

© Лукин В. Л., Сухорученков Б. И., Башилов А.И.  
Lukin V., Sukhoruchenkov B., Bashilov A.

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОДНОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ

### METHOD OF INCREASE OF EFFICIENCY OF TESTS ELEMENTS OF TECHNICAL SYSTEMS NON-PERMANENT USES ON FAULTLESSNESS

**Аннотация.** Дается научно-методическое обоснование способа повышения эффективности оценивания вероятности безотказной работы элементов сложных технических систем одноразового использования на основе испытаний их в составе функциональных сборок.

**Annotation.** The scientifically-methodical ground of method of increase of efficiency of evaluation of probability of faultless work of elements of the difficult technical systems of the non-permanent use is given on the basis of tests of them in composition the functional assembling.

**Ключевые слова.** Техническая система, элемент, испытание, эффективность, безотказность.

**Key words.** Technical system, element, test, efficiency, faultlessness.

#### Введение

Рассматриваются автономные испытания основных подсистем (далее элементов) технических систем (ТС) одноразового использования типа баллистических ракет и ракет-носителей. К ТС предъявляются высокие требования к безотказности: вероятность безотказной работы (ВБР) в течение целевого функционирования ТС должна быть  $P_{\text{ТР}} \in [0,95; 0,98]$ . Предполагается, что ТС состоит из  $j=1, \dots, J$  основных элементов и не имеет резервирования. Поэтому требуемые ВБР элементов  $P_{\text{ЭТР}}$  должны удовлетворять условию

$$\prod_{j=1}^J P_{\text{ЭТР}} = P_{\text{ТР}}. \quad (1)$$

Требования к ВБР элементов определяются на основе методов нормирования безотказности с учетом соотношения (1) и технико-экономических ограниче-

ний. При  $J \approx 10$  элементы ТС должны иметь ВБР в пределах  $P_{\text{ЭТР}} \in [0,995; 0,998]$ . Для достижения таких уровней ВБР необходимо провести большой объем автономных испытаний (АИ) элементов, который не удастся осуществить при ограниченных технико-экономических ресурсах. Поэтому возникает актуальная задача снижения объемов АИ за счет повышения их эффективности. Способ решения этой задачи обосновывается далее.

#### 1. Сравнение эффективности автономных и комплексных испытаний ТС

Рассмотрим ТС, состоящую из  $J$  элементов одноразового использования без резервирования, так что безотказность ТС обеспечивается только при безотказной работе всех элементов в течение времени функционирования. Для отработки ТС на безотказность выделены

Лукин Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, академик-секретарь, секция «Инженерные проблемы стабильности и конверсии» Российской инженерной академии, тел. (495) 543-36-70;

Сухорученков Борис Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской инженерной академии, профессор кафедры ракетного вооружения, Военная академия РВСН имени Петра Великого, тел. (495) 696-06-48;

Башилов Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, ОАО «Корпорация «МИТ».

Lukin Vladimir – doctor of engineering sciences, professor, akademik-sekretar', sections the "Engineering problems of stability and conversion", Russian engineering academy, tel. (495) 543-36-70;

Sukhoruchenkov Boris – doctor of engineering sciences, professor, corresponding member of the Russian engineering academy, professor of department of rocket armament, Military academy of RVSN of the name of Peter Great, tel. (495) 696-06-48;

Bashilov Alexander – doctor of engineering sciences, professor, deputy of director general, OAO "Corporation " MIT".

$n$  комплектов элементов, из которых можно создать  $n$  ТС. Для подтверждения требований к ВБР ТС можно провести АИ элементов или комплексные испытания (КИ) ТС, на основе которых определяются оценки ВБР ТС. Сравним эффективность АИ и КИ на основе оценок ВБР ТС.

Рассмотрим сначала АИ  $j$ -х элементов,  $j=1, \dots, J$  в объеме  $n_j$  испытаний каждый. При этом выявляются возможные дефекты и устраняются на основе доработок. Как показано в работе [2], оценки ВБР элементов наиболее точно определяются по методу несмещенных оценок (МНО). Оценки достигнутых значений ВБР  $j$ -х элементов не зависят от числа отказов, при которых были выявлены дефекты и устранены на основе доработок. Оценки ВБР элементов и их дисперсии зависят только от числа испытаний  $n_j$  и числа случайных отказов  $m$  (причины которых не установлены и доработки не проведены) и в соответствии с МНО определяются по зависимостям

$$\bar{P}_j = \frac{n_j + 1 - m_j}{n_j + 2}; \quad \sigma_{\bar{P}_j}^2 = \frac{(1 + m_j)(n_j + 1 - m_j)}{(n_j + 2)^2(n_j + 3)}; \quad j=1, \dots, J. \quad (2)$$

На основе (2) можно оценить ВБР ТС и ее дисперсию по методу линеаризации по зависимостям

$$\bar{P}_{\text{АИ}} = \prod_{j=1}^J \bar{P}_j; \quad \sigma_{\bar{P}_{\text{АИ}}}^2 = (\bar{P}_{\text{АИ}})^2 \sum_{j=1}^J \frac{\sigma_{\bar{P}_j}^2}{\bar{P}_j^2}. \quad (3)$$

