

5. Юрков, Н.К. Риски отказов сложных технических систем // Н.К. Юрков, В.А.Ермолаев, Ю.А. Романенко /Труды Международного симпозиума Надежность и качество. Т. 1. Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. – С. 46-49.
6. Юрков, Н.К. Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами (Монография) // Н.К.Юрков/ Пенза, ИИЦ Пенз. гос. ун-та, 2003, – 198 с.
7. Юрков, Н.К. Модели и метод организации концептуального мультипроектного управления // Н.К.Юрков, К.С. Петелин, И.М.Рыбаков/ Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 3(27). – С. 1С-18.
8. Кириллов В.И. Квалиметрия и системный анализ. – Минск: Новое знание: М.: ИНФРА-М, 2012. – 440 с.
9. Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня оружия – важный фактор его развития // Военный парад. – 1995 – № 1-2. – С. 174-176 (С. 87-89 – на англ. яз.).
10. Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. – М.: Радио и связь, 2004. – 552 с.
11. Юрков, Н.К. Безопасность сложных технических систем // Н.К.Юрков, / Вестник Пензенского государственного университета – 2013. – №1. – С. 129-134.
12. Семенов С.С., Шербинин В.В. Метод оценки технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб // Вопросы оборонной техники. Сер. 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. – М.: ФГУП "НТЦ "Информтехника", 2010. –Вып. 1 (242) – 2 (243). – 108 с. – С. 29-32.
13. Семенов С.С. Опыт научного признания новых методических подходов к оценке технического уровня образцов вооружения и военной техники на примере управляемых авиационных бомб // Воениприсасы. – 2007. – № 5-6. – 214 с.
14. Спиркин А.Г. Основы философии. – М.: Политиздат, 1988. – 592 с. –С. 179.
15. Цвирикун А.Д. Структура сложных систем. – М.: Советское радио, 1975. –200 с.
16. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. –М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
17. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288 – 2005. Национальный российский стандарт. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем ISO/IEC 15288:2002 (System engineering – System life cycle processes (IDT)). – М. Федеральное агентство по тех. регулированию и метрологии, 2006. – 54 с.
18. Половинкин В., Дышкантук А. Системный подход к оценке жизненного цикла вооружения ВМФ и методы его реализации // Морской сборник. – 2009. – № 7. – С. 23-28.
19. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. – СПб.: НИЦ "МОРИН-ТЕХ", 2001. – 412 с.
20. Самков Т.Д. Теория принятия решений: конспект лекций. – Новосибирск: – НГТУ, 2010. – 107 с.
21. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М.: Машино строение, 1988. – 328 с.
22. Основы синтеза систем летательных аппаратов / А.А. Лебедев, Г.Г. Аджимамудов, В.Н. Баранов и др. Под ред. А.А. Лебедева – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 224 с.
23. Райфа Г. Анализ решений (введение в проблему выбора в условиях неопределенности). – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. – 408 с.
24. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М. Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013. – 304 с.

УДК 615.035.4

Жаднов В.В.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОТКАЗНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ БАЗЫ

Рассмотрены вопросы исследования расчетной модели коэффициента, учитывающего степень жесткости условий эксплуатации в математических моделях интенсивностей отказов электрорадиоизделий, приведенных в отечественных справочниках по надежности. Показано, что использование статистических данных о распределении отказов электрорадиоизделий по видам внешних воздействий, а также результатов моделирования на ЭВМ конструкций радиоаппаратуры, позволяет в ряде случаев уточнить табличные значения коэффициента эксплуатации за счет использования значений локальных уровней внешних воздействий в месте установки электрорадиоизделий. Разработанная модель создана в рамках допущений и ограничений, принятых в действующих нормативных документах. Показана возможность применения модели на примере расчетной оценки характеристик безотказности и долговечности резистора.

Ключевые слова:

надежность, интенсивность отказов, внешние воздействующие факторы, моделирование на ЭВМ, электрорадиоизделие.

Введение

Для учета влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) в принятые в настоящее время математические модели интенсивностей отказов электрорадиоизделий (ЭРИ) введен «коэффициент эксплуатации», который характеризует степень жесткости условий эксплуатации [1]. Кроме того, аналогичным образом учитывается влияние жесткости условий эксплуатации и в моделях интенсивностей отказов ЭРИ, приведенных в зарубежных справочниках и стандартах (см., например, [2]).

Однако этот коэффициент характеризует влияние совокупности ВВФ, присущих данной группе эксплуатации аппаратуры, т.е. представляет собой интегральную оценку степени жесткости условий эксплуатации.

