

Анализ влияния входного контроля и дополнительных испытаний на надежность электронной компонентной базы

А. Я. Кулибаба, *ncseo@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Сашов, *к. т. н., ncseo@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. К. Суконкин, *ncseo@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Штукарев, *ncseo@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Электронная компонентная база (ЭКБ) для ракетно-космической техники (РКТ) подвергается входному контролю и дополнительным испытаниям в испытательных центрах. Благодаря этому, за счет выявления бракованных и потенциально ненадежных изделий, снижается средняя по партии интенсивность отказов ЭКБ. Количественно данный вклад можно оценить путем введения понижающего коэффициента влияния испытаний входного контроля (ВК) и дополнительных испытаний (ДИ) на интенсивность отказов ЭКБ — $K_{И}$, на который умножается справочное значение интенсивности отказов.

Значения $K_{И}$ можно оценить следующими путями: с помощью статистики отбраковки ЭКБ в испытательных центрах; сравнительным анализом коэффициентов, характеризующих уровень качества, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ.

В результате анализа было получено усредненное значение $K_{И}$, которое можно использовать при проектной оценке надежности аппаратуры РКТ.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, электронная компонентная база, надежность, дополнительные испытания

Analysis of the Influence of Incoming Inspection and Additional Tests on the Reliability of Electrical, Electronic, and Electromechanical Parts

A. Ya. Kulibaba, *ncseo@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Sashov, *Cand. Sci. (Engineering), ncseo@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. K. Sukonkin, *ncseo@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Shtukarev, *ncseo@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Electrical, electronic, and electromechanical (EEE) parts for rocket and space technology are subjected to incoming inspection and additional tests in test centers. This reduces the batch-average failure rate of EEE parts by identifying faulty and potentially unreliable products. This contribution can be quantified by introducing a reduction factor in the impact of incoming inspection tests and additional tests on the failure rate of EEE parts, K_T , by which the reference value of the failure rate is multiplied.

The K_T values can be evaluated by the following methods:

– The statistics of EEE parts rejection in test centers;

– A comparative analysis of the coefficients characterizing the quality level given in the manuals on EEE parts reliability.

As a result of the analysis an average K_T value was obtained, which can be used for the design evaluation of the reliability of rocket and space technology equipment.

Keywords: rocket and space technology, electrical, electronic, and electromechanical (EEE) parts, reliability, additional tests

Введение

При разработке изделий космической техники большое внимание уделяется ее надежности из-за высокой стоимости, важности решаемых задач и невозможности обслуживания (ремонта) на орбите. В настоящее время при проектной оценке надежности данных изделий ракетно-космической техники (РКТ) активно используются соответствующие справочники. При этом существует несколько проблем:

- справочники по надежности электронной компонентной базы (ЭКБ) [1, 2] не перевыпускались с 2006 г. и не включают статистику по отказам за последние 14 лет;

- не учитывается, что постоянно совершенствуются методы и средства входного контроля, в том числе переход от выборочного к сплошному входному контролю (ВК) и дополнительных испытаний (ДИ) ЭКБ.

Целью данной работы является оценивание коэффициентов $K_{И}$. Их значения можно оценить различными путями [3, 4].

В рамках данной работы поставлены задачи получения оценок $K_{И}$ с помощью:

- статистики отбраковки ЭКБ в испытательных центрах (метод 1);
- сравнительного анализа различных уровней качества изделий, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ (метод 2);
- эмпирических данных (метод 3).

Методы оценки коэффициентов ВК и ДИ

Метод 1

Оценить коэффициенты влияния ВК и ДИ на показатели надежности партий ЭКБ можно на основе статистики отказов ЭКБ при проведении испытаний в испытательных центрах. Для этого существует методика, изложенная в [5], согласно которой требуется оценить верхнюю доверительную границу для интенсивности отказов λ , $ч^{-1}$ по формуле:

$$\lambda = \frac{\chi^2(P_{\text{дов}}, r)}{2 \cdot N \cdot T_{\text{САС}}}, \quad (1)$$

где $\chi^2(\alpha, k)$ — квантиль χ^2 распределения с k степенями свободы и доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$ (справочное значение);

r — количество изделий ЭКБ, потенциально могущих отказать за срок активного существования (САС), шт.;

N — количество изделий ЭКБ, примененных в изделии РКТ, шт.;

$T_{\text{САС}}$ — срок активного существования изделия, ч.