ВБР ТС можно также оценить по результатам КИ. Если проведено  $n$  испытаний ТС, при которых получено  $m$  случайных отказов, то оценка ВБР ТС и ее дисперсия определяются по зависимостям, аналогичным (2)

$$\bar{P}_{\text{КИ}} = \frac{n + 1 - m}{n + 2}; \quad \sigma_{\bar{P}_{\text{КИ}}}^2 = \frac{(1 + m)(n + 1 - m)}{(n + 2)^2(n + 3)}. \quad (4)$$

Оценки ВБР ТС (3) по АИ и (4) по КИ зависят от параметров  $n, J, \{m_j\}$  и  $m$ . Далее для сравнения эффективности АИ и КИ будем рассматривать вариант, когда объемы испытаний каждого элемента одинаковы и равны числу КИ:  $n_j = n$ . Число случайных отказов ТС при КИ равно суммарному числу отказов элементов при АИ:  $m = \sum m_j$ . Числа случайных отказов элементов одинаковы:  $m_j = \text{const}$ . Значения оценок ВБР и их среднеквадратические отклонения (СКО) при вариациях этих параметров приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что при безотказных испытаниях (при  $m=0$ ) оценки ВБР ТС по КИ получаются значительно выше и точнее, нежели по АИ, особенно при возрастании числа элементов  $J$ . При возможном одном случайном отказе каждого элемента при  $n > J$  КИ ТС также эффективнее АИ элементов. Эффективность КИ выше благодаря эффекту совместных испытаний элементов в составе ТС. Однако АИ необходимы для выявления и устранения возможных дефектов элементов ТС на ран-

Таблица 1

**Реализации оценок ВБР ТС и их СКО при  $J = 5$  (обычный шрифт) и  $J = 10$  (жирный шрифт) по результатам возможных АИ и КИ**

$n$	$m_j$	$\hat{P}_j$	$\sigma_{\bar{P}_j}$	$\hat{P}_{\text{АИ}}$	$\sigma_{\bar{P}_{\text{АИ}}}$	$\hat{P}_{\text{КИ}}$	$\sigma_{\bar{P}_{\text{КИ}}}$
10	0	0,917 <b>0,917</b>	0,077 <b>0,077</b>	0,647 <b>0,419</b>	0,121 <b>0,111</b>	0,917 <b>0,917</b>	0,077 <b>0,077</b>
	1	0,833 <b>0,833</b>	0,103 <b>0,103</b>	0,402 <b>0,162</b>	0,111 <b>0,063</b>	0,500 <b>0,083</b>	0,139 <b>0,077</b>
15	0	0,941 <b>0,941</b>	0,055 <b>0,055</b>	0,739 <b>0,545</b>	0,097 <b>0,102</b>	0,941 <b>0,941</b>	0,055 <b>0,055</b>
	1	0,882 <b>0,882</b>	0,076 <b>0,076</b>	0,535 <b>0,286</b>	0,103 <b>0,078</b>	0,647 <b>0,353</b>	0,113 <b>0,113</b>
20	0	0,955 <b>0,955</b>	0,043 <b>0,043</b>	0,792 <b>0,628</b>	0,081 <b>0,090</b>	0,955 <b>0,955</b>	0,043 <b>0,043</b>
	1	0,909 <b>0,909</b>	0,060 <b>0,060</b>	0,621 <b>0,386</b>	0,092 <b>0,080</b>	0,727 <b>0,500</b>	0,093 <b>0,104</b>

ней стадии создания ТС, так как при этом требуется меньше затрат на проведение доработок по сравнению с КИ ТС. Эффективность КИ по сравнению с АИ особенно заметна при сравнении числа испытаний, необходимых для подтверждения требуемой ВБР.

**2. Определение объемов испытаний, необходимых для подтверждения требований к ВБР ТС**

Основной задачей АИ и КИ является доведение ВБР ТС и их элементов до требуемых значений и подтверждение соответствия ВБР требованиям. Контроль ВБР осуществляется на основе сравнения оценок ВБР с требуемыми значениями. Число КИ  $n$  определяется из условия  $\bar{P}_{\text{КИ}} \geq P_{\text{ТР}}$ , которое с учетом (4) можно представить в виде

$$\frac{n + 1 - m}{n + 2} \geq P_{\text{ТР}}. \quad (5)$$

На основе (5) получается зависимость для определения необходимого числа КИ ТС при предполагаемом числе случайных отказов  $m$

$$n_{\text{ТР}} \geq \frac{2P_{\text{ТР}} - 1 + m}{1 - P_{\text{ТР}}}. \quad (6)$$

Аналогично определяется с учетом (2) необходимое число АИ элементов для подтверждения требуемой ВБР элементов  $P_{j\text{ТР}}$ , если возможно  $m_j$  случайных отказов элементов:

$$n_{j\text{ТР}} \geq \frac{2P_{j\text{ТР}} - 1 + m_j}{1 - P_{j\text{ТР}}}, \quad j=1, \dots, J. \quad (7)$$