Вместе с тем в ряде работ (см., например, [3]), приведены модели интенсивностей отказов ЭРИ, в которых учитывается влияние каждого ВВФ. Однако эти модели до сих пор не нашли применения в инженерной практике расчетов надежности интенсивностей отказов ЭРИ, т.к. определение численных значений их коэффициентов требует проведения экспериментальных исследований и испытаний.

Альтернативный подход предложен в работах [4, 5], где показана возможность использования данных о распределении отказов аппаратуры по видам воздействий, полученных по результатам ее эксплуатации для получения «уточненной» оценки значения коэффициента эксплуатации. Однако и разработанная на этой основе модель не лишена недостатков, т.к. значение коэффициента эксплуатации в ней является функцией времени.

Поэтому разработка моделей интенсивностей отказов ЭРИ, учитывающих дифференцированное влияние ВВФ, и в настоящее время является актуальной задачей.

Математические модели интенсивностей отказов ЭРИ

В рекомендациях по использованию справочных данных, приведенных в [1], сказано, что значения эксплуатационной интенсивности отказов (λ_3) для большинства групп ЭРИ рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид:

$$\lambda_3 = \lambda_6 \cdot \prod_{i=1}^I K_i, \quad (1)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов ЭРИ; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; I – число учитываемых факторов.

Модели (1) распространяются на период постоянства интенсивности отказов во времени [1].

Для учета влияния фактора ВВФ на значение λ_3 в модель (1) введен «коэффициент эксплуатации» (K_3), который характеризует степень жесткости условий эксплуатации и показывает, во сколько раз интенсивность отказов ЭРИ в аппаратуре конкретного класса (группе эксплуатации аппаратуры по классификации [6]) выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре (группа 1.1) [1]. Значения K_3 приведённые в [1], многократно подтверждены результатами эксплуатации соответствующих групп аппаратуры. На рис. 1, в качестве примера, приведён фрагмент таблицы значений K_3 для класса «Резисторы».

Значения коэффициента жесткости условий эксплуатации K_3 для различных групп резисторов

Группа изделий	Значения K_3 по группам аппаратуры ГОСТ РВ 20.39.304-98													
	1.1	1.2	1.3 – 1.10	2.1.1, 2.1.2,	2.1.3,	2.1.5,	2.2, 2.4,	3.1	3.2	3.3, 3.4	4.1 – 4.9			5.1, 5.2
				2.3.1, 2.3.2	2.3.3	2.3.5	2.1.4, 2.3.4				запуска	свободного полета	бреющего полета	
Постоянные непроволочные	1	2	5	3	5	6	5	10	6	10	15	6	8	1

Рисунок 1 – Справочник «Надёжность ЭРИ»: фрагмент таблицы значений K_3

Как следует из рис. 1 при повышении степени жесткости условий эксплуатации у резисторов группы «Постоянные непроволочные» λ_3 может возрасти в 15 раз.

Математические модели коэффициента эксплуатации

В [1] указано, что при проведении расчетов надежности аппаратуры, конструктивные особенности и условия применения которой обеспечивают менее жесткие условия эксплуатации по сравнению с аппаратурой соответствующей группы, допускается принимать значение K_3 , соответствующее данной аппаратуре.

Основанием для этого могут служить данные о результатах испытаний, данные о надежности аналогов РЭА и т.п., включая и результаты расчетов уровней ВВФ, действующих на ЭРИ. Значения ВВФ в месте установки ЭРИ можно получить с помощью рекомендованного в [7] метода конечных элементов, который представляет собой расчётный компьютерный метод анализа воздействия тепловых, механических и др. нагрузок, прикладываемых к ЭРИ. На рис. 3, в качестве примера, приведено поле ускорений корпусов ЭРИ при воздействии гармонической вибрации, рассчитанное в подсистеме АСОНИКА-ТМ системы АСОНИКА [8].