Получаемые при расчете оценки интенсивности отказов основаны на предположении, что выявленная на ВК и ДИ дефектная или потенциально ненадежная ЭКБ откажет в течение срока активного существования изделия. Коэффициент влияния ВК и ДИ на показатели надежности изделий определяется по формуле:

$$K_{И} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad (2)$$

где λ_1 — верхняя доверительная граница интенсивности отказов для групп ЭКБ, прошедших ВК и ДИ, $ч^{-1}$;

λ_2 — верхняя доверительная граница интенсивности отказов для групп ЭКБ, не прошедших ВК и ДИ и содержащих дефектные или потенциально ненадежные изделия, $ч^{-1}$.

Используя данную методику и статистику выявленных в 2019 г. отказов ЭКБ в испытательном центре АО «Российские космические системы», были получены оценки $K_{И}$ для ЭКБ, изготовленной по техническим условиям (ТУ) и без ТУ, которые приведены в табл. 1.

В целях повышения достоверности были также получены значения $K_{И}$ на основе статистики отказов ЭКБ в АО «Российские космические системы» за последние 3 года (с 2017 по 2019 гг.), а результаты представлены в сводной табл. 2.

В связи с тем, что результаты оценки коэффициентов $K_{И}$ в табл. 2 сильно разнятся, предлагается усредненный по всем классам электрорадиоизделий (ЭРИ) коэффициент влияния ВК и ДИ на показатели надежности на основе статистики испытаний АО «Российские космические системы» за 2017–2019 гг., который равен 0,50 ($K_{И} = 0,50$).

Таблица 1. Оценка $K_{И}$ для изделий ЭКБ, изготавливаемых по ТУ/без ТУ, полученная по результатам ВК, ДИ в АО «Российские космические системы» в 2019 г.

Класс ЭРИ	Кол-во испытанной ЭКБ (N), шт.	Кол-во отказов на ВК и ДИ (R), шт.	Ожидаемое число отказов за $T_{САС}$, шт.		Ожидаемая интенсивность отказов, $ч^{-1}$		$K_{И} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$
			с ВК и ДИ (r_1)	без ВК и ДИ ($r_2 = R + r_1$)	с ВК и ДИ (λ_1)	без ВК и ДИ (λ_2)	
Микросхемы по ТУ	49 934	781	1438	2219	$3,06 \cdot 10^{-7}$	$4,67 \cdot 10^{-7}$	0,66
Микросхемы без ТУ	44 870	5198	1914	7112	$4,50 \cdot 10^{-7}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$	0,28
Транзисторы по ТУ	15 741	151	287	438	$2,09 \cdot 10^{-7}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	0,67
Транзисторы без ТУ	9998	735	43	778	$6,09 \cdot 10^{-8}$	$8,46 \cdot 10^{-7}$	0,07
Диоды по ТУ	38 778	159	1147	1306	$3,17 \cdot 10^{-7}$	$3,59 \cdot 10^{-7}$	0,88
Диоды без ТУ	29 373	4345	109	4454	$4,63 \cdot 10^{-8}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$	0,03
Оптроны по ТУ	554	22	8	30	$3,14 \cdot 10^{-7}$	$8,20 \cdot 10^{-7}$	0,38
Оптроны без ТУ	8018	319	598	917	$8,20 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$	0,66
Конденсаторы по ТУ	109 224	1397	1124	2521	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$2,42 \cdot 10^{-7}$	0,46
Конденсаторы без ТУ	203 574	6442	363	6805	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-7}$	0,06
Резисторы по ТУ	257 806	74	619	693	$2,64 \cdot 10^{-8}$	$2,94 \cdot 10^{-8}$	0,90
Резисторы без ТУ	181 962	126	226	352	$1,45 \cdot 10^{-8}$	$2,19 \cdot 10^{-8}$	0,66
Индуктивности по ТУ	2702	7	6	13	$5,39 \cdot 10^{-8}$	$8,93 \cdot 10^{-8}$	0,60
Индуктивности без ТУ	13 195	117	19	136	$2,41 \cdot 10^{-8}$	$1,26 \cdot 10^{-7}$	0,19
Соединители по ТУ	26 740	615	41	656	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$2,69 \cdot 10^{-7}$	0,08
Соединители без ТУ	6049	119	17	136	$4,85 \cdot 10^{-8}$	$2,74 \cdot 10^{-7}$	0,18
Фильтры по ТУ	964	1	31	32	$4,83 \cdot 10^{-7}$	$4,96 \cdot 10^{-7}$	0,97
Фильтры без ТУ	7428	310	99	409	$1,68 \cdot 10^{-7}$	$6,17 \cdot 10^{-7}$	0,27