Рассмотрим ТС, состоящую из  $J$  элементов, к ВБР которой предъявляется требование РТР. Будем полагать, что к ВБР элементов предъявляются одинаковые требования  $P_{j\text{ТР}} = \text{const}$ . При этом в соответствии с (1) требуемые ВБР элементов зависят от  $P_{\text{ТР}}$  и при равнонадежности элементов определяются по зависимости

$$P_{j\text{ТР}} = \sqrt[J]{P_{\text{ТР}}}, \quad j=1, \dots, J. \quad (8)$$

Требуемые объемы АИ и КИ зависят от числа элементов ТС, требований к ВБР и числа возможных случайных отказов. Будем предполагать, что при АИ каждого элемента возможно  $m_j$  случайных отказов, так что соответствующее эквивалентное возможное число отказов ТС равно их сумме:  $m = \sum_{j=1}^J m_j$ . Необходимые объемы АИ и КИ при вариациях параметров  $P_{TP}$ ,  $J$  и  $m_j$  приведены в табл. 2. Здесь же показаны отношения требуемых объ-

$$\bar{P}_{CB} = \frac{n_{cb} + 1 - m_{cb}}{n_{cb} + 2}; \quad \sigma_{\bar{P}_2}^2 = \frac{(1 + m)(n_{cb} + 1 - m)}{(n_{cb} + 2)^2 (n_{cb} + 3)}. \quad (11)$$

Оценки ВБР (10) и (11) должны совпадать. Однако из-за эффекта испытаний элементов в составе ФС оценка ВБР (10) получается ниже оценки (11). Для обеспечения равенства оценок ВБР (10) и (11) необходимо скорректировать (повысить) оценки ВБР элементов (9). Для этого можно использовать различные модели. Воспользуемся

Таблица 2

**Необходимые объемы АИ и КИ для подтверждения требуемой ВБР ТС**

J	m <sub>j</sub>	P <sub>TP</sub> = 0,90			P <sub>TP</sub> = 0,95			P <sub>TP</sub> = 0,98		
		n <sub>TP</sub>	n <sub>TP</sub>	k = n <sub>TP</sub> /n <sub>TP</sub>	n <sub>TP</sub>	n <sub>TP</sub>	k = n <sub>TP</sub> /n <sub>TP</sub>	n <sub>TP</sub>	n <sub>TP</sub>	k = n <sub>TP</sub> /n <sub>TP</sub>
5	0	8	46	5,75	18	96	5,3	48	246	5,10
	1	18	286	15,90	38	586	15,4	98	1486	15,20
10	0	8	93	11,70	18	194	10,7	48	493	10,30
	1	18	1048	58,20	38	2148	56,5	98	5448	55,60

емов АИ и КИ.

Из табл. 2 следует, что для подтверждения требований к безотказности ТС необходимо очень большое число АИ элементов, во много раз превышающих число КИ, особенно при возможных случайных отказах. Провести АИ в таком объеме невозможно при ограниченных технико-экономических ресурсах. Поэтому необходимо искать способы существенного повышения оценок ВБР элементов ТС и сокращения числа необходимых АИ элементов.

**3. Способ повышения эффективности испытаний элементов ТС в составе функциональных сборок**

Одним из способов снижения объемов испытаний элементов ТС на этапе АИ являются групповые испытания (ГИ) элементов в составе функциональныхборок (ФС). Рассмотрим несколько ( $N < J$ ) элементов, которые функционально связаны с рассматриваемым  $j$ -м элементом и которые можно испытывать совместно. При числе  $n_{cb}$  испытаний такой ФС возможны  $m_j$  случайных отказов  $j$ -го элемента и  $m_{cb} \geq m_j$  случайных отказов собственно сборки. Исследуем возможность оценивания ВБР элементов по результатам ГИ.

**3.1. Приближенный метод оценивания ВБР элементов по результатам групповых испытаний**

В результате ГИ можно получить точечные оценки ВБР  $P_j$  каждого  $j$ -го элемента, ВБР ФС по АИ  $P_{AI}$  и по КИ  $P_{CB}$  и их дисперсии по зависимостям, аналогичным (2)–(4):

$$\bar{P}_j = \frac{n_{cb} + 1 - m_j}{n_{cb} + 2}, \quad \sigma_{\bar{P}_2}^2 = \frac{(1 + m)(n_{cb} + 1 - m)}{(n_{cb} + 2)^2 (n_{cb} + 3)}, \quad (9)$$

$j = 1, \dots, J;$

$$\bar{P}_{AI} = \prod_{j=1}^N \bar{P}_j; \quad \sigma_{\bar{P}_{AI}}^2 = (\bar{P}_{AI})^2 \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{\bar{P}_j}^2}{\bar{P}_j^2}; \quad (10)$$

принципом, согласно которому повышение ВБР элемента пропорционально его «ненадежности». В соответствии с этим получается следующая модель коррекции оценок ВБР элементов по результатам ГИ

$$\bar{P}_{jcb} = \bar{P}_j + q_j(1 - \bar{P}_j), \quad q_j \in [0; 1], \quad j=1, \dots, J. \quad (12)$$