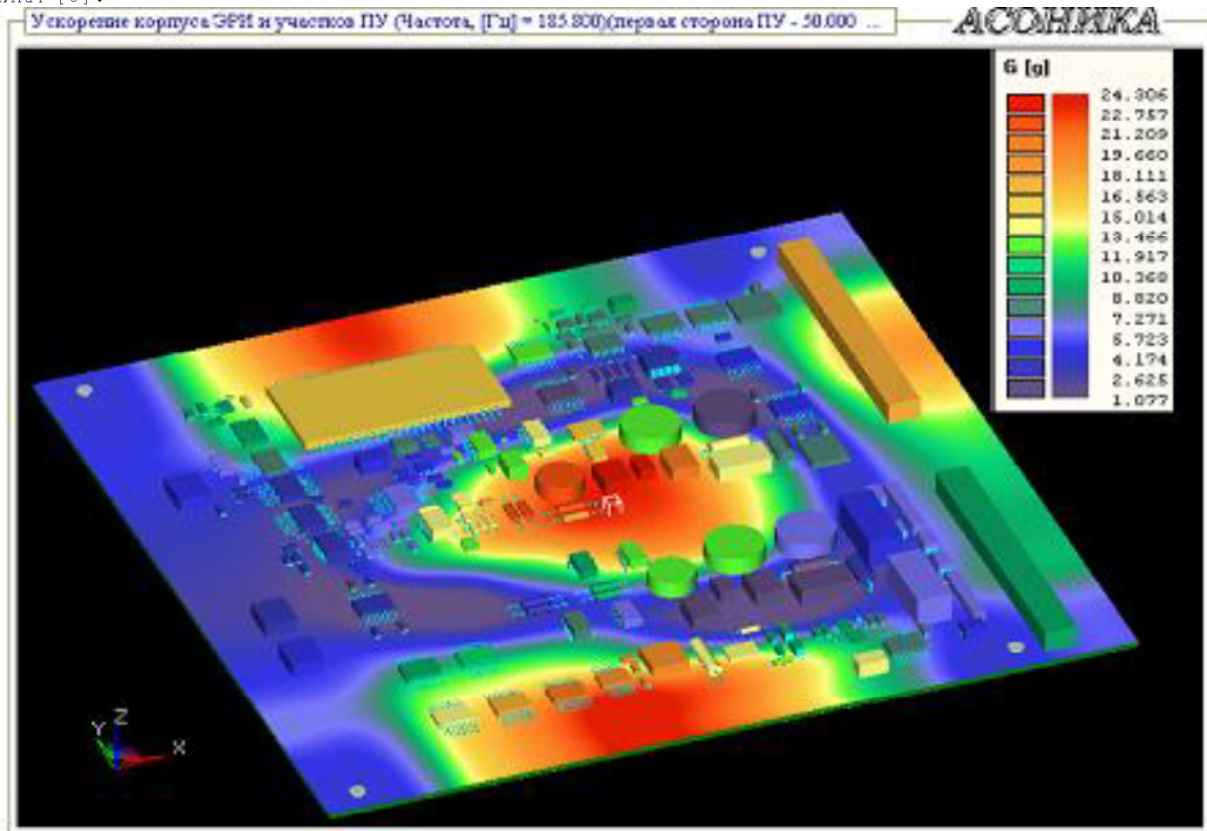


Рисунок 2 – Подсистема АСОНИКА-ТМ: Поле ускорений корпусов ЭРИ

Как видно из рис. 2, при заданных воздействиях в точках крепления печатного узла, значения ускорений у различных ЭРИ существенно отличаются друг от друга. Используя эти данные

можно подобрать такие группы аппаратуры по классификации [6], которые перекрывают расчётные значения воздействий. Другими словами, такие группы должны удовлетворять условию:

$$z_i^{pab} \leq z_{ij}^{focT} \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

где z_i^{pab} – расчётное значение i -го ВВФ, действующего на ЭРИ; z_{ij}^{focT} – предельное значение i -го ВВФ, приведённое в [6] для j -ой группы аппаратуры; I – общее число ВВФ, действующих на ЭРИ; J – количество групп аппаратуры в [6], содержащих i -й ВВФ.

Для каждого (i -го) ВВФ по таблицам [6] находят номера групп аппаратуры, удовлетворяющие условию (2), и для них по таблицам [1] определяются значения $K_{э, j}$, из которых находится минимальное значение коэффициента эксплуатации для каждого ВВФ – $K_{э}(z_i^{pab})$:

$$K_{э}(z_i^{pab}) = \min_{j=1, J} (K_{э, 1}, K_{э, 2}, \dots, K_{э, i}, \dots, K_{э, J}), \quad (3)$$

где $K_{э, j}$ – значение коэффициента эксплуатации, определенного для i -го ВВФ j -ой группы аппаратуры.

Окончательное значение $K^*_{э}$ принимается равным максимальному из всех значений $K_{э}(z_i^{pab})$:

$$K^*_{э} = \max_{i=1, I} (K_{э}(z_1^{pab}), K_{э}(z_2^{pab}), \dots, K_{э}(z_i^{pab}), \dots, K_{э}(z_I^{pab})), \quad (4)$$

где $K_{э}(z_i^{pab})$ – значение $K_{э}$, определяемое из условия (3).

Как следует из (4), при использовании такого подхода в случае, если значение хотя бы одного

$K_{э}(z_i^{pab})$ будет соответствовать группе аппаратуры, заданной для РЭА, то исходное значение $K_{э}$ не изменится (т.е. $K^*_{э} = K_{э}$), несмотря даже на то, что значения $K_{э}(z_i^{pab})$ для других ВВФ будут меньше.

