



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ\*

*Рассмотрены вопросы применения статистического моделирования для расчетов показателей долговечности электронных средств. Цель исследования – повышение качества проектирования бортовых электронных средств космических аппаратов с длительными сроками активного существования в результате совершенствования метода расчета ресурса, учитывающего вероятностные характеристики ресурса электронных компонентов.*

*Объект исследования – типовая методика расчетной оценки ресурса электронных средств на этапе проектирования по данным о характеристиках долговечности электронных компонентов.*

*Предмет исследования – методы, модели и алгоритмы, применимые для анализа проектного уровня долговечности электронных средств.*

*Для исследования эффективности статистического моделирования разработана компьютерная программа и протестирована достоверность ее работы. С помощью данной программы проведены вычислительные эксперименты. Сравнение результатов статистического моделирования и расчетов по типовой методике позволило выявить ряд существенных ограничений детерминированного метода.*

*В типовой методике принято допущение, что коэффициент вариации ресурса – постоянная величина для всех электронных компонентов. Анализ справочных данных о характеристиках долговечности электронных компонентов показал различие коэффициентов вариации электронных компонентов разных типов. Проведенные расчеты подтвердили необходимость учета значений коэффициентов вариации ресурса электронных компонентов при определении ресурса электронных средств.*

*Кроме того, в типовой методике принято, что ресурс электронного средства, которое содержит электронные компоненты с одинаковыми значениями ресурса, равен ресурсу электронного средства, которое содержит только один такой компонент. Вычислительные эксперименты показали, что ресурс электронного средства, которое содержит электронные компоненты с одинаковыми значениями ресурса, меньше ресурса электронного средства, которое содержит только один такой компонент.*

*На основе проведенных исследований определена область применения типовой методики и доказана эффективность статистического моделирования для автоматизации проектных исследований показателей долговечности электронных средств. Результаты, которые получают методом статистического моделирования, должны корректироваться по результатам испытаний и подконтрольной эксплуатации электронных средств.*

**Ключевые слова:** электронное средство; надежность; долговечность; ресурс; автоматизация проектирования; имитационное моделирование.

**V. V. Zhadnov, V. N. Kulygin**

(National Research University “Higher School of Economics”, Moscow, Russia)

## APPLICATION OF THE STATISTICAL MODELING METHOD FOR AUTOMATION OF PREDICTING DURABILITY IN DESIGNING ELECTRONIC MEANS

*The article discusses the application of statistical modeling for the durability prediction of electronic equipment. Durability indicators are one of the important characteristics of onboard electronic equipment of spacecraft with long terms of active existence.*

*The purpose of the study is to improve the quality of design work by improving the method of calculating the life of electronic equipment, taking into account the probabilistic characteristics of the life components of its electronic components.*

*The object of the study is a typical procedure for calculating the life of electronic equipment at the design stage from data on the characteristics of the durability of electronic components.*

*The subject of the study are methods, models and algorithms applicable to the analysis of the design level of the durability of electronic equipment.*

*To study the effectiveness of statistical modeling, software was developed and the reliability of its work was tested. With the help of this software, computational experiments were carried out. Comparison of the results of statistical modeling and calculations by a typical methodology made it possible to identify a number of significant limitations of the deterministic method.*

*In the standard methodology, it is assumed that the variation coefficient of life is a constant for all electronic components. But the analysis of Data Sheet of electronic components has shown that the values of the variation coefficient can be different for electronic components of different types. The calculations have confirmed the need to take into account the values of the variation coefficient of life in predicting the durability of electronic equipment.*

*In addition, in the standard methodology it is assumed that the life of electronic equipment that contains electronic components with the same life values will be equal to the life of electronic equipment that contains only one such electronic component. Computational experiments have shown that the life of electronic equipment that contains electronic components with the same life values will be less than the life of electronic equipment that contains only one such electronic component.*

*Based on the studies, the scope of the standard methodology was determined and the effectiveness of statistical modeling was proved. However, the results obtained by the statistical modeling method should be corrected by the results of the tests and the controlled operation of electronic equipment.*

**Keywords:** Electronic means; Reliability; Durability; Resource; Design automation; Simulation.

*Статья поступила в редакцию 20.12.2017 г.*

\* В статье использованы результаты, полученные при выполнении проекта № 15-05-0029 в рамках программы «Научный фонд НИУ ВШЭ», 2015 г.