Примечание: r_1 — ожидаемое число отказов за $T_{САС}$ по [1]; r_2 — ожидаемое число отказов за $T_{САС}$ без ВК и ДИ; λ_1 и λ_2 — верхняя доверительная граница интенсивности отказов (1) ($\lambda_1 = \chi^2(\alpha, r_1)/(2 \cdot N \cdot T_{САС})$, $\lambda_2 = \chi^2(\alpha, r_2)/(2 \cdot N \cdot T_{САС})$), где $\chi^2(P_{дов}, k)$ — квантиль χ^2 распределения с k степенями свободы и доверительной вероятностью $P_{дов} = 99\%$. Для примера вычисления λ_1 и λ_2 по (1) выбрано $T_{САС} = 100\,000$ часов ($K_{И}$ не зависит от $T_{САС}$).

Метод 2

На сегодняшний день для оценки эксплуатационной интенсивности отказов ЭКБ используются справочники «Надежность ЭРИ ОП» [1] и «Надежность ЭРИ ИП» [2], а за рубежом — справочник MIL-HDBK-217F [6] и др. Общий вид модели для оценки эксплуатационной интенсивности отказов описывается формулой

$$\lambda_3 = \lambda_6 \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где K_i — коэффициенты, учитывающие изменения интенсивности отказов в зависимости от различных факторов;

n — число учитываемых факторов.

Во всех моделях для ЭКБ используется коэффициент уровня качества $K_{пр}$ или π_q . Данный коэффициент характеризует требования к производству, в том числе объемы испытаний ЭКБ.

Поэтому другим путем получения оценок $K_{И}$ может быть сравнительный анализ коэффициентов для различных уровней качества изделий, приве-

Таблица 2. Оценки $K_{И}$ для изделий ЭКБ, изготавливаемых по ТУ/без ТУ, полученные по результатам ВК, ДИ в АО «Российские космические системы» с 2017 по 2019 гг.

Класс ЭРИ	Оценка $K_{И}$ для ЭКБ, изготавливаемой по ТУ/без ТУ								
	2017 г.			2018 г.			2019 г.		
	$\lambda_1, ч^{-1}$	$\lambda_2, ч^{-1}$	$K_{И}$	$\lambda_1, ч^{-1}$	$\lambda_2, ч^{-1}$	$K_{И}$	$\lambda_1, ч^{-1}$	$\lambda_2, ч^{-1}$	$K_{И}$
Микросхемы по ТУ	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	0,72	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	0,82	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	0,66
Микросхемы без ТУ	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	0,52	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	0,62	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,28
Транзисторы по ТУ	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	0,41	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	0,74	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	0,67
Транзисторы без ТУ	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,08	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	0,29	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	0,07
Диоды по ТУ	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	0,74	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	0,78	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	0,88
Диоды без ТУ	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0,13	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0,14	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,03
Оптроны по ТУ	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,42	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	0,63	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	0,38
Оптроны без ТУ	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	0,91	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,61	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,66
Конденсаторы по ТУ	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,89	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,80	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	0,46
Конденсаторы без ТУ	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,18	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,18	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0,06
Резисторы по ТУ	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	0,72	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	0,84	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0,90
Резисторы без ТУ	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	0,22	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0,49	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,66
Индуктивности по ТУ	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	0,11	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	1,00	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$	0,60
Индуктивности без ТУ	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,06	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	0,14	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	0,19
Соединители по ТУ	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	0,33	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	0,14	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0,08
Соединители без ТУ	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	0,19	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	0,87	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0,18
Фильтры по ТУ	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	0,59	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	0,84	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,97
Фильтры без ТУ	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	0,95	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,76	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	0,27

денных в справочниках по надежности ЭКБ. Использование данного подхода представляет научную новизну статьи. Коэффициент влияния ВК и ДИ на показатели надежности можно оценить отношением:

$$K_{И} = \frac{\pi_{q1}}{\pi_{q2}} \quad \text{или} \quad K_{И} = \frac{K_{пр.1}}{K_{пр.2}}, \quad (4)$$

где π_{q1} , $K_{пр.1}$ — значение коэффициента для более высокого уровня качества;

π_{q2} , $K_{пр.2}$ — значение коэффициента для более низкого уровня качества.

Рассмотрим порядок вычисления коэффициента $K_{И}$ на примере интегральных микросхем (ИМС) для коэффициентов уровней качества «В-1» и «Commercial». В справочнике MIL-HDBK-217F [4] указано, что с помощью определенного объема испы-

таний уровень качества ИМС можно повысить от «Commercial» до «В-1». При соответствии ИМС уровню качества «В-1» (с ВК и ДИ) $\pi_{q1} = 2$; для уровня качества «Commercial» (без ВК и ДИ) $\pi_{q2} = 10$. Тогда коэффициент влияния ВК и ДИ на показатели надежности для ИМС, вычисленный по (4), равен $K_{И} = 0,2$.