Свободными от этого недостатка является модели интенсивностей отказов ЭРИ, приведенные в [3], в которых учитывается влияние каждого ВВФ. Однако для определения численных значений коэффициентов этих моделей не достаточно только данных о результатах испытаний или данных о надежности аналогов РЭА [1] и технических условий (ТУ) на ЭРИ, а требуется проведение экспериментальных исследований и испытаний ЭРИ [3], поэтому здесь их рассматривать не будем.

Другим подходом к формированию модели $K_{э}$ является метод, основанный на использовании данных о надежности аналогов РЭА, предложенный в [4, 5]. В качестве таких данных используется распределение отказов РЭА по видам воздействий. Такая статистика может быть получена с помощью «Системы классификации отказов». Структура информации об отказах (отказавшем изделии) и рекомендуемые категории используемых классификаторов, приведенная в [9], показана на рис. 3.

Структура информации об отказавшем изделии и рекомендуемые категории используемых классификаторов

Данные об отказавшем изделии	Компоненты данных	Рекомендуемые классификаторы и другие НТД
1. Общие данные	1.1. Наименование изделия	Общесоюзный классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции (ОКП)
	1.2. Предприятие-изготовитель изделия	Общесоюзный классификатор предприятий и организаций (ОКПО)
	1.3. Климатическое исполнение	ГОСТ 15150
2. Адрес отказа	2.1. Наименование функциональных систем, составных частей (СЧ) и комплектующих элементов (КЭ)	ОК
	2.2. Предприятие-изготовитель отказавшей СЧ (КЭ)	ОКПО
3. Условия эксплуатации	3.1. Климатический район	ГОСТ 16350 ГОСТ 24482 ГОСТ 25870
	3.2. Внешние воздействующие факторы (ВВФ)	ГОСТ 21964
	3.3. Места хранения	Государственный стандарт. Межотраслевой классификатор (МОК)
	3.4. Способы защиты от ВВФ	Государственный стандарт. МОК
4. Режимы эксплуатации (испытаний)	4.1. Этап эксплуатации (вид испытаний)	МОК, отраслевой классификатор (ОК)
	4.2. Режим работы (функционирования)	МОК, ОК
5. Характеристика отказа	5.1. Внешнее проявление	ОК
	5.2. Механизм отказа	ОК
	5.3. Вид отказа	ОК
	5.4. Причина возникновения	ОК
	5.5. Последствия отказа	МОК, ОК
6. Данные о восстановлении изделия	6.1. Способ восстановления	ОК
	6.2. Подразделение (лица), восстановившее изделие	ОК
7. Данные о наработке изделия до отказа (между отказами)	7.1. Вид наработки	ОК
	7.2. Единица измерения (час, км, цикл и т.д.)	ОК

Рисунок 3 – РД 50-699: Структура информации об отказах

Как видно из рис. 3, одним из типов данных об отказах изделия являются данные о ВВФ. Кроме того, при использовании в системе классификации отказов РЭА фасетного метода классификации, получение данных о распределении отказов РЭА по видам ВВФ не вызывает затруднений. На рис. 4, в качестве примера, показано типовое распределение отказов аппаратуры при эксплуатации по видам воздействий, приведённое в [10].

Тогда, если известно распределение процентов отказов аппаратуры по видам ВВФ (см. рис. 4), и для ЭРИ определены значения $K_{э}(z_i^{pab})$ для каждого ВВФ i -го вида, можно перейти от интегральной оценки значения $K_{э}$ к дифференциальной. В этом случае модель $K^*_{э}$ может быть представлена в виде [4, 5]:

$$K^*_{э} = - \frac{\ln \left(1 - \sum_{i=1}^I \frac{\%i}{100} \left(1 - e^{-K_{э}(z_i^{pab}) \lambda_{э}^* t} \right) \right)}{\lambda_{э}^* t}, \quad (5)$$

где $\%i$ – процент отказов по i -му ВВФ; I – количество ВВФ; $K_{э}(z_i^{pab})$ – значение $K_{э}$, определяемое из условия (3); $\lambda_{э}^*$ – значение эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ, рассчитанное по (1) для $K_{э} = 1$; t – время эксплуатации РЭА.

Как видно из (5), $K^*_{э}$ зависит от t . Рассмотрим эту зависимость на примере расчета $K^*_{э}$ для металлооксидного (металлодиэлектрического) посто-

янного резистора типа С2-23 (см. рис. 5), который предназначен для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока [11].



Рисунок 4 – Распределение отказов аппаратуры по видам ВВФ при эксплуатации



Рисунок 5 – Резистор типа С2-23

В качестве исходных данных примем следующие условия:

- группа аппаратуры по классификации [6], заданная в ТЗ на РЭА – 3.1;
- группа аппаратуры по классификации [6] по уровню вибрационных воздействий на резистор – 1.2;

Процент отказов аппаратуры по вибрационным воздействиям при эксплуатации примем равным 28% (см. рис. 4).