## Введение

На ранних этапах проектирования электронных средств для подтверждения возможности достижения требуемых показателей надежности (в том числе долговечности) используются расчетные методы. Однако, если для автоматизации расчетов показателей безотказности созданы отечественные программные средства (системы АСРН и АСОНИКА-К-СЧ), а также зарубежные (системы RAM Commander, WQS, BlockSim и др.), то расчеты показателей долговечности до настоящего времени не автоматизированы. Отчасти это обусловлено простотой стандартизированной методики расчета долговечности, но при этом приходится мириться с целым рядом допущений и ограничений, адекватность которых вызывает сомнения. Поэтому поставлена задача проверки стандартизированной методики альтернативным методом создания программного обеспечения и обоснования целесообразности его применения при расчетах показателей долговечности электронных средств на ранних этапах проектирования.

## Постановка задачи

Исходные данные задачи прогнозирования ресурса *электронных средств* (ЭС) – характеристики долговечности комплектующих ее *электрорадиоизделий* (ЭРИ): гамма-процентный ресурс  $T_{p,\gamma}$  и минимальная наработка  $T_{н.м.}$ . Результатом расчетов является гамма-процентный ресурс ЭС, который представляет собой время, в течение которого ЭС не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , %. Критерием предельного состояния ЭС согласно [1] является израсходование ресурса заданным процентом комплектующих его ЭРИ (в «наихудшем случае» – любым элементом). Исходя из этого, математическая задача прогнозирования ресурса ЭС сводится к решению уравнения относительно  $T_{p,\gamma_{ЭС}}$

$$\frac{\gamma}{100} = \text{Вер} \left( T_{p,\gamma_1} \geq T_{p,\gamma_{ЭС}} \mid T_{p,\gamma_2} \geq T_{p,\gamma_{ЭС}} \right), \quad (1)$$

где  $T_{p,\gamma_1}$ ,  $T_{p,\gamma_2}$  – вектор соответственно ресурсов всех компонентов и ресурсов компонентов, которые могут израсходовать свой ресурс.

Для «наихудшего случая» уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\gamma}{100} = \text{Вер} \left( T_{p,\gamma_1} \geq T_{p,\gamma_{ЭС}} \right). \quad (2)$$

## Расчет показателей долговечности электронных средств методом статистического моделирования

Для расчетов показателей долговечности ЭС в инженерной практике применяется метод, изложенный в стандарте [1], который регламентирует порядок расчета показателей долговечности ЭС на этапе проектирования и применяется либо непосредственно [2], либо является основой при создании стандартов предприятий [3–5].

Исходными данными для расчетов показателей долговечности ЭС по методикам стандарта [1] служат характеристики долговечности ЭРИ. Несмотря на большое число публикаций, посвященных вопросам оценки долговечности ЭРИ [6], в инженерной практике используются данные, которые приводятся в ТУ и систематизированы в справочнике [7], который является официальным изданием Министерства обороны РФ, и в нем приведены нормируемые в ТУ (экспериментально полученные) следующие характеристики долговечности ЭРИ:

- гамма-процентный ресурс  $T_{p,\gamma}$ ;
- наработка минимальная  $T_{н.м.}$ .

Отметим, что значения  $T_{н.м.}$  в справочнике приведены только для ЭРИ, выпускаемых в соответствии с требованиями современных стандартов. Для ЭРИ, значения  $T_{н.м.}$  которых в справочнике не приведены, расчет проводится по формуле стандарта [1]:

$$T_{н.м.} = \frac{1 - v\chi_{\gamma_1}}{1 - v\chi_{\gamma_2}} T_{p,\gamma_2}, \quad (3)$$

где  $v$  – коэффициент вариации ресурса (его значение в стандарте принято одинаковым для всех классов ЭРИ и равно 0,15);

$\chi_{\gamma_1}, \chi_{\gamma_2}$  – квантиль нормального распределения для вероятности соответственно  $\gamma_1/100, \gamma_2/100$ .

Как следует из (3), в методиках стандарта [1] принято, что ресурс ЭРИ  $t_p$  – случайная величина, распределенная по нормальному закону

$$f(t_p) = \frac{1}{\sigma(t_p)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(t_p - m(t_p))^2}{2\sigma(t_p)^2}\right] dt_p, \quad (4)$$

где  $m(t_p), \sigma(t_p)$  – параметры закона распределения.

Для анализа методики стандарта использовался метод статистического моделирования, который является «универсальным методом расчета для объектов любой структуры и при любых сечениях распределений наработок между отказами и временем восстановления элементов, при любых стратегиях и методах восстановления и профилактики...» [8].

В данном случае статистическое моделирование включало в себя следующие этапы.

