эксплуатационная интенсивность отказов, 10 <sup>-6</sup> 1/ч	0,016	0,00217	0,00129

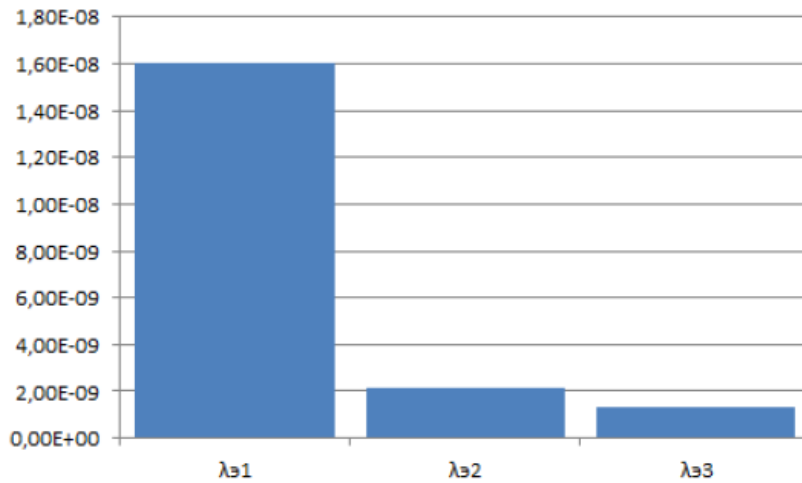


Рисунок 3 - Сравнение эксплуатационных ИО диода «Д231»:  $\lambda_{э1}$  - по справочнику «Надежность ЭРИ»,  $\lambda_{э2}$  - по 217F,  $\lambda_{э3}$  - по 217Plus

Анализируя полученные результаты расчета ИО, видно, что значения, полученные по справочникам «Надежность ЭРИ» [4] и 217F [5] дали расхождение в два порядка:

$$\lambda_{э1} / \lambda_{э2} = 7,37$$

В то же время, расхождение между значениями ИО, полученными по 217F [5] и 217Plus [6] всего в 2 раза:

$$\lambda_{э2} / \lambda_{э3} = 1,68$$

Данный результат согласуется с исследованиями, проведенными Корейским обществом «Управления качеством ЭКБ» и опубликованном в [7] и

говорит о существенном «плохой» надежности российской электроники.

Проведенный анализ моделей оценки интенсивности отказов с использованием различных справочных материалов: отечественного справочника «Надежность ЭРИ» и американских стандартов «Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F» и «Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models» на примере выпрямительного диода типа «Д231» показал, что расчет, проведенный по справочнику «Надежность ЭРИ» редакции 2006 г. позволяет

**Груды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2015, том 1**

получить нижнюю оценку такого показателя безотказности как вероятность безотказной работы и средней наработки до отказа. Для получения более точной оценки имеет смысл пользоваться моделью, приведенной в 217Plus [6].

Данный вывод правомерен для всей технологической группы «Кремниевый выпрямительный диод» класса «Полупроводниковые приборы».

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
2. ГОСТ РВ 20.39.302-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений.
3. 362.018 TV ред. 2-70.
4. Справочник «Надежность электрорадиоизделий» редакции 2006. 2006, - с. 641.
5. Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F. Department of Defense Washington DC, 1991, - p. 205.
6. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. Reliability Information Analysis Center, 2006, - p. 182.
7. Sensitivity Analysis of the 217Plus™ Component Models for Reliability Prediction of Electronic. Journal of the Korean Society for Quality Management / v.39 no.4, 2011, pp.507-515.