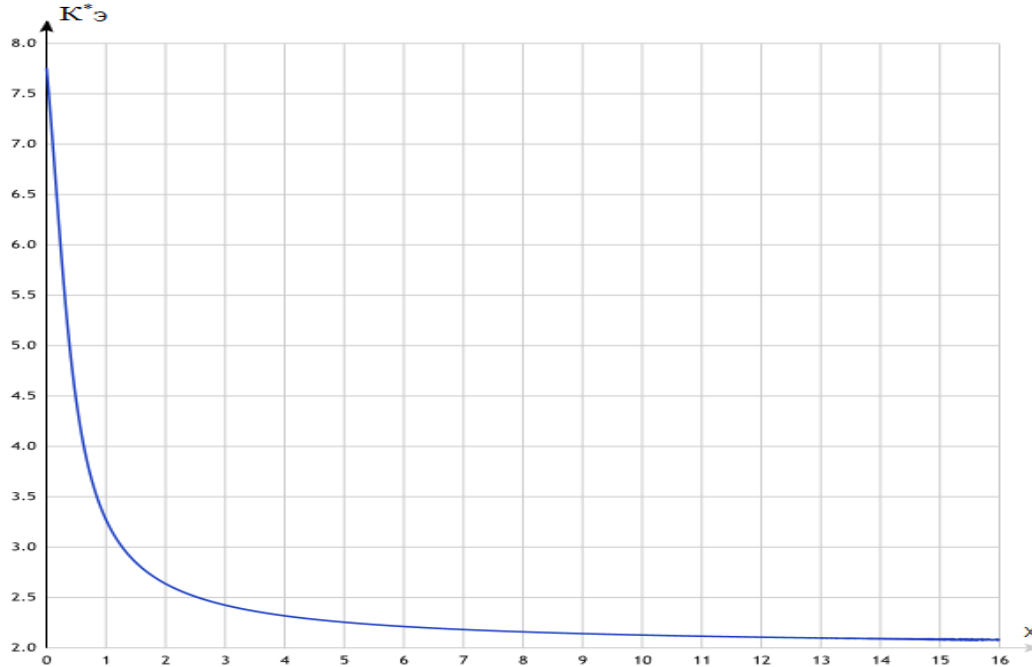


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента эксплуатации

Как видно из рис. 6, при $x \rightarrow 0$ значение $K^*_{э} \rightarrow 7,76$, а при $x \rightarrow \infty$ значение $K^*_{э} \rightarrow 2$.

В табл. 1 приведены значения $K^*_{э}$, полученные по модели (5) при изменении x от 0,0001 до 0,1,

что соответствует изменению вероятности безотказной работы $\{P\}$ от 0,9999 до 0,9.

Значения $K^*_{э}$

№ п/п	x	P	$K^*_{э}$	№ п/п	x	P	$K^*_{э}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	-	7	0,050	0,95	7,419
2	0,0001	0,9999	7,759	8	0,060	0,94	7,347
3	0,010	0,99	7,694	9	0,070	0,93	7,274
4	0,020	0,98	7,627	10	0,080	0,92	7,2
5	0,030	0,97	7,559	11	0,090	0,91	7,125
6	0,040	0,96	7,49	12	0,100	0,9	7,049

Таблица 1.

Как следует из табл. 1 при использовании модели (5) изменение x от 0,0001 до 0,1 приводит к снижению $K^*_{э}$ на 8,4 %. Поэтому при вероятностях безотказной работы ЭРИ близких к 1 модель (5) можно преобразовать к виду:

$$K^*_{э} = \sum_{i=1}^I \left[\frac{\%_i}{100} \cdot K_{э}(z_i^{p^{аб}}) \right], \quad (6)$$

где $\%_i$ – процент отказов по i -му ВВФ; I – количество ВВФ; $K_{э}(z_i^{p^{аб}})$ – значение $K_{э}$, определяемое из условия (3).

Следует отметить, что погрешность модели (6) зависит не только от λ_3 и t , но и от соотношений $\%_i$ и значений $K_{э}(z_i^{p^{аб}})$. Заметим, что при $P \rightarrow 1$ и одинаковых $\%_i$ и $K_{э}(z_i^{p^{аб}})$ погрешность модели (6) по отношению к модели (5) будет стремиться к 0.