1. Расчет параметров закона распределения ресурса  $m(t_{pn})$  и  $\sigma(t_{pn})$  по значениям  $T_{p,\gamma}, \gamma, T_{н.мн}, \gamma_1 = 99,9\%$  для каждого ЭРИ (закон распределения ресурса – нормальный).

2. Проведение имитационного моделирования:

- расчет реализации ресурса  $\hat{t}_{pn}$  для каждого ЭРИ:

$$\hat{t}_{pn} = m(t_{pn}) + x_n \sigma(t_{pn}),$$

где  $x_n$  – реализации случайной величины, распределенной по нормальному закону, которая рассчитывается по формуле Бокса–Мюллера [9]

$$x_n = \cos(2\pi z_1) / \sqrt{-2 \ln z_2},$$

где  $z_1, z_2$  – реализации базовой случайной величины;

- расчет реализации ресурса ЭС по критерию предельного состояния  $K_{п.с}$ . Так как критерий предельного состояния по стандарту – израсходование ресурса заданным процентом ЭРИ от их общего числа, то при таком критерии предельного состояния для расчета реализации ресурса ЭС вектор реализаций ресурсов ЭРИ упорядочивается в порядке возрастания, и из этого вектора выбирается значение с номером  $k$ :

$$\hat{t}_{pЭС} = \hat{t}_{pk}, \quad (5)$$

$$k = \left\lceil \frac{K_{п.с}}{100} \text{int}(N) \right\rceil + 1, \quad (6)$$

где  $\hat{t}_{pЭС}$  – значение реализации ресурса ЭС;

$N$  – число ЭРИ в ЭС.

Очевидно, что если критерий предельного состояния формулируется как «израсходование ресурса любым ЭРИ», то при таком критерии предельного состояния

$$\hat{t}_{pЭС} = \min_{n=1, N} (\hat{t}_{p1}, \hat{t}_{p2}, \dots, \hat{t}_{pN}). \quad (7)$$

3. Проведение имитационных экспериментов и формирование вектора реализаций ресурса ЭС.

4. Расчет  $\gamma$ -процентного ресурса ЭС. Упорядочивание вектора реализаций ресурса ЭС в порядке убывания и выбор из него значения с номером  $l$ :

$$T_{p,\gammaЭС} = \hat{t}_{pl}, \quad (8)$$

$$l = \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) M, \quad (9)$$

где  $T_{p,\gammaЭС}$  –  $\gamma$ -процентный ресурс ЭС;

$M$  – число имитационных экспериментов.

Данный метод реализован и включен в систему АСОНИКА-К-Д программного комплекса АСОНИКА-К [10].

С помощью разработанного программного обеспечения проведен расчет 95%-го ресурса для примера, приведенного в стандарте [1]. Исходные данные для расчета *радиоэлектронной аппаратуры (РЭА)* приведены в табл. 1.

1. Исходные данные для расчета 95%-го ресурса РЭА

№ эле-мента	Тип изделия	$T_{н.м.}$ , тыс. ч	$T_{р.γ.}$ , тыс. ч ( $γ = 95\%$ )	Число штук	$i$	Всего $N_i$ , шт.	По стандарту [1]	
							$T_{р.γ.}$ , тыс. ч ( $γ = 95\%$ )	Сумма процентов, $\%_{\Sigma}^*$
Конденсаторы керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше					1	25	< 10	100
1	К15-15	2	5	24				
Кинескопы монохромные					2	26	< 15	89,6
2	2ЛК1Б	2	9 ( $γ = 90\%$ )	1				
Конденсаторы оксидно-электролитические					3	37	< 20	79
3	К50-20	10	13	1				
Терморезисторы					4	37	< 30	63,9
4	КМТ-1	10	15 ( $γ = 90\%$ )	25				
Конденсаторы объемно-пористые					5	95	< 50	48,8
5	К52-2	10	15	27				
Конденсаторы керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше					6	24	< 60	9,9
6	К15-14в	7,5	15	10				
Резисторы постоянные металлодиэлектрические					-	244	-	-
7	С2-6	15	25	35				
Трансформаторы питания низковольтные					-	244	-	-
8	ТАН	12	27,5	2				
Микросхемы интегральные					-	244	-	-
9	Гибридные	25	50	37				
Маломощные кремниевые транзисторы					-	244	-	-
10	2Т317А	25	50	14				
Диоды кремниевые выпрямительные					-	244	-	-
11	Д214	25	50	22				
Мощные кремниевые транзисторы					-	244	-	-
12	2Т808А	25	50	5				
Резисторы постоянные металлодиэлектрические					-	244	-	-
13	Р1-12	25	40	17				
Резисторы постоянные металлодиэлектрические					-	244	-	-
14	Р1-4	30	60	24				
Итого $N_{\Sigma}$ :					-	244	-	-

$$* \%_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 \%_i, \text{ где } \%_i = \frac{N_i}{N_{\Sigma}} \cdot 100\%.$$

Критерий предельного состояния РЭА: «Ресурс не более чем у 20 % элементов может быть израсходован».