Показатели  $q_j$  характеризуют степень повышения ВБР. При  $q_j \rightarrow 0$  оценка ВБР не изменяется; при  $q_j \rightarrow 1$  оценка ВБР приближается к единице. При вариациях показателей  $q_j$  оценка ВБР  $\bar{P}_{jcb} \in [\bar{P}_j; 1]$ . Задача определения всех показателей  $\{q_j\}$  является некорректной. Для приближенного оценивания ВБР элементов по результатам ГИ допустим, что показатели одинаковы:  $q_j = \text{const} = q$ . В этом случае показатель  $q$  можно определить на основе равенства оценок ВБР (11) и (10) при подстановке в них значений (12)

$$\prod_{j=1}^N [\bar{P}_j + q(1 - \bar{P}_j)] = \bar{P}_{CB}. \quad (13)$$

На основе (13) численным способом определяется показатель  $q$ . При полученном значении вычисляются скорректированные оценки ВБР элементов по зависимости (12) и их дисперсии с учетом дисперсий (9) по зависимостям

$$\bar{P}_{jcb} = \bar{P}_j + q(1 - \bar{P}_j); \quad \sigma_{\bar{P}_{jcb}}^2 = (1 - q)^2 \sigma_{\bar{P}_j}^2, \quad j=1, \dots, J. \quad (14)$$

Реализации оценок ВБР ФС и элементов и их СКО при числе испытаний ФС  $n = 15$  и вариациях возможного числа случайных отказов ФС и элементов приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что при ГИ оценки ВБР  $j$ -х элементов возрастают, а их СКО снижаются, что особенно заметно при возрастании числа элементов ФС и при безотказных испытаниях элементов. Аналогичные результаты получаются и при других объемах испытаний ФС. При случайных отказах ФС и элементов эффективность

Таблица 3  
**Реализации оценок ВБР ФС и  $j$ -х элементов по результатам 15 ГИ и эквивалентное число испытаний элементов при  $N=3$  (обычным шрифтом) и  $N=5$  (жирным шрифтом)**

$m_{сб}$	$\hat{P}_{сб}$	$\sigma_{\hat{P}_{сб}}$	$m_j$	$\hat{P}_j$	$\sigma_{\hat{P}_j}$	$n_{jэkv}$
0	0,941	0,055	0	0,980 <b>0,988</b>	0,019 <b>0,011</b>	48 <b>81</b>
1	0,882	0,076	0	0,969 <b>0,979</b>	0,029 <b>0,019</b>	30 <b>46</b>
			1	0,939 <b>0,959</b>	0,040 <b>0,027</b>	31 <b>47</b>
2	0,824	0,090	0	0,963 <b>0,973</b>	0,035 <b>0,026</b>	25 <b>35</b>
			1	0,925 <b>0,946</b>	0,048 <b>0,035</b>	25 <b>35</b>

ГИ заметно снижается. Поэтому при ГИ элемента целесообразно в состав ФС включать отработанные другие элементы с высокой ВБР. Кроме того, при любом отказе необходимо проводить тщательный анализ причин отказа и осуществлять эффективные доработки для их устранения, чтобы не рассматривать отказ как случайный.

**3.2. Эквивалентное число испытаний элементов в составе функциональных сборок**

При фиксированном числе случайных отказов элементов  $m_j$  полученную оценку ВБР (14) можно представить в виде, аналогичном (9), в зависимости от соответствующего эквивалентного числа испытаний  $n_{jэkv}$

$$\bar{P}_{jсб} = \frac{n_{jэkv} + 1 - m_j}{n_{jэkv} + 2}, \quad j=1, \dots, J. \quad (15)$$

На основе (15) получается зависимость для эквивалентного числа испытаний элементов при ГИ

$$n_{jэkv} = \frac{2\bar{P}_{jсб} - 1 + m_j}{1 - \bar{P}_{jсб}}, \quad j=1, \dots, J. \quad (16)$$

Число испытаний  $j$ -го элемента  $n_{jэkv}$  по ГИ, эквивалентное числу автономных испытаний, зависит от числа испытаний сборки  $n_{сб}$ , возможного числа  $m_j$  случайных отказов  $j$ -го элемента и суммарного числа отказов  $m_{сб}$  всей сборки, а также от числа элементов  $N$ , входящих в ФС. Значения  $n_{jэkv}$  при вариациях этих параметров, полученные по числу ГИ ФС  $n_{сб}=15$ , приведены в табл. 3. Видно, что эквивалентное число испытаний элементов возрастает с увеличением числа элементов в сборке и со снижением числа возможных случайных отказов элементов. При безотказных испытаниях  $j$ -го элемента эквивалентное число испытаний может в несколько раз превышать число испытаний ФС.

Следует учитывать, что приведенные выше результаты имеют приближенный характер, так как получены при упрощающих допущениях.