Действительно:

$$K^*_{э} = \frac{28}{100} \cdot 2 + \frac{72}{100} \cdot 10 = 7,76$$

На рис. 7 приведен график зависимости P от x для резистора типа С2-23 при использовании моделей (5) и (6)

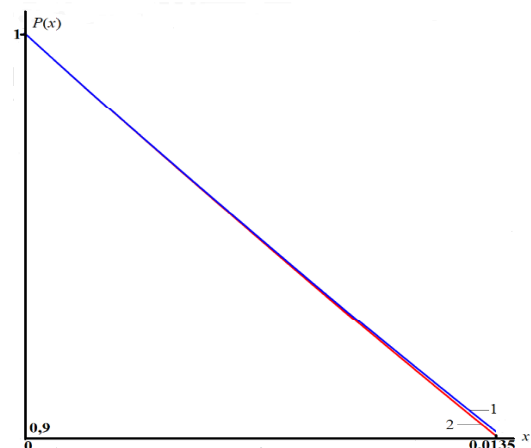


Рисунок 7 – Графики зависимости вероятности безотказной работы резистора типа С2-23: 1 – при использовании модели (5), 2 – при использовании модели (6)

В табл. 2 приведены значения вероятности безотказной работы резистора типа С2-23, полученные с использованием моделей (5) и (6) при изменении x от 0 до 0,013.

Как следует из табл. 2, при использовании и модели (6), и модели (5), значения вероятности безотказной работы резистора типа С2-23 практически совпадают, что позволяет сделать вывод о том, что модель (6) может применяться в инженерных расчетах [12].

Еще одним доводом в пользу использования модели (6) является то, что ее структура аналогична структуре модели интенсивности отказов для «сеансного» режима применения (см., например, [13]):

$$\lambda_3 = K_{иэ1} \cdot \lambda_1 + K_{иэ2} \cdot \lambda_2 + \dots + K_{иэj} \cdot \lambda_j, \quad (7)$$

Значения P

Таблица 2

№ п/п	x	P		№ п/п	x	P	
		модель (5)	модель (6)			модель (5)	модель (6)
1	0,000	1	1	8	0,007	С,9474	С,9471
2	0,001	0,9923	0,9923	9	0,008	С,9402	С,9398
3	0,002	0,9846	0,9846	10	0,009	С,933	С,9325
4	0,003	0,977	0,977	11	0,010	С,9259	С,9253
5	0,004	0,9695	0,9694	12	0,011	С,9189	С,9182
6	0,005	0,9621	0,9619	13	0,012	С,9119	С,9111
7	0,006	0,9547	0,9545	14	0,013	С,905	С,904

Сравнивая (7) и (8) можно провести аналогию между $K_{иэj}$ и $\%i$. Эта аналогия может оказаться существенной при оценке показателей долговечности ЭРИ [14].

Математические модели характеристик долговечности ЭРИ

Методики оценки показателей долговечности ЭРИ приведены в [15]. Так, например, гамма-процентный ресурс ЭРИ до списания в режиме работы ($T^*_{p\gamma}$) определяется по формуле [15]:

$$T^*_{p\gamma} = \frac{T_{p\gamma}}{K_{иэ} K_{н}}, \quad (9)$$

где $T_{p\gamma}$ – гамма-процентный ресурс ЭРИ до списания во всех режимах по ТУ; $K_{н}$ – коэффициент нагрузки по «критическому параметру»; $K_{иэ}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации.

Значения $T_{p\gamma}$ приведены в [1] или ТУ. На рис. 8, в качестве примера, приведён фрагмент таблицы значений $T_{p\gamma}$ для класса «Резисторы».

Характеристика надежности и справочные данные отдельных типов резисторов

Тип изделия	d, шт.	$\lambda_0 \cdot 10^6$, 1/ч	$T_{нм}$, тыс. ч	$T_{p\gamma}$, тыс. ч ($\gamma = 95\%$)	T_{xp} , лет
Резисторы постоянные непроволочные					
<i>Металлодиэлектрические (кроме прецизионных)</i>					
С2-23			50 (во всех режимах по ТУ); 100 ($t \leq 55^\circ\text{C}$, $P/P_n \leq 0,5$)	100 (во всех режимах по ТУ)	25

Рисунок 8 – Справочник «Надёжность ЭРИ»: фрагмент таблицы значений $T_{p\gamma}$

Как видно из рис. 8, критическими параметрами для резистора типа С2-23 являются рабочая температура и нагрузка по мощности, поэтому формула (5) справедлива в случае применения резистора в группе аппаратуры 1.1 по классификации [6]. В случае использования резистора в аппаратуре, группа которой по классификации [6], отлична от группы 1.1, формула (5) должна быть представлена в виде [16]:

$$T^*_{p\gamma} = \frac{T_{p\gamma}}{K_{иэ} K_{н} K_{э}}, \quad (10)$$

где $T_{p\gamma}$ – гамма-процентный ресурс ЭРИ до списания во всех режимах по ТУ; $K_{н}$ – коэффициент нагрузки по «критическому параметру»; $K_{иэ}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации; $K_{э}$ – коэффициент эксплуатации.