В табл. 3 рассчитаны коэффициенты $K_{И}$ по двум соседним уровням качества, по которым можно судить о вкладе ВК и ДИ в повышение показателей надежности партий ЭКБ.

Анализируя данные, приведенные в табл. 3, можно получить усредненный по группам коэффициент влияния ВК и ДИ на показатели надежности партий ЭКБ на основе справочников, равный 0,34 ($K_{И} = 0,34$).

Таблица 3. Значения коэффициентов влияния ВК и ДИ на показатели надежности партий ЭКБ, рассчитанных по соседним уровням качества

Класс ЭРИ	Оценка $K_{И}$ для ЭКБ, определенная по справочнику								
	Надежность ЭРИ [1]			Надежность ЭРИ ИП [2]			MIL-HDBK-217F [6]		
	$K_{пр.1}$	$K_{пр.2}$	$K_{И}$	$K_{пр.1}$	$K_{пр.2}$	$K_{И}$	π_{q1}	π_{q2}	$K_{И}$
Микросхемы	0,30	1	0,30	2	10	0,20	2	10	0,20
Транзисторы	0,32	1	0,32	5	25	0,20	2,4	5,5	0,44
Диоды	0,35	1	0,35	2,4	5,5	0,44	2,4	5,5	0,44
Оптроны	0,60	1	0,60	2,4	5,5	0,44	2,4	5,5	0,44
Конденсаторы	0,30	1	0,30	3	10	0,30	3	10	0,30
Резисторы	0,37	1	0,37	3	10	0,30	1	3	0,33
Индуктивности	0,20	1	0,20	1	3	0,33	4	20	0,20
Соединители	0,50	1	0,50	1	2	0,50	2	20	0,1

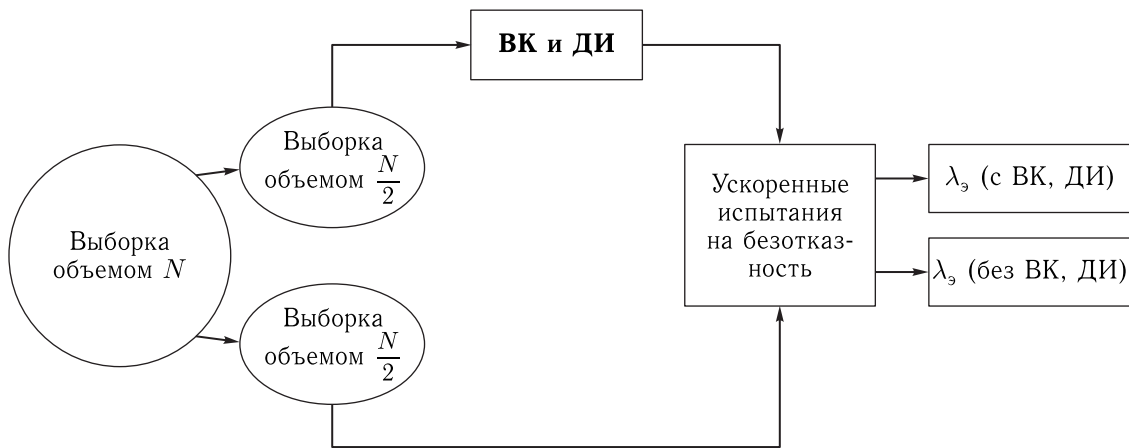


Рисунок. Эмпирический подход определения коэффициентов ВК и ДИ

Метод 3

В связи с тем, что коэффициенты, полученные разными способами, сильно различаются, требуется их экспериментальное подтверждение. Для этого, как было предложено в [7], рассматривается получение количественных оценок значений коэффициентов влияния ВК и ДИ на показатели надежности партий ЭКБ на основе экспериментальных значений эксплуатационной интенсивности отказов, определенных по результатам испытаний. Схема данного подхода представлена на рисунке. Оценка эксплуатационной интенсивности отказов проводится с помощью ускоренных испытаний групп ЭКБ, прошедших и не прошедших ВК и ДИ, с последующим

анализом результатов и получением коэффициентов влияния испытаний на показатели надежности партий ЭКБ.

Для предложенного подхода была проведена оценка минимально необходимых объемов выборки и длительности испытаний для различных классов ЭРИ. Результаты представлены в табл. 4.