**4. Метод оценивания ВБР элементов ТС по результатам групповых испытаний на основе статистического моделирования**

**4.1. Модель связи ВБР функциональной сборки и элементов**

Изложенный в п. 3 метод оценивания ВБР элементов ТС по результатам ГИ является приближенным. Для более точного оценивания ВБР элементов необходимо построить распределение оценок ВБР элементов. Для этого воспользуемся методом статистического моделирования на основе связи ВБР ФС  $P_{сб}$  с ВБР элементов  $P_j$

$$\prod_{j=1}^N P_j = P_{сб}. \quad (17)$$

На основе (17) можно представить модель ВБР элементов в зависимости от ВБР ФС:

$$P_j = P_{сб}^{a_j}, \quad j=1, \dots, N, \quad (18)$$

где показатели  $a_j$  должны удовлетворять условиям

$$\sum_{j=1}^N a_j = 1, \quad a_j \in [0; 1], \quad j=1, \dots, N. \quad (19)$$

При равнонадежных элементах показатели  $a_j$  одинаковы и равны  $a_j = 1/N$ . В общем случае ВБР элементов могут иметь разный уровень. Их возможные вариации можно описать в виде соответствующих вариаций показателей  $a_j$ . В предельном случае при  $a_j \rightarrow 0$  ВБР  $j$ -го элемента приближается к единице:  $P_j \rightarrow 1$ . С другой стороны, при  $a_j \rightarrow 1$  ВБР  $j$ -го элемента практически совпадает с ВБР сборки, при этом ВБР других элементов должны равняться единице, так как в соответствии с (19) для них показатели  $a_j \rightarrow 0$ . Для корректности задачи оценивания ВБР элементов, которые могут быть разными, целесообразно показатели  $a_j$  выбирать в диапазонах  $a_j \in [a_{jn}; a_{jв}]$ , при этом нижние границы должны быть выше нуля:  $a_{jn} > 0$ , а верхние границы должны превышать средние значения  $1/N$  и находиться в диапазоне  $a_{jв} \in [1/N; 1]$ . Для статистического моделирования возможных результатов ГИ можно принять значения показателей  $a_j \in [0,05; 2/N - 0,05]$ .

**4.2. Алгоритм статистического моделирования для построения плотности вероятности оценок ВБР ФС и элементов по результатам ГИ**

На основе (17)-(19) для статистического моделирования распределения оценок ВБР ФС и элементов по результатам ГИ был принят следующий алгоритм.

1. Выбирается модель ФС и ГИ: число элементов  $N$  в ФС, число испытаний ФС  $n_{сб}$ , возможный диапазон ВБР ФС  $P \in [P_H; 1]$ , рассматриваемый  $j$ -й элемент, число возможных случайных отказов ФС  $m_{сб}$  и элемента  $m_j$ .

2. Назначается число серий ГИ  $S$ . Для достижения

хорошей точности целесообразно иметь  $S \geq 10^5$ .

3. В каждой  $v$ -й серии ГИ,  $v=1, \dots, S$ , по датчику случайных чисел (ДСЧ) с равномерным распределением  $R[0; Z]$  моделируется случайное число (СЧ)  $\xi \in [P_H; 1]$  и определяется возможное значение ВБР ФС  $p_{c\bar{v}} = \xi$ .

4. По ДСЧ моделируются возможные значения (реализации) показателей  $a_{rj} \in R[a_{j\mu}; a_{j\sigma}]$ ,  $j=1, \dots, N$ . Для обеспечения условия (19) полученные показатели нормируются

$$a_j = a_{rj} / \sum_{j=1}^N a_{rj}, \quad j=1, \dots, N. \quad (20)$$

5. Определяются возможные значения ВБР  $j$ -х элементов по зависимости (18):  $p_{jv} = p_{c\bar{v}}^{a_j}$ .

6. Обнуляется начальное число возможных случайных отказов ФС  $m_s=0$  и  $j$ -го элемента  $m_j=0$ .

7. Последовательно выбираются номера испытаний ФС  $i=1, \dots, n$ .

8. Для каждого  $i$ -го испытания по ДСЧ выбирается СЧ  $\xi \in R[0; 1]$  и сравнивается с реализацией ВБР ФС  $p_{c\bar{v}}$ . При  $\xi \leq p_{c\bar{v}}$ , испытание признается успешным и число отказов  $m_s$  и  $m_j$  не изменяется. Если  $\xi > p_{c\bar{v}}$ , то фиксируется отказ ФС и число отказов  $m_s$  наращивается на единицу.

9. Если по п. 8 зафиксирован отказ ФС, то определяется вероятный элемент, из-за которого произошел отказ. Для этого для каждого  $j$ -х элемента по ДСЧ определяются СЧ  $\xi_j \in R[0; p_{jv}]$ , отражающие реализации ВБР элементов, и соответствующие вероятности отказов элементов  $B_j = 1 - \xi_j$ . Так как при отказе ФС отказ какого либо элемента обязательно должен произойти, то сумма вероятностей должна равняться 1. Для этого вероятности  $B_j$  корректируются (нормируются) по формуле

$$B_{Kj} = B_j / \sum_{j=1}^N B_j, \quad j=1, \dots, N. \quad (21)$$

Если ФС отказала, то обязательно должен быть отказавший элемент. Определить его на стадии моделирования можно только случайным образом на основе вероятностей (21). Для этого по ДСЧ выбирается СЧ  $\xi_j \in R[0; 1]$ . Для рассматриваемого  $j$ -го элемента это значение сравнивается с соответствующей вероятностью  $B_{Kj}$ . Если  $\xi_j < B_{Kj}$ , то считается, что отказ ФС произошел из-за отказа  $j$ -го элемента и число соответствующих отказов  $m_j$  наращивается на 1. Иначе число  $m_j$  не изменяется.