Поскольку в стандарте типов ЭРИ не приведено, они выбраны так, чтобы число элементов, имеющих значение 95 % ресурса, попадающего в соответствующие интервалы, совпадало с данными стандарта.

Согласно примеру стандарта, 95%-й ресурс РЭА равен 15 тыс. ч (точнее, 13 тыс. ч). Для  $K_{п.с} = 0\%$  расчет по методике стандарта 95%-го ресурса РЭА дает величину 5 тыс. ч (см. табл. 1).

Заметим, что согласно [1], если требования к показателям долговечности РЭА не выполняются (например,  $T_{p,\gamma PЭА} \geq 15$  тыс. ч при  $K_{п.с} = 0\%$ ), то выявляются элементы, у которых ресурс меньше требуемого (элементы с №№ 1–5 в табл. 1) и ими дополняется *запасное имущество, приборы и принадлежности (ЗИП)* в необходимом количестве, т.е. в данном случае начальные уровни запаса таких элементов в ЗИП больше нуля. Особенности оптимизации ЗИП при ненулевых уровнях начальных запасов рассмотрены в [11].

На рис. 1 показаны графики плотности вероятности ресурса РЭА  $f(T_{p,\gamma PЭА})$ .

Расчеты для всех примеров выполнены с помощью системы АСНИКА-К-Д (число имитационных экспериментов  $M = 10^6$ ).

На рис. 1, а показано, что 95%-й ресурс РЭА – не менее 17,827 тыс. ч, что в 1,4 раза больше рассчитанного по методике стандарта, а для  $K_{п.с} = 0\%$  (см. рис. 1, б) – не менее 2,457 тыс. ч, что в 2 раза меньше рассчитанного по методике стандарта.

Для анализа причин этих расхождений проводились вычислительные эксперименты на двух тестовых примерах.

*Пример 1.* Рассчитаем 95%-й ресурс при  $K_{п.с} = 0\%$  для двух изделий, содержащих соответственно один и десять резисторов типа Р1-1 ( $T_{н.м} = 25$  тыс. ч,  $T_{p,\gamma} = 50$  тыс. ч,  $\gamma = 95\%$ ). Графики плотности вероятности ресурса РЭА  $f(T_{p,\gamma PЭА})$  приведены на рис. 2.

На рис. 2, а показано, что полученное значение 95%-го ресурса изделия с одним резистором ( $T_{p,\gamma PЭА} = 49,956$  тыс. ч) практически совпадает с его  $T_{p,\gamma}$  (и с методикой стандарта), в то время как для изделия с десятью резисторами оно значительно меньше ( $T_{p,\gamma PЭА} = 34,068$  тыс. ч).