Анализируя данные, приведенные в табл. 4, видим, что эмпирическую оценку коэффициентов влияния ВК и ДИ на показатели надежности достаточно сложно провести силами испытательного центра, поэтому ее целесообразно осуществлять силами отрасли микроэлектроники с помощью сбора информации об отказах на предприятиях отрасли.

Таблица 4. Результаты оценки необходимого объема выборки и длительности испытаний

Класс ЭРИ	Оценка объема испытаний для ЭКБ, изготавливаемой									
	по ТУ					без ТУ				
	K_y	$T_{САС}$, ч	λ , ч ⁻¹	N , шт.	$T_{исп}$, ч	K_y	$T_{САС}$, ч	λ , ч ⁻¹	N , шт.	$T_{исп}$, ч
Микросхемы	47,6	100 000	$2 \cdot 10^{-8}$	2338	2103	50,2	100 000	$3 \cdot 10^{-8}$	1536	1992
Транзисторы	13,9	100 000	$3 \cdot 10^{-8}$	1440	7215	10,4	100 000	$2 \cdot 10^{-7}$	224	9629
Диоды	9,3	100 000	$5 \cdot 10^{-8}$	940	10 786	5,9	100 000	$1 \cdot 10^{-8}$	4606	17 023
Оптроны	8,9	100 000	$1 \cdot 10^{-7}$	356	11 197	2,4	100 000	$8 \cdot 10^{-7}$	62	41 556
Конденсаторы	17	100 000	$1 \cdot 10^{-7}$	384	5890	33,6	100 000	$6 \cdot 10^{-9}$	7196	2977
Резисторы	5,4	100 000	$7 \cdot 10^{-8}$	650	18 464	5,9	100 000	$2 \cdot 10^{-8}$	2076	16 959
Индуктивности	19,4	100 000	$4 \cdot 10^{-9}$	11 514	5163	2,2	100 000	$3 \cdot 10^{-8}$	1746	44 865
Соединители	68,1	100 000	$2 \cdot 10^{-8}$	3072	1469	1,8	100 000	$3 \cdot 10^{-8}$	1646	54 673

Примечание: K_y — коэффициент ускорения, оценен для типового представителя каждой группы ЭКБ; $T_{исп}$ — необходимое время испытаний, полученное для типовой наработки $T_{САС}$ и коэффициента ускорения K_y ($T_{исп} = T_{САС}/K_y$); N — объем выборки при испытаниях, делится пополам (группы с ВК, ДИ и без ВК, ДИ). Значение N получено из формулы (1) для определения значений λ величин, близких к справочным [1, 2], при условии нуля отказов ($r = 0$) в группе с ВК, ДИ, $P_{дов} = 90\%$.

Заключение

Выполненный в статье анализ показал, что проведение ВК и ДИ позволяет в среднем снизить оценку эксплуатационной интенсивности отказов ЭКБ на 50–66% (что соответствует значениям K_I в 0,5 и 0,34). Таким образом, на стадиях разработки, модернизации или производства изделий РКТ целесообразно при расчете их оценки надежности использовать усредненное значение K_I , равное 0,42. Данное значение следует подтвердить путем сбора, обработки и анализа информации по отказам ЭКБ на предприятиях ракетно-космической отрасли, после чего предлагается включить K_I в справочники по надежности ЭКБ [1, 2].

Список литературы

1. Надежность электрорадиоизделий: Справочник / Научный руководитель С. Ф. Прытков. М.: ФГУ 22 ЦНИИ МО РФ, 2004. 620 с.
2. Надежность ЭРИ ИП: Справочник / Научный руководитель С. Ф. Прытков. М.: ФГУ 22 ЦНИИ МО РФ, 2006. 52 с.
3. Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение, 2006, № 10. С. 50–56.
4. Федосов В. В., Патраев В. Е. Оценка влияния разрушающего физического анализа на характеристики безотказности изделий микроэлектроники, устанавливаемых в бортовую аппаратуру космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение, 2008, № 1. С. 37–40.
5. РД 134-0165-2009. Нормативный документ по стандартизации РКТ. Требования, объем и порядок проведения дополнительных испытаний электрорадиоизделий для комплектования автоматических космических аппаратов длительного функционирования. СПб.: Электронстандарт, 2009. 199 с.
6. MIL-HDBK-217F. Military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC, 1991. 205 с.
7. Кулибаба А. Я., Сашов А. А., Суконкин М. К., Штукарёв А. Ю. Анализ влияния входного контроля и дополнительных испытаний на надежность партий электронной компонентной базы // Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: ФГБОУ ВО «СибГУ им. М. Ф. Решетнева», 2019. С. 352–354.