10. Повторяются вычисления по пп. 6-9 и накапливаются объемы отказов ФС  $m_s$  и  $j$ -го элемента  $m_j$ .

11. По каждой  $v$ -й серии испытаний накапливаются возможные ВБР ФС  $p_{c\bar{v}}$  и  $j$ -го элемента  $p_{jv}$ , а также число зафиксированных отказов ФС  $m_s$  и элемента  $m_j$ .

12. Повторяются вычисления по пп. 3-11 и формируется массив результатов  $Q = \{p_{c\bar{v}}; p_{jv}; m_s; m_j\}$ .

13. Из массива  $Q$  выбираются возможные значения ВБР ФС  $p_{c\bar{v}}$  и элемента  $p_{jv}$ , при которых зафиксированы числа отказов  $m_s$  и  $m_j$ , совпадающие с предполагаемыми в п. 1 результатами ГИ – числами отказов ФС  $m_{c\bar{v}}$  и  $j$ -го элемента  $m_j$ . Формируется новый массив оценок ВБР  $V = \{p_{c\bar{v}}; p_{jv}\}$ . Элементы этого массива представляют возможные значения ВБР ФС и  $j$ -го элемента, то есть возможные оценки ВБР по результатам  $n$  испытаний, если при ГИ зафиксировано  $m_{c\bar{v}}$  случайных отказов ФС и  $m_j$  случайных отказов испытываемого элемента.

14. Для принятой модели ФС и ГИ на основе массива  $V$  строится гистограмма распределения возможных оценок ВБР ФС и  $j$ -го элемента в виде частот или плотности вероятности (ПВ)  $f(p)$  оценок ВБР  $p$ . Для этого можно использовать стандартные программы на ЭВМ, например, в системе вычислений MathCAD [1]. При достаточно большом числе  $S$  серий моделирования ГИ построенная гистограмма близка к истинному распределению оценок ВБР.

### 4.3. Оценивание ВБР ФС и элементов по результатам ГИ

На основе построенных по алгоритму п. 4.2 ПВ оценок ВБР ФС  $f(p_{c\bar{v}})$  и элемента  $f(p_j)$  (обозначим их в общем виде  $f(p)$ ) можно оценить ВБР ФС или элемента (обозначим ВБР в общем виде  $P$ ). Точечные оценки ВБР и их дисперсии определяются как первые моменты распределения:

$$\bar{P} = \int_0^1 p f(p) dp; \quad \sigma_{\bar{P}}^2 = \int_0^1 (p - \bar{P})^2 f(p) dp. \quad (22)$$

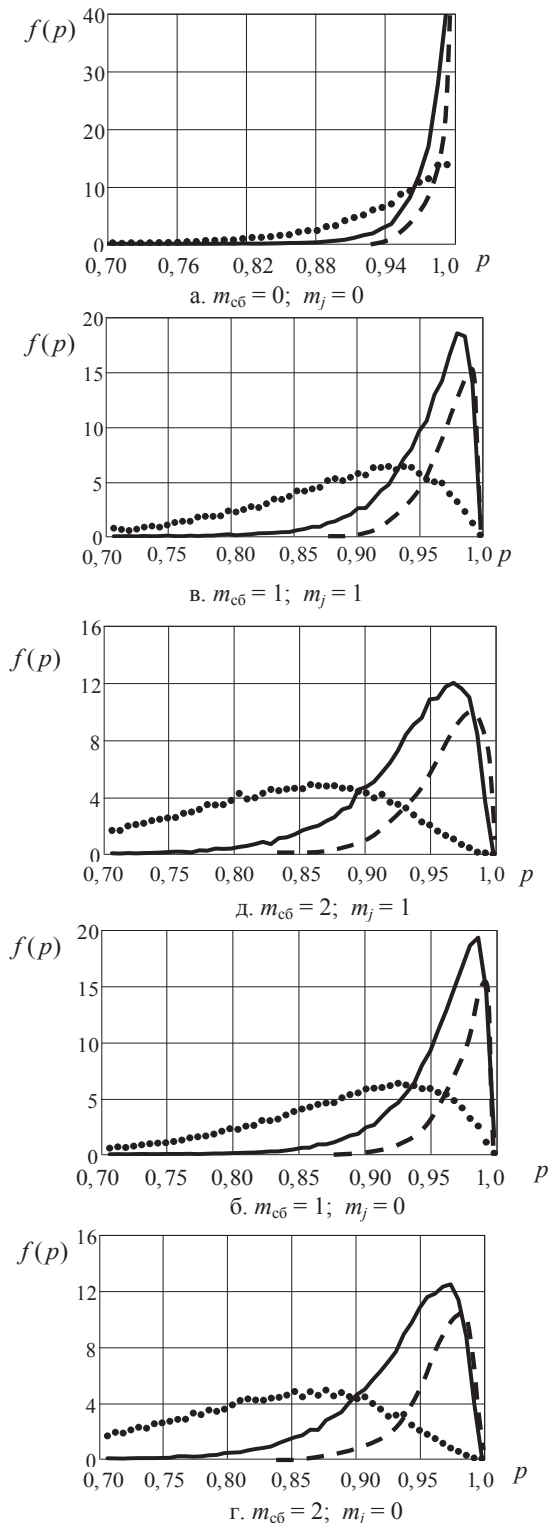
Нижние доверительные границы для ВБР при заданной доверительной вероятности  $\gamma$  определяются численным способом на основе равенства:

$$\int_{\bar{P}_H}^1 f(p) dp = \gamma. \quad (23)$$

### 5. Примеры оценивания ВБР ФС и элементов по результатам групповых испытаний на основе статистического моделирования

В соответствии с изложенным в п. 4.2 алгоритмом составлена программа вычислений на ПЭВМ в системе MathCAD [1]. Вычисления по программе были проведены на примере функциональной сборки с числом элементов  $N = 3$  или  $N = 5$ , для которой проведено  $n_{c\bar{v}} = 15$  испытаний. Возможная ВБР ФС варьировалась в пределах  $P_{c\bar{v}} \in [0,5; 1]$ . Показатели  $a_j$  моделировались в диапазоне  $a_j \in [0,05; 0,55]$  для  $N=3$  и  $a_j \in [0,05; 0,40]$  для  $N=5$ . Число серий испытаний принято равным  $S=10^5$ . Построенные плотности вероятности  $f(p)$  оценок  $p$  ВБР ФС и испыты-

ваемого  $j$ -го элемента при вариациях возможного числа случайных отказов приведены на рисунке. При этом для наглядного сравнения ПВ оценок ВБР элемента ФС при  $N=5$  уменьшена в 2 раза.



Плотности вероятности оценок ВБР ФС (точки) и элементов по АИ (точки) и по ГИ при  $N=3$  (сплошная) и  $N=5$  (пунктирная, ПВ уменьшена в 2 раза) при  $n_{сб}=15$  и некоторых вариантах числа случайных отказов  $m_{сб}$  ФС и  $m_j$  элементов

Из рис. 1 следует, что ПВ оценок ВБР ФС по результатам моделирования практически совпадает с ПВ бета-распределения и полностью соответствует ПВ, которая строится по МНО [2]:

$$f(p_{сб}) = (n+1)C_{n_{сб}}^{m_{сб}} p_{сб}^{n_{сб}-m_{сб}} (1-p_{сб})^{m_{сб}}, \quad (24)$$

где  $C_{n_{сб}}^{m_{сб}}$  – число сочетаний из  $n_{сб}$  по  $m_{сб}$ . Такая же ПВ получается и для оценок ВБР элементов по результатам АИ при  $n_j=n_{сб}$  и  $m_j=m_{сб}$ . Построенные ПВ оценок ВБР ФС, совпадающие с ПВ (24), подтверждают достоверность результатов статистического моделирования. При АИ элемента ПВ оценок ВБР совпадала бы с ПВ ФС при тех же объемах испытаний и числах случайных отказов. При ГИ ПВ оценок ВБР элемента  $f(p_j)$  имеют более компактный вид по сравнению с ПВ ВБР сборки и концентрируются ближе к предельной ВБР  $P=1$ . Это свидетельствует об эффективности ГИ по сравнению с АИ.

Оценки ВБР ФС и отдельного элемента, полученные на основе построенных ПВ оценок (см. рисунок) по зависимостям (22) и (23) при  $\gamma=0,90$ , приведены в табл. 4. Здесь же показано эквивалентное число испытаний элемента по зависимости (16).

Оценки ВБР ФС и их СКО в табл. 4 отличаются  
Таблица 4

**Оценки ВБР ФС и элемента, полученные при статистическом моделировании по результатам 15 ГИ при вариациях числа случайных отказов ФС и элемента при объеме ФС  $N=3$  (обычный шрифт) и  $N=5$  (жирный шрифт)**

$m_{сб}$	$\hat{P}_{сб}; \hat{P}_j$	$\sigma_{\hat{P}_{сб}}; \sigma_{\hat{P}_j}$	$m_j$	$\hat{P}_{jсб}$	$\sigma_{\hat{P}_{jсб}}$	$\sigma_{\hat{P}_{сб}}$	$n_{экв}$
0	0,937	0,055	0	0,975	0,022	0,942	38
				<b>0,986</b>	<b>0,014</b>	<b>0,967</b>	<b>69</b>
1	0,882	0,072	0	0,957	0,034	0,908	21
				<b>0,973</b>	<b>0,021</b>	<b>0,943</b>	<b>35</b>
			1	0,956	0,035	0,907	43
			<b>0,972</b>	<b>0,021</b>	<b>0,942</b>	<b>69</b>	
2	0,827	0,081	0	0,936	0,044	0,873	14
				<b>0,959</b>	<b>0,028</b>	<b>0,918</b>	<b>22</b>
			1	0,934	0,045	0,870	28
			<b>0,959</b>	<b>0,028</b>	<b>0,919</b>	<b>47</b>	

от оценок в табл. 3 из-за погрешностей статистического моделирования. На основе сравнения данных табл. 3 и табл. 4 видно, что оценки ВБР элемента по статистическому моделированию отличаются от оценок, полученных приближенно по методу п. 3. Поэтому для более точного оценивания ВБР элементов по результатам ГИ необходимо использовать статистическое моделирование по способу, изложенному в п. 4.