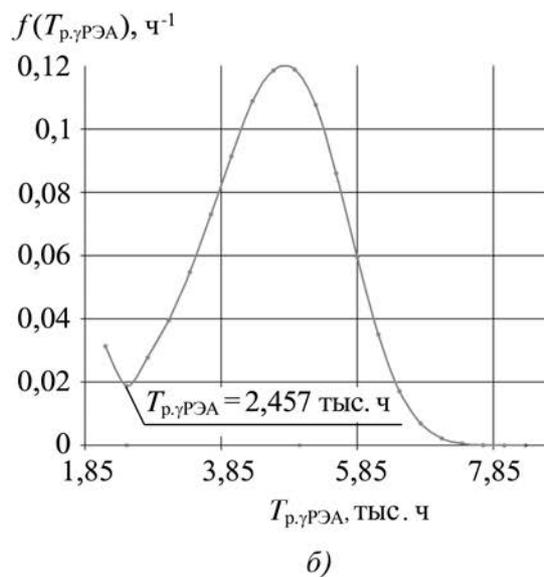
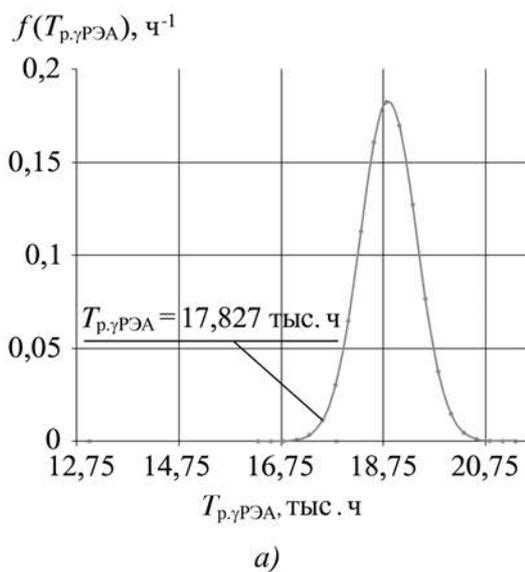
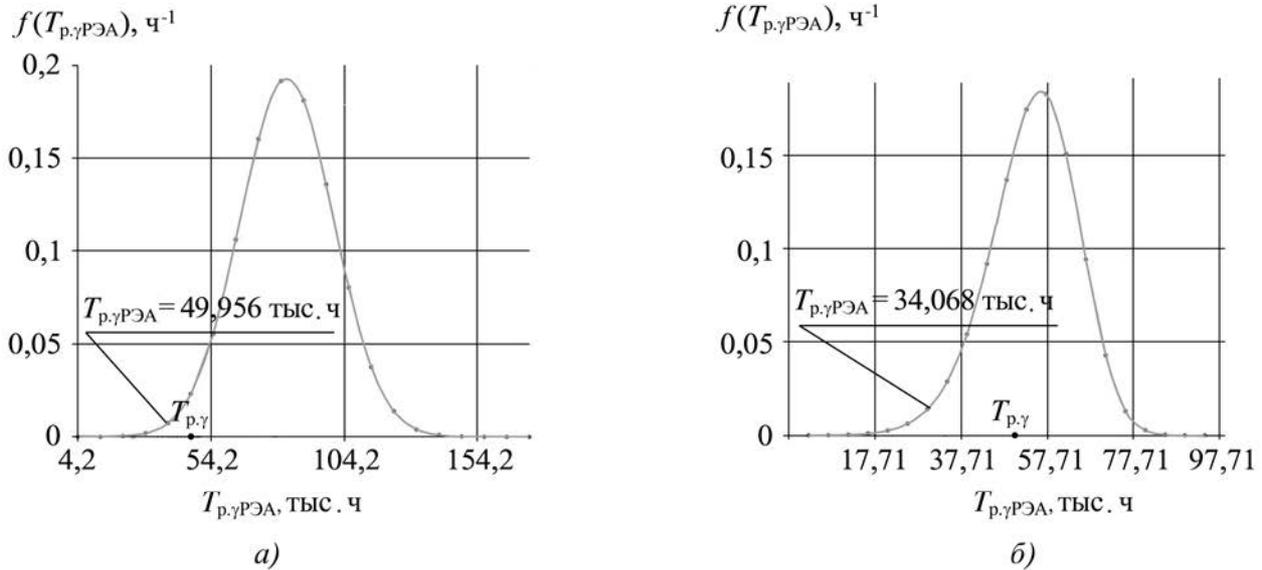


Рис. 1. Графики плотности вероятности ресурса РЭА  $f(T_{p,\gamma PЭА})$ :

а, б – для  $K_{п.с}$  соответственно равному 20 и 0 %



**Рис. 2. Графики плотности вероятности ресурса РЭА  $f(T_{p,\gamma PЭА})$ :**  
 а, б – для изделия соответственно с одним и десятью резисторами

Такое различие обусловлено тем, что в стандарте [1] принято допущение  $T_{p,\gamma ЭС} = T_{p,\gamma}$  при условии, что все ЭРИ, входящие в ЭС, имеют одинаковые значения  $T_{p,\gamma}$  и  $\gamma$ , и  $\gamma = \gamma_{ЭС}$ , т.е. не зависят от их числа. Однако ресурсы различных ЭРИ – независимые случайные величины, а при моделировании независимых случайных величин (ресурсов) для каждого ЭРИ генерируется свое значение случайной величины ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) и по ней рассчитывается значение ресурса ( $t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pN}$ ). Моделирование реализаций ресурсов электрорадиоизделий приведено на рис. 3.