Найдем $T^*_{p\gamma}$ для резистора типа С2-23 для группы эксплуатации 3.1 при следующих данных:

$T_{p\gamma} = 100000$ ч. (см. рис. 8), $K_{э} = 10$ (см. рис. 1) и примем, что $K_{н} = K_{иэ} = 1$. Тогда:

$$T^*_{p\gamma} = \frac{100000}{10} = 10000 \text{ ч.}$$

При оценке $K_{э}$ по формуле (6) $K_{э} = K^*_{э} = 7,76$. Тогда значение $T^*_{p\gamma}$ будет равно:

$$T^*_{p\gamma} = \frac{100000}{7,76} = 12886,6 \text{ ч.}$$

Таким образом, при использовании модели (6) для оценки $K_{э}$ случае значение гамма-процентного ресурса до списания резистора типа С2-23 будет в 1,3 раза больше, чем рассчитанное по модели (10).

где $K_{иэj}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации ЭРИ в j -м режиме применения; λ_j – интенсивность отказов ЭРИ в j -м режиме применения; J – количество режимов применения ЭРИ.

Для сравнения, подставим (6) в (1) и после несложных преобразований получим:

$$\lambda_3 = \frac{\%i_1}{100} \cdot [K_{э}(z_1^{pab}) \cdot \lambda_3^1] + \frac{\%i_2}{100} \cdot [K_{э}(z_2^{pab}) \cdot \lambda_3^2] + \dots + \frac{\%i_I}{100} \cdot [K_{э}(z_I^{pab}) \cdot \lambda_3^I], \quad (8)$$

где $\%i$ – процент отказов по i -му ВВФ; $K_{э}(z_i^{pab})$ – значение $K_{э}$, определяемое из условия (3); λ_3^i – значение эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ, рассчитанное по (1) для $K_{э} = 1$; I – количество ВВФ.

Теперь рассмотрим расчет $T^*_{p\gamma}$, основанный на аналогии моделей (7) и (8). В [17] показано, что для «сеансного» режима применения ЭРИ его гамма-процентный ресурс до списания в режиме работы ($T^*_{p\gamma}$) определяется по формуле:

$$T^*_{p\gamma} = \sum_{j=1}^I K_{иэj} \cdot T_{p\gamma j}, \quad (11)$$

где $T_{p\gamma j}$ – гамма-процентный ресурс ЭРИ до списания во всех режимах по ТУ; $K_{иэj}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации ЭРИ в j -м режиме применения; J – количество режимов применения ЭРИ.

Тогда, используя аналогию между (7) и (8) можно записать, что:

$$T^*_{p\gamma} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{\%i}{100} \right) \cdot T^*_{p\gamma i}, \quad (12)$$

где $\%i$ – процент отказов по i -му ВВФ; I – количество ВВФ; $T^*_{p\gamma i}$ – гамма-процентный ресурс ЭРИ до списания при воздействии i -го ВВФ.

Значение $T^*_{p\gamma i}$ в (12) можно определить по формуле (10) при $K_{н} = K_{иэ} = 1$ и $K_{э} = K_{э}(z_i^{pab})$.

Найдем $T^*_{p\gamma}$ для резистора типа С2-23 при приведённых выше условиях:

$$T^*_{p\gamma} = \left(\frac{28}{100} \right) \cdot \frac{100000}{2} + \left(\frac{22}{100} \right) \cdot \frac{100000}{2} = 21200 \text{ ч.}$$

Как следует из полученных результатов, рассчитанное по модели (12) значение гамма-процентного ресурса до списания резистора типа С2-23 в 1,6 раза больше, чем рассчитанное по модели (10) при $K_{э} = 7,76$, и в 21 раз больше, чем при значении $K_{э}$, соответствующего группе эксплуатации 3.1, заданной в ТЗ на РЭА.

Заключение

Таким образом, использование моделей (6) и (12) позволяет уточнить значения характеристик безотказности и долговечности ЭРИ в случаях, когда уровни ВВФ в месте установки ЭРИ отличаются от уровней, приведённых в [6] для группы аппаратуры, заданной в ТЗ. Поскольку использование этих моделей повышает трудоёмкость расчетов, их следует применять в первую очередь для «критичных» ЭРИ. В качестве «критичных» ЭРИ следует рассматривать те, у которых рассчитанные по стандартизованным методикам характеристики надежности существенно ниже, чем у остальных.