Из табл. 4 следует, что наибольший уровень оценок ВБР элемента достигается при безотказных испытаниях ФС. Чем больше случайных отказов ФС, тем ниже оценки ВБР элементов и хуже их точность. Поэтому ГИ выбранного элемента целесообразно проводить с отработанными

ми другими элементами в ФС, имеющими высокие ВБР. Оценки ВБР элемента и их точность повышаются с увеличением числа элементов в ФС. При этом повышается также эквивалентное число испытаний элемента, иногда в несколько раз по сравнению с числом испытаний ФС. Это подтверждает эффективность ГИ элементов в составе ФС.

### 6. Варианты возможных функциональных сборок для групповых испытаний основных элементов ракетной техники

На основе проведенных исследований показана целесообразность проведения ГИ элементов. В состав ФС необходимо включать как можно больше элементов, однако такие элементы должны быть функционально связаны, чтобы при испытаниях они функционировали совместно. При этом для повышения оценок ВБР испытываемого элемента в состав ФС целесообразно включать отработанные другие элементы с высокими ВБР. В качестве таких элементов могут использоваться как натурные элементы, так и физические модели, имитирующие реальные образцы элементов. Для АИ элементов баллистических ракет (БР) и ракет-носителей (РН) наиболее проблемными и затратными являются АИ двигательных установок, систем старта, систем разделения ступеней и отделения головной части (ГЧ) или КА, систем разведения боевых блоков (ББ) и построения боевого порядка (БП) ГЧ. Для наземных испытаний систем БР и РН в состав ФС могут входить:

- для системы старта: система старта, модель ДУ первой ступени, модель СУ ракеты;
- для ДУ первых ступеней: модель системы старта, ДУ, модель системы отделения 1-й ступени, модель СУ ракеты;
- для ДУ средних ступеней: модель системы отделения предыдущей ступени, ДУ, модель системы отделения обтекателя, модель системы отделения ступени, модель СУ ракеты;
- для ДУ последних ступеней: модель системы отделения предыдущей ступени, ДУ, модель системы отделения головной части или КА, модель СУ ракеты.
- для системы разведения ББ и построения БП ГЧ: ДУ, модели средств крепления и отделения ББ и элементов БП ГЧ, модель СУ ракеты.

Возможны и другие варианты состава ФС. В качестве моделей элементов могут использоваться различные физические имитаторы, которые создают нагрузки

и их динамику, соответствующие штатному функционированию ТС. При ГИ могут обрабатываться сразу несколько элементов, входящих в ФС, для чего ФС может составляться из реальных элементов ТС.

Создание стендов для ГИ элементов ТС одноразового использования в составе ФС связано с дополнительными затратами, однако значительное повышение эффективности испытаний элементов может компенсировать такие затраты.

### Выводы

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

Показано, что для подтверждения требуемой безотказности элементов технических систем (ТС) одноразового использования необходим большой объем автономных испытаний (АИ), который невозможно реализовать при ограниченных технико-экономических ресурсах (пп. 1 и 2).

Предложен способ повышения эффективности испытаний элементов ТС на основе групповых испытаний (ГИ) нескольких элементов в составе функциональных сборок (ФС) (п. 3). На основе приближенного метода показано, что при ГИ удастся существенно повысить оценки вероятности безотказной работы (ВБР) элементов ТС по сравнению с обычными АИ. Показано, что ГИ по числу «эквивалентных» испытаний в несколько раз эффективнее АИ элементов (п. 3).

Обоснован метод оценивания ВБР элементов ТС по результатам ГИ на основе статистического моделирования (п. 4). Показано, что метод позволяет построить плотность вероятности оценок ВБР элементов и на их основе определить как точечные, так и интервальные оценки ВБР элементов (п. 4). На примерах показано, что получаемые оценки ВБР элементов по результатам ГИ значительно выше и точнее по сравнению с АИ (п. 5).

Предложены варианты возможных составов ФС для ГИ основных систем баллистических ракет и ракет-носителей (п. 6).

Разработанный способ может использоваться при формировании программ обеспечения надежности ТС типа БР и РН для повышения эффективности испытаний элементов ТС одноразового применения на безотказность.

### Литература

1. Плис А. И., Сливина Н. А. МАТНКАД. Математический практикум для инженеров и экономистов. М., «Финансы и статистика», 2003.
2. Сухорученков Б. И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: Вузовская книга, 2010.

Материал поступил в редакцию 19. 06. 2014 г.