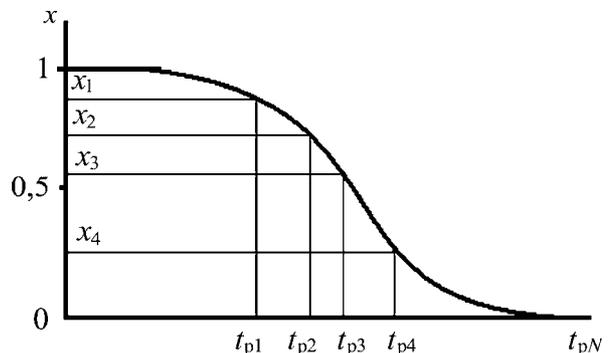
Значение  $T_{p,\gamma ЭС}$  будет тем меньше, чем больше ЭРИ входит в его состав. Это может привести к тому, что рассчитанное значение гамма-процентного ресурса ЭС будет меньше не только ресурса, рассчитанного по методике стандарта, но и его минимальной наработки.

Отметим, что значение  $\gamma_1 = 99,9\%$  в формуле (3) нужно рассматривать как ориентировочное, которое рекомендовано в стандарте для расчетной оценки  $T_{н.м}$  тех ЭРИ, у которых в ТУ данные о минимальной наработке не приводятся. Минимальная наработка – время (ресурс), в те-

чение которого предельное состояние изделия не наступит с вероятностью  $P(t_p) = 1$ , т.е.  $T_{н.м}$  можно рассматривать как параметр сдвига для функции распределения ресурса.

С учетом приведенного значения реализации ресурса ЭРИ в системе АСОНИКА-К-Д рассчитывались по формуле

$$\hat{t}_{p_n} = \begin{cases} \hat{t}_{p_n} & \text{при } \hat{t}_{p_n} > T_{н.м}; \\ T_{н.м} & \text{при } \hat{t}_{p_n} < T_{н.м}. \end{cases} \quad (10)$$



**Рис. 3. Моделирование реализаций ресурсов электрорадиоизделий**

Пример 2. Рассчитаем 95%-й ресурс при  $K_{п.с} = 0\%$  для двух изделий. Первое изделие содержит пять ЭРИ, у которых средний ресурс  $T_{р.ср} = 50$  тыс. ч и пять ЭРИ с  $T_{р.ср} = 40$  тыс. ч с одинаковыми  $v = 0,175$ . Второе изделие содержит пять ЭРИ с  $T_{р.ср} = 50$  тыс. ч,  $v = 0,1$  и пять ЭРИ с  $T_{р.ср} = 40$  тыс. ч,  $v = 0,25$ . Графики плотности вероятности ресурса  $f(T_{р.γРЭА})$  приведены на рис. 4.

Значение  $v$  в стандарте [1] принято одинаковым для всех ЭРИ и равным 0,15. Однако в нормативном документе [3] значение  $v = 0,25$ , а в стандарте предприятия [4] –  $v = 0,21$ . При расчетах характеристик долговечности для всех классов ЭРИ значение  $v$  принимается одинаковым.

Вместе с тем расчеты коэффициентов вариации для различных типов ЭРИ показывают, что значения  $v$  находятся в диапазоне 0,1...0,25. На рис. 5 в качестве примера приведена диаграмма распределения значений коэффициентов вариации для ЭРИ класса «Трубки электронно-лучевые приемные и преобразовательные».

Так как коэффициенты вариации ресурса у разных ЭРИ могут отличаться, то может оказаться, например, что у одного элемента  $T_{р.ср}$  будет больше, чем у другого, а  $T_{р.γ}$ , наоборот, меньше. Чтобы избежать этого, в [10] предложено использовать среднее значение коэффициентов вариации ресурса ЭРИ:

$$v_{ср} = \frac{\sum_{n=1}^N v_n}{N}, \quad (11)$$

где  $v_n$  – коэффициент вариации ресурса  $n$ -го ЭРИ;

$N$  – число ЭРИ в ЭС.

Сравнивая рис. 4, а и б, можно видеть, что при условии, когда для всех ЭРИ  $v = v_{ср}$ , расчетное значение 95%-го ресурса изделия отличается от ресурса изделия, которое содержит ЭРИ с различными значениями.

Также следует отметить, что методики стандарта [1] не учитывают влияния элементного резервирования ЭС (резервирования с использованием дополнительных элементов) на величину его показателей долговечности.