Кроме того, расчетные модели получены в рамках принятых в настоящее время допущений и ограничений, поэтому они обладают ограниченной точностью, а при использовании программ моделирования физических процессов для расчета уровней воздействия ВВФ на ЭРИ добавляется еще и погрешность таких расчетов. Поэтому при использовании рассмотренных выше моделей требуется экспериментальное подтверждение прогнозных оценок показателей безотказности и долговечности, например, результатами испытаний или подконтрольной эксплуатации аналогов РЭА.

В работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта (№ 15-05-0029), в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надёжность ЭРИ: справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
2. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – USA: DoD, 2006.
3. Сотсков В.С. Основы теории и расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Высшая школа, 1970. – 270 с.
4. Жаднов В.В., Сарафанов А.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств: Учебное пособие. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2004. – 464 с.
5. Жаднов В.В., Гаршин А.А. Дифференцированная оценка влияния ВВФ при проектных исследованиях надёжности электронных компонентов. / Электронные компоненты. – 2010. – № 3. – с. 16-23.
6. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
7. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надёжности.
8. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н. Жаднов В.В. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. / под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 368 с. – т. 1.
9. РД 50-699-90. Методические указания. Надёжность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний.
10. Писарев В., Критенко М., Постнов В. Система испытаний – основа обеспечения надёжности. / Электроника НТВ. – 2002. – № 5. – с. 32-35.
11. ОЖ.0467.081 ТУ. Резисторы постоянные непроволочные металлодиэлектрические С2-23. Технические условия.
12. Жаднов В.В. Гаршин А.А. Исследование влияния ВВФ на надёжность вертолётной системы связи. / Надёжность и качество: Труды международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: ПГУ, 2010. – с. 415-419. – 1 т.
13. ОСТ 4Г 0.012.021-71 Аппаратура радиоэлектронная. Проектирование и комплектование ЗИП.
14. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Кулыгин В.Н., Лушпа И.Л. Компьютерное прогнозирование показателей долговечности вычислительной техники. / Системный администратор. – 2015. – № 12. – с. 92-95.
15. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
16. Жаднов В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / Надёжность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – с. 65-73.
17. Карапузов М.А., Полесский С.Н., Жаднов В.В. Влияние внешних возмущающих факторов на долговечность СВЧ-устройств. / Надёжность и качество сложных систем. – 2014. – № 2. – с. 14-21.

УДК 539.124.6

Графутин¹В.И., Ельникова¹Л.В., Илюхина О.В., Прокопьев¹Е.П., Тимошенко²С.П., Фунтиков²Ю.В., Чаплыгин² Ю.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт», ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ»

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ НАНООБЪЕКТОВ В ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ, ДЕФЕКТНЫХ МАТЕРИАЛАХ И НАНОМАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И В ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПО МЕТОДУ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Показано, что одним из эффективных методов определения размеров нанобъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции в ИТЭР материалах (например, в пористых системах, дефектных материалах и особенно наноматериалах) является метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Дан краткий обзор экспериментальных исследований нанобъектов в кварце, порошках кварца, пористом кремнии, кремнии и металлах (сплавах), облученных нейтронами и протонами.

Известно [1-43], что позитроны эффективно зондируют свободные объемы нанобъектов с размерами в наностромном и нанометровом диапазонах как в металлах и сплавах, так и в полупроводниках и пористых системах. Особую важность представляет возможность определения размеров нанобъектов в ИТЭР материалах (<http://iterrf.ru/>), облученных нейтронами. Для этого необходимо проведение комплексных исследований дефектной структуры ИТЭР материалов, содержащих полости нанометровых размеров (вакансии, вакансионные кластеры, поры) с использованием различных методов позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Это позволяет установить связи между экспериментально измеряемыми параметрами аннигиляционных спектров и характеристиками нанодфектов (типом, размером, концентрацией) в этих материалах. При этом поведение радиационных дефектов нанометрового размера оказывается весьма важным.

Выполнение такого рода исследований будет способствовать накоплению фундаментальных знаний о радиационных повреждениях нейтронами в ИТЭР материалах, развитию теоретических моделей, описывающих свойства и поведение наноразмерных дефектов. Нами было показано, что одним из эффективных методов определения средних размеров цилиндрических и сферических нанобъектов \bar{R} (свободных объемов пор, полостей, пустот и т.д.), их средних значений концентрации \bar{N} и химического состава в месте аннигиляции позитрона в пористых системах и некоторых дефектных материалах (и в большом числе технически важных материалах и наноматериалах) является метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) [1-3]. Это позволяет определять средние значения доли свободного пространства $\bar{V}_{rad} = (4/3)\pi\bar{R}^3\bar{N}$ образующегося в материалах электронной и ядерной техники