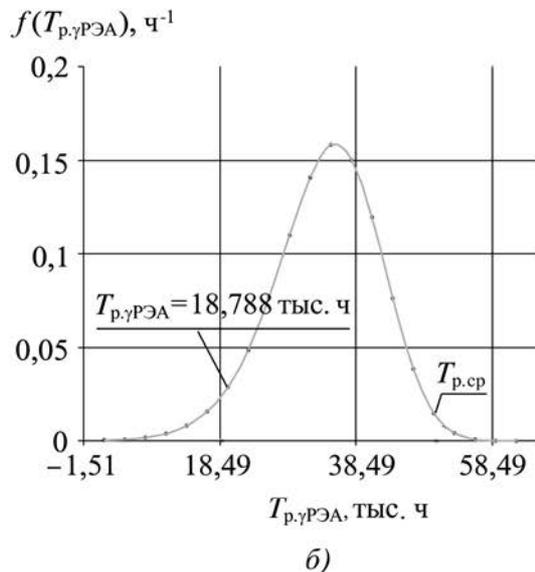
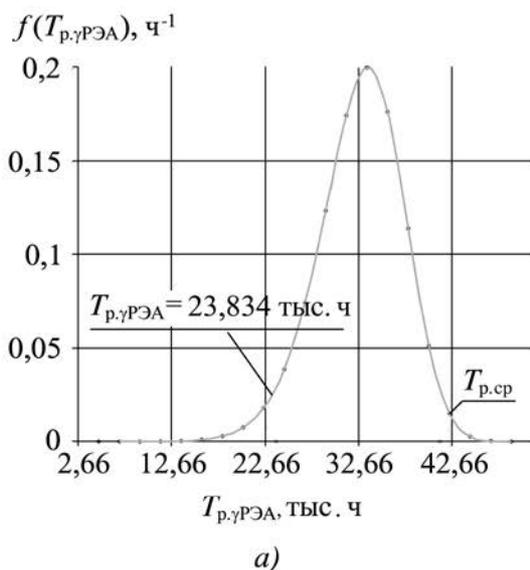
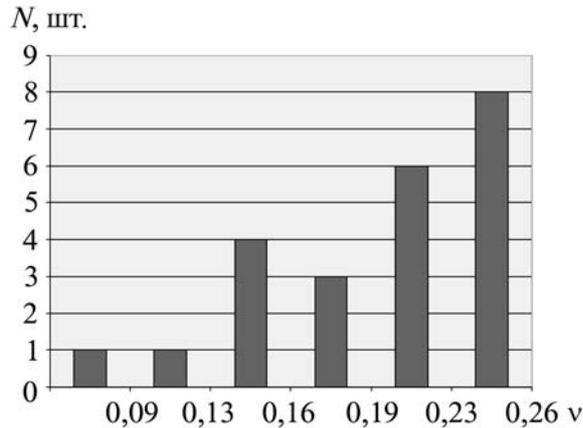


Рис. 4. Графики плотности вероятности ресурса  $f(T_{р.γРЭА})$  для коэффициента вариации:

а –  $v_{1-10} = v_{ср} = 0,175$ ; б –  $v_{1-5} = 0,1$  и  $v_{6-10} = 0,25$



**Рис. 5.** Диаграмма распределения значений коэффициентов вариации  $v$  для электрорадиоизделий класса «Трубки электронно-лучевые приемные и преобразовательные»

Например, при постоянном нагруженном резервировании критерий предельного состояния формулируется как «Израсходование ресурса 100 % элементов, входящих в резервированную группу». Тогда для такой резервированной группы  $K_{п.с} = 100\%$ , а расчет реализации ресурса резервированной группы необходимо проводить по формуле

$$\hat{t}_{p.гр} = \max_{n=1, N_{гр}} \left( \hat{t}_{p_1}, \hat{t}_{p_2}, \dots, \hat{t}_{p_{N_{гр}}} \right), \quad (12)$$

где  $N_{гр}$  – число элементов в резервированной группе, включая основной.

### Выводы

Проведенные исследования и вычислительные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

- в качестве «нижней» оценки гамма-процентного ресурса нерезервированных ЭС можно использовать значение минимальной наработки, определяемой как минимум из минимальных наработок ЭРИ, входящих в них;

- методика расчета долговечности, приведенная в стандарте [1], применима для расчета гамма-процентного ресурса ЭС только в том случае, если доказано, что ресурсы комплектующих элементов имеют сильную корреляционную связь;

- статистическое моделирование – наиболее приемлемый способ расчетной оценки гамма-процентного ресурса ЭС в случае, если ресурсы комплектующих элементов – независимые случайные величины с разными значениями коэффициентов вариации;

- при моделировании реализаций ресурсов ЭРИ следует использовать законы распределения с параметром сдвига, равного величине их минимальной наработки;

- при наличии элементного резервирования (резервирования с использованием дополнительных (резервных) элементов) его необходимо учитывать при моделировании реализаций ресурса ЭС;

- расчет гамма-процентного ресурса ЭС методом имитационного моделирования требует создания программного обеспечения или применения специализированных программных средств (например, системы АСОНИКА-К-Д).

### Заключение

В приведенном методе статистического моделирования не учитывались зависимость ресурса ЭРИ от модели эксплуатации ЭС, а также особенности прогнозирования ресурсов элементов, суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов их составных частей.

В связи с этим метод статистического моделирования не гарантирует 100%-й точности расчетной оценки гамма-процентного ресурса ЭС, поэтому полученные с его помощью результаты должны корректироваться по результатам ресурсных испытаний и подконтрольной эксплуатации.

### Библиографический список

1. **ОСТ 4.012.013–84.** Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности. Введ. 1985-07-01. М.: ВНИИ, 1985. 13 с.
2. **СТО ОмГТУ 73.03–2012.** Система менеджмента качества. Проектирование и разработка. Порядок выполнения и методики расчета надежности на стадии разработки. Введ. 2012-11-26. Омск: ОмГТУ, 2012. 49 с.

3. **E10.012.054–87.** Нормативный документ. Методика оценки среднего срока службы изделий расчетным методом. М.: ВНИИ, 1987. 20 с.
4. **СТП ЮФКВ.025–2004.** Методика расчета показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Модуль, 2004. 31 с.
5. **СТПС 101–85.** Система управления качеством разработок изделий. Аппаратура физических измерений. Аппаратура и комплексы аппаратурные. Расчет показателей надежности и состава ЗИП. М.: НИИТ, 2000. 63 с.
6. **Овчинникова И.** Определение надежности оптических кабелей // Технологии и средства связи. 2009. № 3. С. 39 – 41.
7. **Надежность** электрорадиоизделий: справочник нормативного характера. М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2006. 641 с.
8. **ГОСТ 27.301–95.** Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. 1997-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1996. 16 с.
9. **Братулин А. В., Пименов С. Ю., Тинаев В. В.** Исследование производительности различных алгоритмов формирования случайных последовательностей с гауссовским законом распределения // Наука и образование: новое время. 2017. № 3. С. 479 – 483.
10. **Жаднов В. В.** Расчет надежности электронных модулей. М.: Солон-Пресс, 2016. 232 с. (Серия «Библиотека студента»)
11. **Сравнение** локальных вычислительных сетей по критерию требований к комплектам запасных частей / В. В. Жаднов и др. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 4. С. 36 – 44. doi: 10.14489/vkit.2015.04.pp.036-044
2. Quality Management System. Design and development. The order of implementation and methods of calculating the reliability of the development stage. *Standard of organization No. STO OmGTU 73.03–2012.* Omsk: OmGTU. [in Russian language]
3. Methods of estimating the average service life of products by the calculation method. *Regulatory Document No. E10.012.054–87.* Moscow: VNI. [in Russian language]
4. The method of calculating the reliability of electronic equipment. *Enterprise Standard No. STP YuFKV.025–2004.* Moscow: Modul'. [in Russian language]
5. Quality management system for product development. Physical measurement equipment. Equipment and hardware complexes. Calculation of reliability and composition of spare parts. *Enterprise Standard No. STPS 101–85.* Moscow: NIIT. [in Russian language]
6. Ovchinnikova I. (2009). Determination of the reliability of optical cables. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, (3), pp. 39-41. [in Russian language]
7. *Reliability of radio and radio products: a handbook of a regulatory nature.* Moscow: 22 TsNIII MO RF. [in Russian language]
8. Reliability in technology. Calculation of reliability. The main provisions. *Ru Standard No. GOST 27.301–95.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]
9. Bratulin A. V., Pimenov S. Yu., Tinaev V. V. (2017). Investigation of the performance of various algorithms for the formation of random sequences with Gaussian distribution law. *Nauka i obrazovanie: novoe vremya*, (3), pp. 479-483. [in Russian language]
10. Zhadnov V. V. (2016). *Calculation of the reliability of electronic modules: scientific issue.* Moscow: Solon-Press. [in Russian language]
11. Zhadnov V. V. Et al. (2015). Comparison of local area networks according to the criterion of requirements for sets of spare parts. *Vestnik komp'yuternyh i informatsionnyh tekhnologiy*, (4), pp. 36-44. doi:10.14489/vkit.2015.04.pp.036–044 [in Russian language]

## References

1. Electronic equipment. Definition of durability indicators. *Industry Standard No. OST 4.012.013–84.* Moscow: VNI. [in Russian language]